



OPTIMIZACIÓN BÁSICA DEL RODETE DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA DE 500 WATIOS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Jorge Armando Castillo Amézquita

Código; 20451322647

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Ingeniería Mecánica
Tunja, Colombia
2021

OPTIMIZACIÓN BÁSICA DEL RODETE DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA DE 500 WATIOS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Jorge Armando Castillo Amézquita

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:

PhD. Carlos Ramón Batista Rodríguez

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Ingeniería Mecánica
Tunja, Colombia
2021

Nota de aceptación

Este trabajo ha sido revisado y analizado encontrándose que reúne los requisitos de elaboración y presentación exigidos por la Universidad Antonio Nariño, por lo cual notificamos su aprobación.

Director: PhD. Carlos Ramón Batista Rodríguez

Jurado 1: Ing. Mercy Tatiana Villate Fonseca

Jurado 2: Ing. Omar F. Rojas Moreno

Tunja, Julio de 2021

Dedicatoria

Con el tiempo he aprendido a valorar a quienes realmente son mi apoyo y mi inspiración. A ti madre, que con esmero emprendiste la lucha por forjarme como un ser humano integro. A ti hija que eres el motivo de mi sonrisa y el impulso que da a mi vida todo sentido. A Dios porque él siempre está conmigo.

Jorge Armando Castillo Amézquita

Agradecimientos

A Dios que en su infinita misericordia me ha acompañado cada día de mi existencia y es conocedor de los sacrificios que he realizado para culminar este desafío. A mi familia, que ha sido apoyo incondicional y permanente en este trayecto académico. Agradecer a la Universidad Antonio Nariño Sede Tunja por facilitar el laboratorio donde se encuentra la bomba. Así mismo, a los ingenieros William Sanabria, Carlos Batista y Jorge Bareño, docentes de la Universidad y miembros del FIMEB, quienes hicieron grandes aportes para la realización de este proyecto y siempre estuvieron presentes en el desarrollo de éste.

Resumen

El objetivo general de este proyecto es evaluar la geometría del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios de la Universidad Antonio Nariño sede Tunja (UAN) mediante el uso de la herramienta CAD (Autodesk Inventor) con la simulación y el desarrollo de un análisis computacional de fluidos (CFD) con el fin de optimizar su desempeño, ya que se puede observar una caída en la cabeza de presión y una disminución del caudal que proporciona la bomba. Para la realización de este proyecto se tuvo en cuenta bibliografía especializada en el diseño paramétrico de bombas centrífugas y en análisis por elementos finitos aplicado a fluidos. Se realizaron cuatro diseños en Inventor variando los ángulos de velocidad (0° 10° 20° y 30°) de los álabes del rodete exportándolos a CFD para su respectiva simulación, y de esta forma poder evaluar y comparar su respectivo comportamiento frente al rodete original, obteniendo como resultados gráficos ilustrativos de contornos de eficiencia, presión, caudal, magnitud, verticidad y turbulencia. Los resultados experimentales del rendimiento de la bomba centrífuga muestran que la eficiencia media ponderada de la bomba por debajo de 0.8%, 1.0% y 0.9% aumenta 2,9% que el modelo original.

Con los resultados obtenidos en los diferentes experimentos se pudo verificar las características de la bomba centrífuga de 500 watios y del rodete, identificando las fallas, para de esta manera dar solución a los diferentes problemas que se presentan en el rodete actual, obteniendo los resultados esperados.

Palabras Clave: Bomba Centrífuga, Rodete, Álabes, Presión, Caudal, Fluidos, CFD, Inventor.

Abstract

The general objective of this project is to evaluate the geometry of the impeller of the 500-watt centrifugal pump of the Antonio Nariño University, Tunja headquarters (UAN) by using the CAD tool (Autodesk Inventur) with the simulation and development of a computational analysis. of fluids (CFD) in order to optimize its performance, since a drop in the pressure head and a decrease in the flow provided by the pump can be observed. For the realization of this project, bibliography specialized in the parametric design of centrifugal pumps and in finite element analysis applied to fluids was taken into account. Four designs were made in Inventur varying the speed angles (0° 10° 20° and 30°) of the impeller blades exporting them to CFD for their respective simulation, and in this way being able to evaluate and compare their respective behavior against the original impeller, obtaining as graphic results illustrative contours of efficiency, pressure, flow, magnitude, vorticity and turbulence. The experimental results of the energy efficiency of the centrifugal pump shows that the weighted average efficiency of the pump below 0.8%, 1.0% and 0.9% increases 2.9 percent points than the original model.

With the results obtained in the different experiments, it was possible to verify the characteristics of the 500-watt centrifugal pump and the impeller, identifying the faults, in order to solve the different problems that current arise in the impeller, obtaining the expected results.

Key Words: Centrifugal Pump, Impeller, Vanes, Pressure, Flow, Fluids, CFD, Inventur.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Introducción	1
1. Marco Teórico.....	4
1.1 Conocimientos previos de mecánica de fluidos	4
1.1.1 Presión estática	5
1.1.2 Fuerza centrífuga.....	5
1.1.3 Caudal	7
1.1.4 Vorticidad.....	8
1.1.5 RPM (Revoluciones por minuto)	11
1.1.6 Tipología de las bombas hidráulicas	12
1.1.7 Bombas centrífugas.....	13
1.1.8 Sellado de las bombas centrífugas	17
1.1.9 Elementos de las bombas centrífugas	18
1.1.10 Triángulos de Velocidades.....	26
1.1.11 Rendimiento de la bomba	27
1.1.12 NPSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD)	28
1.1.13 Software CAD 3D Autodesk Inventor	29
1.1.14 Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics) 29	
1.2 Estado del Arte.....	30
2. Desarrollo metodológico	36
2.1 Modelación de parámetros de flujo a través del rodete de la bomba mediante software CFD.....	36
2.1.1 Montaje de la bomba centrífuga de 500 vatios.....	36
2.1.2 Instalación de equipos para toma de mediciones.....	37
2.1.3 Medición del rendimiento obtenido del rodete	38
2.1.4 Desarme de la bomba centrífuga	40
2.2 Planos y diseños del rodete y carcaza	40
2.2.1 Diseños del rodete de la bomba centrífuga de 500 vatios con variación en los ángulos de los álabes a 10°,20° y 30° grados, mediante el software CFD.....	44

3. Capítulo 3: Resultados.....	49
3.1 Resultados con diferentes variables tomadas para realizar análisis del rodete con variación en los ángulos de los álabes.	49
3.2 Resultados obtenidos de la presión total mediante la simulación en CFD de los diferentes diseños de rodetes.	50
4. Conclusiones y recomendaciones.....	52
4.1 Conclusiones.....	52
4.2 Recomendaciones.....	53
Anexo A: Artículo: Mejora en el rendimiento de una bomba centrífuga.	54
Anexo B: Planos.....	55
Bibliografía	59

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Fuerza centrípeta (real) y fuerza centrífuga (falsa o ficticia).	6
Figura 2: Flujo volumétrico	8
Figura 3: Vorticidad planetaria	9
Figura 4: Estela de vorticidad (Sección de ala de avión en un flujo de aire inicialmente no perturbado).....	11
Figura 5: Toma de rpm de la bomba centrífuga para diferentes cálculos.....	12
Figura 6: Tipología de las bombas hidráulicas.....	12
Figura 7: Bomba centrífuga de 500 watos EVANS-EP1ME050	14
Figura 8: Componentes de una bomba centrífuga de 500 watos	15
Figura 9: Partes de la bomba centrífuga y su funcionamiento.	16
Figura 10: Vista seccional de una bomba con cierre por empaquetadura.....	17
Figura 11: Descripción de las partes del sello mecánico y su funcionamiento.	18
Figura 12: Funcionamiento del rodete y la voluta en el aporte de energía al fluido.	19
Figura 13: Tipos de impulsores	20
Figura 14: Rodete de bomba diagonal abierta y rodete bomba cerrado tipo Francis	21
Figura 15: Empuje axial en impulsor abierto con álabes posteriores	22
Figura 16: Empuje axial en impulsor cerrado.....	23
Figura 17: Descripción de las partes de un impulsor cerrado	24
Figura 18: Tipos de Difusor	25
Figura 19: Triángulo de velocidades de una bomba centrífuga.....	26
Figura 20: Triángulo de velocidades.....	27
Figura 21: Presiones por debajo del punto de saturación.	28
Figura 22: Malla computacional (a) y distribución de presiones (b) en álabes de rodete de una turbina Francis.....	31
Figura 23: Banco hidráulico laboratorio UAN.....	36
Figura 24: Instrumentos de medición utilizados en el proyecto para medir presión, rpm y caudal.	37
Figura 25: Resultados de parámetros de medición de bomba centrífuga a diferentes rpm.	38
Figura 26: Características y curva de rendimiento de bomba centrífuga EVANS-EP1ME050, modelo utilizado como referencia para el desarrollo de este proyecto.	39
Figura 27: Desarme bomba centrífuga 500 watos: extracción rodete y carcaza	40
Figura 28: Planos de la carcasa de la bomba centrífuga de 500 watos elaborados en el programa de diseño "Inventor".	41

Figura 29. Diseño en “Inventor” de la carcasa de bomba centrífuga de 500 watios.	41
Figura 30: Planos del rodete de la bomba centrífuga 500 watios elaborados en el programa de diseño “Inventor”	42
Figura 31: Diseño en “Inventor” del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios.....	42
Figura 32: Enmallado de los diseños, de la carcasa y rodete de la bomba centrífuga de 500 watios mediante el software CFD.	43
Figura 33: Enmallado de los diseños rodete y carcasa con variación en los ángulos de los alabes a 20° y 30° grados.	44
Figura 34: Análisis de contorno de presión para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los álbes a 0, 10, 20 y 30 grados.....	45
Figura 35: Análisis de contorno de velocidad para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los alabes a 0,10, 20 y 30 grados.	46
Figura 36: Análisis de vorticidad para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los alabes a 0,10, 20 y 30 grados.	47
Figura 37: Análisis de turbulencia para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los alabes a 0,10, 20 y 30 grados.	48

Introducción

En el laboratorio hidráulico de la Universidad Antonio Nariño Sede Tunja (UAN) se encuentra una bomba centrífuga de 500 watios; por lo cual es de interés para la institución evaluar el comportamiento de la misma, ya que se puede evidenciar una caída en la cabeza de presión y una disminución del caudal que proporciona la bomba.

Se considera entonces necesario realizar un análisis a la configuración geométrica del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios mediante el uso de CFD, que permita evaluar su perfil, y los vectores de velocidad a la entrada y salida del mismo, en espera de mejorar su desempeño y eficiencia.

Con este planteamiento se llega a la formulación de la siguiente pregunta problema: ¿Cómo aplicar la herramienta CAD y la simulación en CFD para evaluar la configuración geométrica del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios de la Universidad Antonio Nariño Sede Tunja y conseguir mejorar su desempeño?

En consecuencia, el objetivo general de la presente investigación es evaluar la geometría del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios de la Universidad Antonio Nariño – Sede Tunja (UAN) mediante el uso de la herramienta CAD y una simulación en CFD con el fin de optimizar su desempeño. Para este logro se plantean los siguientes objetivos específicos: 1) modelar parámetros de flujo a través del rodete de la bomba mediante software CFD, 2) proponer cambios en la configuración geométrica del rodete con el fin de optimizar su funcionamiento y 3) evaluar experimentalmente los resultados en la presión y caudal de la bomba centrífuga para el caso del rodete actual frente a la versión del rodete optimizado.

La realización del estudio se justifica ya que al modelar el diseño y la optimización del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios, se aplican los conocimientos obtenidos durante los semestres de formación de ingeniería mecánica, lo que involucra aplicar conocimientos adquiridos durante todo el proceso de aprendizaje en la universidad, como

mecánica de fluidos y diseño mecánico, apoyados con información de textos y artículos sobre bombas hidráulicas.

También a partir de la optimización básica del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios se busca mejorar la presión, el caudal de la bomba centrífuga, y disminuir las horas de trabajo de la bomba, obteniendo un buen desempeño de la misma, y disminuir costos en su mantenimiento.

Para realizar la modelación de parámetros de flujo a través del rodete de la bomba mediante software CFD, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Fase 1: Utilizando el banco que se encuentra en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Antonio Nariño–Sede Tunja, se determinaron las diferencias de presiones de la bomba centrífuga con el fin de evaluar la eficiencia de la bomba y en sus condiciones de funcionamiento de fábrica. No se determinaron curvas características sino únicamente se evaluó su eficiencia a un solo régimen de caudal.

Fase 2: Desarmar la bomba extrayendo su rodete y realizar el levantamiento del plano de carcaza y rodete, de allí se modelará en el programa profesional **Inventor de Autodesk** para posteriormente exportarlo al programa **CFD Motion de Autodesk**.

Para el desarrollo del segundo objetivo específico se procedió así:

Fase 3: A partir de las condiciones de flujo medidas experimentalmente en la bomba se establecieron los parámetros característicos, condiciones de frontera y condiciones iniciales para realizar la simulación en el programa CFD Motion. Con ello se verificó la velocidad del fluido, presión estática, vorticidad, entre otros que permitan visualizar el comportamiento dinámico del fluido a través del rodete.

Fase 4: Con los resultados obtenidos en el procedimiento anterior se modeló los triángulos de velocidad con el fin de mejorar las características visualizadas en el programa y lograr obtener un rodete con mejores resultados.

Para evaluar la eficiencia, solamente se tuvo en cuenta las modificaciones hechas al rodete. Igual que lo establecido en el primer objetivo, no se determinaron curvas características.

Fase 5: Con el desarrollo de estos procedimientos, se podrá hacer la evaluación sobre la optimización mediante un programa CFD como alternativa para la mejora de bombas centrífugas de baja potencia a partir de la variación y de los parámetros hidrodinámicos del rodete de la bomba.

También se analizarán los resultados mediante la optimización del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios realizando cálculos experimentales en su estructura como son:

- Triángulos de velocidades.
- Utilización de la ecuación de Euler.
- Tomas de presiones antes y después.
- Tipos de paletas.
- Velocidad periférica del impulsor o velocidad tangencial.
- Velocidad absoluta del flujo.
- Velocidad relativa del impulsor.
- Ángulos que forman las dos velocidades.

Los alcances y limitaciones de este proyecto para el diseño y elaboración del prototipo se realizan con fines académicos experimentales, más no de tipo lucrativo. La optimización del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios se hizo con la bomba que se encuentra en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Antonio Nariño Sede Tunja. Las pruebas y el prototipo final se evaluaron solamente a nivel de sus correspondientes resultados en el laboratorio y solamente para una bomba centrífuga con las características anteriormente mencionadas

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto se clasifica como una investigación Experimental, ya que se realizó la optimización al rodete, al hacer sus debidas comparaciones con el rodete original de la bomba centrífuga de 500 watios. También se realizaron mediciones y pruebas al rodete original para tener un conocimiento de hasta dónde puede llegar a ser la modificación mediante este experimento. Con el desarrollo de los diferentes experimentos se pudo verificar las características de la bomba centrífuga de 500 watios y del rodete, identificando las fallas y de esta manera dar solución a los diferentes problemas que se presentan en el rodete, obteniendo los resultados esperados.

1. Marco Teórico

La construcción de un rodete tiene algunas características específicas propias asociadas a sus componentes y su estructura inherente, de acuerdo con la descripción dada desde el punto de vista de la calidad de la pieza. Para el presente trabajo se hace énfasis en los fundamentos y directrices de la mecánica de fluidos, teniendo en cuenta los siguientes fundamentos teóricos:

- Ecuación de energía
- Fluido, presión y caudal
- Triangulo de velocidades

1.1 Conocimientos previos de mecánica de fluidos

La Mecánica de Fluidos estudia las leyes del movimiento de los fluidos y sus procesos de interacción con los cuerpos sólidos. La Mecánica de Fluidos como hoy se conoce, es una mezcla de teoría y experimento que proviene por un lado de los trabajos iniciales de los ingenieros hidráulicos, de carácter fundamentalmente empírico, y por el otro del trabajo de básicamente matemáticos, que abordaban el problema desde un enfoque analítico. Al integrar en una única disciplina las experiencias de ambos colectivos, se evita la falta de generalidad derivada de un enfoque estrictamente empírico, válido únicamente para cada caso concreto, y al mismo tiempo permite que los desarrollos analíticos matemáticos aprovechen adecuadamente la información experimental y eviten basarse en simplificaciones artificiales alejadas de la realidad.

La característica fundamental de los fluidos es la denominada fluidez. Un fluido cambia de forma de manera continua cuando está sometido a un esfuerzo cortante, por muy pequeño que sea éste, es decir, un fluido no es capaz de soportar un esfuerzo cortante sin moverse

durante ningún intervalo de tiempo. Unos líquidos se moverán más lentamente que otros, pero ante un esfuerzo cortante se moverán siempre. (Agustín Martín Domingo 1997-2011).

1.1.1 Presión estática

La presión estática es la que tiene un fluido, independiente de la velocidad del mismo, y que se puede medir mediante la utilización de tubos piezométricos. La presión total que ejerce un fluido, bien sea gaseoso o líquido, se define como la suma de la presión estática y la presión dinámica. (Ec. 1)

$$P_o = P_s + P_d \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde;

P_o = Presión total en pascales

P_s = Presión estática en pascales

P_d = Presión dinámica en pascales

De esta manera, cualquier presión ejercida por un fluido, la cual no es ejercida por el movimiento o velocidad del fluido es llamada presión estática del fluido.

Para fluidos en reposo (estáticos) la presión dinámica es nula y la presión estática es igual a la presión total. Mientras que la presión dinámica actúa únicamente en la dirección del flujo, la presión estática actúa por igual en todas las direcciones y siempre en ángulo recto con todas las superficies que contengan al fluido.

1.1.2 Fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga es la fuerza que se produce hacia afuera de una masa cuando ésta rota o gira. Tomando en cuenta que la Tierra gira alrededor de un eje fijo, la dirección de la fuerza centrífuga siempre se aleja del eje, está opuesta a la dirección de la gravedad en el ecuador; y en los polos de la Tierra es cero. Es la fuerza necesaria hacia dentro que impide que la masa se mueva en línea recta, tiene el mismo tamaño que la fuerza centrífuga, con el signo opuesto. Es importante mencionar que la fuerza centrífuga es solo una fuerza aparente.

El calificativo de "centrífuga" significa que "huye del centro". En efecto, un observador no inercial situado sobre una plataforma giratoria siente que existe una «fuerza» que actúa sobre él, que le impide permanecer en reposo sobre la plataforma a menos que él mismo aplique otra fuerza dirigida hacia el eje de rotación. Así, aparentemente, la fuerza centrífuga tiende a alejar los objetos del eje de rotación. El término también se utiliza en la mecánica de Lagrange para describir ciertos términos, en la fuerza generalizada que dependen de la elección de las coordenadas generalizadas.

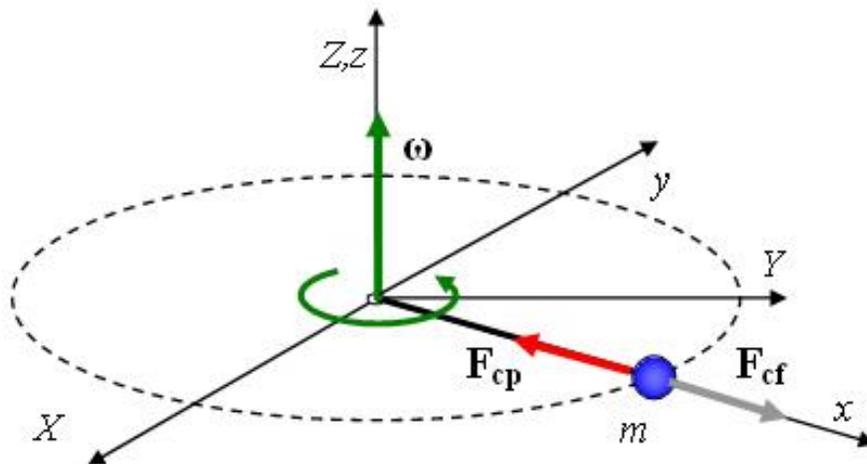
En la figura 1: se puede apreciar que en general la fuerza centrífuga asociada a una partícula de masa m en un sistema de referencia en rotación con una velocidad angular ω y en una posición r respecto del eje de rotación se expresa:

$$F_{cf} = -m\omega \times (\omega \times r) \quad (\text{Ec. 2})$$

Por lo tanto, el módulo de esta fuerza se expresa por:

$$F_{cf} = m\omega^2 r \quad (\text{Ec. 3})$$

Figura 1: Fuerza centrípeta (real) y fuerza centrífuga (falsa o ficticia).



Fuente: tomado de Stern, David P. NASA (2005).

1.1.3 Caudal

En dinámica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal...) por unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

Para calcular el caudal de agua (en m³/s) se multiplica la velocidad media del agua por la sección transversal media. Velocidad media del agua = 0,27 m/s; Sección transversal media = 1,8 m²; (ver Ec. 4)

$$\text{Caudal de agua} = 0,27 \text{ m/s} \times 1,8 \text{ m}^2 = 0,486 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (\text{Ec. 4})$$

▪ Caudal de aceleración

Una ventaja clave de las bombas centrífugas es la capacidad de «estrangular» sus caudales en un amplio rango. La estrangulación de las bombas centrífugas con una válvula de descarga no es tan eficiente en energía como el uso de un variador de frecuencia (VFD) para reducir la velocidad de la bomba / motor, pero es mucho menos costosa de instalar. Por supuesto, estrangular el caudal de una bomba centrífuga tiene ciertos límites.

Otro punto importante es que el funcionamiento de bombas centrífugas a velocidades de motor de 1750 RPM en vez de velocidades de motor de 3500 RPM reducirá el desgaste de sellos y rodamientos casi 4 veces y la bomba también tendrá menos posibilidades de cavitación cuando las condiciones de succión sean menos favorables. Sin embargo, las bombas centrífugas que funcionan a 1750 RPM requieren carcasas e impulsores mucho más grandes que las que funcionan a 3500 RPM y, por lo tanto, cuestan mucho más dinero.

▪ Unidades de medición de caudal

- Litros por segundo = L/s
- Litros por minuto = L/min
- Litros por hora = L/h
- Metros cúbicos por hora = M³/h

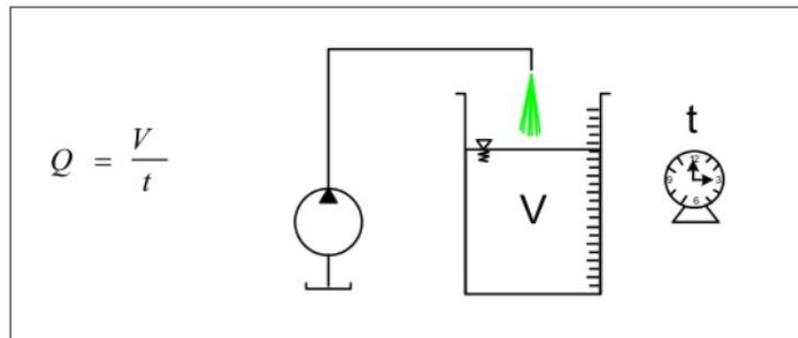
▪ Métodos para la medición de caudales

Entre los métodos más utilizados para medir caudales de agua se encuentran los siguientes:

- Método del Flotador
- Método volumétrico
- Método de la trayectoria
- Estructuras de medida

El flujo volumétrico es el volumen de fluido V que fluye por un punto en el tiempo t . (Fig. 2).

Figura 2: Flujo volumétrico



Fuente: TECSUP-PFR sistemas hidráulicos

Ej. Si queremos llenar un depósito cuyo volumen es de 20 litros en el tiempo de dos minutos, se necesita un caudal:

$$Q = V / t = 20L / 2\text{min} = 10 \text{ L/min} \quad (\text{Ec. 5})$$

Con este concepto es posible determinar el caudal que entrega una bomba con solo contar con un recipiente graduado y un reloj o cronómetro. Como aplicación práctica se puede determinar el caudal (L/min) que entrega el caño de una casa, con la ayuda de un balde con volumen conocido (comúnmente de 10 a 30 litros) y un reloj. (SlideShare, 2015)

1.1.4 Vorticidad

La vorticidad es una magnitud física empleada en mecánica de fluidos y en el mundo meteorológico para cuantificar la rotación de un fluido.

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \boldsymbol{\mathcal{V}} \quad (\text{Ec. 6})$$

La vorticidad se origina fundamentalmente en los contornos sólidos debido a que los fluidos no son capaces de deslizar sobre ellos, y luego se propaga al interior del fluido siguiendo la ley de variación descrita por la Ecuación 7.

$$\frac{Dw}{Dt} = w \cdot \nabla u + v \nabla^2 w \quad (\text{Ec. 7})$$

El primer término corresponde a la variación de vorticidad por deformación de las líneas vorticosas. Este fenómeno ocurre tanto en fluidos viscosos como no viscosos, sin embargo, es un hecho notable que cuando el fluido es no viscoso (ideal) esta es la única forma en que la vorticidad puede variar. Tal como lo demostró Kelvin en uno de sus teoremas, esta variación ocurre siempre que el flujo de vorticidad asociado a una superficie abierta que se mueve con el fluido permanece constante, lo cual también implica que la variación de la circulación Γ de la velocidad a lo largo del contorno de esa misma superficie sea nula:

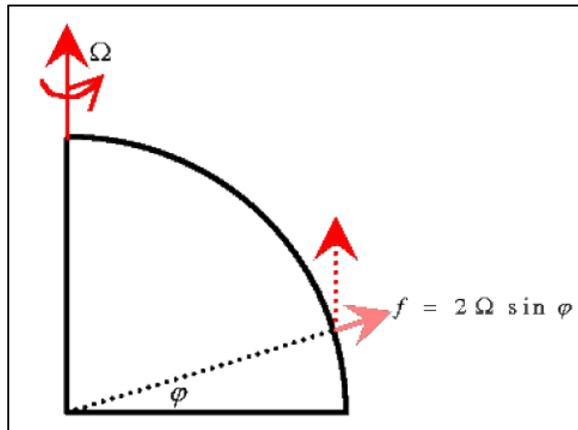
$$\frac{d\Gamma}{dt} = 0 \quad (\text{Ec. 8})$$

Al caracterizar la atmósfera se trabaja con un sistema de coordenadas que gira, entonces es necesario aclarar que la vorticidad relativa y la vorticidad planetaria sumadas, es la vorticidad absoluta.

En la Figura 3, tomando el cálculo de la circulación terrestre como $dC_e/dt = f dA/dt$, la componente vertical de la vorticidad planetaria es el parámetro de Coriolis f , y es igual a dos veces la razón de rotación local de la Tierra. (Ver Ecuación 9)

$$f = 2 \Omega \sin \varphi \quad (\text{Ec.9})$$

Figura 3: Vorticidad planetaria



Fuente: Tomado de Barreiro, Marcelo (s.f.).

En la Figura 4, se presenta una sección de ala de avión, que se mueve en un flujo de aire inicialmente no perturbado, el flujo es irrotacional en la mayor parte del campo. No obstante, aun con una viscosidad para el aire muy pequeña, la velocidad del fluido en contacto con la superficie es siempre cero, los fluidos se “pegan” a las superficies de los cuerpos sólidos por pulidos que estén.

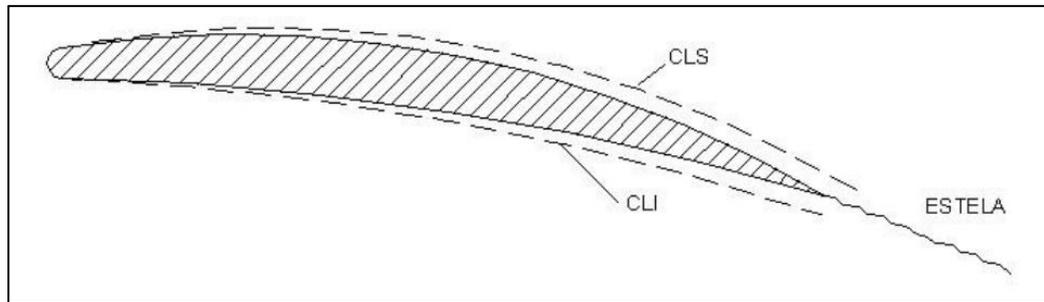
No obstante como las condiciones de corriente libre o próximas a ellas se obtienen a distancias pequeñas del cuerpo, se concluye que debe haber zonas de pequeño espesor próximas a la superficie, donde el gradiente de velocidad debe ser muy grande y por tanto lo serán las tensiones de corte en estas zonas de acuerdo a la ley de viscosidad del modelo de Newton, ya que las velocidades pasan de cero al valor elevado en la corriente libre en un pequeño espesor de capa del fluido que se denomina capa límite (c.l). Al haber tensiones de cortante manifiestas dentro de las denominadas “capas límite entre el cuerpo y el flujo totalmente desarrollado” o simplemente “capas límites”, está dada la condición necesaria para que las partículas del fluido estén sometidas a una distorsión importante y a la presencia de rotacionalidad dentro de estas zonas debido a los fenómenos descritos.

Los fenómenos de rotacionalidad se presentan también en las estelas. En un perfil de ala delgado (la sección recta en corte del ala de un avión o un ave) con un ángulo de incidencia pequeño (inferior a 5°) puede observarse una zona de discontinuidad entre las capas límite laminares superior e inferior en el borde trasero, donde el fluido se mueve con diferente velocidad.

Al sobrepasarse el vértice de salida o posterior, aparece allí una franja estrecha de discontinuidad entre la región superior e inferior de la C.L, esta discontinuidad da lugar a una zona separada que presenta regiones de rotación completa, llamada estela de vorticidad (Fig. 4). La estela rotacional persistiría por siempre si la viscosidad no la anulara, al igual, que la rotación de una bola de billar persistiría por siempre en ausencia de rozamiento.

Los espesores de la capa límite laminar se mantienen pequeños, digamos del orden unas décimas de milímetro hasta la región próxima al espesor máximo del perfil, (de allí y corriente abajo, se presenta una zona de gradiente negativo de presiones) y el gradiente de presiones comienza a aumentar.

Figura 4: Estela de vorticidad (Sección de ala de avión en un flujo de aire inicialmente no perturbado)



Fuente: tomado de Rosasco, Jorge (s.f.)

1.1.5 RPM (Revoluciones por minuto)

Una revolución por minuto es una unidad de frecuencia que se usa también para expresar velocidad angular. En este contexto, se indica el número de rotaciones completadas cada minuto por un cuerpo que gira alrededor.

A veces se utiliza el término régimen de giro para referirse a la velocidad de giro expresada en revoluciones por minuto y no confundirse con la velocidad angular expresada en radianes por segundo.

Las RPM, es el número de giros que el eje del motor desarrolla en cada minuto. En los motores de corriente alterna la rotación del eje está sincronizada con la frecuencia de la corriente de alimentación (Hz), dando el número de pares de polos del motor.

Las bombas centrífugas son el tipo de bomba principal en la clase de bombas llamadas bombas «cinéticas» y son claramente diferentes a las bombas de desplazamiento positivo. Todas las bombas centrífugas incluyen un impulsor o rodete accionado por un eje que gira (generalmente a 1750 o 3500 RPM) dentro de una carcasa. El líquido fluye hacia el área de succión (entrada) de la carcasa y se lanza hacia el exterior de la carcasa y luego sale del punto de descarga. La velocidad impartida al líquido por el impulsor se convierte en energía de presión o «cabeza». (Figura 5)

Figura 5: Toma de rpm de la bomba centrífuga para diferentes cálculos

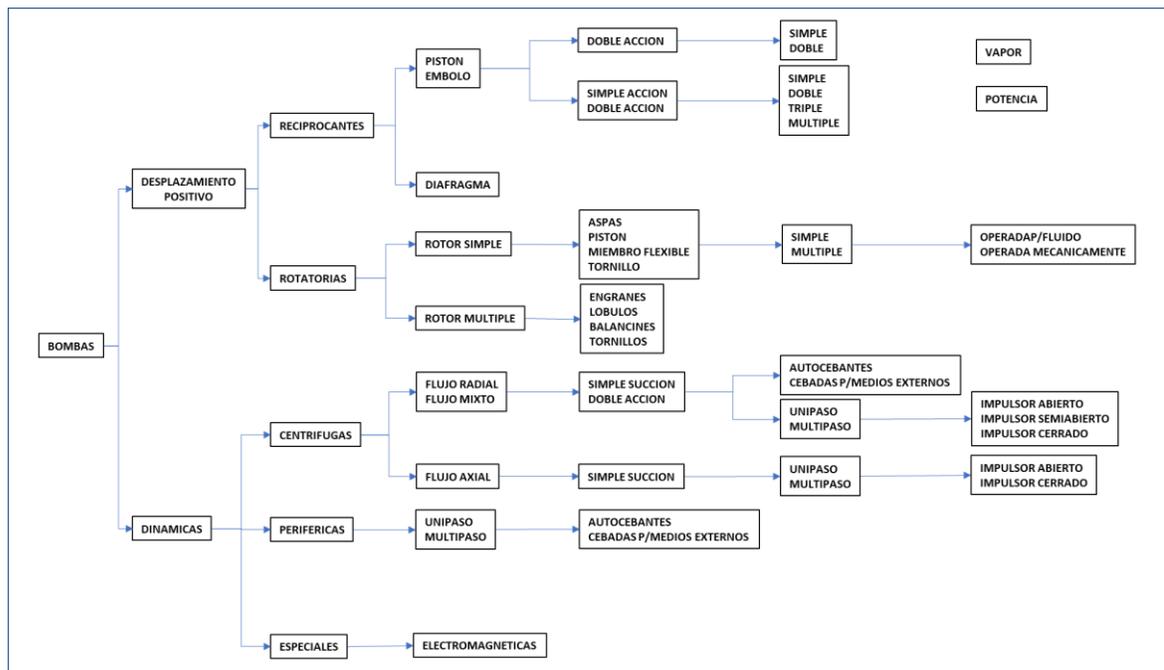


Fuente: Autor, 2020

1.1.6 Tipología de las bombas hidráulicas

Las bombas hidráulicas pueden clasificarse de acuerdo a su desplazamiento y rotación, al interior de la bomba, el fluido transportado. La Figura 6 muestra tales categorías:

Figura 6: Tipología de las bombas hidráulicas



Fuente: Autor, 2020

En la Tabla 1 se comparan las características más importantes de las bombas hidráulicas.

Tabla1: Características de las bombas hidráulicas

PARÁMETRO	BOMBAS VOLUMÉTRICAS	BOMBAS DINÁMICAS
Altura de elevación	Media y alta	Baja y media
Capacidad (gasto)	Poco	Medio y grande
Autosucción	Buena	Falta (con excepción de bombas especiales de autosucción)
Velocidad (giros)	Baja	Media y alta
Peso de máquina por capacidad	Grande	Pequeño
Capacidad para transportar líquidos con partículas sólidas	Limitada	Buena
Costos de mantenimiento	Altos	Bajos
Ruido producido	Mayor	Menor
Costo de máquina por unidad de potencia	Alto	Bajo
Tiempo de trabajo sin mantenimiento	Corto	Largo

Fuente: tomado de Yepes (2016)

1.1.7 Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas son turbo máquinas encargadas de succionar un fluido por medio de un rodete de diferentes tipos de álabes, que pueden ser abiertos, semiabiertos o cerrados, y que recibe potencia de un motor, a través de su eje horizontal.

Cuando un fluido se desplaza desde donde hay mayor presión hasta donde hay menor presión, no se genera gasto energético; pero al necesitar el movimiento inverso, se requiere el uso de una bomba que transmita al fluido, energía como presión y/o potencia. Para ejercer esta actividad, la bomba se apoya en un motor que le genera la energía que necesita.

Este tipo de bombas transforman el movimiento de rotación de un motor, en energía cinética y de presión, que se ve reflejado en el caudal que arroja. Estas bombas centrífugas de baja potencia son muy comerciales y se encuentran en diferentes presentaciones, pero en general, todas poseen el mismo principio de operación y, por ende, sus partes son muy comunes entre sí (Figura 7).

Figura 7: Bomba centrífuga de 500 watos EVANS-EP1ME050



Fuente: Cortesía Evans Colombia

▪ **Principio fundamental de la bomba centrífuga**

La transferencia de energía, en la bomba centrífuga, se realiza hidrodinámicamente, frente a la transferencia de energía hidrostática en la bomba de desplazamiento positivo. En la transferencia de energía hidrodinámica, el fluido es acelerado por el rodete de la bomba centrífuga. Por esta razón, el rodete de la bomba centrífuga se tiene que mover con una velocidad mayor y, por tanto, con un número de revoluciones superior. El trabajo Y_i , transmitido al fluido, se calcula a partir de las velocidades en el rodete.

$$Y_i = (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1) \quad (\text{Ec. 10})$$

El trabajo específico Y_i es independiente de las propiedades del fluido (densidad, viscosidad). Junto con el caudal Q y la densidad ρ del fluido, se obtiene la potencia P_i transmitida del rodete al fluido.

$$P_i = \rho \cdot Q(c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1) \quad (\text{Ec. 11})$$

▪ **Partes de una bomba centrífuga**

Carcasa: Es la parte exterior protectora de la bomba y cumple la función de convertir la energía de velocidad impartida al líquido por el impulsor en energía de presión. Esto se lleva a cabo mediante reducción de la velocidad por un aumento gradual del área.

Impulsores: Es el elemento principal de la bomba centrífuga. Recibe el líquido y le transmite una velocidad de la cual depende la carga producida por la bomba.

Anillos de desgaste: Son elementos fáciles y baratos de remover en aquellas partes en donde debido a las cerradas holguras entre el impulsor y la carcasa, el desgaste es casi seguro, evitando así la necesidad de cambiar estos elementos y quitar solo los anillos.

Estoperas, empaques y sellos: La función de estos elementos es evitar las fugas del líquido bombeado hacia exterior a través del orificio por donde pasa el eje de la bomba y el flujo de aire hacia el interior de la bomba.

Flecha: Es el eje de todos los elementos que giran en la bomba centrífuga, transmitiendo el movimiento que imparte la flecha del motor y a su vez manteniendo la alineación de la bomba.

Cojinetes: Soporte de la flecha de todo el rotor en un alineamiento correcto en relación con las partes estacionarias. Soportan las cargas radiales y axiales existentes en la bomba.

Bases: Sirven de soporte a la bomba, sosteniendo el peso de toda ella. (SlideShare, 2015)

Figura 8: Componentes de una bomba centrífuga de 500 watos



Fuente: Tomado de Bombas Igoto

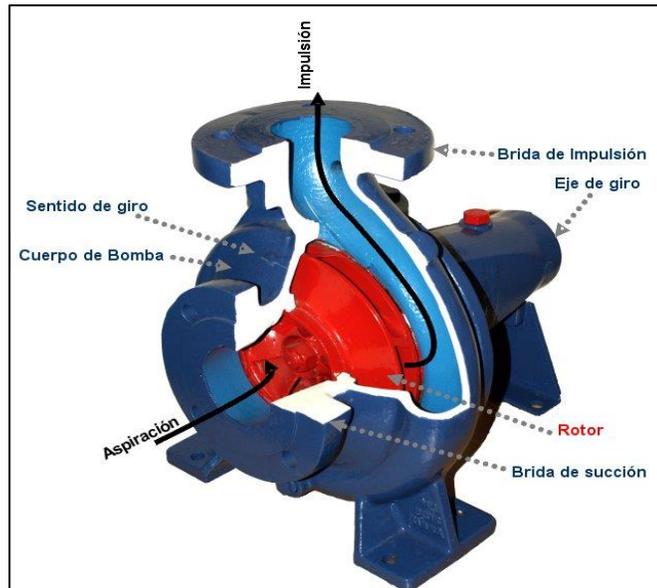
▪ **Funcionamiento**

Inicialmente, se encuentra el impulsor que está unido a un eje, el eje gira y es alimentado por el motor. El fluido entra en el ojo del rodete y es atrapado entre los álabes, estos tienen cuchillas para contener el líquido y distribuyen velocidad a medida que esta pasa desde el centro del impulsor hacia el exterior, presentando un aumento en su velocidad. Como el

fluido se acelera, se genera una zona de baja presión en el ojo del impulsor (el Principio de Bernoulli, como la velocidad aumenta, la presión disminuye). Por lo anterior, el líquido debe entrar en la bomba con la energía suficiente.

Luego, el líquido sale del diámetro exterior del impulsor a una alta velocidad (la velocidad del motor) e inmediatamente se cierra, en la pared interior de la carcasa de la voluta. La velocidad centrífuga del líquido llega a un punto alto y la velocidad se convierte en presión (el Principio de Bernoulli a la inversa). De la bomba sale el líquido a la presión de descarga, dispuesto a superar la resistencia en el sistema; el recorrido que realiza el fluido en la bomba, se puede observar en la figura 9.

Figura 9: Partes de la bomba centrífuga y su funcionamiento.



Fuente: (Fluideco: Dosificación · Sampling · Ingeniería · Control (2019))

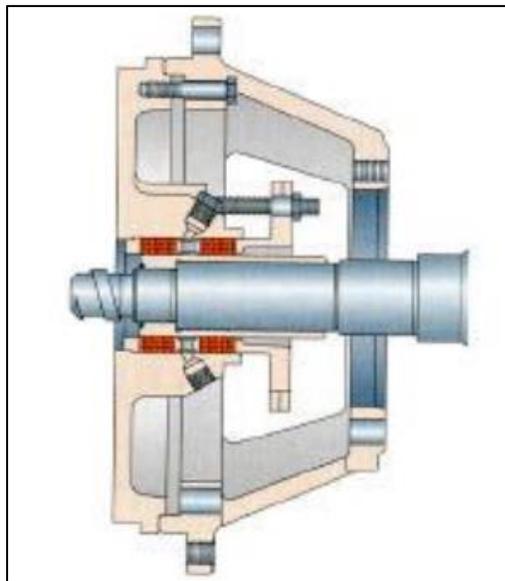
La velocidad del eje y la altura de los álabes del impulsor rigen el flujo de una bomba centrífuga. La velocidad del motor y el diámetro del impulsor enmarcan la presión o la cabeza que la bomba puede generar. El flujo y la presión de la bomba pueden variar por el número de los álabes del rodete, su diámetro y ángulo.

1.1.8 Sellado de las bombas centrífugas

Existen dos opciones para el correcto funcionamiento del sellado de la bomba centrífuga:

1- Prensa Estopa: Consta de unas tirillas de material prensado, el cual se ajusta al eje evitando fugas exageradas del fluido que se esté manejando (ver Fig. 10); por otra parte, la pequeña fuga que se presenta, es aprovechada como refrigerante, que evita el exceso de calor, el cual podría ocasionar el daño de los prensaestopas por efectos de temperatura.

Figura 10: Vista seccional de una bomba con cierre por empaquetadura.

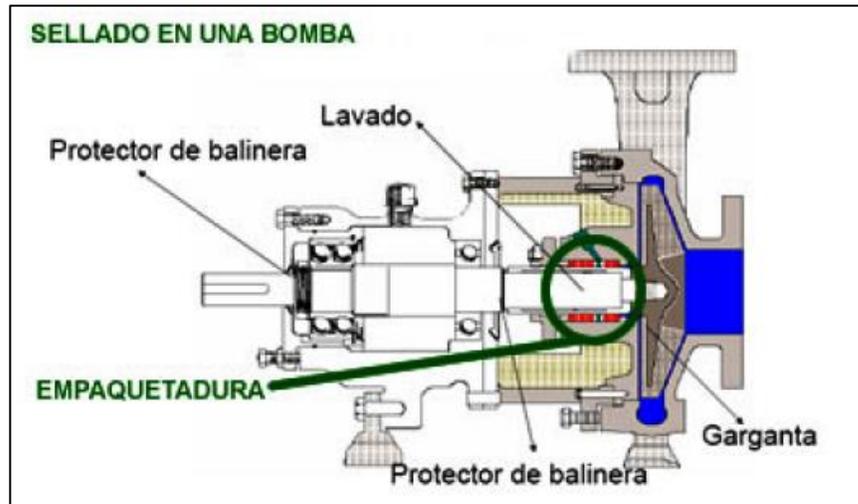


Fuente: (Mendieta de Jesús, Misael (s.f.)

En la figura se observa el funcionamiento de la prensa estopa (color rojo) alrededor del eje.

2- Sello Mecánico: Este sello está compuesto por dos partes, una fija a la carcasa de la bomba y otra en rotación con un resorte, esta última es el mecanismo que ajusta las dos caras del sello que se deslizan entre sí, logrando en el eje un sellado hermético del fluido. (Figura 11)

Figura 11: Descripción de las partes del sello mecánico y su funcionamiento.



Fuente: tomado de Curso de selección de bombas centrífugas/Pumpsbomas

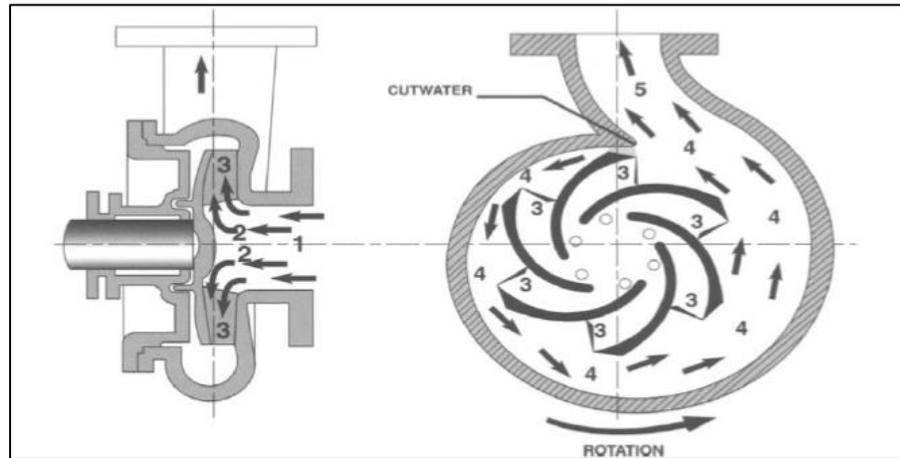
1.1.9 Elementos de las bombas centrífugas

La carcasa y el rodete son dos elementos principales que influyen en el óptimo funcionamiento de las bombas centrífugas.

- **Carcasa**

Orienta el fluido con la energía entregada por el rodete hacia la red de tuberías diseñadas para la aplicación específica, la carcasa cuenta con una sección que aumenta gradualmente hasta encontrar la salida de la bomba; el objetivo de este cambio de área es generar una variación de energía cinética a energía de presión, reduciendo así las pérdidas por fricción.

El funcionamiento de la bomba se puede observar en la (Fig.12) el líquido entra en la boquilla de succión en el punto 1 y se dirige hacia el centro del rodete en el punto 2. El fluido es acelerado por los álabes del impulsor a una gran velocidad en el punto 3. A medida que el líquido sale del impulsor, la velocidad aumenta a la salida de los álabes del rodete, por lo que la velocidad centrífuga es mayor. En el punto 4, la carcasa tiene forma espiral cada vez mayor. Cuando el líquido se desplaza a alta velocidad en medio de las paredes del rodete hacia la carcasa en espiral abierta, con un área cada vez mayor, se transforma la energía aumentando la velocidad del líquido y la presión. Con la acumulación de fluido a alta presión en los puntos 4, la sección final de la carcasa dirige el fluido a la descarga de la boquilla en el punto 5 (Figura12).

Figura 12: Funcionamiento del rodete y la voluta en el aporte de energía al fluido.

Fuente: Mendieta de Jesús, Misael (s.f.)

La voluta es también un transformador de energía, ya que disminuye la velocidad (transforma parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión), aumentando la presión del líquido a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta. (Gunt Hamburg, s.f.)

▪ Rodete

El rodete consiste en un disco perpendicular al eje de giro, compuesto por álabes curvados en dirección contraria al movimiento. Según los esfuerzos que deba soportar y la agresividad del medio que deba impulsar, el rodete puede estar fabricado en bronce o aleaciones metálicas, como por ejemplo acero o aluminio, o de algún polímero, como por ejemplo poliamida. El fluido entra por el centro del rodete y es arrastrado por los álabes en dirección radial, saliendo a la carcasa y de ahí, hacia las tubuladuras de salida en las bombas mono etapa, o es recogido por el siguiente rodete en las bombas multietapa, que están conformadas por varios rodetes colocados en serie. La geometría del rodete y de los álabes es de gran importancia para conseguir una mejor eficiencia en la bomba.

El Impulsor está diseñado por un conjunto de álabes de diferentes formas que giran en el interior de una carcasa. El rodete va acoplado al eje y son las partes móviles de la bomba. Cuando el fluido ingresa axialmente por la tubería de aspiración hasta el centro del rodete, es movido por un motor eléctrico, generando un cambio de dirección en el líquido más o menos brusco, pasando a carga radial, (en las bombas centrífugas), o permaneciendo en carga axial, (en las bombas axiales), absorbiendo un trabajo y obteniendo una aceleración.

Los álabes del rodete direccionan a las partículas del fluido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, de forma que se alejan del rodete hacia la carcasa a gran velocidad, aumentando la presión en el rodete según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación; en la carcasa se transforma parte de la energía dinámica adquirida en el rodete, en energía de presión, siendo lanzados los líquidos contra las paredes del cuerpo de la bomba y evacuados por la tubería de impulsión.

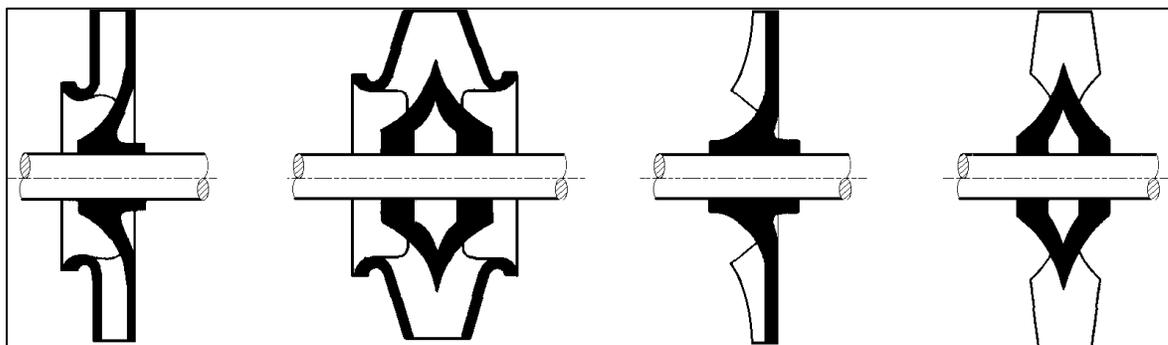
▪ Tipos de rodetes

Los rodetes también conocidos como impulsores determinan la eficiencia de las bombas centrífugas. De acuerdo a su diseño mecánico o estructural, se pueden distinguir tres tipos de impulsores:

- a) De álabes aislados (abiertos)
- b) Con una pared o disco lateral de apoyo (semiabiertos)
- c) Con ambas paredes laterales (cerrados).

El diseño hidráulico también determina tipos de rodetes, bajo lo cual, puede haber impulsores centrífugos y de flujo mixto, abiertos, semiabiertos o cerrados. (Fernández, s.f.)

Figura 13: Tipos de impulsores



Cerrado

De doble aspiración

Semiabierto

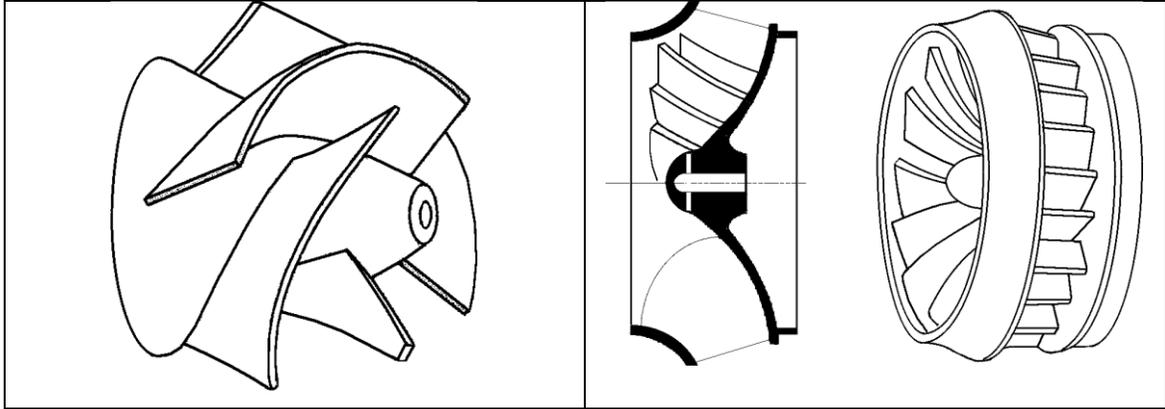
Abierto

Fuente: Tomado de Fernández (s.f.)

Los impulsores axiales se emplean para mover altas cantidades de fluido; por su estructura, sólo pueden ser semiabiertos o cerrados, pues sus álabes están como

apoyados lateralmente en el eje de rotación, que hace las veces de cubo del impulsor, como si fuese la pared posterior de los radiales y diagonales.

Figura 14: Rodete de bomba diagonal abierta y rodete bomba cerrado tipo Francis



Fuente: Tomado de Fernández (s.f.)

Impulsores Abiertos. En un impulsor abierto, los álabes se encuentran unidos sólo al eje de giro y se mueven entre dos paredes laterales fijas que pertenecen a la carcasa de la bomba, que cuentan con tolerancias laterales muy estrechas para evitar escapes.

Los impulsores abiertos son de estructura débil, se utilizan para sólidos en suspensión o fluidos abrasivos y están más expuestos al deterioro. Los impulsores abiertos se utilizan en algunas bombas radiales pequeñas y para el bombeo de líquidos abrasivos.

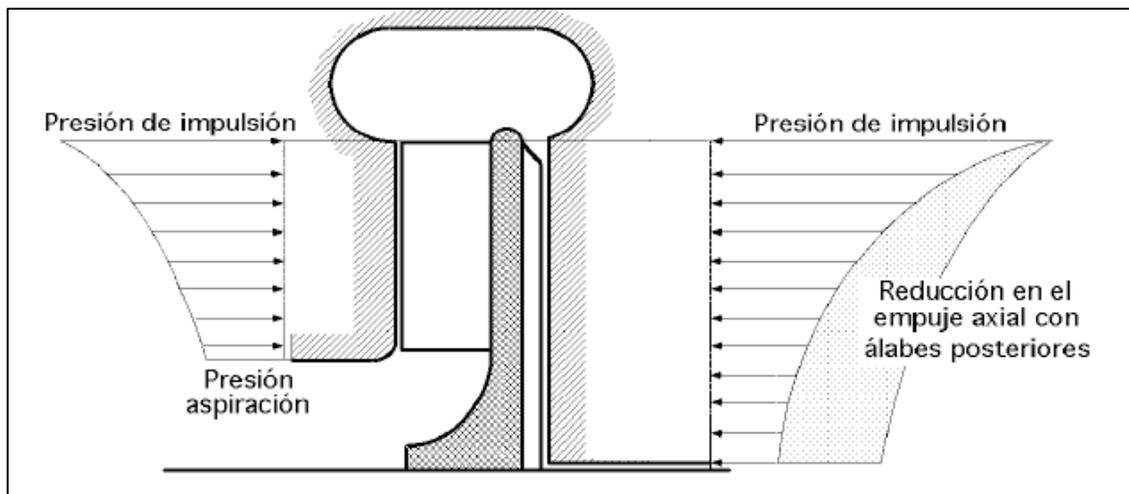
Impulsores Semiabiertos. Estos impulsores con una sola pared lateral, que siempre es la posterior, se emplean en bombas de flujo mixto y todas las bombas axiales. Su rendimiento está sustentado en una tolerancia lateral estrecha, que impide fugas del derredor al centro y en los canales del rodete entre sí. Cuanto menos viscoso es el líquido, las fugas son tanto mayores. El caudal y la altura pueden aumentar con líquidos algo viscosos, a pesar de las mayores pérdidas por rozamiento, lo que les hace más apropiados que los abiertos para trabajar con líquidos a altas temperaturas.

Suele presentarse desgaste del impulsor, el cual es proporcional a la velocidad relativa del fluido y radialmente no es uniforme, sino algo mayor en la periferia. Se debe cambiar el rodete, cuando el juego lateral se hace grande por el desgaste. Cuando se trabaja con fluidos abrasivos, en algunas ocasiones, se instalan placas laterales de desgaste de intercambio fácil, fabricadas, por ejemplo, en acero inoxidable que tiene mayor dureza, y cuyo costo es bajo, pues la carcasa de la bomba es resultado de fundición.

Se puede presentar una posible desviación del eje a causa de la escasa tolerancia lateral del rodete y generar graves consecuencias, asimismo, que las dilataciones o contracciones anormales, que en esta situación tienen mucha mayor importancia que en los impulsores cerrados.

Los rodetes abiertos logran un empuje axial mayor que los cerrados, pues la parte anterior está afectada por una presión media menor; para disminuir este defecto se les provee de álabes posteriores (Fig. 15), que disminuyen, de forma efectiva, la presión media en la cara posterior. De igual forma, evitan que el fluido quede estacionado cerca del eje y empaquetaduras, pues si el líquido es abrasivo podría perjudicar el material de las piezas.

Figura 15: Empuje axial en impulsor abierto con álabes posteriores



Fuente: (Fernández, s.f.)

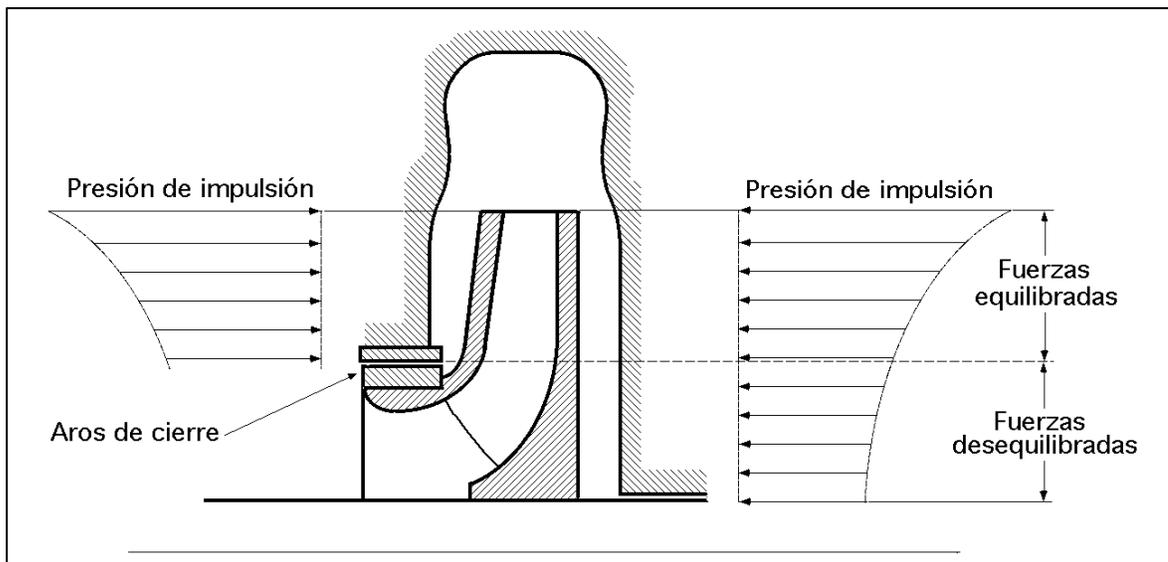
Frente a los impulsores cerrados, los rodetes abiertos tienen las siguientes ventajas:

- Es adecuado para fluidos sucios dada su menor tendencia a obstruirse.
- El disco sufre menor roce hidráulico, al tener sólo una pared girando, por lo cual hay un buen rendimiento
- Se logran mejores acabados al contar con accesibilidad de los álabes para el mecanizado.
- Su construcción es fácil y los modelos más sencillos, permitiendo utilizar gran variedad de materiales con un costo menor de producción.

Actualmente, se fabrican rodetes de aspiración simple, pues los impulsores abiertos y de doble aspiración dificultan su ajuste.

Impulsores Cerrados. Los impulsores cerrados presentan los álabes dispuestos entre dos paredes laterales, anterior o de aspiración y posterior, (Fig. 16). Son utilizados en bombas centrífugas de altas eficiencias y para manejo de fluidos transparentes. Los rodetes cerrados tienen un diseño más complejo y costoso, no solo por el impulsor, dado que necesitan anillos de desgaste adicionales.

Figura 16: Empuje axial en impulsor cerrado



Fuente: (Fernández, s.f.)

Al presentarse desgaste de los aros de cierre, tiene como ventaja su facilidad de cambio, recobrando la tolerancia inicial, evitando así pérdidas mayores.

El desgaste se puede aminorar utilizando materiales especiales con mayor tolerancia a las condiciones de funcionamiento y servicio que afrontan.

En ocasiones, en lugar de estos aros dobles se instala sólo un aro montado en la carcasa, de forma que la superficie rozante móvil pertenece al propio rodete; en estos casos, en el impulsor se deja material suficiente para poder rectificar su superficie desgastada, si procede, cambiando el aro de la carcasa por uno nuevo de diámetro ligeramente diferente, de forma que deje el juego conveniente con el impulsor.

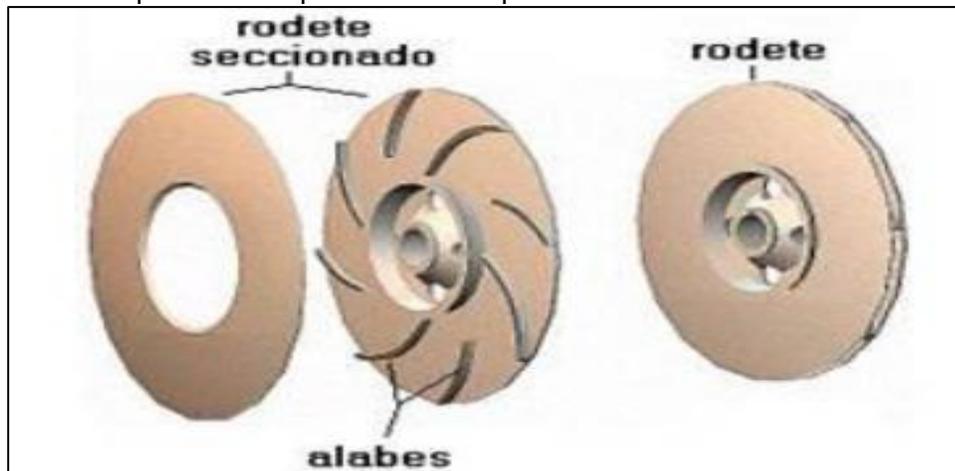
Existen impulsores de doble aspiración que llevan aros de cierre en los dos oídos; entre sus ventajas se encuentran la ausencia de empuje axial, una menor NPSHr y una mayor capacidad de aspiración. Se pueden considerar como dos impulsores de aspiración simple, opuestos y en paralelo.

De igual manera hay impulsores de simple aspiración, cuando están equipados en la parte posterior de una cámara de equilibrado del empuje hidráulico axial en comunicación con la aspiración a través de los agujeros de equilibrio, sólo tienen aros a ambos lados, lo que implica una desventaja para el equilibrado que, hidráulicamente, es bastante eficaz.

Los impulsores cerrados pueden resistir mucho mejor cualquier flexión del eje, o contracciones y dilataciones mayores de las previstas, por lo que son más adecuados para servicios de altas temperaturas. (Figura 17)

Tienen la desventaja de que sus canales son normalmente inaccesibles para cualquier tipo de mecanizado, lo que exige métodos constructivos especiales más difíciles que en los abiertos. Hidráulicamente, el rozamiento de disco al tener el impulsor dos paredes, es doble que, en los abiertos, pero las pérdidas volumétricas son menores. La posibilidad de obstrucción con líquidos sucios es mayor y para ello se diseñan impulsores especiales con oído de gran área, canales lo más amplios posibles, pequeño número de álabes, 2 o 3, y éstos con los bordes de entrada redondeados.

Figura 17: Descripción de las partes de un impulsor cerrado



Fuente: (Fernández, s.f.)

El rendimiento volumétrico u orgánico son pérdidas ocasionadas por el rozamiento del eje con los prensaestopas, los cojinetes o el fluido en las holguras entre el rodete y la

carcasa. Todo esto hace que la potencia que se necesita suministrar en el eje de la bomba sea mayor.

El rendimiento hidráulico o manométrico es la relación entre la energía entregada en el eje de la turbina y la hidráulica absorbida por el rodete. Suelen estar asociadas a pérdidas por rozamiento, y cambios de dirección.

- **Difusor**

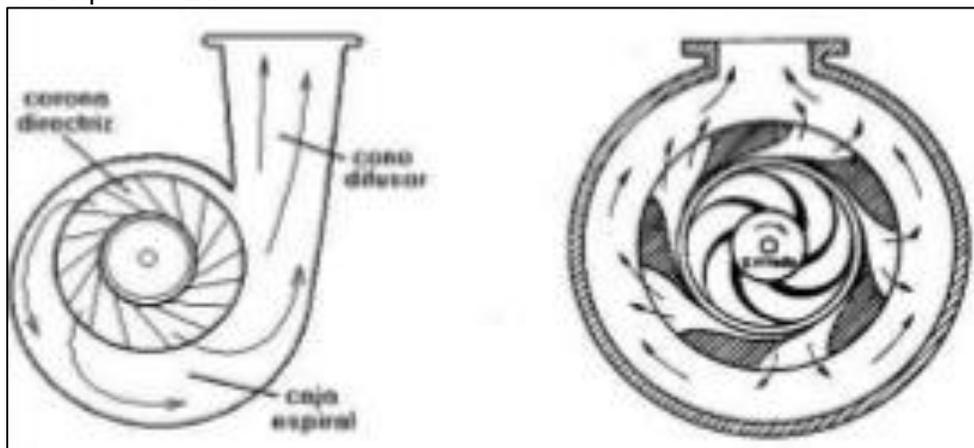
El difusor junto con el rodete, están encerrados en una cámara, llamada carcasa o cuerpo de bomba. El difusor está formado por unos álabes fijos divergentes, que, al incrementarse la sección de la carcasa, la velocidad del agua irá disminuyendo lo que contribuye a transformar la energía cinética en energía de presión, mejorando el rendimiento de la bomba. Según la forma y disposición, las bombas centrífugas son de 2 tipos:

De voluta: la **carcasa** tiene forma de caracol, rodeando el rodete de tal forma que el área de flujo de agua aumenta progresivamente hacia la tubería de descarga.

De turbina: la **carcasa** va provista de unos difusores fijos dispuestos de tal forma que el área de flujo se ensancha progresivamente hacia la salida.

Eje: El eje de la bomba es una pieza en forma de barra de sección circular no uniforme que se fija rígidamente sobre el impulsor y le transmite la fuerza del elemento motor, como se puede apreciar en la (Fig. 18). a) Difusor de voluta y b) difusor de turbina.

Figura 18: Tipos de Difusor



a) Difusor de voluta

b) Difusor de turbina

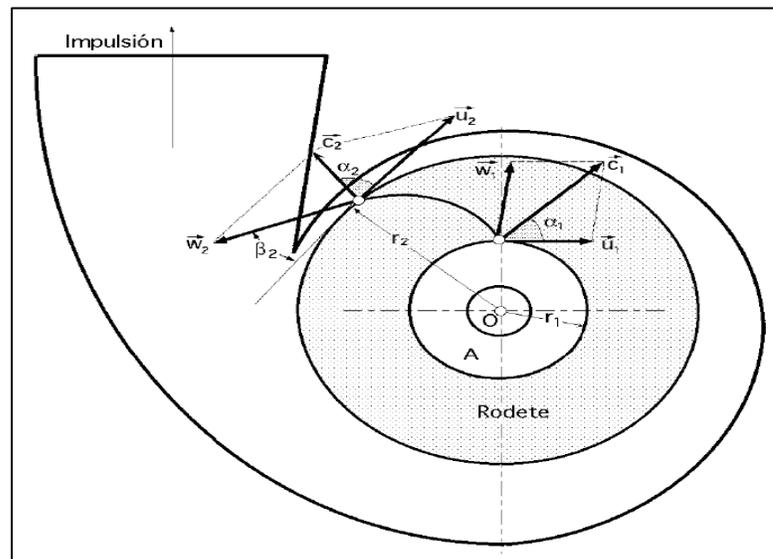
Fuente: (Fernández, s.f.)

1.1.10 Triángulos de Velocidades

El estudio matemático del comportamiento al interior del rodete se describe mediante los triángulos de velocidades, los cuales brindan los datos necesarios para calcular otras características del impulsor como pueden ser, ancho del rodete, ángulos de descarga, eficiencias, altura, potencia necesaria etc. (Herrera y Puerto, 2016)

En la (Fig. 18) se puede observar el rodete con los álabes dispuestos según una sección perpendicular al eje de la bomba; el líquido llega a la entrada del rodete en dirección normal al plano de la figura 19, (dirección axial), y cambia a dirección radial recorriendo el espacio o canal delimitado entre los álabes. El líquido queda sometido a una *velocidad relativa* w a su paso por el espacio entre álabes entre la entrada y la salida, y a una *velocidad de arrastre* u debida a la rotación del rodete alrededor del eje. La suma vectorial de estas velocidades proporciona la velocidad absoluta C . (Fernández Diez, sf.)

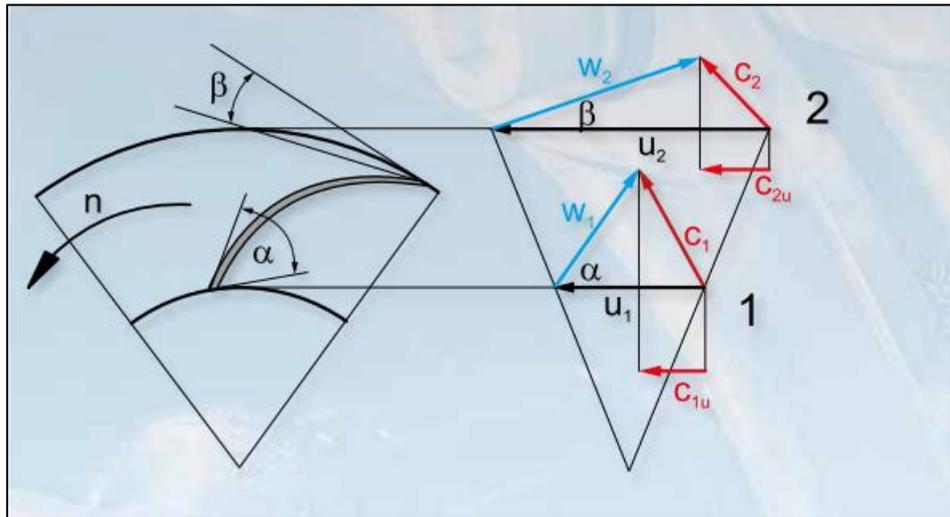
Figura 19: Triángulo de velocidades de una bomba centrífuga



Fuente: Fernández Diez (s.f.)

En otro ejemplo, en la Fig. 20 se observa que las velocidades en la entrada del rodete (1) y en la salida del rodete (2) se pueden representar visiblemente en triángulos de velocidades. 1 entrada del flujo, 2 salida del flujo, u velocidad circunferencial, w velocidad relativa del fluido en el rodete, c velocidad absoluta del fluido, c_1u / c_2u componente circunferencial de la velocidad absoluta α , β ángulo entre las velocidades, Q caudal volumétrico, (β) densidad, n número de revoluciones (Gunt Hamburg. (s.f.)

Figura 20: Triángulo de velocidades



Fuente: Gunt Hamburg (s.f.)

1.1.11 Rendimiento de la bomba

Se deben tener en cuenta los siguientes valores para el rendimiento de una bomba:

- El caudal (Q), se analiza como el flujo de volumen disponible en la salida de la bomba es decir en la descarga.
- El trabajo específico o la cabeza de la bomba (H).
- Potencia requerida por la bomba para cumplir con los requisitos del sistema.
- La eficiencia general y en especial la hidráulica generada por la bomba (Ec.12)
- La cabeza positiva necesaria de succión NPSH en la entrada de la bomba, o la succión positiva neta.
- Velocidad del rotor (n).

$$\eta_h = \frac{H_i - H_{perd}}{H_i} \quad (\text{Ec. 12})$$

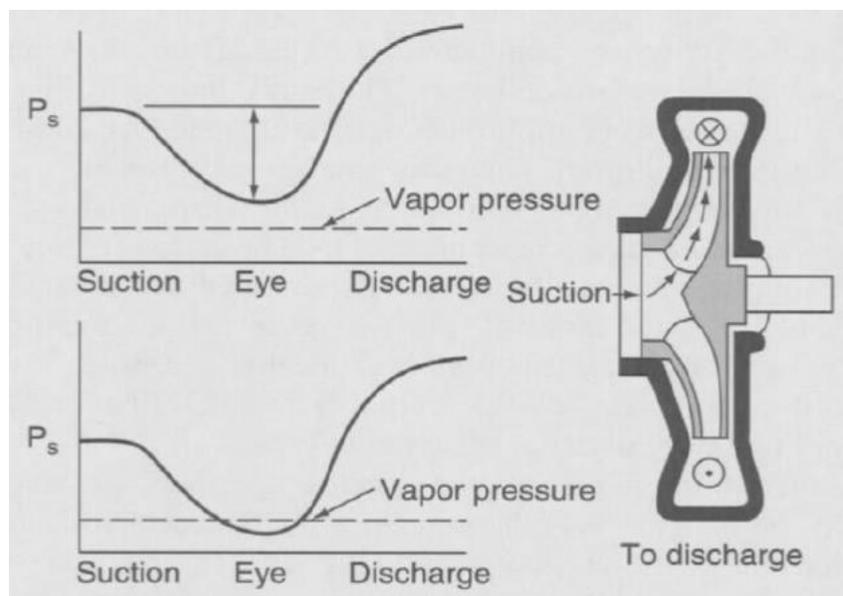
1.1.12 NPSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD)

Es un factor que busca evitar que el fluido disminuya su presión por debajo de la presión de vapor o de saturación. Este parámetro siempre se debe tener en cuenta en el análisis de cavitación en un sistema hidráulico, debido a que es un elemento que permite conocer la distancia de instalación o la altura de succión entre la bomba y el punto de aspiración del sistema; además disminuye el riesgo de presentar cavitación; la cual se presenta como burbujas de aire que chocan con la parte interna del rodete generando pérdidas hidráulicas y daños por erosión.

Otros factores que ayudan a la presencia de cavitación en el sistema es el taponamiento por objetos dentro de la tubería de succión o la apertura parcial de la válvula lo cual no permite el flujo requerido de caudal generando mayores pérdidas que se reflejan con mayor intensidad en la presión.

Se pueden presentar zonas por debajo de la presión de saturación del fluido justo en el ojo del rodete y el borde de ataque (L_e) ver (Fig. 21).

Figura 21: Presiones por debajo del punto de saturación.



Fuente: Tomado de “Bombas centrífugas Práctica”.

1.1.13 Software CAD 3D Autodesk Inventor

Este software ofrece un conjunto de herramientas fáciles de usar para diseño mecánico en 3D, documentación y simulación de productos. La creación de prototipos digitales con Inventor ayuda a diseñar y validar los productos antes de que sean fabricados para entregar mejores resultados, reducir costos de desarrollo y comercializarlos con más rapidez, mediante herramientas especializadas de modelado digital.

Es la herramienta ideal para diseño en detalle de dispositivos mecánicos de alta ingeniería, ya que logra validar los prototipos digitales por medio de análisis de elementos finitos y simulación dinámica. Optimiza la etapa de diseño de producto, validando el correcto funcionamiento de los elementos, y permitiendo la parametrización de variables de validación, para la mejora constante.

También permite la actualización automática del modelo 3D, según la dependencia de este a las variables asignadas, así mismo permite la extracción de información de ingeniería por medio de planos detallados, facilitando a los departamentos de diseño la comunicación con los departamentos de manufactura. Además, facilita la importación y exportación de los diferentes formatos CAD existentes en el mercado.

Los análisis de elementos finitos se pueden llevar a cabo en la nube Autodesk 360. Proporcionan funciones de diseño avanzado de ingeniería mecánica, análisis de elementos finitos, simulación de movimiento, gestión de datos, sistemas de rutas y diseño de moldes, así como soluciones de productividad CAD mejoradas. El Software CAD 3D es fácil de usar para la creación de piezas, ensamblajes y dibujos. (Marchegiani, 2004)

1.1.14 Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics)

Es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, Aero acústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo como así disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala. (Kuzmin, s.f.)

1.2 Estado del Arte

Actualmente, los desarrollos en el área de la mecánica de fluidos han contribuido en la resolución de problemas relacionados con el funcionamiento mecánico de algunos componentes y por ende el mejoramiento de los mismos. En el tópico específico de la construcción y optimización del rendimiento de las piezas asociados a cualquier componente también se han obtenido algunos resultados como los mostrados recientemente con el gran avance de la tecnología computacional y de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Por esto, la simulación del flujo interno en componentes individuales o múltiples de una turbo máquina, se ha convertido en una labor rutinaria y a la fecha se han desarrollado grandes mejoras para lograr un buen desempeño de la bomba centrífuga. Por otro lado, como el flujo en una turbina hidráulica es turbulento, no estacionario y con elevados gradientes de presión, posiblemente sea bifásico agua – aire y altamente tridimensional (3D) con fuertes efectos de la rotación y la curvatura. Por tanto, la simulación numérica y la predicción del flujo en estas máquinas son muy exigentes y no están exentas de dificultades (Laín, García; Quintero, y Orrego, 2008, p.17)

Para corroborar lo anterior, a continuación se mencionan algunas investigaciones y artículos referentes al tema de estudio con el fin de tener una idea de las exploraciones y avances que se han hecho sobre la temática propuesta en este proyecto que busca la optimización del rodete mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) en la bomba centrífuga de la universidad Antonio Nariño Sede Tunja.

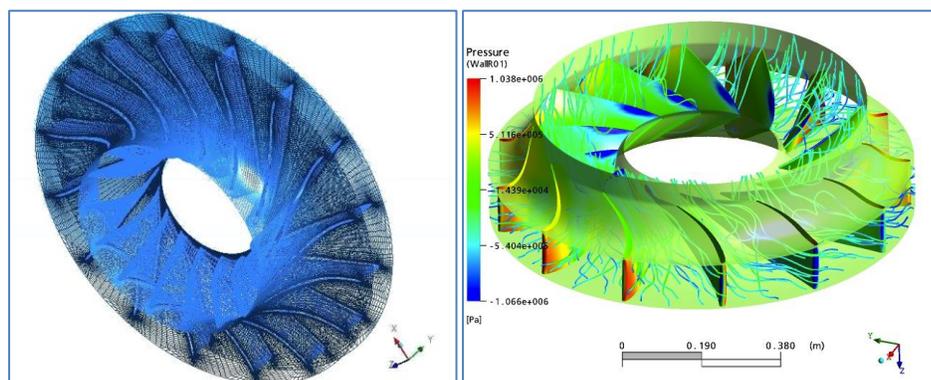
En el artículo titulado “**Simulación numérica del flujo en turbomáquinas hidráulicas. Estado del arte y fuentes de error: aplicación a turbinas Francis**”, realizado por Laín, García; Quintero, y Orrego (2008), se plantea el papel de la metodología de simulación numérica y la Dinámica de Fluidos Computacional, como herramienta fundamental de

apoyo en el proceso de diseño, optimización y análisis de turbomáquinas hidráulicas. Además de presentar una revisión del estado del arte en este campo, considerando tanto procesos estacionarios como no estacionarios, se discuten las fuentes de error, de modelado y numéricas, presentes en la simulación numérica de turbomáquinas hidráulicas. También se hace hincapié en las diferentes estrategias de modelado posibles, así como en sus ventajas e inconvenientes, las cuales se ilustran en el caso particular de las turbinas Francis. (Laín, García; Quintero, y Orrego, 2008, p.90)

Por otro lado, los autores dicen que para cualquier modelo de CFD, lo primero es crear una geometría que represente el objeto que se va a modelar. En consecuencia, se debe crear una malla donde están las celdas o volúmenes de control. Después que la malla está finalizada, se especifican las condiciones iniciales de frontera y los valores de entrada; el software resuelve las ecuaciones de estado para cada celda hasta que se obtiene una convergencia aceptable. Cuando el modelo ha sido resuelto, los resultados pueden analizarse numérica y gráficamente (Laín, García; Quintero, y Orrego, 2008)

En este artículo también se hace hincapié en las diferentes estrategias de modelado posibles, así como en sus ventajas e inconvenientes, las cuales se muestran en el caso particular de las turbinas Francis; demostrando que cuando las turbinas Francis operan a carga parcial presentan un vórtice muy intenso o torcha (vortex rope), a la salida del rotor. Conforme el flujo rotante desacelera en el tubo de descarga, surge una inestabilidad hidrodinámica en la que el vórtice anterior cambia su posición de forma periódica creando altas fluctuaciones de presión no estacionarias en las paredes del tubo de descarga; estas, con el tiempo, podrían llevar a un fallo por fatiga del material. (Fig. 22)

Figura 22: Malla computacional (a) y distribución de presiones (b) en álabes de rodete de una turbina Francis.



Fuente: Tomado de Laín, García; Quintero, y Orrego (2008)

Por último se presta especial atención a dos procesos no estacionarios en turbinas Francis: la interacción del flujo entre los sistemas de referencia estacionario (carcasa espiral, álabes directrices y tubo de descarga) y rotante (rodete), y la dinámica vortical (torcha) que aparece en el tubo de descarga bajo condiciones de carga parcial.

Por otro lado en la Tesis titulada “**Estudio del fenómeno de la cavitación en una bomba centrífuga de 1 HP y su influencia en los parámetros de rendimiento energético en la facultad de ingeniería civil y mecánica**”, desarrollada por Vargas (2015) se analiza el fenómeno de cavitación en una bomba centrífuga de 1HP y se evalúa el efecto que ésta ocasiona en los parámetros de rendimiento. Para esto, en primer lugar se investigó las causas que generan cavitación, así como también el mecanismo que tiene este fenómeno dentro en un sistema de bombeo, posterior a esto se realizó un esquema hidráulico que nos sirva para analizar este fenómeno y se decidió utilizar el Banco de Pruebas Hidráulicas “Bombas Centrífugas” del laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, con el banco en disposición para su uso, se programó realizar procedimientos para tomar datos de rendimiento energético y observar el efecto que tenía la cavitación sobre la bomba, luego se analizará todo lo ocurrido en el banco de pruebas. Posteriormente a la toma de datos se analizó los resultados obtenidos del rendimiento de la bomba y se justificó los procedimientos realizados con cálculos, conceptos teóricos y experimentales; para luego concluir con valores cuantitativos y cualitativos que en efecto la cavitación genera problemas en la bomba centrífuga. Finalmente se propone realizar una simulación computarizada del fluido en la bomba centrífuga para analizar y observar las presiones de flujo, así como también la generación de cavitación. La simulación debe acercarse en lo posible a la realidad para obtener valores bastante cercanos a los obtenidos en la práctica experimental. Una vez que la simulación sea aceptable se procederá a comparar datos con la realidad y se realizarán cambios en las condiciones del fluido para evaluar su efecto.

El proyecto de grado “**SIMULACIÓN MEDIANTE MODELOS NUMÉRICOS DE UNA BOMBA-TURBINA INTEGRAL**”, elaborado por Ruiz de Galarreta (2016), surge como continuación de varios proyectos anteriores relacionados con una Bomba-Turbina Integral y pretende realizar diferentes análisis numéricos, mediante el programa ANSYS, de un modelo tridimensional. El primer proyecto relacionado con la máquina, fue Diseño de una Bomba-Turbina Integral. En este proyecto se diseñó una bomba-turbina para una

localización concreta. Un año después se realizó el proyecto de Prototipado y Ensayo de un Modelo a Escala de una Bomba-Turbina Integral, realizado por Cayetana Urbina. En este proyecto se fabricó un modelo a escala (1/5) del diseño del primer proyecto para ser probado en un banco de ensayos en el laboratorio de la escuela. La fabricación de cada una de las partes se realizó mediante técnicas de fabricación aditiva en una impresora 3D. El objetivo principal del proyecto fue el estudio hidráulico del rodetes del prototipo anteriormente mencionado. El rodetes es la parte que diferencia esta máquina del resto de turbomáquinas hidráulicas, por ello hay que tener en cuenta que se trata de un estudio muy genérico y que no se tienen en cuenta todos los componentes que generalmente integran una máquina de estas características, así como se despreciaron numerosas pérdidas habituales en estos casos como las mecánicas o volumétricas. Con este proyecto lo que se pretende no es el estudio de la máquina en su totalidad, sino que únicamente se estudia el comportamiento del rodetes para poder definir en qué rango de trabajo aproximado nos encontramos con este diseño. Los objetivos del proyecto fueron los siguientes: 1) Importación del rodetes de la máquina: partiendo de los planos y datos del diseño realizado para el prototipo, se importó la geometría en el programa para su posterior estudio. 2) Simulación: con los modelos generados, se estudiaron las diferentes formas para simularlos. Se vio cómo resolver el problema (si simulando el rodetes completo o dividirlo en sus diferentes partes, la bomba y la turbina). Una vez hecho esto, se generó un mallado óptimo y, 3) Obtención de resultados y conclusiones; donde se realizaron estudios para comprobar el funcionamiento de la máquina a distintas velocidades y se determinaron los puntos óptimos de funcionamiento.

En España el artículo realizado por Fernández (s.f) titulado “**BOMBAS CENTRÍFUGAS Y VOLUMÉTRICAS**”, se hace una completa descripción de las bombas centrífugas con sus diferentes clasificaciones y todas sus características y propiedades. También hace referencia a los triángulos de velocidades, alturas y par motor a considerar en las bombas centrífugas; la ecuación general de estas bombas, curvas características y potencias y rendimientos de una bomba centrífuga.

Así mismo se refiere el tema de los álabes y grado de reacción con el cálculo del número de álabes, la cavitación en bombas centrífugas y la variación de las curvas características con la velocidad de rotación; así mismo se hace referencia a los acoplamientos y empuje axial y a la lubricación y equilibrado. Por último, se presenta un análisis sobre los cierres y empaquetaduras y un tratado sobre bombas volumétricas.

A nivel nacional en el trabajo de grado **“ESTUDIO DE LOS EFECTOS GENERADOS POR LA VARIACIÓN DEL NÚMERO DE ÁLABES Y EL ÁNGULO DE DESCARGA EN UN RODETE CERRADO DE ENTRADA RADIAL”** presentado Herrera y Puerto (2016); se muestra el desarrollo de un análisis computacional de fluidos (CFD) aplicado a un impulsor de bomba centrífuga con entrada radial variando el número de álabes y el ángulo de descarga por medio del software ANSYS 16. Para la realización de este proyecto se tuvo en cuenta bibliografía especializada en el diseño paramétrico de bombas centrífugas y en análisis por elementos finitos aplicado a fluidos, posteriormente se hizo el diseño, proyección en 3-D y simulación computacional por medio de las diferentes celdas de ANSYS (Vista CPD, BladeGen, TurboGrid, CFX), obteniendo como resultado los modelos CFD que se analizaron en detalle.

La idea de la investigación fue dar a conocer este tipo de herramientas computacionales a los estudiantes de ingeniería y tecnología en mecánica en la Universidad Distrital, avanzando respecto a métodos modernos y vanguardistas de análisis aprovechando herramientas de software como ANSYS en el campo de la simulación computacional. El trabajo, se hizo con uso del software ANSYS con sus sistemas Vista CPD, BladeGen, TurboGrid y CFX para modelar un impulsor cerrado de entrada radial de una bomba centrífuga y analizar como varían parámetros como la velocidad, presión y eficiencia al cambiar el número de álabes, con el objetivo de profundizar más acerca del diseño de bombas centrífugas y generar un mayor interés en las herramientas computacionales de ingeniería como un modelo de estudio para futuros proyectos o investigaciones relacionadas con el campo de los fluidos y de la mecánica en general.

Para logros satisfactorios, se decide implementar un modelo de bomba centrífuga desde un catálogo comercial disponible en el país, de esta manera se pudo hacer uso sus condiciones operacionales y de esta forma analizar su funcionamiento interno. Para iniciar el análisis computacional, se recomienda utilizar un modelo de bomba centrífuga acorde con los parámetros del programa, en este caso se selecciona una bomba Pedrollo FG2-65/160, con una frecuencia de 60 HZ.

Como conclusión de dicha investigación y de acuerdo a las simulaciones realizadas, se pudo establecer que un rodete con mayor número de álabes, presenta una mayor

eficiencia, los modelos de 5 y 7 álabes producen una eficiencia superior en 11% respecto al modelo de 4 álabes, este fenómeno se explica con un flujo menos turbulento al aumentar las paletas, además, un número mayor de álabes genera una menor recirculación de fluido y una menor variación de presión, esto producido por la cercanía entre las caras de los álabes, lo cual permite un flujo más estable y uniforme al interior del rodetes.

2. Desarrollo metodológico

2.1 Modelación de parámetros de flujo a través del rodete de la bomba mediante software CFD

2.1.1 Montaje de la bomba centrífuga de 500 vatios

Para empezar con el procedimiento establecido en las fases de la investigación, primero que todo se aborda el banco de hidráulica del laboratorio de la Universidad Antonio Nariño Sede Tunja, para desmontar el circuito mixto de la bomba y acoplarlo a un circuito en serie con una bomba centrífuga de 500 vatios y así realizar las diferentes mediciones y poder determinar el funcionamiento del rodete.

Figura 23: Banco hidráulico laboratorio UAN



Fuente: Autor, 2020

2.1.2 Instalación de equipos para toma de mediciones

Después se procede a determinar los tres instrumentos de medición que sirven para tomar las diferentes medidas como son; presión, rpm y caudal para luego instalar un variador de velocidad al circuito eléctrico. (Fig. 24)

Figura 24: Instrumentos de medición utilizados en el proyecto para medir presión, rpm y caudal.



Fuente: Autor, 2020

Manómetro 30 lb glicerina Astro: El manómetro es un instrumento de medición para la presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados. Se distinguen dos tipos de manómetros, según se empleen para medir la presión de líquidos o de gases.

Medidor de flujo de agua GPI: Es un instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido o para la medición del gasto másico. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. También suelen llamarse medidores de caudal, medidores de flujo o flujómetros.

Tacómetro de tipo foto-contacto con láser, de 5 dígitos: El tacómetro digital con pantalla LCD de 5 dígitos de 13 mm LCD con retroiluminación proporciona medidas rápidas y precisas de RPM de contacto y sin contacto y medidas de velocidad de superficie de objetos giratorios. La carcasa de plástico con protección de goma antideslizante integrada se adapta cómodamente en cualquier mano.

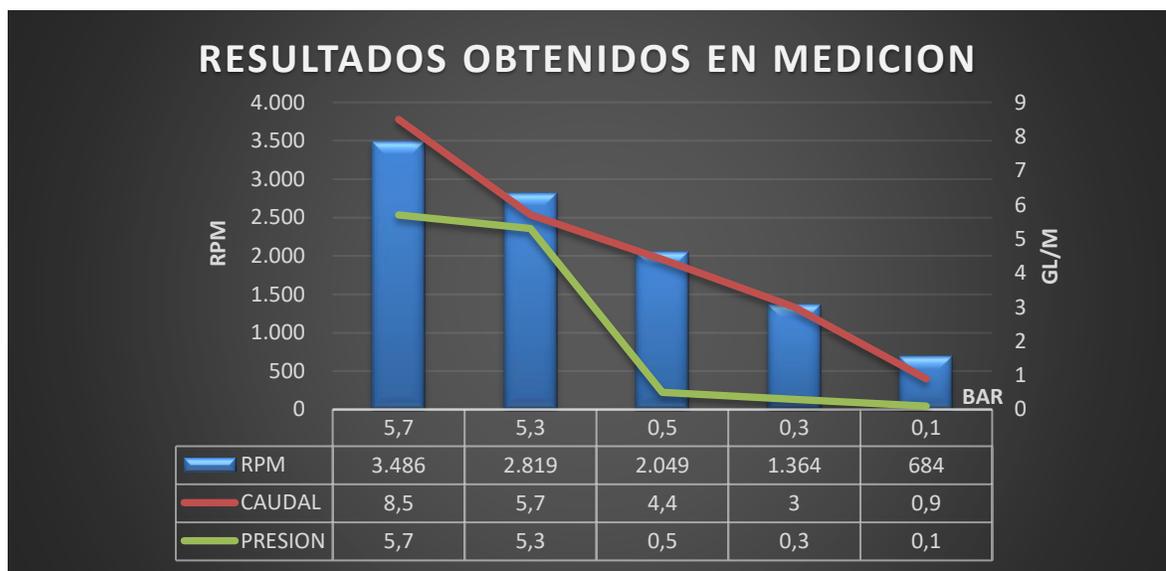
Variador velocidad motor cc: Un variador de velocidad es el equipo utilizado en sistemas de accionamiento electromecánicos para controlar la velocidad y el par del motor de CA

variando la frecuencia y el voltaje de entrada del motor. Los variadores de velocidad pueden ser: eléctricos, hidráulicos, mecánicos o incluso electrónicos.

2.1.3 Medición del rendimiento obtenido del rodete

Con las diferentes medidas de la bomba centrífuga de 500 watos se diseña una tabla en Excel con sus respectivas curvas características para observar el rendimiento del rodete. (Fig. 25)

Figura 25: Resultados de parámetros de medición de bomba centrífuga a diferentes rpm.



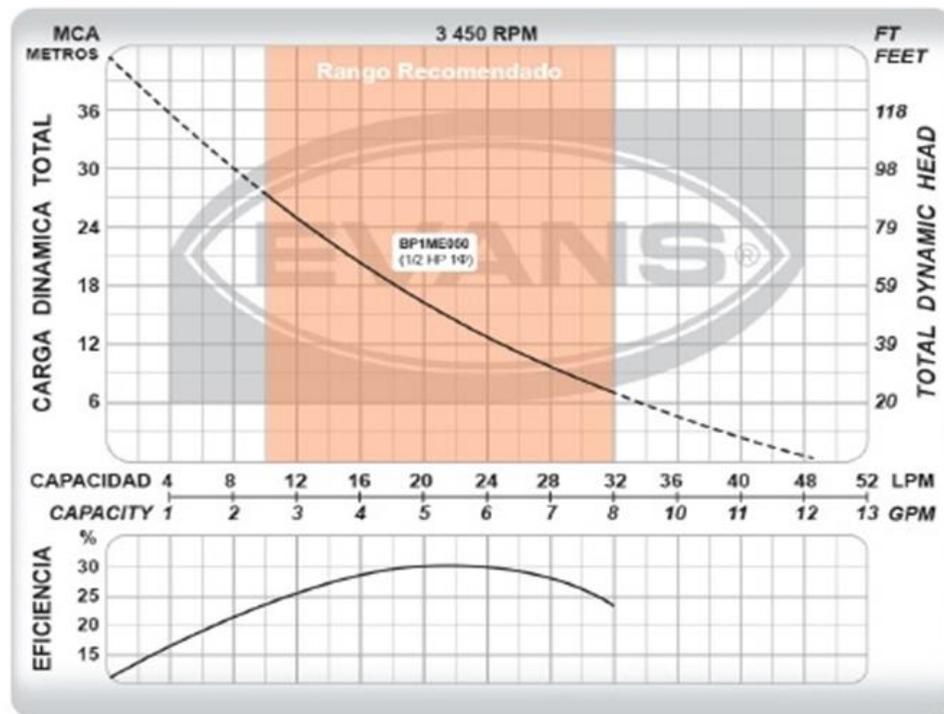
Fuente: Autor, 2020

En la figura 25, se muestran los resultados experimentales que se obtuvieron variando las rpm de la bomba centrífuga de 500 watos, Estas mediciones se realizaron con diferentes instrumentos de medición que se describen en la (Fig. 26). Estos resultados son analizados y comparados con los datos de la ficha técnica de la bomba centrífuga cortesía de EVANS Colombia.

Se puede concluir que los resultados experimentales frente a los datos de la ficha técnica demuestran una similitud en su desempeño: la curva que representa a la eficiencia de la bomba esta entre 30% y 50 %, el caudal se mantiene entre (2,5 y 8,3 Gpm), la presión demuestra un comportamiento eficiente entre los valores de 0,5 y 5,7 bar.

Figura 26: Características y curva de rendimiento de bomba centrífuga EVANS-EP1MEO50, modelo utilizado como referencia para el desarrollo de este proyecto.

BOMBA	
Tipo de Bomba	Superficie
Flujo Optimo	20.00 LPM
Altura Optima	16.00 m
Numero de etapas	1 etapas
Diámetro de succión	1.00 pulg
Diámetro de descarga	1.00 pulg
Tipo de impulsor	Cerrado
Material del cuerpo	Hierro Gris
Material del impulsor	Latón
Tipo de motor	Eléctrico
Potencia del motor	0.50HP
RPM del motor	3450 RPM
Voltaje	115V
Fases del motor	1
Corriente	5 A
Protección térmica	Si
Temperatura Máxima del Agua	40° C

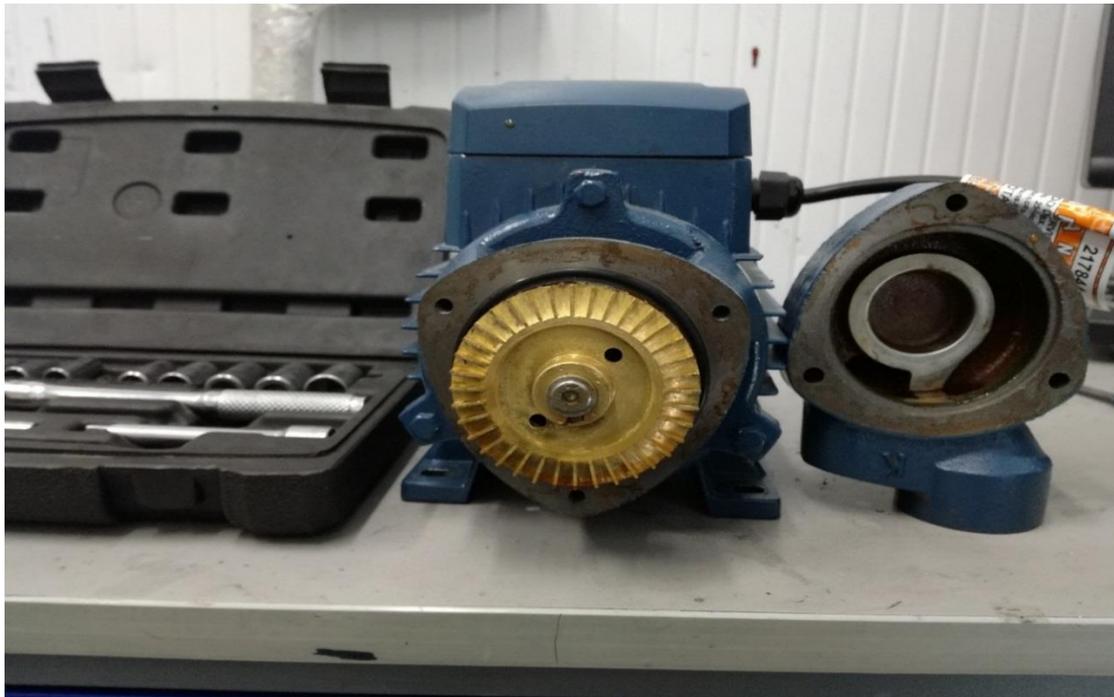


Fuente: Cortesía EVANS Colombia.

2.1.4 Desarme de la bomba centrífuga

Después de obtener los resultados de las medidas experimentales de la bomba centrífuga de 500 vatios, se procede al desarme de la bomba centrífuga como se observa en la siguiente (Fig. 27) para extraer el rodete y carcaza, y así mismo realizar el levantamiento de planos de los mismos, utilizando el instrumento de medición pie rey estas mediciones se realizan en (mm).

Figura 27: Desarme bomba centrífuga 500 vatios: extracción rodete y carcaza

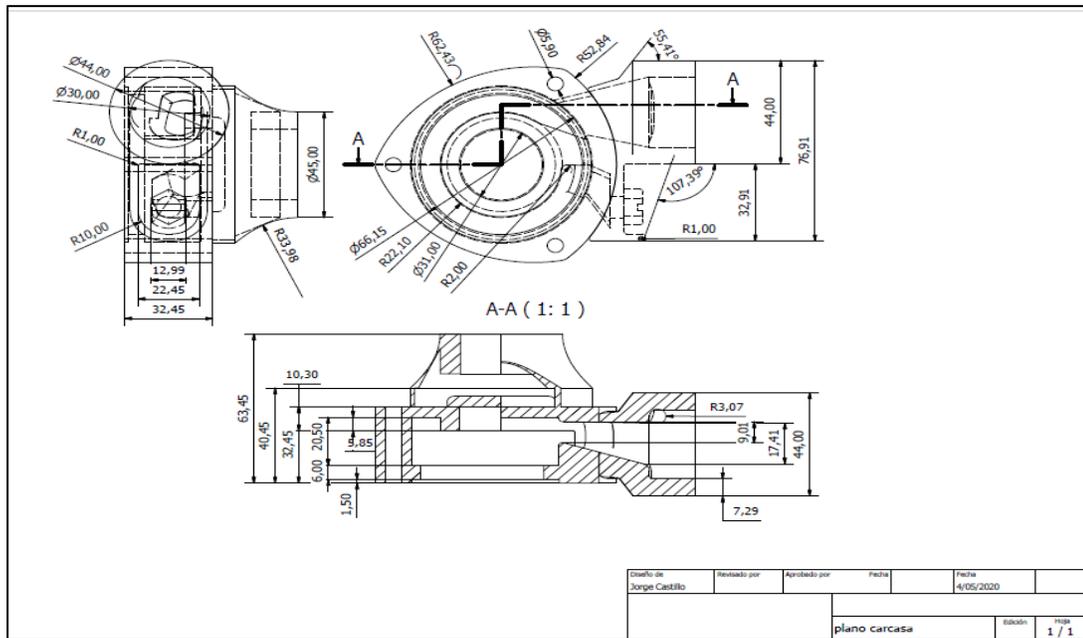


Fuente: Autor, 2020

2.2 Planos y diseños del rodete y carcaza

En esta fase se realizan los planos y diseños del rodete y carcaza con el programa de diseño “Inventor”, variando los ángulos de velocidad de los álabes 0°, 10°, 20° y 30° grados. Como se observa en la (Fig. 28)

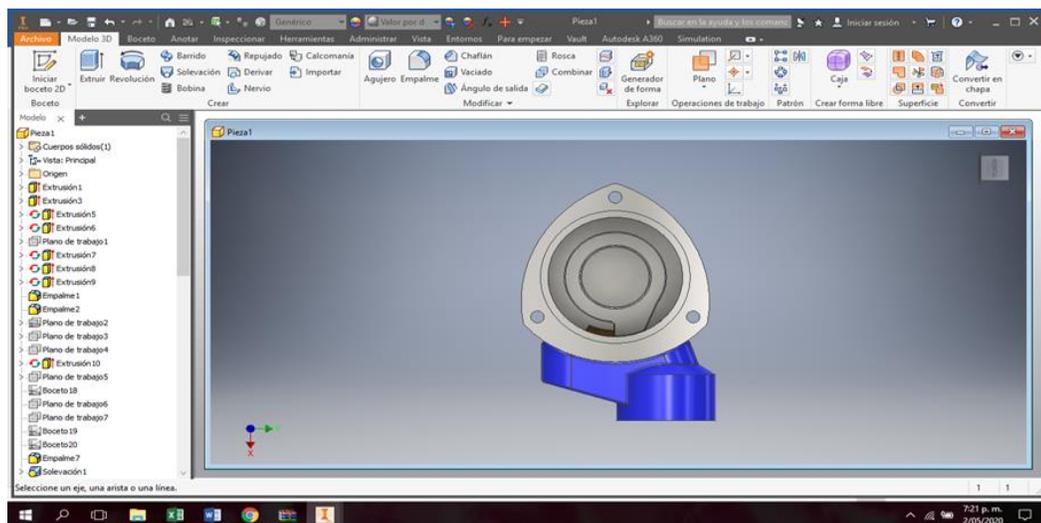
Figura 28: Planos de la carcasa de la bomba centrífuga de 500 watos elaborados en el programa de diseño “Inventor”.



Fuente: Autor, 2020

En la figura 29 se ilustra el diseño de la carcasa de la bomba centrífuga de 500 watos mediante el programa CAD inventor, también se puede observar las diferentes ventanas de herramientas del programa de diseño.

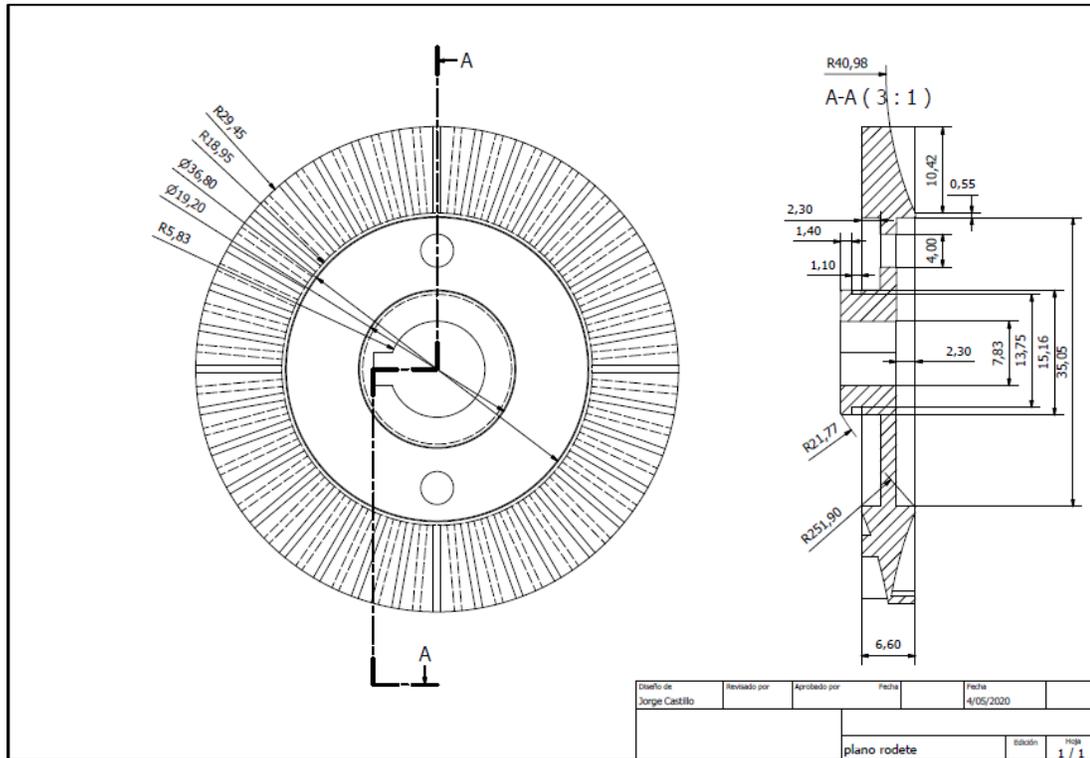
Figura 29. Diseño en “Inventor” de la carcasa de bomba centrífuga de 500 watos.



Fuente: Autor, 2020

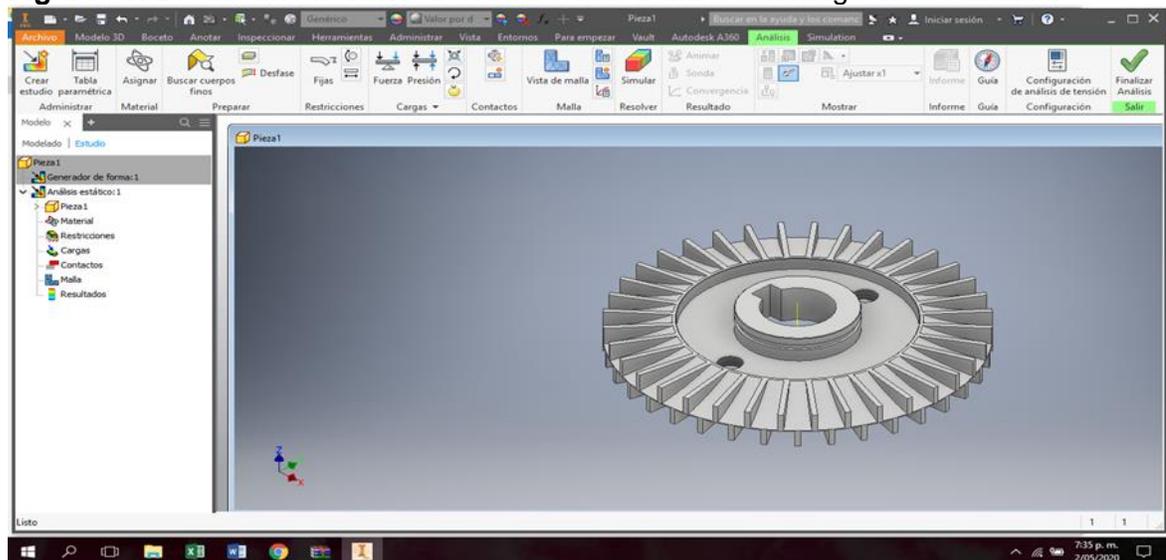
En la Figura 30 se observa el levantamiento de planos del rodete original de una bomba centrífuga de 500 watios con ángulo de 0 grados en los alabes.

Figura 30: Planos del rodete de la bomba centrífuga 500 watios elaborados en el programa de diseño “Inventor”



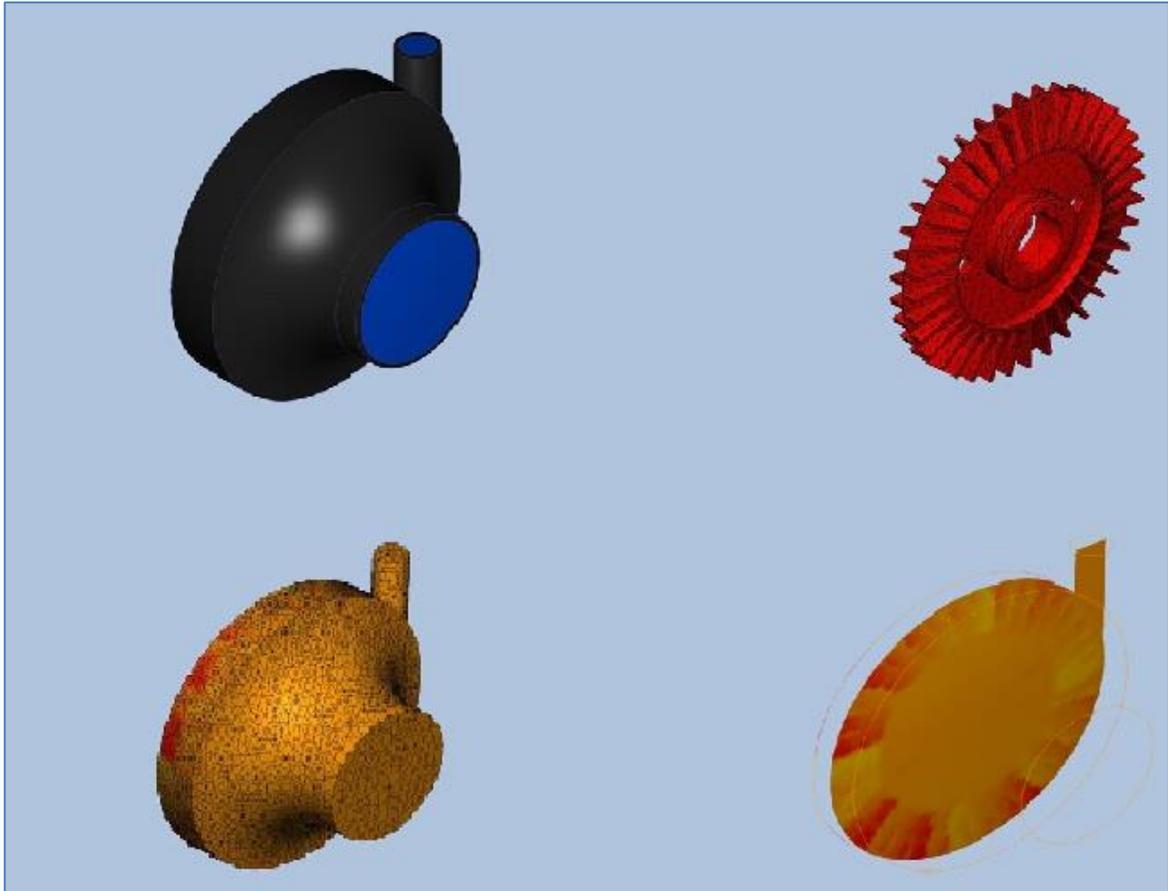
Fuente: Autor, 2020

Figura 31: Diseño en “Inventor” del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios.



Fuente: Autor, 2020

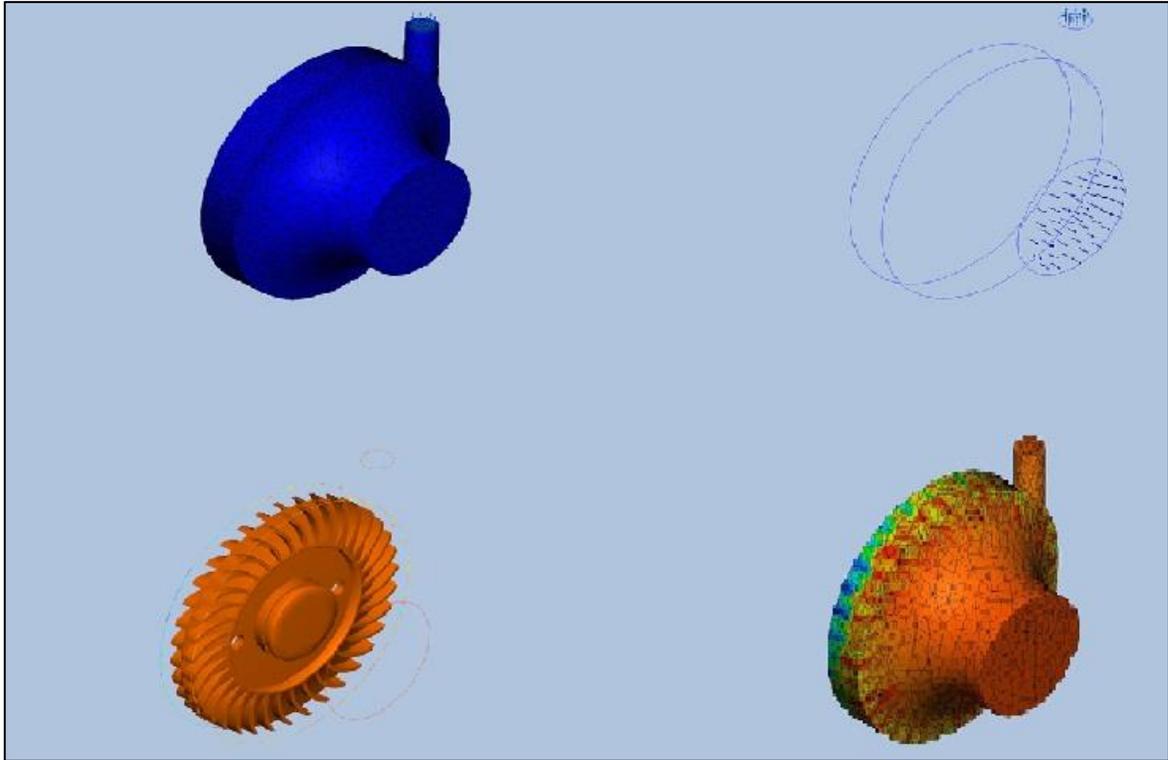
Figura 32: Enmallado de los diseños, de la carcasa y rodete de la bomba centrífuga de 500 watos mediante el software CFD.



Fuente: Autor, 2020

En la figura anterior se puede ver el enmallado de los diseños del rodete y carcaza con variación en el ángulo del álabe a 0° y 10° grados de la bomba centrífuga de 500 watos. Es un dato muy importante para la simulación en el programa CFD. Esto es fundamental porque entre mayor sea en número de nodos y se acople a la simulación los resultados son más precisos.

Figura 33: Enmallado de los diseños rodete y carcaza con variación en los ángulos de los alabes a 20° y 30° grados.



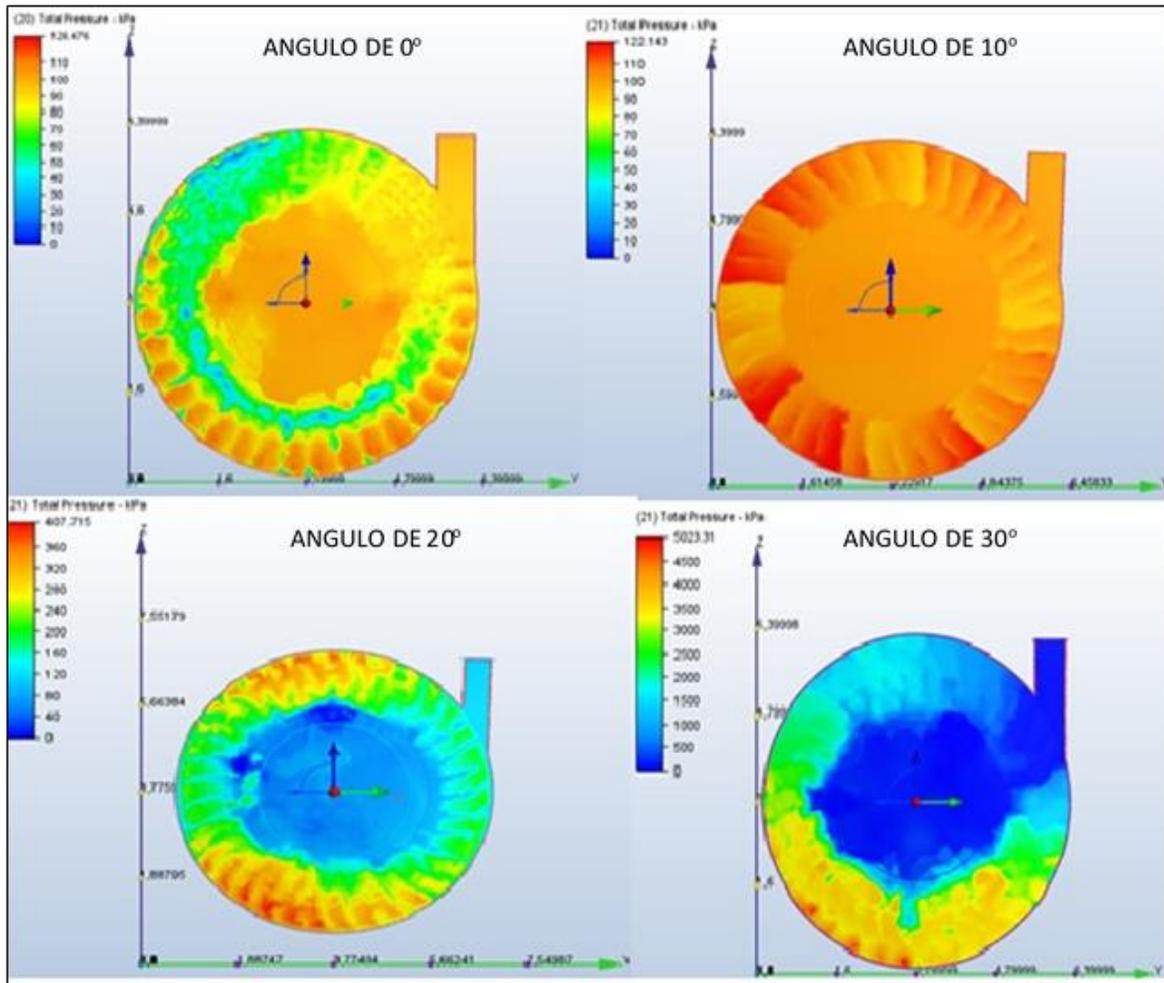
Fuente: Autor, 2020

En esta figura se puede verificar el enmallado con diferentes números de nodos y elementos finitos de los diseños de rodete y carcaza con variación en los ángulos a 20° y 30° grados. También se puede observar el recorrido de los vectores de velocidad a la salida de la carcasa.

2.2.1 Diseños del rodete de la bomba centrífuga de 500 watos con variación en los ángulos de los álabes a 10°,20° y 30° grados, mediante el software CFD

Siguiendo con el procedimiento establecido para tal fin, se realizan cuatro diseños en el programa CAD Inventor variando los ángulos de los álabes del rodete y se exportan al programa CFD para realizar la optimización y modelamiento y observar cuál de los diseños es el que mejor se comporta y mejor rendimiento tiene, a continuación, se muestra los resultados y análisis por el software CFD.

Figura 34: Análisis de contorno de presión para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los álabes a 0, 10, 20 y 30 grados.



Fuente: Autor, 2020

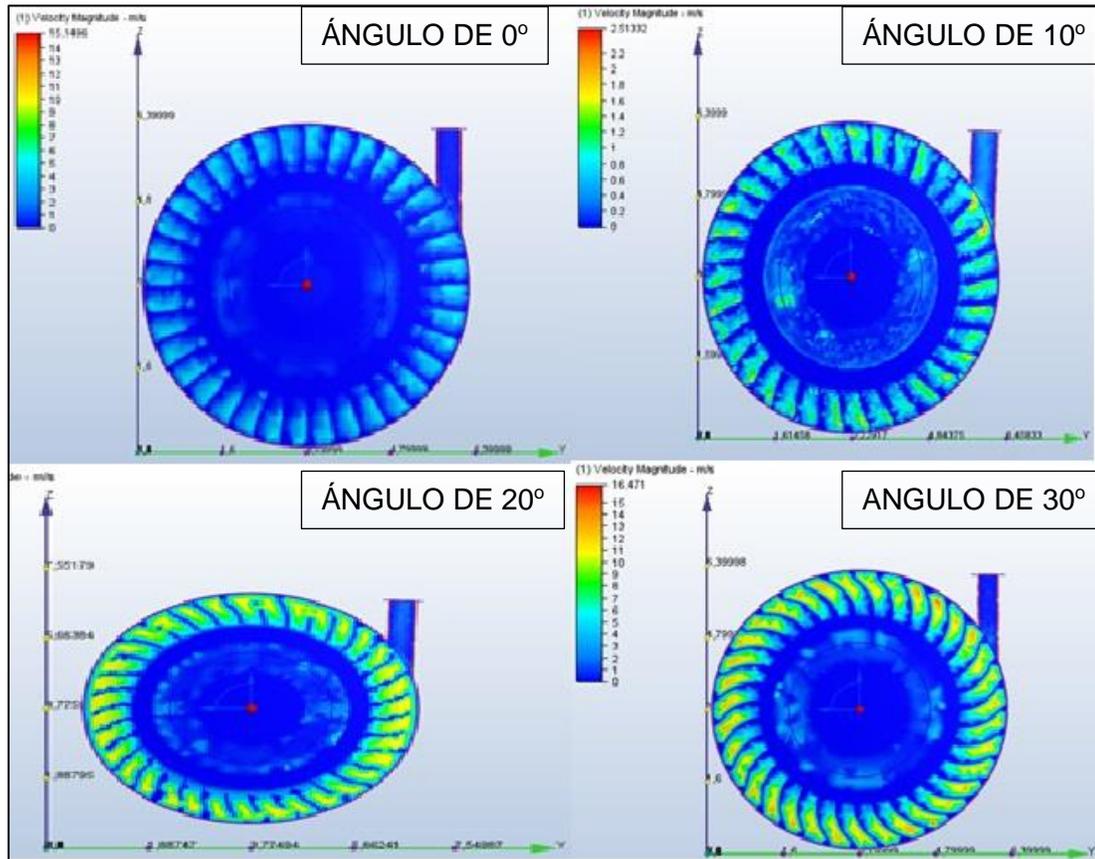
Según la (Fig. 34), en la parte izquierda de cada modelo de rodete, se puede localizar una tabla con el valor de presión y su color en el modelo, de esta tabla se toman los valores con los cuales se realiza la comparación entre cada rodete.

En este modelo de rodete se puede observar en la (Fig. 34) que en los modelos de 0° y 10° la presión tiende a ser más uniforme y distribuida en el área entre álabes, en los modelos de 20° y 30° se observa que la presión no es uniforme a la salida del rodete.

La presión a la salida también se ve afectada, aunque la variación no es significativa, el modelo de rodete que presenta la presión más elevada a la salida es el modelo de 30 grados, con una presión de 502.3 Kpa, y la variación entre presiones entre el modelo de

0° y el modelo de 10° es de 4.33 Kpa, entre el rodete de 20 y 30 grados la variación de presiones es de 94,5 kpa.

Figura 35: Análisis de contorno de velocidad para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los alabes a 0,10, 20 y 30 grados.



Fuente: Autor, 2020

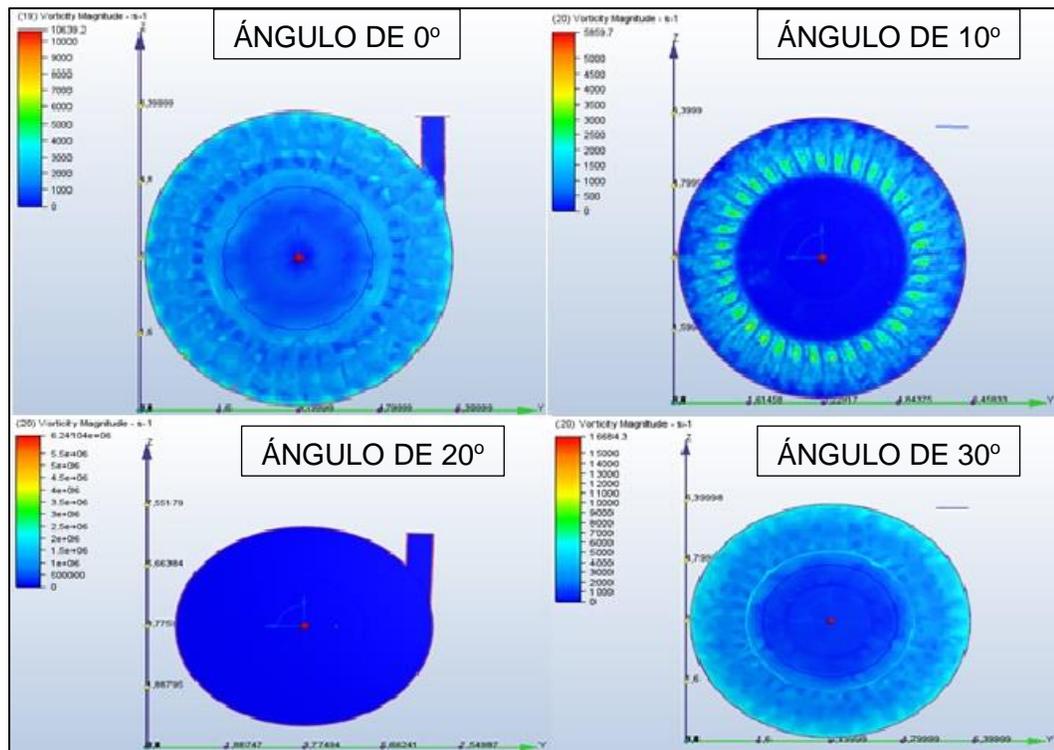
En la figura 35 se pueden observar las velocidades del rodete y como varían a la salida según el ángulo beta, se evidencia un rango de velocidad a la salida con un valor más alto cuando el valor del ángulo es menor, adicionalmente se presentan zonas de baja velocidad de color azul en las caras internas y externas del álabe debido a la fricción del fluido con el material de construcción del rodete.

Además, se puede observar que al aumentar el ángulo de descarga se disminuye la velocidad en la salida del impulsor, esto se presenta al estar más separados los álbes, ya que no se puede canalizar toda la energía en el fluido; este fenómeno es descrito por el

principio de Bernoulli el cual afirma que al tener una menor área de flujo se obtiene una mayor velocidad.

En la descarga de la bomba se ve como aumenta la velocidad en los bordes superiores del rodete y los alabes con ángulos menores, de igual manera se mantiene estable el comportamiento presentado en el rodete con ángulos de 0, 10 grados que entre menor sea el valor del ángulo de entrada mayor será la velocidad a la salida del fluido, se observa en los ángulos de los alabes de 20 y 30 grados una menor magnitud en las zonas de baja velocidad debido a que el espacio entre las paredes de los álabes es menor y no se presentan un nivel alto turbulencia.

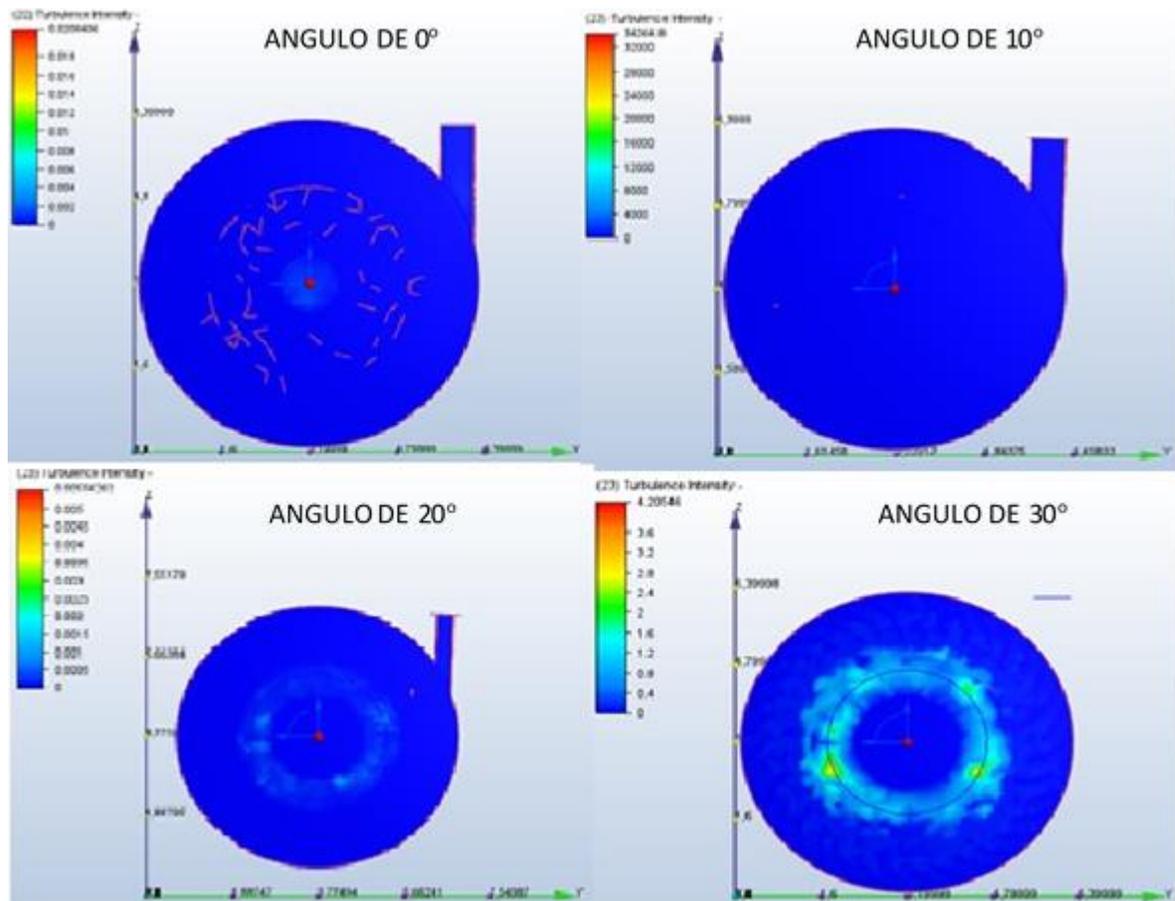
Figura 36: Análisis de vorticidad para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los alabes a 0,10, 20 y 30 grados.



Fuente: Autor, 2020

La Figura 36 muestra el campo de vorticidad en la superficie del rodete donde se presentan pequeñas zonas de vorticidad distintas a 0. Se puede evidenciar que la vorticidad es muy similar en las paredes de los alabes del rodete ya que en esta área se concentra mayor flujo de agua.

Figura 37: Análisis de turbulencia para el modelo del rodete con variación en los ángulos de los alabes a 0,10, 20 y 30 grados.



Fuente: Autor, 2020

En la figura anterior se observa el efecto de turbulencia que es el estado de movimiento de un fluido donde sus distintas variables relevantes como presión, caudal y velocidad, oscilan de una forma desordenada esto hacer referencia a un estado no estacionario estas variables adoptan valores dependientes tanto del tiempo como la posición y estos valores varían aleatoriamente.

También se puede observar un análisis de turbulencia en los modelos del rodete con diferentes ángulos en los alabes, donde se evidencia que el rodete con ángulo de 30 grados se presenta un mayor efecto de turbulencia debido a que los alabes se encuentran más cerrados entre ellos y carece de ausencia de espacio en el interior de la carcasa de la bomba centrífuga.

3. Capítulo 3: Resultados

3.1 Resultados con diferentes variables tomadas para realizar análisis del rodete con variación en los ángulos de los álabes.

Figura 38: Comparación de resultados obtenidos de la simulación en el programa CFD.

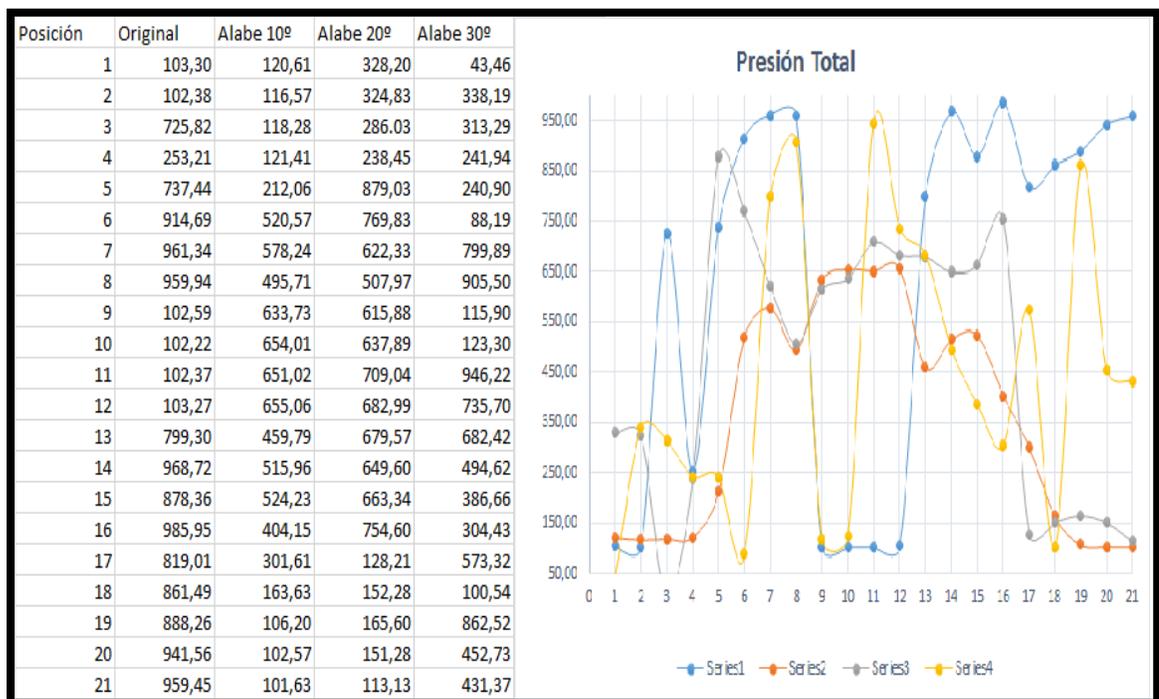
TABLA DE RESULTADOS DE LA SIMULACION EN CFD DE LOS ANGULOS DEL ALABE DEL RODETE				
	0°	10°	20°	30°
Presion dyne/cm²	17573.1 dyne/cm ²	203417.0 dyne/cm ²	2389470.0 dyne/cm ²	48125.4 dyne/cm ²
Velocidad en eje (x) cm/s	38.3426 cm/s	135.561 cm/s	495.174 cm/s	81.4346 cm/s
Velocidad en eje (y) cm/s	3.85866 cm/s	194.461 cm/s	1335.6 cm/s	1076.89 cm/s
Velocidad en eje (z) cm/s	6.15643 cm/s	198.611 cm/s	1379.84 cm/s	1077.08 cm/s
Densidad g/cm³	8.93958 g/cm ³	8.93958 g/cm ³	8.93958 g/cm ³	8.93958 g/cm ³
Magnitud cm/s	158.599 cm/s	189.419 cm/s	140.568 cm/s	288455 cm/s
Turbulencia cm²/s²	0.0001 cm ² /s ²			
Numero de nodos	14392	126812	67727	14448
Numero de elementos	66512	658684	348005	66641
Eficiencia %	0%	18,30%	38,20%	31,50%
Caudal m³/s	0,0010 m ³ /s	0,0025 m ³ /s	0,0035 m ³ /s	0,0018 m ³ /s

Fuente: Autor, 2020

- Se realizaron las 4 simulaciones de los parámetros definidos con la ayuda del software CFD ANSYS, obteniendo como resultados gráficos ilustrativos de contornos de eficiencia, presión, caudal, magnitud, vorticidad y turbulencia.
- Se establecieron los parámetros de simulación en cada uno de los casos de estudio para una variación en los ángulos de los álabes del rodete de 0°, 10°, 20° y 30°, tomando estos valores como los rangos más utilizados en el diseño de bombas centrífugas, obteniendo diferentes casos de estudio, en donde se cumplen todos los requerimientos para el análisis.
- La curva de rendimiento de la bomba centrífuga de 500 watios según los resultados de la figura 38 se muestra en la siguiente figura.

3.2 Resultados obtenidos de la presión total mediante la simulación en CFD de los diferentes diseños de rodetes.

Figura 39: Resultado obtenidos de los diseños del rodete de la bomba centrífuga de 500 watios mediante el programa CFD.



Fuente: Autor, 2020

- Con la realización del estudio de presión, velocidad y eficiencia de una bomba centrífuga de 500 watios con un impulsor radial y cerrado y variando los parámetros de diseño como el ángulo de los álabes a 0°, 10°, 20° y 30° grados, se generó como resultado la gráfica de presión total de acuerdo a las 4 simulaciones que se realizaron mediante el programa de CFD.
- El mejor comportamiento lo tiene el rodete con ángulo en los alabes de 20° grados frente a los diferentes resultados de los otros modelos.
- Se puede evidenciar que la presión del rodete con alabes a 20 grados se sostiene entre 6 y 12 alabes. Demostrando así que el mejor comportamiento se obtiene en el rodete con alabes a 20° grados.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto, se generó un conjunto de parámetros bajo los cuales se evaluó el comportamiento de la geometría del rodete para una bomba centrífuga de 500 watos .se realizaron cuatro diseños con variación en los ángulos de los alabes del rodete a 0°, 10°, 20°, 30° grados en el programa de diseño inventor, posteriormente se exporto al software CFD para realizar las respectivas simulaciones obteniendo:

- El rodete con variación en el ángulo de los alabes a 20°, presenta una mayor eficiencia en comparación a los modelos de 0°,10° y 30°, los modelos de 10° y 30° producen una eficiencia superior en 9%, además una variación mayor en los ángulos de los álabes del rodete genera una menor recirculación de fluido y una menor variación de presión, esto producido por la cercanía entre las caras de los álabes, lo cual permite un flujo más estable y uniforme al interior del rodete.
- Los resultados experimentales del rendimiento de la bomba centrífuga muestran que la eficiencia media ponderada de la bomba por debajo de 0.8%, 1.0% y en 0.9% aumenta 2.9% frente al modelo original.
- Se identifica en los contornos de velocidad obtenidos en las 4 simulaciones, una mayor velocidad de salida del impulsor cuando el ángulo de descarga es menor, es decir de 20°, esto debido a que con un valor de descarga de 20 grados los álabes están más cerradas, facilitando así la canalización del fluido y suministrándole mayor energía cinética.
- De acuerdo a los resultados demostrados en la tabla de la (Fig. 34), se puede observar que los rodetes con un ángulo mayor a la salida, permiten una cabeza mayor que los

modelos con ángulos más cerrados, esto sucede debido al área de flujo entre los álabes, los modelos de 20° y 30° grados tienen una entrada mayor entre los álabes, por lo cual permiten desplazar una mayor cantidad de fluido que los modelos de 0 y 10 grados. Este cambio es apenas observable y la variación es apenas del 3% con un caudal bajo.

4.2 Recomendaciones

El diseño en “Autodesk Inventor” y la utilización del software de elementos finitos CFD es un excelente recurso para la enseñanza en diversas áreas de ingeniería; sin embargo para poder aprovechar al máximo estos recursos, se debe potenciar el aprendizaje y el desarrollo de grupos de investigación y proyectos relacionados con estas áreas, especialmente en la fluido dinámica computacional CFD, también se debe hacer énfasis en la actualización y el aprendizaje de programas CAD de diseños desde los primeros semestres de carrera universitaria , para generar más interés y así desarrollar mejores proyectos en la facultad.

Anexo A: Artículo: Mejora en el rendimiento de una bomba centrífuga.

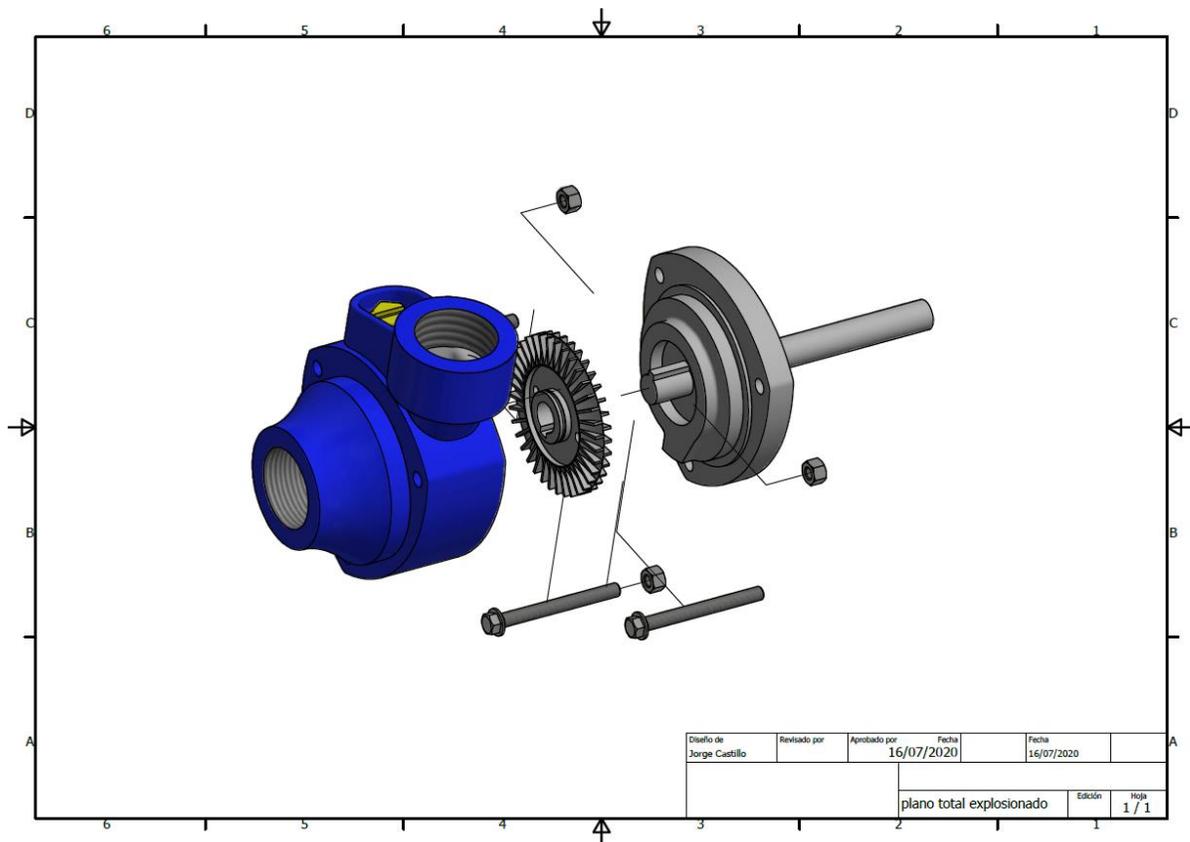
	Authors:	Santi Kumari Behera, Abhijeet Mahapatra, Amiya Kumar Rath and Prabira Kumar Sethy
	Paper Title:	Classification & Grading of Tomatoes using Image Processing Techniques
111.	Abstract:	<p>This examination manages the programmed arrangement and reviewing of tomatoes utilizing picture-preparing systems. Mostly tomatoes are of three assortments for example cherry, classic & cylindrical variety and of all assortment have little, medium & big size. Tomato order and evaluating is exceptionally troublesome precisely and in quick way because of their huge contrast in highlight, for example, size, shape and shading because of variable states of nature condition and manual components. Programmed characterization and evaluating of tomato dependent on picture preparing methods is the best arrangement as manual forecast is absence of objectivity, exactness and has lower proficiency. Here, we utilize the picture handling parameters, for example, major axis, minor axis, bounding box, perimeter & diameter for grouping and evaluating reason for tomato and furthermore confirmed with the ground truth measure by Vernier caliper. This examination accomplished coefficient of correlation (R2) 0.98 for length and 0.97 for width. Again, it effectively characterizes the variety of 96.67% and grade into three classes as indicated by size is 100%.</p>

https://scholar.google.com.co/scholar?q=international+journal+of+innovative+technology+and+exploring+engineering+volumen+8+issue&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar

Este artículo lo anexo debido a que me parece muy interesante porque hace un breve resumen de cómo mejorar el rendimiento de una bomba centrífuga, y fue muy valioso para el desarrollo de esta tesis.

Anexo B: Planos

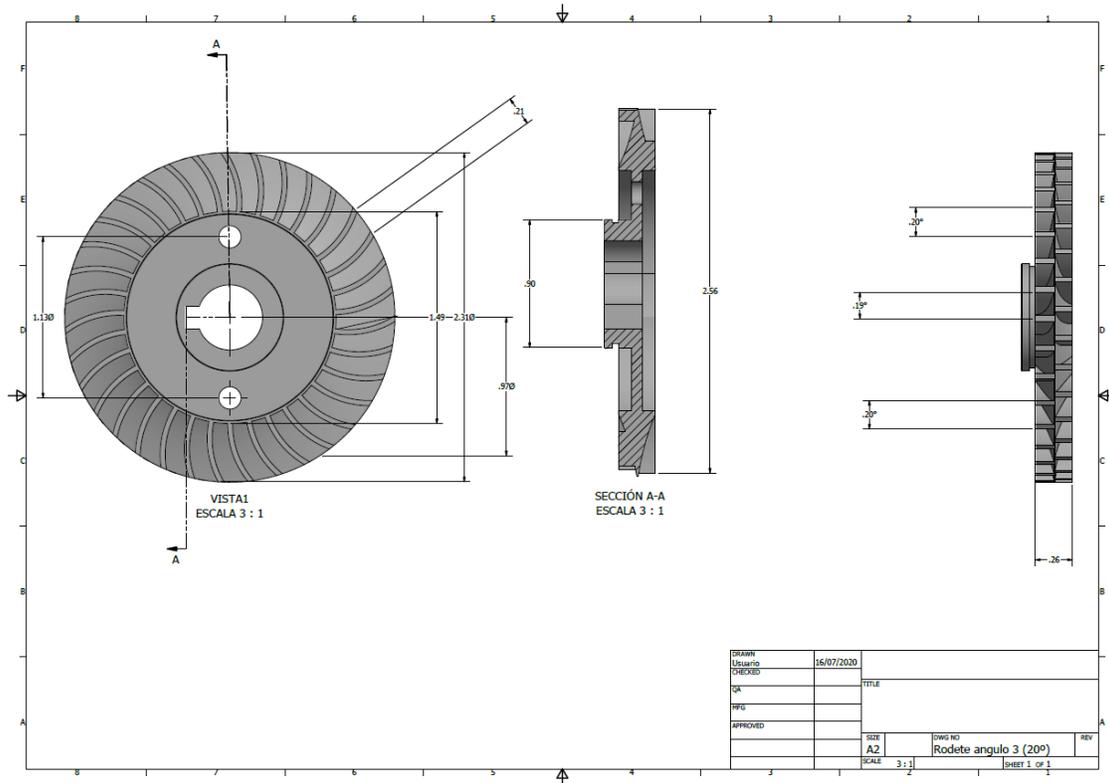
Figura 40: Plano totalmente explosionado carcasa, rodete y eje.



Fuente: Autor, 2020

En la (Fig. 40) se muestran los planos explosionados del conjunto de carcasa, rodete y eje de la bomba centrífuga de 500 wattios, tomados como referencia para el análisis de simulación en el programa CFD.

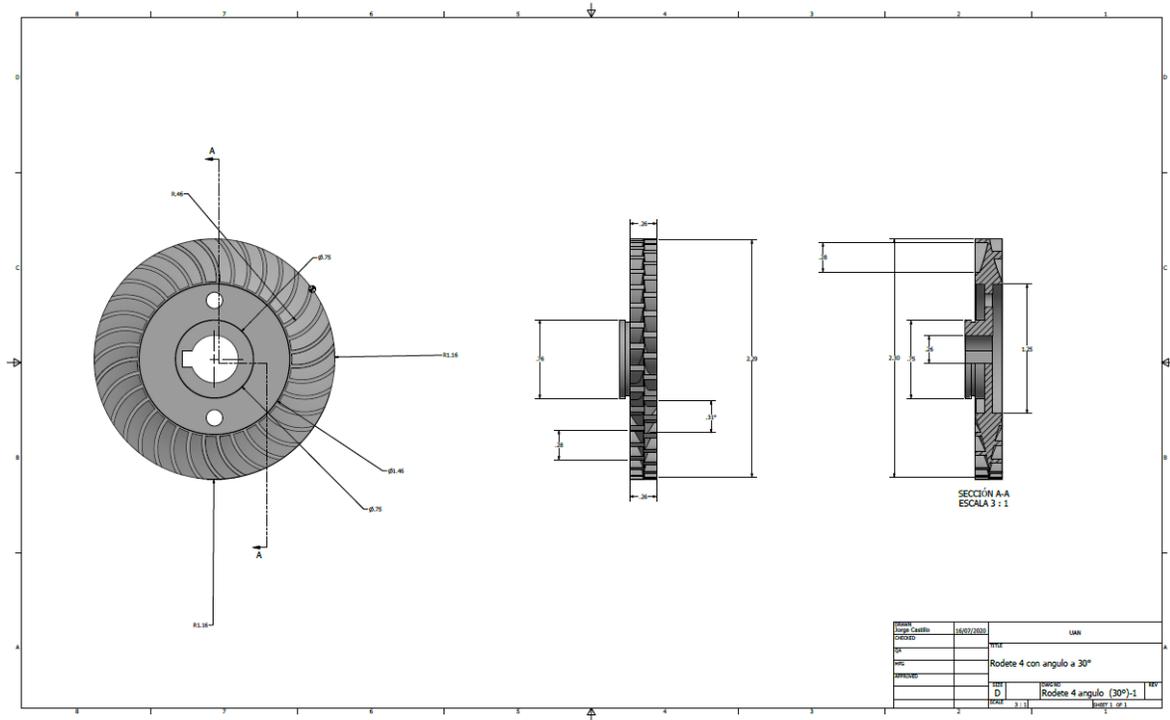
Figura 41: Plano rodete bomba centrífuga con ángulo de 20° en los alabes.



Fuente: Autor, 2020

En la (Fig. 41), se observa la elaboración de planos en el programa Inventor de Autodesk del rodete de una bomba centrífuga con variación en los alabes de los ángulos a 20° grados estos planos inicialmente se realizaron a mano alzada con la herramienta pie del rey.

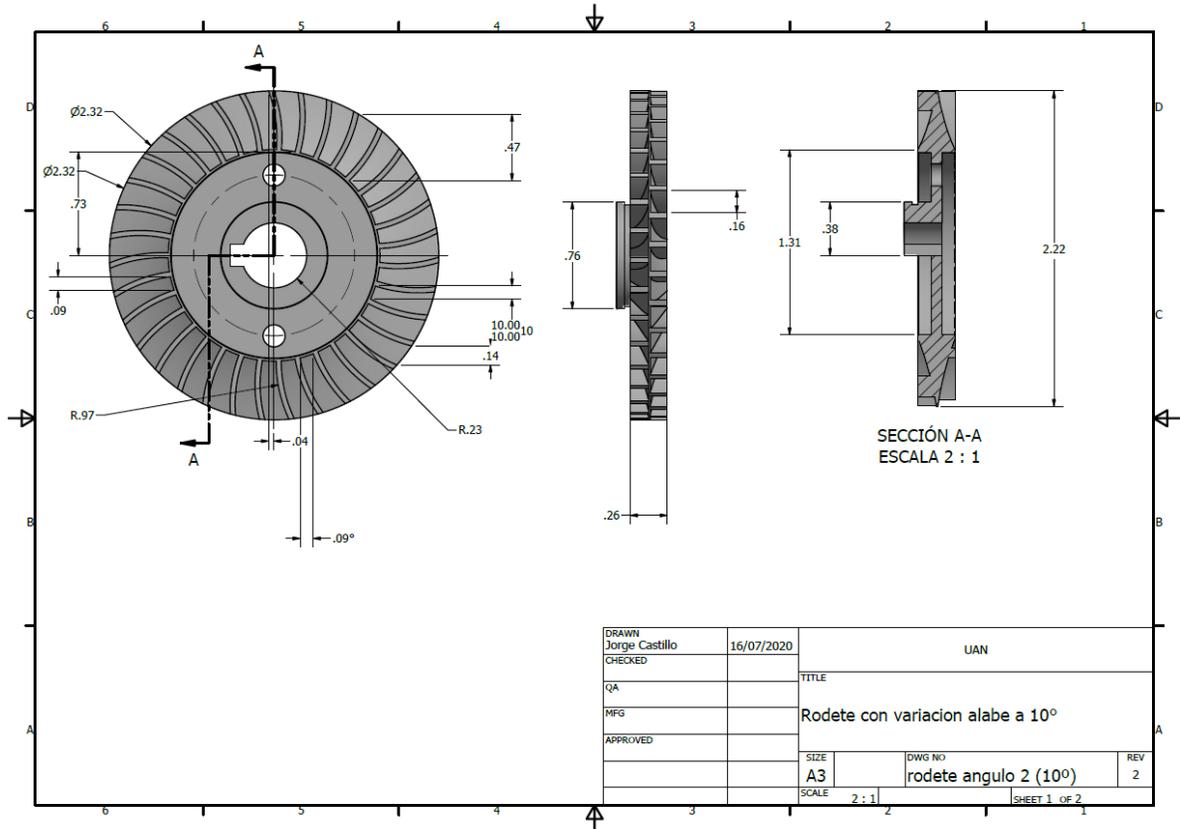
Figura 42: Plano rodete bomba centrífuga con ángulo de 30° en los alabes.



Fuente: Autor, 2020

En la (Fig.42) se describen los planos del rodete de la bomba centrífuga de 500wattios con variación en los ángulos de los alabes a 30° grados diseñados en Inventor.

Figura 43: Plano rodete bomba centrífuga con ángulo de 10° en los alabes.



Fuente: Autor, 2020

La (Fig. 43): muestra los planos diseñados en Inventor, del rodete de una bomba centrífuga de 500 watos. Con variación en el ángulo de los alabes a 10° grados este es uno de los cuatro planos que se diseñaron para la realización de este proyecto.

Bibliografía

- Barreiro, Marcelo (s.f.). “*Introducción a la Dinámica de la Atmósfera*”. Tomado de:
http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/Introduccion_a_la_dinamica_de_la_atmosfera/Teorico_IDA/IDA_Tema5.pdf
- Crane (1988) “*Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*”. McGraw - Hill. México.
- Euston96 (2020) “*Fuerza centrífuga*” tomado de: <https://www.euston96.com/fuerza-centrifuga/>
- Fernández Díez, Pedro. (s.f.). “*Bombas centrífugas y volumétricas*”. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. Tomado de:
http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/bombas-centrifugas-y-volumetricas.pdf
- Fluideco: Dosificación · Sampling · Ingeniería · Control (2019) Qué es una bomba centrífuga. Madrid, España. Tomado de (<https://fluideco.com/que-es-una-bomba-centrifuga/>)
- Full mecánica. “*Lo que hay que saber de una bomba centrífuga*”. Tomado de:
<http://www.fullmecanica.com/definiciones/b/1677-bombas-centrifugas>
- Gómez, Maycon (s.f.). Academia. “*Bomba centrífuga definición*”: Universidad Nacional del Callao, Perú. Tomado de:
http://www.academia.edu/8014551/BOMBA_CENTR%C3%8DFUGA_DEFINICI%C3%93N_Las_Bombas_cent%C3%ADfugas_tambi%C3%A9n_llamadas_Rotodin%C3%A1micas
- Gunt Hamburg. (s.f.) “*Máquinas Fluidomecánicas Hidráulicas, Bombas Centrífugas. Conocimientos básicos bombas centrífugas*”. Tomado de:
http://www.gunt.de/images/download/Conocimientos-bsicos-bombas-centrifugas_spanish.pdf

Herrera Cabra, Carlos Alberto y Puerto Aranzales, Andrés Camilo (2016) *Estudio de los efectos generados por la variación del número de álabes y el ángulo de descarga en un rodete cerrado de entrada radial* de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, Tecnología en Mecánica de Bogotá D.C 2016.

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2010) “*Selección de equipos de transporte de fluidos*”. Ministerio de Industria, turismo y comercio.

Iwase, T.; Sugimura, K. & Shimada, R. (2006). “*Technique for designing forward curved blades fans using CFD and numerical optimization*”, Proc. FEDSM2006, 2006 ASME Joint U.S. – European Fluids Engineering Summer Meeting, July 17-20. Miami (FL) USA. Paper FEDSM2006-98136.

Kuzmin Dmitri. (s.f.) “*Introduction to Computational: Fluid Dynamics*”. Institute of Applied Mathematics University of Dortmund. Tomado de: <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>

Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización. *Tema 6: Bombas Centrífugas*. Tomado de: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/fichero/6+-+BOMBAS+CENTR%C3%8DFUGAS.pdf>

Marchegiani, Ariel R. (2004). “*Bombas centrífugas*”, Universidad Nacional del Comahue facultad de ingeniería, departamento de mecánica aplicada, laboratorio de máquinas hidráulicas (la.m.hi.). Tomado de: <https://adnervillarroel.files.wordpress.com/2013/05/bombas.pdf>

Mendieta de Jesús, Misael (s.f.) Academia.edu. *Impulsión de Aguas Residuales: Bombas para la Impulsión de Aguas Residuales*. Página 1 de 1 Sección 1: Clasificación y Tipos de Bombas. Tomado de: <http://cidta.usal.es/Cursos/redes/modulos/Libros/unidad%209/clasificacion.PDF>

Mendieta de Jesús, Misael (s.f.) Academia.edu. *Impulsión de Aguas Residuales: Bombas para la Impulsión de Aguas Residuales*. Ingeniería Mecánica. Tomado de: https://www.academia.edu/13515930/Impulsi%C3%B3n_de_Aguas_Residuales_Bombas_para_la_Impulsi%C3%B3n_de_Aguas_Residuales

Laín Beatove Santiago, García Ruiz Manuel Julio; Avellan Francois, Quintero Arboleda Brian y Orrego Bustamante Santiago (2008) *Simulación Numérica de Turbinas Francis*. Fondo Editorial Universidad EAFIT – Editorial UAO.

https://www.researchgate.net/profile/Santiago-Lain/publication/260057451_Simulacion_numerica_de_turbinas_Francis/links/59bc5261458515e9cfc7c4d6/Simulacion-numerica-de-turbinas-Francis.pdf

Laín Beatove, Santiago, García Ruiz, Manuel Julio; Quintero Arboleda, Brian y Orrego Bustamante, Santiago (2008) “*Simulación numérica del flujo en turbo máquinas hidráulicas. Estado del arte y fuentes de error. Aplicación a turbinas Francis*”. *Revista Universidad EAFIT*. Vol. 44. No. 152. 2008. pp. 90-114.

<https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/16738/document%20-%202020-08-03T095716.088.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Rosasco, Jorge (s.f.) “*Introducción a La Mecánica de Fluidos, Módulo 6. Flujo Rotacional y Vorticidad*”. Tomado de:

http://www.liruca.com.ar/pluginfile.php/60180/mod_resource/content/1/Mod%2006%2012%20%20flujo%20rotacional%20y%20vorticidad.pdf

Ruiz de Galarreta López, Álvaro (2016) “*Simulación mediante modelos numéricos de una bomba-turbina integral*” Escuela técnica superior de ingeniería (ICAI) Universidad Pontificia Comillas de Madrid España, máster en ingeniería industrial. Tomado de: [repositorio.comillas.edu › bitstream › TFM000615pdf](https://repositorio.comillas.edu/bitstream/TFM000615pdf).

SlideShare (2015) Bomba centrífuga. Tomado de: <https://es.slideshare.net/mayconingarucagomez/bomba-centrifuga>

SlideShare (2015) *Clasificación y funcionamiento de bombas centrífugas* (2015). Tomado de: <https://es.slideshare.net/sirasorett/clasificacin-y-funcionamientos-de-bombas-centrifuga> (2015)

Stern, David P. Nasa (2005). “(23a) *Marcos de referencia*”: La fuerza centrífuga. tomado de: <https://pwg.gsfc.nasa.gov/stargaze/Sstern.htm>

Universidad Industrial de Santander (2019) Escuela de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Sistemas de Transporte y Aprovechamiento de Fluidos. Bombas centrífugas. Grupo J2- el legado del tigre. 17 de marzo del 2019, II semestre académico de

2018. Tomado de: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-del-norte-mexico/mecanica/ensayos/informe-bombas-nota-75/4793317/view>

Vargas Badillo, Santiago Fabián (2015). “*Estudio del fenómeno de la cavitación en una bomba centrífuga de 1 hp y su influencia en los parámetros de rendimiento energético en la facultad de ingeniería civil y mecánica*”, Universidad técnica de Ambato, Ecuador, Tomado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/9352/1/Tesis%20I.%20M.%20236%20-%20Vargas%20Badillo%20Santiago%20Fabi%C3%A1n.pdf>

Vu, T. C.; Nenneman, B.; Ciocan, G. D.; Iliescu, M. S.; Braun, O. & Avellan, F. (2004). “*Experimental Study and Unsteady Simulation of the FLINDT Draft Tube Rotating Vortex Rope*”, Proceedings of the Hydro 2004 Conference. Porto, Portugal, October 16-18.

Vu, T. C. & Shyy W. (1994). “Performance prediction by viscous flow analysis for Francis turbine runners”, ASME J. Fluids Eng., (116). New York, pp. 116-120.

Yepes Piqueras, Víctor (2016) “*Clasificación de las bombas hidráulicas*”. Universidad politécnica de Valencia, España. Tomado de: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/04/04/clasificacion-de-las-bombas-hidraulicas/>