



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**VALORACIÓN ENERGÉTICA DE UNA BOMBA
CENTRÍFUGA FUNCIONANDO COMO TURBINA
MEDIANTE EL REDISEÑO DE LOS ÁLABES**

**TESIS:
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

Ing. Carlos Alberto Molina Tirado

ASESORES:

Dr. Sergio Ricardo Galván González

Dr. Giovanni Delgado Sánchez
Doctorado en Ciencias (Mecánica)



Morelia, Michoacán, octubre de 2024.

Índice

Índice	1
Índice de figuras.....	3
Índice de tablas	4
Dedicatoria y agradecimientos.....	5
Resumen.....	6
Abstract	7
Capítulo 1 Introducción	8
1.1 Introducción	8
1.2 Definición del problema	12
1.3 Estado del arte (Antecedentes).....	14
1.4 Justificación.....	21
1.5 Hipótesis.....	21
1.6 Objetivos	22
Objetivo general	22
Objetivos específicos	22
Capítulo 2 Turbomáquinas.....	23
2.1 Bombas centrífugas	23
2.2 Turbinas hidráulicas	24
2.3 Pump as turbine (<i>PAT</i>).....	26
2.4 Impulsores de bombas centrífugas	28
2.5 Rodetes de turbinas Francis	29
2.6 Ecuación de Euler	33
Capítulo 3 Ingeniería Inversa.....	35
3.1 Introducción a la Ingeniería Inversa en la Turbomaquinaria	35
3.2 Importancia y aplicaciones industriales	35
3.3 Pasos para la ingeniería inversa	36
3.4 Modelado paramétrico (herramientas numéricas).....	39

Capítulo 4 Metodología	42
4.1 Metodología para la generación de un rodete para la <i>PAT</i>	42
4.2 Impulsor cerrado original	43
4.3 Limpieza de la geometría	46
4.4 Obtención y discretización del álabe recto.....	46
4.5 Desplazamiento de los puntos en el espacio	51
4.6 Generación de la superficie media	51
4.7 Generación de la superficie del álabe.....	55
4.8 Montaje del nuevo álabe sobre los discos	57
4.9 Impresión 3d	59
Capítulo 5 Análisis de resultados.....	62
5.1 Banco de pruebas EAFIT Colombia	62
5.2 Obtención de datos	63
Conclusiones y sugerencias	69
Bibliografía	70

Índice de figuras

Figura 1. 1. Triángulos de velocidades en una PAT	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1. 2. Triángulos de velocidades en una PAT con álabes de turbina	10
Figura 1. 3. CAD del impulsor de la bomba objeto de estudio.....	12
Figura 1. 4. Curva característica de la bomba [46].....	13
Figura 1. 5. Gráficas de comparación Original vs Creado especial [13].....	15
Figura 1. 6. Impulsores utilizados para las pruebas [15]	16
Figura 1. 7. a) Borde original b) Borde redondeado [15]	16
Figura 1. 8. Bomba con los impulsores testeados en simulación [15].....	17
Figura 1. 9. Campo de velocidades para dos distintos espesores [30].....	18
Figura 1. 10. Obtención del álabe reconstruido [1]	19
Figura 1. 11. Reconstrucción de la corona y banda del rodete al momento de revolucionar el álabe recto [2].....	20
Figura 2. 1. Diseño de bomba centrífuga [31]	23
Figura 2. 2. a) Turbina Francis b) Rodete de turbina Francis [35]	25
Figura 2. 3. Cuerpo hidráulico de una bomba centrífuga	28
Figura 2. 4. Tipos de impulsores para las bombas centrífugas.....	29
Figura 2. 5. Triangulo de velocidades a la entrada para diversos valores de β_1 [39].....	30
Figura 2. 6. Figura 2.5. Rodete Francis lento $\beta > 90$ [39]	30
Figura 2. 7. Rodete Francis Normal $\beta = 90$ [39].....	31
Figura 2. 8. Rodete Francis rápido $\beta < 90$ [39].....	32
Figura 2. 9. Triángulos de velocidades para la entrada y salida de flujo de una bomba centrífuga	34
Figura 2. 10. Triángulos de velocidades para la entrada y salida de flujo para una turbina.....	34
Figura 3. 1. Marco general de la reconstrucción de una pieza utilizando ingeniería inversa [41]	37
Figura 3. 2. Relación entre el plano lógico y el plano físico [1].....	40
Figura 4. 1. Algoritmo de generación de un nuevo rodete para las PATs	42
Figura 4. 2. Datos técnicos de la bomba	43
Figura 4. 3. Escaneo de la bomba con precisión de hasta 0.04 mm	44
Figura 4. 4. Modelo computacional del impulsor tras ser escaneado	45
Figura 4. 5. Impulsor real montado en la bomba	45
Figura 4. 6. Corrección de errores de escaneo	46
Figura 4. 7. a) Impulsor completo; b) Impulsor partido a la mitad con SolidWorks.....	47
Figura 4. 8. a) Vista del álabe recto en el impulsor. b) Álabe recto discretizado con una serie de puntos en sus 4 fronteras	48
Figura 4. 9. a) Rodete Francis 99; b) Álabe recto del rodete Francis 99	49
Figura 4. 10. Línea media del álabe principal de la turbina Francis 99 (Acercamiento al borde de salida)	49
Figura 4. 11. Angulo α formado por los vectores AC y AB pertenecientes a las direcciones hacia el Marco del álabe principal y el marco recto del rodete respectivamente.....	50
Figura 4. 12. a) Desplazamiento de cada punto del álabe recto; b) Marco obtenido para la PAT	51

Figura 4. 13. a) Sentido de extracción de datos y los nombres de los sentidos lógicos del álabe.	52
Figura 4. 14. a) Algoritmo para la generación de la superficie media.....	53
Figura 4. 15. a) Superficie media del álabe (Malla 100 x 100)	54
Figura 4. 16. Perfil original del álabe de la bomba.....	55
Figura 4. 17. Proyección del perfil a lo largo de la superficie.....	56
Figura 4. 18. Generación de las superficies del álabe (densidad 100×100).....	56
Figura 4. 19. Montaje y revolución del álabe sobre los discos	58
Figura 4. 20. Segmentación previa del rodete en programa	60
Figura 4. 21. Fases de la impresión 3D.....	61
Figura 5. 1. Diagrama esquemático del banco de pruebas [45].....	62
Figura 5. 2. Potencia hidráulica.	65
Figura 5. 3. Potencia mecánica	65
Figura 5. 4. Colina de operación.....	66
Figura 5. 5. Curva “S”	68

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Datos técnicos de la bomba objeto de estudio [12].....	13
Tabla 4. 1. Cantidad de puntos por lado	48

Dedicatoria y agradecimientos

Este proyecto está dedicado a mis condiciones materiales y, a mi deseo constante de progreso cuyos orígenes se asemejan a las corrientes ocultas que guían un río desde su fuente misteriosa. Estas aspiraciones han sido mi fuente de fortaleza, paciencia y sabiduría para llevarlo a cabo. Agradezco profundamente el apoyo inquebrantable de mi familia, todos ellos ingenieros y personas excepcionales, así como del equipo de trabajo que me ha acompañado en este camino hacia el conocimiento y la innovación.

A mis padres, Mónica Tirado Garibay y Alfonso Molina Estrada, les debo gracias infinitas por su papel fundamental en este proyecto. Su apoyo, comprensión y dedicación han sido esenciales para superar los obstáculos y alcanzar este logro significativo. A mis abuelos, Elodia Garibay, Sacramento Tirado, Alfonso Toledo y María Cervantes, quienes fueron pilares fundamentales en mi desarrollo personal y académico, brindándome un apoyo incondicional cuando estuvieron en mi vida

A mi hermano José Alfonso Molina Tirado, le agradezco especialmente por el constante sentido de competencia personal entre nosotros, un estímulo que ha enriquecido mi camino y ha alimentado mi motivación en este proyecto.

A los distinguidos académicos Dr. Sergio Ricardo Galván González y Dr. Giovanni Delgado Sánchez, les expreso mi más sincero agradecimiento por su orientación experta y paciencia incansable a lo largo de cada etapa de este trabajo. Su compromiso con la excelencia académica y su profundo conocimiento en ingeniería mecánica han sido fundamentales para enriquecer mi aprendizaje y desarrollo profesional.

Al equipo colaborador, en especial al Dr. Francisco Javier Domínguez Mota por su habilidad para transmitir conocimientos y guiar el desarrollo matemático de esta metodología, así como a Luis David Martínez Hernández por su dedicación, tiempo y apoyo en enseñarme el uso de software avanzado, un aspecto crucial para este proyecto de investigación; a Fernando Salgado Delgado y María Goretti Gama Guzmán por su constante colaboración y apoyo en este trabajo. También agradezco a mis amigos por su apoyo incondicional y su presencia constante en los momentos más desafiantes, a la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM) por brindarme la oportunidad de formar parte de esta prestigiosa institución académica y por su respaldo durante mi formación profesional, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su invaluable apoyo a los investigadores y su significativa contribución a la realización de proyectos científicos y tecnológicos de alto impacto. Finalmente, si existe alguna entidad superior, agradezco por guiar mis pasos y permitirme alcanzar esta meta.

Resumen

Las bombas centrífugas pequeñas son utilizadas como turbinas hidráulicas en muchos países del mundo, resultan una buena fuente de energía renovable para las zonas rurales o con deficiencia en el suministro de energía eléctrica.

Las *PAT* (Pump as Turbines) o bien *BCT* (bombas como turbina) forman parte de centrales hidroeléctricas de micro generación de energía y han demostrado varias ventajas sobre las turbinas hidráulicas tradicionales, como baja complejidad, menor costo, fácil instalación y debido a su producción masiva una gran disponibilidad de refacciones y tamaños de bomba para una amplia gama de alturas y caudales.

La optimización de los impulsores de las para obtener un mejor rendimiento al emplearse como turbinas resulta un dilema que a falta de universidades o empresas que investiguen sobre el tema se limita el conocimiento al respecto, es por eso que en este trabajo se desarrolla una metodología en donde se adaptan algoritmos propios desarrollados en la *FIM* y *FCFM* de la *UMSNH* para la adaptación geométrica del impulsor de una bomba.

Este trabajo emplea la ingeniería inversa basándonos en la geometría original de la turbina Francis 99 y de la turbina de la central eléctrica de Tirio Michoacán para así, hacer una adaptación del impulsor de la bomba para convertirlo en rodete. Esto comprende la limpieza y simplificación de la geometría actual, la discretización de la superficie, la manipulación de datos, la aplicación de herramientas numéricas y finalmente la manufactura de los nuevos rodetes para ser probados en laboratorio.

Palabras clave:

1. Bomba
2. Turbina
3. Ingeniería Inversa
4. Algoritmos
5. Geometría

Abstract

Small centrifugal pumps are used as hydraulic turbines in many countries around the world, and are a good source of renewable energy for rural areas or those with a shortage of electricity.

PATs (Pumps as Turbines) or BCTs (pumps as turbines) are part of micro-generation hydroelectric power plants and have demonstrated several advantages over traditional hydraulic turbines, such as low complexity, lower cost, easy installation and, due to their mass production, a wide availability of spare parts and pump sizes for a wide range of heights and flows.

The optimization of impellers to obtain better performance when used as turbines is a dilemma that, due to the lack of universities or companies that research the subject, limits knowledge on the subject. This is why in this work a methodology is developed in which the programming algorithms proposed by Delgado Sánchez [1] and Fernando Salgado [2] are adapted for the geometric adaptation of the impeller of a pump. This work uses reverse engineering based on the original geometry of the Francis 99 turbine and the turbine of the Tirio Michoacán power plant in order to adapt the pump impeller to convert it into a runner. This includes cleaning and simplifying the current geometry, discretizing the surface, manipulating data, applying numerical tools and finally manufacturing the new runners to be tested in the laboratory.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

En México, la investigación y estudio sobre turbomáquinas es realizada por pocas instituciones académicas, centros de investigación y empresas especializadas en el sector de energía, a pesar que en América Latina y el Caribe somos el segundo país más industrializado, hace falta empeño en la investigación y generación de tecnología para el desarrollo innovador de la turbomaquinaria.

En el año 2019 el 29% electricidad mundial producida fue por parte de fuentes renovables, precisamente tan solo de plantas hidroeléctricas fue una potencia de 1,330 gigavatios (GW) que representa el 2.5% del total de energía producida [3]. Tan solo en México existen un total de 731 centrales hidroeléctricas destinadas al servicio público de energía eléctrica, éstas se encuentran distribuidas en 16 estados de la República, y en conjunto suman una capacidad de 12,303 MW, cantidad que representa el 22.5% de la capacidad total [4].

Sin embargo, también la construcción de centrales hidroeléctricas a gran escala tiene un impacto negativo sobre el medio ambiente como propiciar la reubicación de residentes locales, que es un proceso social bastante complejo [5]. Además, en las zonas rurales, debido a las largas distancias y terrenos montañosos, el enfoque tradicional para suministrarles electricidad resulta muy costoso.

Debido a esto, las micro centrales hidroeléctricas de una capacidad no superior a 25 MW resultan una solución popular para aprovechar el potencial de energía hidráulica en zonas rurales [6]. También las micro centrales tienen el factor de capacidad más alto en comparación con otros tipos de sistemas de generación de energía, por ello, conllevan el retorno de la inversión más rápido y el ciclo de vida a un más bajo costo [7].

Un componente crucial en los sistemas hidroeléctricos es la turbina que, usualmente se fabrica a gran escala por que se obtiene un mayor costo-beneficio. Las turbinas de pequeña escala resultan mucho más caras y difíciles de conseguir debido a su baja demanda y poco desarrollo de su proceso de producción, por eso, la bomba como turbina (*PAT*) resulta una opción viable para sustituir las turbinas pequeñas y convencionales. También, gracias a la demanda del público para la adquisición de bombas, su diseño, fabricación y producción está mucho más maduro y desarrollado. Esto resulta favorable por que se aminoran los costos de fabricación y mantenimiento, así como también se facilita la obtención de refacciones. El análisis anual del costo del ciclo de vida entre la tecnología *PAT* y la turbina Francis ha validado un menor costo por parte de la primera, [8].

Aunque definitivamente, debido a que una bomba centrífuga naturalmente está diseñada para añadir energía al fluido, es preciso pensar que estableciendo un flujo inverso para extraer energía funcione de manera deficiente porque su carcaza y su impulsor no fueron inicialmente diseñados para esta función. A pesar de esto, [9] con sus pruebas, reportó que el PMO (Punto de Mejor Operación) de una bomba centrífuga operada en modo bomba es del 70 % y en modo turbina del 35,45 %.

Del último porcentaje (modo turbina) más del 50% es propiciado por las pérdidas hidráulicas del impulsor

[10], porque está diseñado para girar hacia adelante sin tener en cuenta su funcionamiento hacia atrás en modo turbina.

El rendimiento ideal de una bomba y de una turbina puede analizarse con la ecuación de Euler y los triángulos de velocidades. Con la ec. (1.1), se muestra la forma para obtención de trabajo de flecha.

$$T_{flecha} = \rho Q(r_2 V_{1,t} - r_1 V_{2,t}) \quad (1.1)$$

En la Fig. 1.1 se muestra la geometría comúnmente utilizada para las bombas, también los triángulos de velocidades a la entrada y a la salida funcionando en modo turbina donde, el subíndice 1 indica entrada de flujo y el subíndice 2 salida de flujo, también las letras C, W, V_n , V_t y U que indican la velocidad absoluta, velocidad relativa, velocidad normal, velocidad periférica y velocidad tangencial, respectivamente.

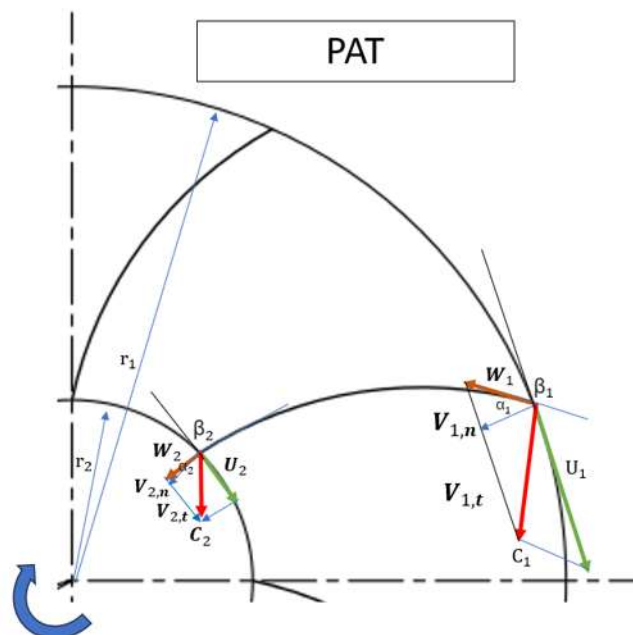


Figura 1.1. Triángulos de velocidades en una PAT

Las bombas con los álabes curvados hacia atrás son las más comunes porque proporcionan la más alta eficiencia en su funcionamiento como bomba. Desafortunadamente esto resulta contraproducente en su funcionamiento como turbina [11], de hecho, un impulsor especial con álabes curvados hacia adelante puede mejorar drásticamente el rendimiento de la PAT por que el

ángulo de entrada coincide más con el flujo de salida de la voluta, [11].

De acuerdo con la ec. (1), técnicamente la densidad es constante, el caudal es dado por la fuente hídrica y los radios r_1 y r_2 podrían modificarse con un impulsor de distinto tamaño. En este trabajo, ya que se pretende conservar el tamaño y la forma de la voluta original, estos radios serían los del impulsor.

Lo que se puede modificar entonces son las $V_{2,t}$ y $V_{1,t}$, por lo tanto, para obtener el máximo trabajo de flecha en modo turbina es cuando $V_{1,t}$ es máximo y cuando $V_{2,t} < 0$, es decir, cuando existe movimiento giratorio invertido, [15].

Se observa en la Fig. 1 que, por la geometría de álabe, el ángulo α es grande a la entrada y pequeño a la salida, esto hace que la velocidad radial $V_{1,t}$ sea pequeña y $V_{2,t}$ relativamente grande.

En cambio, si se modifica el álabe como la geometría tradicional de una turbina con los álabes orientados en sentido contrario a la rotación (curvados hacia adelante) se obtendrían los triángulos de velocidades que se muestra en la Fig. 1.2.

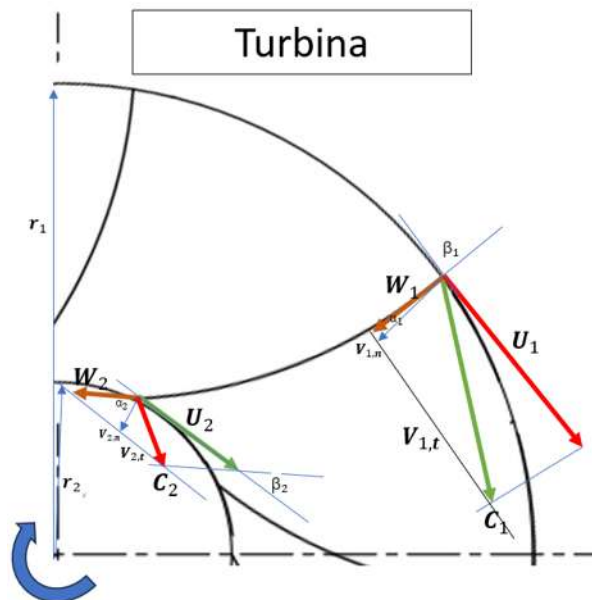


Figura 1. 1. Triángulos de velocidades en una PAT con álabes de turbina

Nótese que en el mismo sentido de rotación α es pequeño a la entrada y grande a la salida, lo que arroja un $V_{1,t}$ grande y un $V_{2,t}$ pequeño, así, mediante la ec. (1) se obtiene el mayor trabajo de flecha por parte de la PAT.

De la Fig. 2 también podemos deducir que entre más orientado esté el álabe en dirección del sentido de giro, menor es el ángulo β y habrá mayor transferencia de energía.

Por la gran influencia que tiene el impulsor en el funcionamiento como turbina, la utilización de métodos basados en fundamentos matemáticos y el empleo de la ingeniería inversa resulta útil para la modificación de la geometría del impulsor.

Así, el propósito de este trabajo es determinar si modificando el impulsor de una PAT, a través de la

modificación del álabe, asemejándolo a la geometría de alguna de las turbinas más utilizadas alcanzaría un mejor rendimiento.

Para ello se adaptaron los algoritmos y subalgoritmos creados en la FIM-FCFM de la UMSNH y propuestos por [1] y [2]. Dichos algoritmos fueron desarrollados con MATLAB®, un software con una gran capacidad para el procesamiento de datos y con una buena flexibilidad en la manipulación ellos.

Los resultados obtenidos revelaron que efectivamente el diseño del rodete y su manufactura a partir de los procesos de impresión 3D pueden generar excelentes resultados en la transformación de energía para las *PATs*.

1.2 Definición del problema

Las bombas centrífugas no están diseñadas para funcionar como turbinas por lo tanto cuando se les establece un flujo inverso existe un bajo rendimiento, vibración y el desprendimiento de la capa límite del fluido. Todo esto provoca un bajo aprovechamiento de la energía del fluido.

El impulsor es una parte fundamental de una bomba centrífuga, ya que es el componente encargado de transformar la energía mecánica en energía hidráulica, por lo tanto, modificar su forma y su diseño para que haga una función contraria (convertir energía hidráulica a energía mecánica) se debe hacer con especial cautela ya que su modificación influirá en la eficiencia y rendimiento en su actual modo turbina.

En la Fig. 1.3 se muestra el impulsor objeto de estudio donde se puede observar que los alabes tienen especial geometría curvada hacia atrás para su funcionamiento como bomba.

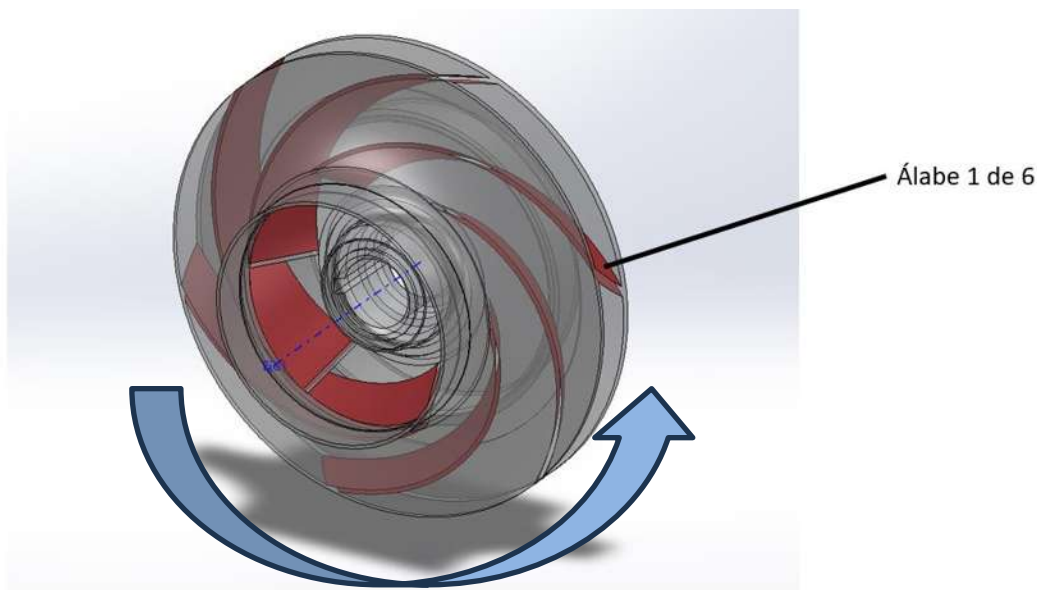


Figura 1. 2. CAD del impulsor de la bomba objeto de estudio

Con esta curvatura de los álabes y el sentido de rotación de acuerdo a la ecuación de Euler hay una baja transferencia de energía del fluido al impulsor (funcionando como rodete). Por ende, es necesario hacer modificaciones para mejorar su desempeño.

El impulsor que se modifica en este trabajo pertenece a una bomba centrífuga marca *Goulds*, del modelo 5SH 2 x 2 ½ x 6 con un motor de 1.5 HP. El fabricante no proporciona información sobre los parámetros geométricos, aunque su curva de operación y sus datos técnicos son los mostrados en la Fig. 1.2.

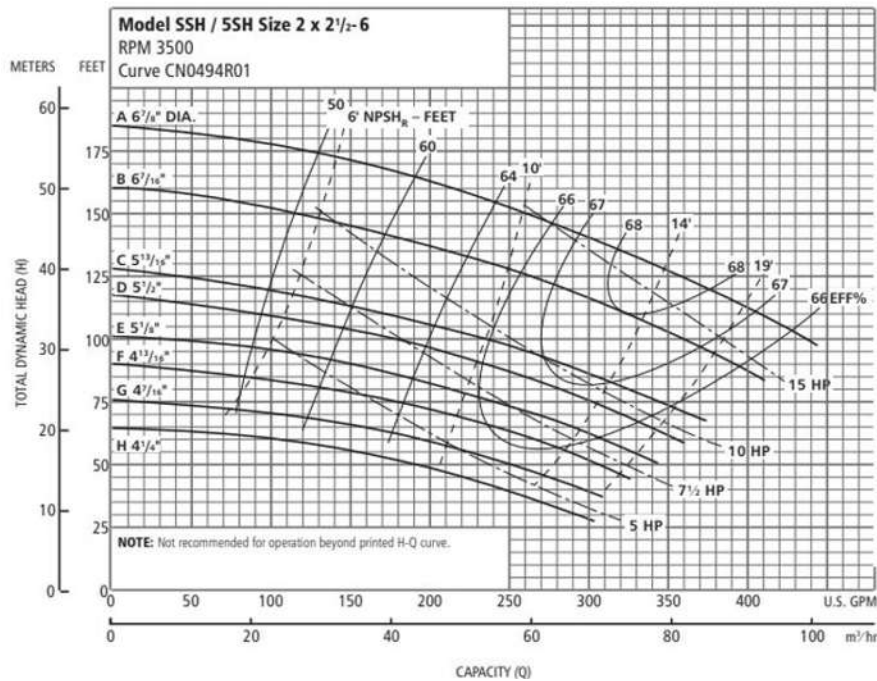


Figura 1. 3. Curva característica de la bomba [46]

Datos técnicos	Bomba centrífuga marca <i>Goulds</i> con base metálica y guarda acople
Modelo	5SH 2 x 2 1/2 x 6
Condiciones de operación	160 GPM @ 20 pies de columna de agua
Motor	TEFC 1.5 HP, 3 HP, 220/240 Volts, 1750 RPM
Impulsor	Impulsor para 5SH 13/16" de diámetro

Tabla 1. 1. Datos técnicos de la bomba objeto de estudio, [12]

1.3 Estado del arte (Antecedentes)

El álabe es un componente fundamental en la turbomaquinaria ya que desempeña un papel crucial en el funcionamiento tanto de bombas como de turbinas. La geometría de los álabes varía significativamente dependiendo de si pertenecen a una bomba o a una turbina. Además, existen diferencias geométricas incluso entre los subtipos dentro de estas dos categorías principales, como las bombas centrífugas, bombas axiales, turbinas de vapor y turbinas hidráulicas. En muchos casos, los álabes presentan formas complejas que dificultan su modelado y análisis de desempeño.

Una línea de investigación muy activa se centra en mejorar los álabes en las bombas que funcionan como turbinas (*PATs*) para aumentar su eficiencia. Este campo de estudio abarca diversas metodologías, incluyendo herramientas numéricas, ingeniería inversa y diferentes tipos de pruebas experimentales. La optimización de los álabes puede implicar el ajuste de su curvatura, ángulo de ataque, y perfil aerodinámico, con el fin de maximizar el rendimiento energético y minimizar las pérdidas por fricción y turbulencia.

En los antecedentes de este trabajo, se presentarán diversas metodologías, modificaciones y pruebas realizadas a bombas que han sido transformadas en turbinas. La recopilación de esta información es crucial, ya que permite comprender los avances en este ámbito y valorar de manera objetiva la contribución del presente trabajo a dicho campo. Comprender estos antecedentes también ayuda a identificar las mejores prácticas y enfoques más prometedores para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos.

Por ejemplo, en [13] se logró mejorar la eficiencia de una *PAT* mediante una investigación teórica exhaustiva. Utilizando la ecuación de Euler tanto en la entrada como en la salida, se diseñó un “impulsor especial” con las palas curvadas hacia adelante. Este diseño buscaba optimizar el flujo de fluido y mejorar la conversión de energía cinética en trabajo útil. Se llevaron a cabo pruebas utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD*) para comparar el rendimiento del impulsor especial con álabes curvados hacia adelante y el impulsor original de fábrica con álabes curvados hacia atrás.

Los resultados mostraron que, con una velocidad específica inicial de 18.1 y otras velocidades específicas para diferentes bombas, las eficiencias máximas de los impulsores especiales aumentaron significativamente. Este incremento en eficiencia se traduce en una mayor producción de energía y una operación más económica y sostenible de las turbomáquinas. Además, se encontró que el caudal experimental en el Punto de Mejor Eficiencia (*BEP*) estaba muy cerca del caudal de diseño teórico, lo que indica que las expresiones presentadas en el artículo proporcionan un método eficaz para predecir el caudal del *BEP* en modo turbina.

En la Fig. 1.5, se presentan dos gráficas que comparan el desempeño del impulsor original con el del impulsor especial creado. Las gráficas muestran las relaciones entre altura (H) y caudal (Q), trabajo (W) y caudal (Q), y eficiencia (η) y caudal (Q). Estas comparaciones visuales son esenciales para entender cómo las modificaciones en el diseño de los álabes afectan el rendimiento general de la turbomaquinaria.

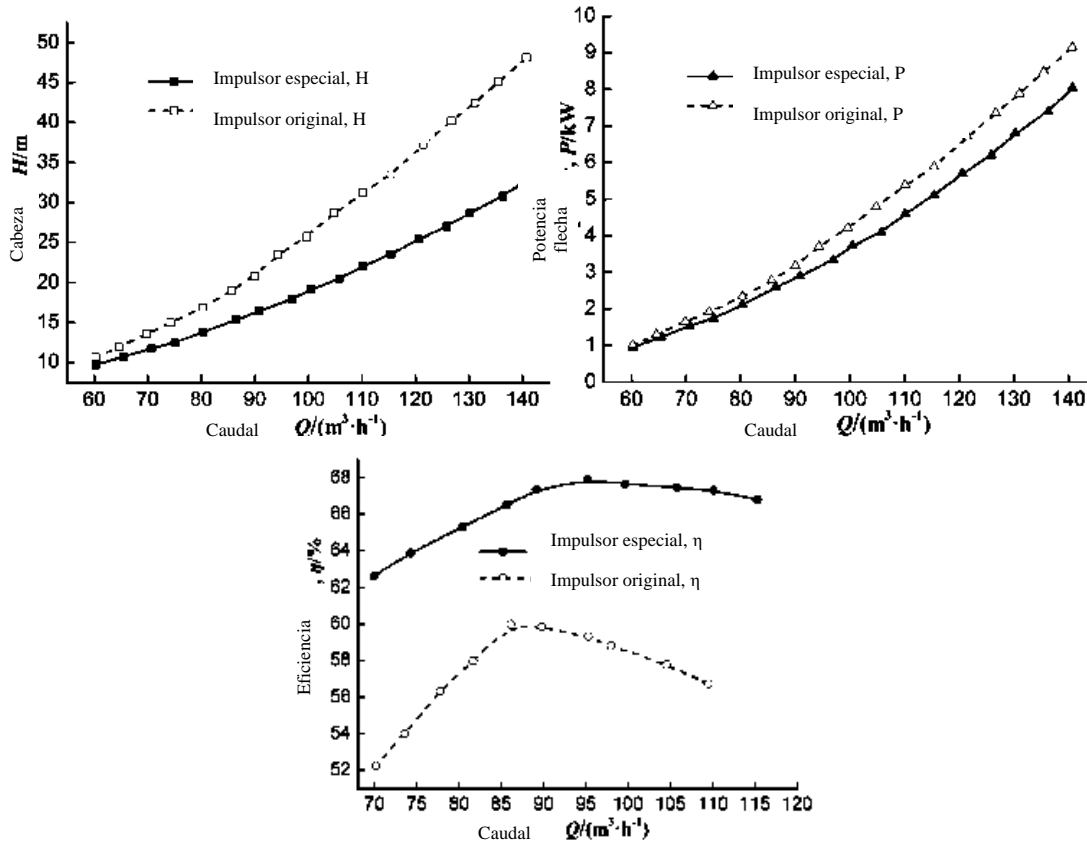


Figura 1. 4. Gráficas de comparación Original vs Creado especial, [13]

Denotando así con estas gráficas que el impulsor especial con los álabes curvados hacia adelante resulta tener un mejor desempeño que el impulsor original con los álabes curvados hacia atrás.

En [14], se realizó experimentación con una PAT con una velocidad de rotación entre 900 y 1500 RPM con 3 rodetes distintos; el original, y recortados al 10% y 20%, también se encontró que el rendimiento de la PAT era el mejor en el rango de velocidad de 1000 a 1200 RPM y que el redondeo en el borde de entrada aumenta del 3% al 4% la eficiencia a la velocidad nominal con el impulsor existente. A continuación, se muestran los impulsores utilizados en dicho estudio.



Figura 1. 5. Impulsores utilizados para las pruebas, [15]



Figura 1. 6. a) Borde original b) Borde redondeado, [15]

La máxima eficiencia fue de 76.93% a 1100 rpm y con el rodete recortado al 10% incluyendo los bordes redondeados.

En [15] se estudió el efecto del número de palas del impulsor de una bomba como turbina, se utilizó el software comercial ANSYS CFX. La estudiada bomba tiene una velocidad específica de 70 y un diámetro de impulsor de 21.4 cm. El número original de álabes del impulsor de fábrica era de 6, el cual se varió a 5, 7 y 8 manteniendo todas las otras dimensiones geométricas sin cambio alguno. Los resultados de la simulación revelaron que la mayor eficiencia se logra con 7 álabes llegando a $\eta = 76.24\%$; sin embargo, se encontró también que el número de álabes adicionales reduce el área por donde va la trayectoria del flujo, propiciando así mayormente el efecto bloqueo que es indeseable y disminuye la potencia neta generada por el impulsor.

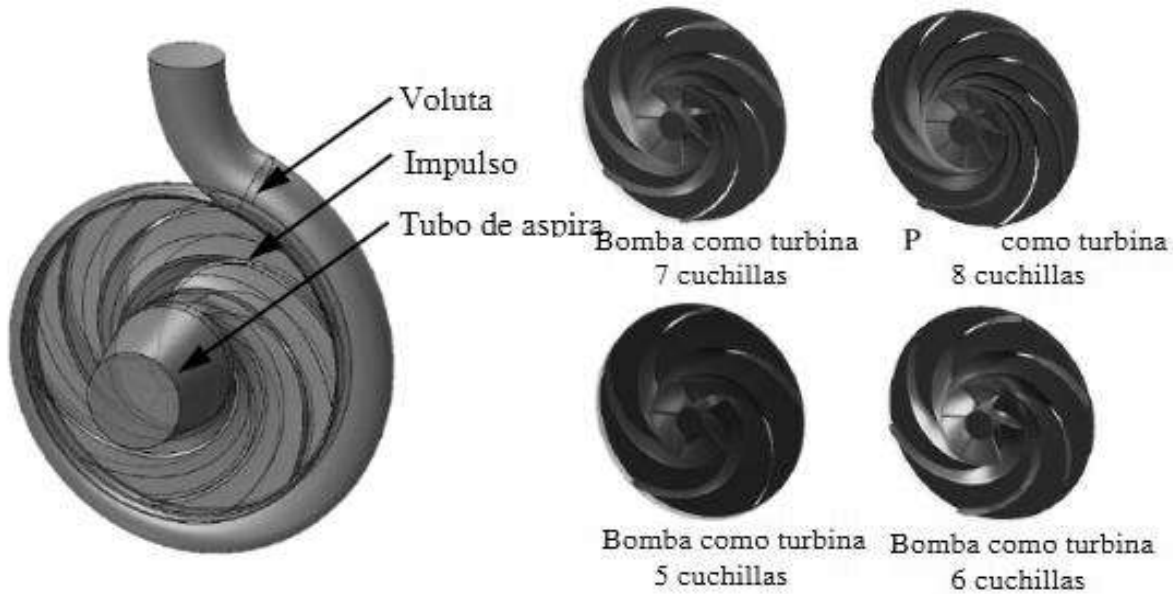


Figura 1. 7. Bomba con los impulsores testeados en simulación, [15]

Sin embargo, también en [16], se estudió el número de álabes guía de un impulsor arrojando que la fuerza radial se reduce y también se vuelve más simetría y homogénea. La recomendación óptima del autor es incluir 9 álabes guía en el impulsor.

En [17] se estudió numéricamente el efecto que tiene el espesor del álabe de la PAT sobre tres velocidades específicas. Arrojando en el análisis de distribución de pérdidas hidráulicas que la pérdida hidráulica total dentro de PAT aumenta al aumentar el espesor de la hoja.

Por lo tanto, la eficiencia disminuye al aumentar el espesor del álabe y debido a esto debe ser lo más delgado posible. A comparación se muestra el campo de velocidades para dos distintos espesores de álabe, en donde el caudal es el mismo en ambos casos. Puede verse en la Figura 1.9 que la velocidad dentro del impulsor aumenta al aumentar el espesor de la pala. La hidráulica local y de fricción es proporcional al cuadrado de la velocidad; por lo tanto, su pérdida hidráulica dentro del impulsor aumenta al aumentar el espesor de la pala

Todos los estudios anteriores son relacionados a modificaciones tanto en la curvatura, número y espesor de los álabes, pero ninguno aún ha insertado aún la geometría del álabe de alguna turbina

funcional en la PAT. Esto es lo que se propone en este trabajo y para realizarlo se utiliza una metodología para la reconstrucción de álabes de turbina.

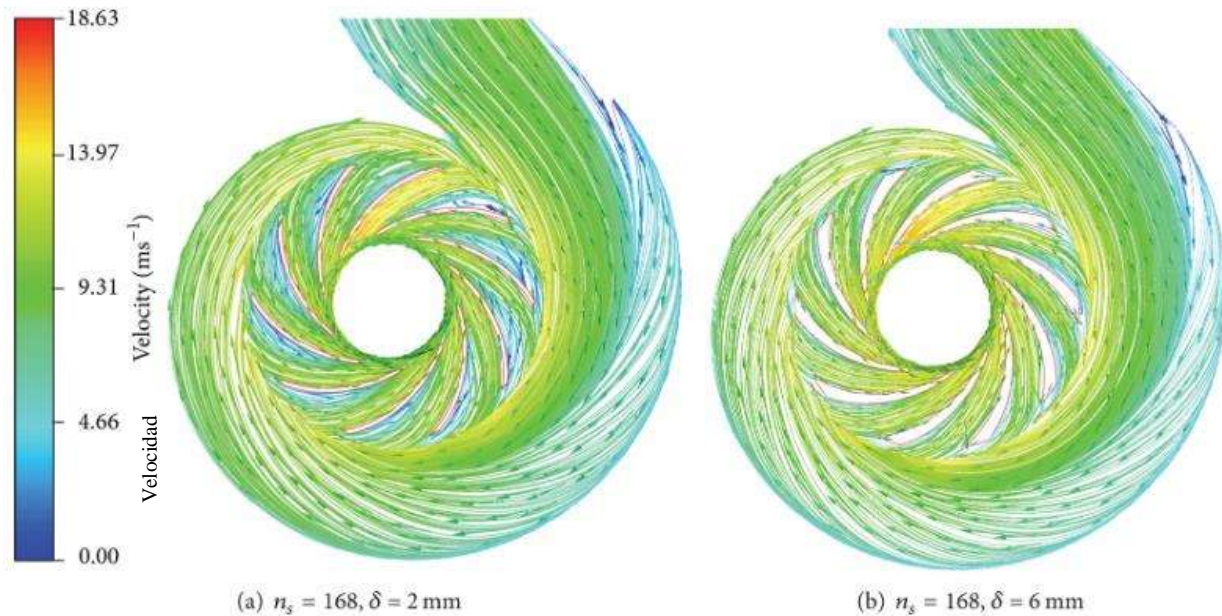


Figura 1. 8. Campo de velocidades para dos distintos espesores, [30]

En [1], se enfoca en la reconstrucción de álabes de turbinas hidráulicas, enfocándose mayormente en los álabes del tipo Francis. La metodología se divide en tres pilares principales: Extracción, Reconstrucción y Evaluación, donde ofrece una solución integral para recuperar modelos CAD originales de álabes dañados o desgastados. Es decir, con la obtención de un mínimo número de datos discretos, se puede generar una nube de datos ordenados de tal manera que represente la geometría del alabe., como se muestra en la Fig. 1.10. En la etapa de extracción, se diseñaron algoritmos especializados que permiten extraer las características principales del álabe. Estos algoritmos utilizan técnicas avanzadas de generación de mallas numéricas y corte de superficies para obtener los datos necesarios para el proceso de reconstrucción. La generación de mallas numéricas implica dividir la superficie del álabe en pequeños elementos que facilitan el análisis y la manipulación de su geometría. El corte de superficies, por otro lado, permite obtener secciones transversales detalladas del álabe, proporcionando una visión más precisa de su estructura interna y externa.

La etapa de Reconstrucción propone una metodología numérica en 3D para reconstruir la geometría del álabe. Lo destacado de esta metodología es su independencia de los parámetros de diseño, lo que permite una definición continua y suave de la superficie del álabe. Esto significa que, a diferencia de otros métodos que dependen de parámetros predeterminados. Esta técnica puede adaptarse a diversas formas y tamaños de álabes, ofreciendo una mayor flexibilidad, lo que contribuye a una reconstrucción más realista y completa de los álabes dañados o desgastados,

permitiendo que se recupere su forma original con alta precisión.

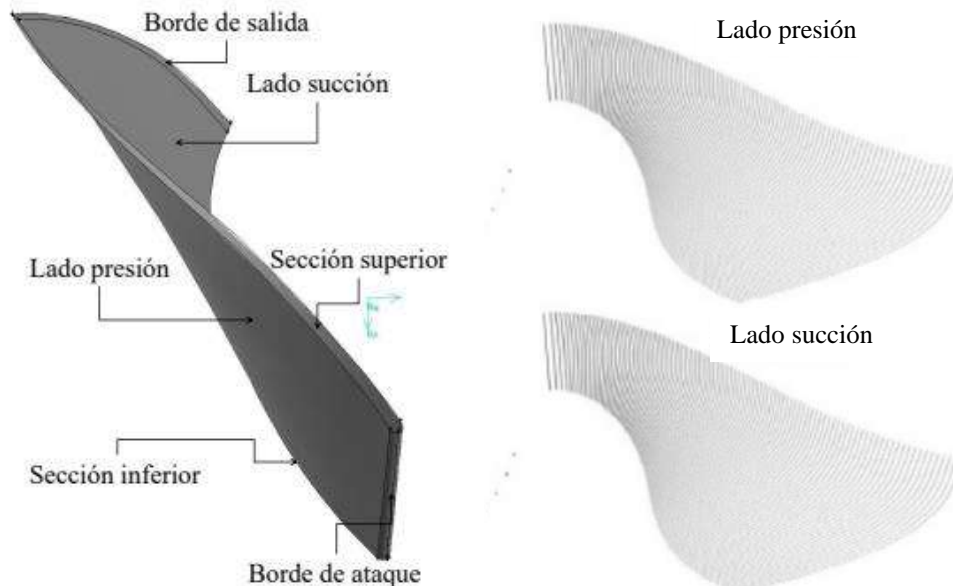


Figura 1. 9. Obtención del álabe reconstruido, [1]

a) Álabe original en modelo CAD

b) Nube de puntos posterior a la aplicación de herramientas numéricas

En la etapa de Evaluación, se lleva a cabo una comparación entre la superficie reconstruida y la superficie real del álabe para evaluar la precisión de la reconstrucción. Se utiliza un algoritmo de distancia de superficie que mide la discrepancia entre ambas superficies. Este algoritmo calcula las diferencias punto por punto entre la superficie reconstruida y la real, proporcionando una medida cuantitativa de la exactitud del proceso de reconstrucción. Los resultados obtenidos demuestran que la metodología de reconstrucción numérica propuesta puede ser utilizada de manera efectiva para recuperar las características de forma de álabes dañados o desgastados, lo que la hace atractiva para aplicaciones industriales y de optimización.

En cuanto a los alcances del artículo, se destaca que la metodología propuesta se enfoca en la reconstrucción numérica de las geometrías complejas de los álabes del rodete Francis, consideradas superficies de forma libre. La metodología se distingue por su capacidad de lograr una definición continua y suave de la superficie del álabe, independiente de los parámetros de diseño. Esto es particularmente útil en el contexto de las turbinas hidráulicas, donde la geometría precisa de los álabes es crucial para el rendimiento eficiente de la máquina. Asimismo, se ha demostrado que la metodología puede ser utilizada exitosamente para recuperar las características de forma de álabes dañados o desgastados, incluso en ausencia de un modelo CAD original. Esto significa que, aunque no se cuente con los planos de diseño originales, es posible reconstruir la geometría del álabe a partir de datos discretos obtenidos mediante técnicas de escaneo o medición directa.

No obstante, es importante considerar ciertas limitaciones de la metodología propuesta. En primer lugar, se requiere una cantidad significativa de datos discretos para lograr una definición continua y suave de la superficie de la pala, lo cual puede representar un desafío en ciertos casos. Obtener estos datos puede ser complicado y costoso, especialmente si se necesita alta precisión. Además, la calidad de la reconstrucción depende en gran medida de la precisión y resolución de los datos iniciales.

En [2], se utilizó la metodología descrita anteriormente para la reconstrucción del álabe. Además, encontraron un polinomio de tercer grado que permite tener el control de los puntos del álabe recto del impulsor, Fig. 1.11. Este polinomio facilita la manipulación de la geometría del álabe, permitiendo trasladar los puntos en el espacio según la preferencia del diseñador para generar un nuevo álabe. Esta capacidad de ajuste y personalización es crucial para optimizar el diseño de los álabes y mejorar el rendimiento de las turbinas.

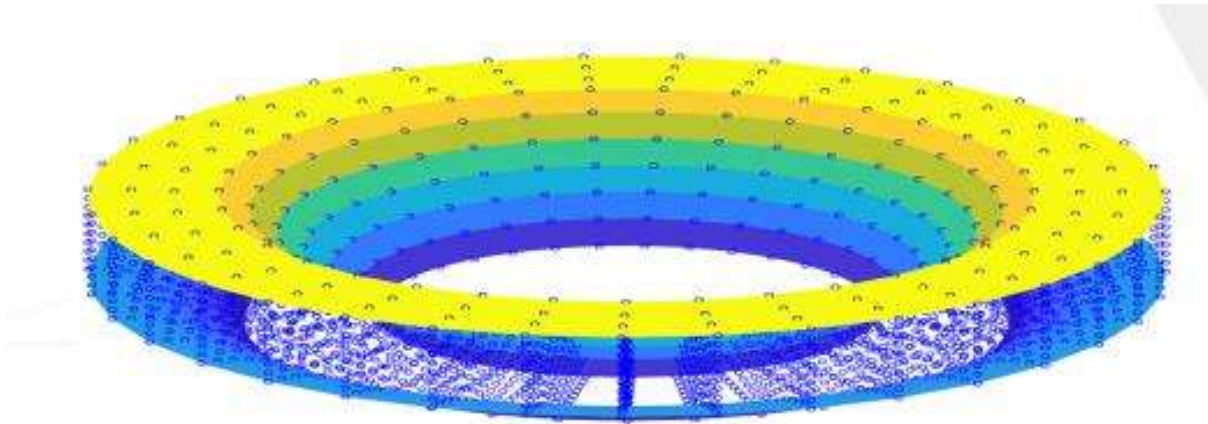


Figura 1. 10. Reconstrucción de la corona y banda del rodete al momento de revolucionar el alabe recto [2]

1.4 Justificación

La bomba que se estudia, cómo se explicó en la definición del problema, está funcionando en sentido inverso, una condición para la cual no fue diseñada. A pesar de que existen algunas referencias relacionadas a la construcción y modificación de los impulsores de las *PAT*, solo se juega con el tamaño del impulsor y la curvatura, espesor o número de álabes de él.

No hay referencia alguna sobre el comportamiento de las *PATs* cuando se le incorpora a su impulsor álabes con geometría compleja pertenecientes directamente escalados de alguna turbina Francis funcional.

Una justificación adicional para esta investigación es que se basa en una nueva aplicación de los algoritmos de reconstrucción de álabes como [1], para las bombas funcionando como turbinas. También en el estudio mencionado, se reconstruyó una geometría "limpia" de un rodete. Sin embargo, en el presente trabajo se generará un rodete a partir de un impulsor con geometría "sucias", obtenida mediante escaneo digital.

Esta diferencia marca un avance significativo en la línea de investigación, ya que el archivo CAD del impulsor con el que se trabaja presenta desperfectos generados debido al proceso de escaneo. Esto brinda la oportunidad de considerar la metodología presentada en este trabajo como una alternativa viable que puede aplicarse al campo de la adaptación de turbomáquina.

1.5 Hipótesis

Mediante la utilización de herramientas numéricas y la ingeniería inversa es posible adaptar el álabe de una turbina Francis en el impulsor original de la bomba *Goulds* para así convertirlo en un rodete que obtenga un mejor rendimiento que el impulsor original.

1.6 Objetivos

Objetivo general

Generar un nuevo rodete que contenga la geometría del impulsor, pero con los álabes de la turbina Francis 99.

Objetivos específicos

- Limpiar la geometría del impulsor escaneado.
- Adaptar la geometría de los álabes del rodete de una turbina a la PAT.
- Construir el modelo del nuevo rodete.
- Manufacturar por técnica aditiva
- Probar el desempeño del nuevo rodete en laboratorio.

Capítulo 2 Turbomáquinas

2.1 Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas forman parte de la turbomaquinaria y está diseñada para mover un fluido (usualmente agua) mediante la transferencia de energía rotacional desde uno o más impulsores. El fluido ingresa al impulsor que gira rápidamente a lo largo de su eje y es expulsado por la fuerza centrífuga a lo largo de la voluta a través de los álabes. La acción del impulsor es aumentar la velocidad y la presión del fluido y también lo dirige hacia la salida de la bomba. La carcasa está especialmente diseñada para restringir el fluido desde la entrada de la bomba, dirigirlo hacia el impulsor y luego desacelerar y controlar el fluido antes de la descarga.

El fluido ingresa al impulsor por la parte delantera del eje (el "ojo") y sale a lo largo de la circunferencia entre las paletas. En el lado opuesto al ojo, está conectado a través de un eje impulsor a un motor y gira a alta velocidad (normalmente. El movimiento de rotación del impulsor acelera el fluido a través de las paletas del impulsor hacia la carcasa de la bomba.

En la carcasa de voluta, el impulsor está desplazado hacia un lado, creando efectivamente un embudo curvo con un área de sección transversal creciente hacia la salida de la bomba. Este diseño hace que la presión del fluido aumente hacia la salida.

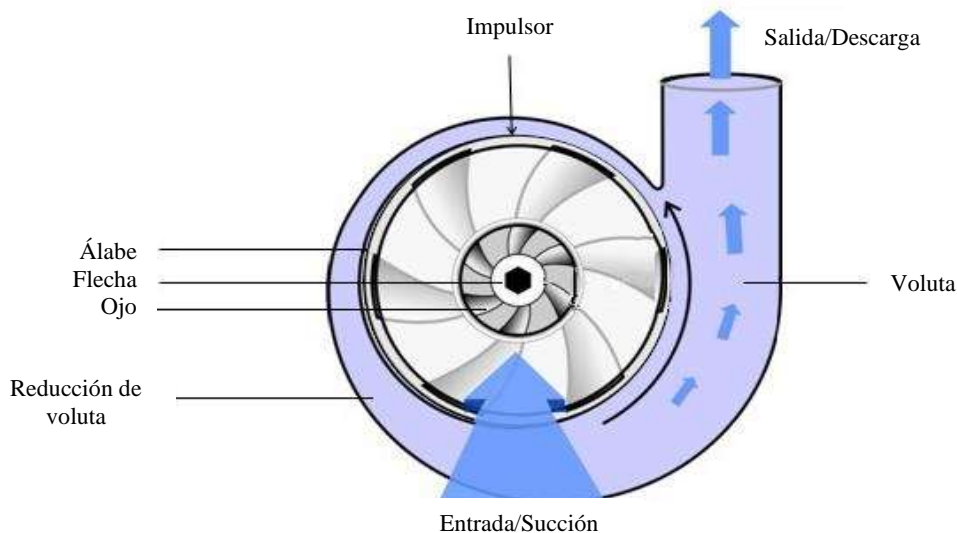


Figura 2. 1. Diseño de bomba centrífuga [18]

2.2 Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son máquinas que convierten la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica de rotación. El agua fluye hacia la turbina y pasa por un rodete (o rotor), donde se produce la transferencia de energía. El eje del rodete está conectado a un generador eléctrico, convirtiendo la energía mecánica en electricidad.

Tipos de turbinas hidráulicas:

- Turbina Pelton (acción de flujo transversal): Diseñada para saltos de agua muy grandes y caudales pequeños. Utiliza cucharas en su periferia para aprovechar la energía cinética del agua.
- Turbina Francis (flujo mixto y de reacción): Diseñada para un amplio rango de saltos y caudales. Combina conceptos de flujo radial y axial. Es ampliamente utilizada en la producción de energía eléctrica.
- Turbina Kaplan (axial, con ángulo de palas variable): Trabaja con saltos de agua pequeños y grandes caudales. Permite variar el ángulo de las palas durante su funcionamiento.

Turbina Francis

De las turbinas anteriormente mencionadas la turbinas Francis ha emergido como la opción preeminente en la generación hidroeléctrica debido a su diseño avanzado y eficiente, su capacidad para operar de manera óptima en una amplia gama de condiciones hidráulicas, y su robustez probada en aplicaciones prácticas a lo largo de décadas.

Eficiencia y diseño

El diseño aerodinámico meticulosamente optimizado de las turbinas Francis permite una conversión eficiente de energía hidráulica en energía mecánica. Este diseño, caracterizado por álabes con geometría compleja precisa, minimiza las pérdidas de energía y maximiza la eficiencia operativa, incluso en situaciones de carga parcial [19].

Adaptabilidad y versatilidad operativa

Una de las principales fortalezas de las turbinas Francis radica en su capacidad para adaptarse eficazmente a variaciones significativas en los caudales de agua y cabezales hidráulicos. Esta adaptabilidad es crucial en entornos donde las condiciones hidrológicas fluctúan estacionalmente, permitiendo un rendimiento óptimo y constante a lo largo del año [20].

Fiabilidad y rendimiento

Investigaciones detalladas han documentado la fiabilidad y el rendimiento consistente de las turbinas Francis bajo diversas condiciones operativas. Desde aplicaciones en grandes centrales hidroeléctricas hasta microcentrales, estas turbinas han demostrado ser confiables y eficaces, contribuyendo significativamente a la producción de energía renovable de manera sostenible y económicamente viable [21].

Contribución a la Energía Renovable

El despliegue extensivo de turbinas Francis en proyectos hidroeléctricos ha facilitado una importante contribución a la energía renovable a nivel global. Su capacidad para maximizar el aprovechamiento de recursos hídricos disponibles, combinada con su alto rendimiento energético, las posiciona como una opción preferida para desarrolladores y operadores de infraestructuras energéticas sostenibles [19].

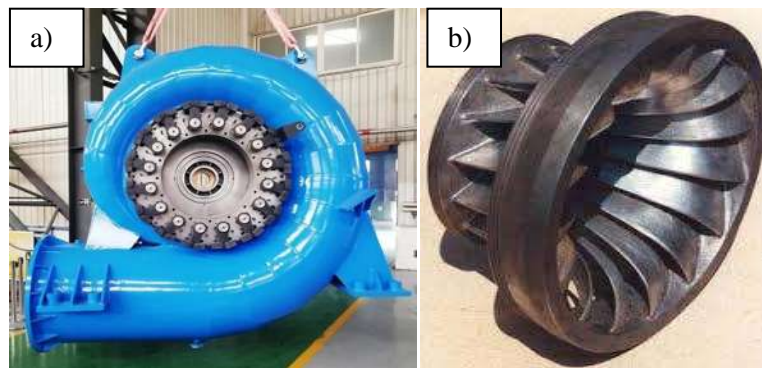


Figura 2. 2. a) Turbina Francis b) Rodete de turbina Francis [22]

2.3 Pump as turbine (*PAT*)

Las bombas como turbinas (*PAT*) por su nombre en inglés (Pump as turbine) son dispositivos hidromecánicos diseñados para operar en reversa respecto a su función original como bombas centrífugas. Esta tecnología permite convertir la energía hidráulica disponible en sistemas de flujo de agua en energía mecánica, especialmente para la generación de electricidad. Aunque históricamente las bombas centrífugas fueron diseñadas para el bombeo de líquidos, se ha demostrado que pueden funcionar eficazmente como turbinas al invertir su dirección de flujo. Este enfoque ha ganado popularidad debido a su potencial para proporcionar soluciones económicas y eficientes en una variedad de aplicaciones hidroeléctricas.

Beneficios de las Bombas como Turbinas (*PAT*)

- **Costo Reducido y Reutilización de Infraestructura:** La conversión de bombas existentes a *PAT* permite aprovechar infraestructura preexistente de manera rentable. Esto resulta en una reducción significativa de los costos de capital y tiempos de implementación, ya que no se requiere la construcción de nuevas instalaciones costosas [23]
- **Adaptabilidad y Flexibilidad Operativa:** Las *PAT* son versátiles y pueden adaptarse a una amplia gama de condiciones de flujo y cabeza hidráulica. Esto las hace adecuadas para aplicaciones en microcentrales hidroeléctricas, sistemas de irrigación agrícola, y en proyectos de abastecimiento más específicamente en zonas rurales o remotas donde la energía eléctrica convencional es limitada [24].
- **Eficiencia Comparable a Turbinas Convencionales:** Cuando se seleccionan y diseñan correctamente, las *PAT* pueden alcanzar eficiencias comparables a las turbinas convencionales. Algunos estudios han demostrado que, en muchos casos, las *PAT* pueden operar con eficiencias superiores al 80%, dependiendo de las condiciones específicas del sitio y del diseño [24].

Mantenimiento Simplificado: La operación y el mantenimiento de las *PAT* son generalmente más simples en comparación con las turbinas convencionales. Esto se debe a la familiaridad de los operadores con el equipo de bombas, lo que facilita la gestión del ciclo de vida del equipo con costos de operación reducidos a lo largo del tiempo.

Desventajas de las Bombas como Turbinas (*PAT*)

Limitaciones de Diseño y Selección: No todas las bombas centrífugas son adecuadas para ser convertidas en turbinas debido a diferencias en el diseño hidráulico y estructural. La selección inadecuada puede resultar en una baja eficiencia o problemas operativos a largo plazo que requieren ajustes significativos [24].

Modificación del impulsor de una *PAT*

Necesidad de Optimización y Control de Procesos: Es crucial realizar una optimización detallada del diseño y del sistema para maximizar el rendimiento operativo de las *PAT*. El control preciso de parámetros como la velocidad, la carga y la estabilidad mecánica es fundamental para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable.

Consideraciones de Durabilidad a Largo Plazo: La durabilidad del equipo puede verse comprometida si no se gestionan adecuadamente las condiciones de operación, especialmente en entornos con fluctuaciones significativas en las condiciones hidráulicas. Esto puede requerir estrategias de mantenimiento preventivo y monitoreo continuo para prolongar la vida útil del equipo.

Aplicaciones de las Bombas como Turbinas (*PAT*)

Microgeneración Hidroeléctrica: Las *PAT* son especialmente adecuadas para micro centrales hidroeléctricas en ubicaciones con recursos hidroeléctricos limitados pero consistentes. Pueden proporcionar una solución rentable y sostenible para la generación de energía localizada y descentralizada [23].

Irrigación y Riego: En sistemas agrícolas que utilizan riego por gravedad, las *PAT* pueden aprovechar el flujo excedente de agua para generar electricidad, contribuyendo a la eficiencia energética y económica de las operaciones agrícolas [24].

Abastecimiento de Agua en Comunidades Rurales: En áreas rurales o remotas donde el acceso a la red eléctrica es limitado, las *PAT* pueden utilizarse en sistemas de bombeo y tratamiento de agua para mejorar la autosuficiencia energética y la seguridad hídrica de las comunidades locales.

2.4 Impulsores de bombas centrífugas

Los impulsores son componentes esenciales dentro de las bombas centrífugas su función es convertir la energía mecánica en energía cinética impulsando el líquido girando rápidamente dentro de la carcasa de la bomba. Esta rotación crea fuerzas centrífugas que empujan el líquido desde el centro del impulsor hacia afuera, aumentando así su velocidad y presión.

La geometría del impulsor puede ser variada dependiendo de la aplicación específica y las características del líquido a bombear. Por lo general, tienen álabes curvados hacia atrás diseñados para dirigir el flujo de manera eficiente y minimizar la turbulencia en el flujo. Están fabricados típicamente de materiales resistentes a la corrosión y al desgaste, como acero inoxidable, bronce o materiales compuestos, que alargan su vida útil y dan un rendimiento confiable incluso en condiciones severas.



Figura 2. 3. Cuerpo hidráulico de una bomba centrífuga

Tipos de impulsores:

Impulsores abiertos: Tienen álabes que están unidos al cubo central sin ninguna cubierta circundante o disco pegado a ellos. Tienen un diseño relativamente simple y son ideales para manejar fluidos abrasivos o cargados de sólidos

suspendidos, lo que los hace comúnmente utilizados en el tratamiento de aguas residuales y en las industrias mineras.

Impulsores semiabiertos: Tienen los álabes unidos al cubo central con un lado expuesto y otro cubierto por un disco. Estos impulsores logran un equilibrio entre impulsores abiertos y cerrados y encuentran aplicaciones en el manejo de fluidos viscosos que pueden obstruir los impulsores abiertos.

Impulsores cerrados: Tiene los álabes cubiertos con discos por ambos lados. Este diseño mejora la integridad estructural del impulsor, haciéndolo adecuado para aplicaciones de alta presión en entornos de fluidos limpios.



Figura 2. 4. Tipos de impulsores para las bombas centrífugas.

2.5 Rodetes de turbinas Francis

El rodete de las turbinas Francis es un componente esencial que transforma la energía hidráulica del agua en energía mecánica para un eje. Funciona recibiendo agua a alta presión desde la carcasa espiral de entrada y guiándola a través de álabes curvos diseñados para optimizar el flujo y minimizar las pérdidas por turbulencia y fricción. Este diseño aerodinámico genera una fuerza centrífuga que impulsa el agua hacia el tubo de descarga, transmitiendo esta energía al eje de la turbina. La velocidad de rotación del rodete puede ajustarse controlando la presión y el caudal de agua, lo que permite adaptar la producción de energía a la demanda eléctrica y a las condiciones cambiantes del flujo.

Las turbinas Francis pueden constituirse en condiciones de rendimiento máximo, por eso se da lugar a dividir las en 3 tipos fundamentales, existen; lentas, normales y rápidas [25].

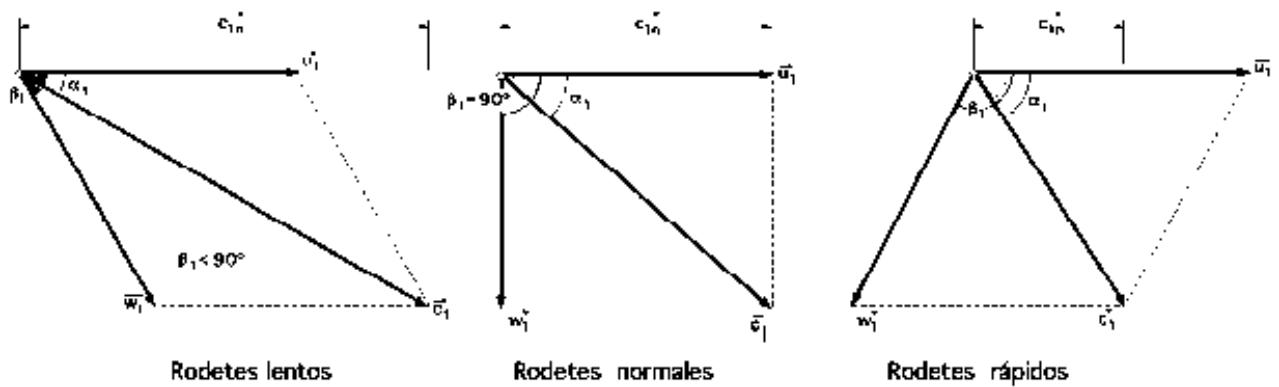


Figura 2. 5. Triangulo de velocidades a la entrada para diversos valores de β_1 [25]

Rodetes Lentos: Los rodetes lentos se utilizan en los grandes saltos; con ellos se tiende a reducir el número de revoluciones, lo cual supone un aumento del diámetro D_1 del rodete respecto al del tubo de aspiración D_3 . El ángulo a la entrada $\beta_1 < 90^\circ$, ($\alpha_1 < 15^\circ$) y su número de revoluciones específico (n_s) que es el número específico de revoluciones por minuto a que giraría una turbina para que, con un salto de 1 metro, genere una potencia de 1 CV está comprendido entre 50 y 100 para esta turbina. En estas turbinas se obtienen velocidades tangenciales reducidas. Los álabes tienen forma especial, aumentando su espesor a fin de que su cara posterior guíe mejor el chorro que atraviesa el rodete deslizándose en contacto con las paredes de los álabes, ya que de no ser así el chorro se despegaría de la cara posterior de los mismos, originando remolinos.

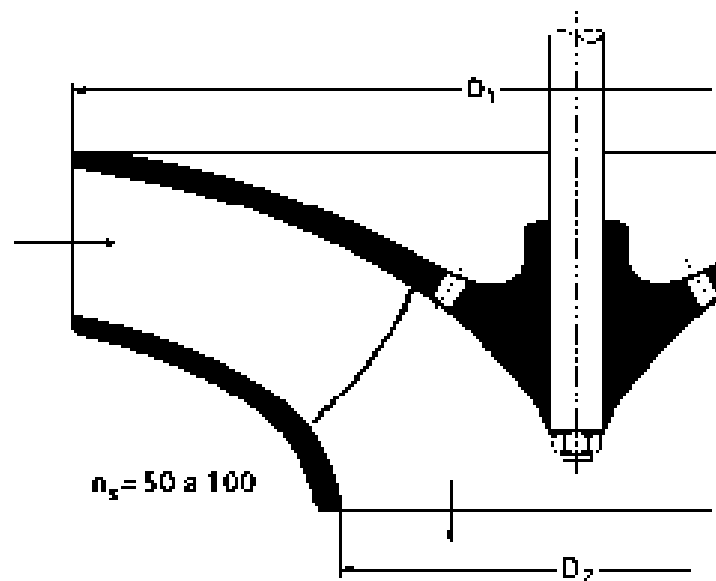


Figura 2. 6. Rodete Francis lento $\beta > 90$ [25]

Modificación del impulsor de una PAT

Rodetes Normales: Los rodets normales son como los de la figura 2.6, se caracterizan porque el diámetro D_1 es ligeramente superior al del tubo de aspiración D_3 . El agua entra en el rodete radialmente y sale de él axialmente, entrando así en el tubo de aspiración. El valor de β_1 es del orden de 90° , ($15^\circ < \alpha_1 < 30^\circ$) y se alcanza un ns comprendido entre 125 y 200 rpm. No existen apenas huelgos entre el distribuidor y la rueda. En estas turbinas, en el triángulo de velocidades a la entrada, al ser $\beta_1 = 90^\circ$, se cumplen las expresiones siguientes:

$$u_1 = c_1 \cos \alpha_1; u_1^2 = \eta_{hid} g H_n$$

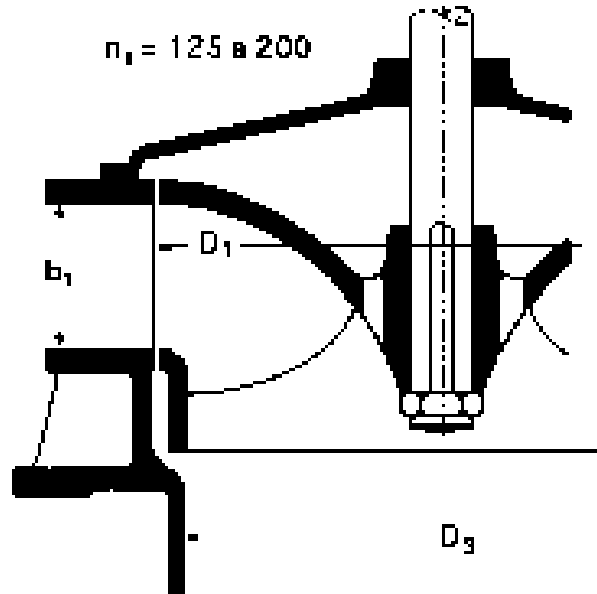


Figura 2.7. Rodete Francis
Normal $\beta=90$ [25]

Rodetes rápidos: Los rodets rápidos, figura 2.7, permiten obtener elevadas velocidades de rotación para valores de ns comprendidos entre 225 y 500. El diámetro del rodete D_1 es menor que el D_3 del tubo de aspiración y el cambio de dirección del agua se efectúa más bruscamente que en las turbinas normales. El ángulo de entrada $\beta_1 > 90^\circ$, ($\alpha_1 < 45^\circ$) favorece el aumento del número de revoluciones, porque aumenta u_1 ; en estas turbinas hay un huelgo bastante grande entre el rodete y el distribuidor, sin que ello tenga apenas ninguna influencia en el rendimiento; el agua entra radialmente y recorre un cierto espacio antes de entrar en el rodete; en este espacio al no existir rozamientos con los álabes, se consigue mejorar el rendimiento.

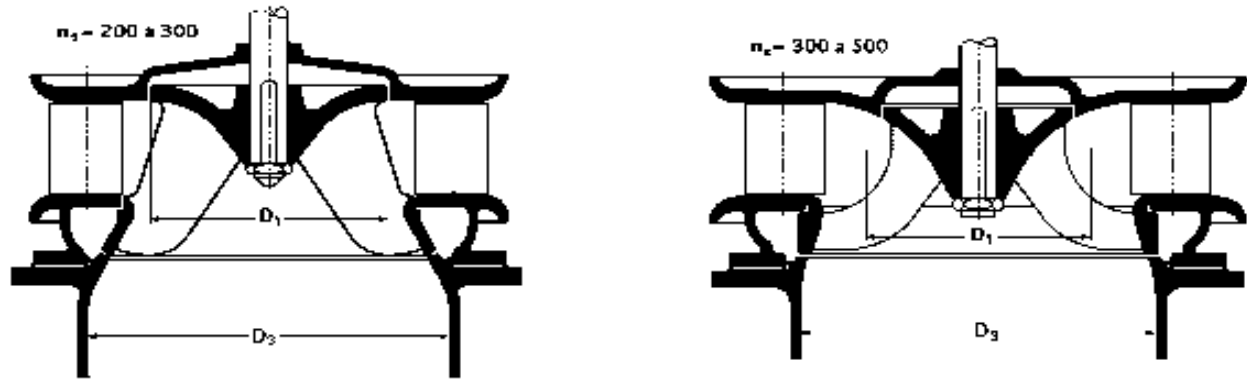


Figura 2. 8. Rodete Francis rápido $\beta < 90$ [25]

2.6 Ecuación de Euler

La ecuación de Euler para turbomaquinaria es una derivación fundamental de las leyes de conservación del momento y de la energía en el contexto de máquinas que intercambian energía con un fluido, tales como turbinas, compresores y bombas. Esta ecuación proporciona una relación directa entre las características geométricas y dinámicas del rotor y el cambio en la energía del fluido que atraviesa el sistema.

$$T_{flecha} = \rho Q (r_2 V_{1,t} - r_1 V_{2,t})$$

Ecuación 2.2. Ecuación de Euler de la turbomáquina [26]

2.6.1. Ecuación de Euler para Bombas:

Proporciona una relación matemática fundamental que describe cómo se transfiere la energía entre el impulsor de la bomba y el fluido. Esta ecuación es esencial para comprender el comportamiento de las bombas y diseñarlas de manera eficiente, ya que permite calcular el aumento de energía del fluido a medida que pasa a través de la bomba. Este incremento de energía se traduce en un aumento de la presión, velocidad, o altura del fluido bombeado, lo cual es crucial para aplicaciones en diversas industrias como la agricultura, la manufactura, la distribución de agua potable y el tratamiento de aguas residuales.

En la Figura 2.9 se muestra la geometría del impulsor comúnmente utilizada para las bombas, también los triángulos de velocidades a la entrada y a la salida, el subíndice 1 indica entrada de flujo y el subíndice 2 salida de flujo, también las letras C, W, V_n , V_t y U que indican la velocidad absoluta, velocidad relativa, velocidad normal, velocidad periférica y velocidad tangencial, respectivamente.

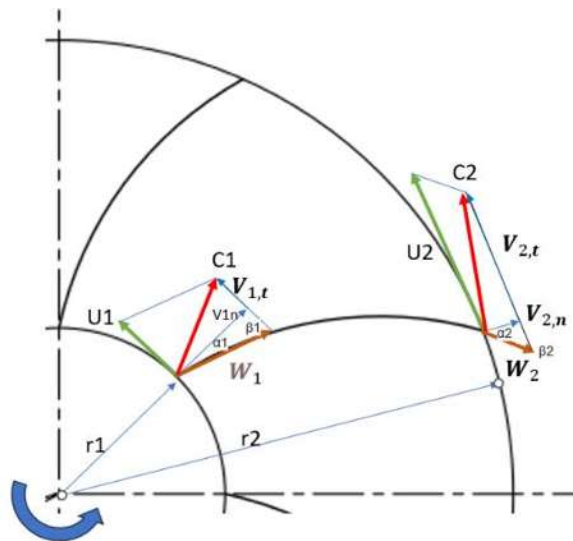


Figura 2. 9. Triángulos de velocidades para la entrada y salida de flujo de una bomba centrífuga

2.6.2. Ecuación de Euler para Turbinas:

La ecuación de Euler establece una relación directa entre la energía del fluido que atraviesa la turbina y el trabajo realizado por el rotor de la misma. Describe cómo la energía cinética y potencial del fluido se transforma en trabajo mecánico en el eje de la turbina.

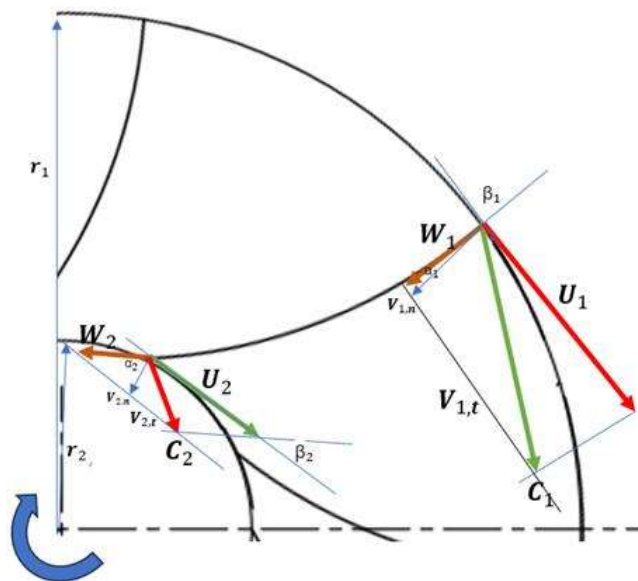


Figura 2. 10. Triángulos de velocidades para la entrada y salida de flujo para una turbina

Capítulo 3 Ingeniería Inversa

3.1 Introducción a la Ingeniería Inversa en la Turbomaquinaria

La ingeniería inversa en el contexto de la turbomaquinaria se presenta como un enfoque crucial para entender, analizar y mejorar el diseño de componentes y sistemas complejos de máquinas que interactúan con fluidos como lo son turbinas, compresores y bombas. Se centra en descomponer y estudiar detalladamente productos existentes para revelar su funcionamiento interno, geometría precisa y materiales utilizados. A través de técnicas avanzadas de escaneo, modelado 3D y análisis computacional, la ingeniería inversa permite a los ingenieros no solo replicar y validar diseños existentes, sino también optimizar y mejorar rendimientos, eficiencia y confiabilidad de estas máquinas críticas en sectores como la generación de energía, la industria aeroespacial y la propulsión naval.

Básicamente podemos decir que la ingeniería inversa es una técnica que consiste en ir hacia atrás. Para la creación de un producto o proyecto, el sentido común dicta comenzar por el principio, pero la ingeniería inversa nos sugiere invertir el proceso de creación mediante un sistema que nos permite obtener información sobre su funcionamiento o estructura. Es como preparar una receta de cocina al revés, partiendo del plato final para descubrir los ingredientes que contiene para si es posible mejorarlo. [6]

3.2 Importancia y aplicaciones industriales

La ingeniería inversa aplicada es esencial en diversas industrias debido a su capacidad para profundizar en la comprensión para mejorar el rendimiento de sistemas complejos, en este caso específicamente la turbomaquinaria. Este enfoque implica un proceso meticuloso de desmontaje y análisis detallado todos o algunos componentes y sistemas existentes. Al descomponer cada parte y examinar su estructura, funcionamiento, comportamiento y materiales utilizados, se obtiene una comprensión profunda de cómo operan las turbinas, compresores y otros equipos en diversas condiciones de trabajo.

Una de las principales ventajas de la ingeniería inversa en la turbomaquinaria es su capacidad para optimizar el diseño. Este proceso no se limita a replicar productos existentes, sino que también permite identificar áreas críticas donde se pueden introducir mejoras significativas. Por ejemplo, mediante el uso de tecnologías avanzadas de escaneo

3D y modelado computacional, los ingenieros pueden mejorar la geometría de las turbinas o bombas, optimizando la distribución de los álabes del rotor para así maximizar la eficiencia energética, o para seleccionar materiales más ligeros y resistentes que mejoren la durabilidad y reduzcan el peso total del equipo.

Además de la optimización del diseño, la ingeniería inversa fomenta la innovación al proporcionar una plataforma para el desarrollo de nuevos productos o la adaptación de tecnologías existentes para cumplir con las demandas cambiantes del mercado. Al comprender en profundidad cómo funcionan y se estructuran los productos competidores, las empresas pueden introducir mejoras disruptivas que no solo aumenten la eficiencia y la fiabilidad del equipo, sino que también abran nuevas oportunidades de mercado y fortalezcan la posición competitiva de la empresa en la industria global.

Otro aspecto clave de la ingeniería inversa en turbomaquinaria es su papel en la gestión del ciclo de vida del producto y la optimización del mantenimiento. Con datos detallados sobre la composición, rendimiento y vida útil esperada de los componentes, las empresas pueden implementar estrategias avanzadas de mantenimiento predictivo y preventivo. Esto no solo reduce los costos operativos al minimizar el tiempo de inactividad no planificado, sino que también prolonga la vida útil del equipo, mejora la disponibilidad operativa y garantiza un rendimiento consistente a lo largo del tiempo.

3.3 Pasos para la ingeniería inversa

La ingeniería inversa es una técnica clave en muchas industrias, ya que permite analizar y entender productos y sistemas existentes para mejorar su diseño y funcionamiento. Consiste en descomponer un objeto en sus partes esenciales para estudiar cómo funciona y cómo está construido. Esta comprensión ayuda a optimizar y actualizar productos, además de crear piezas de repuesto cuando los diseños originales no están disponibles.

En la práctica, se usa para examinar productos competidores, mejorar diseños existentes y reparar equipos antiguos. También se emplea en manufactura para crear modelos digitales precisos, facilitando así el diseño y la producción. En sectores como la automoción y la aeroespacial, ayuda a perfeccionar piezas complejas y a integrar nuevas tecnologías. Además, tiene aplicaciones en la recuperación de datos y el análisis forense, proporcionando información útil para prevenir fallos futuros.



Figura 3. 1. Marco general de la reconstrucción de una pieza utilizando ingeniería inversa [27]

La ingeniería inversa comprende todos los siguientes puntos:

• **Modelado Geométrico:**

Adquisición de Datos: Hay varios métodos para capturar la geometría de los objetos, incluyendo la fotogrametría, el escaneo láser y las técnicas de visión por computadora. Estos métodos permiten obtener datos detallados sobre la forma y las características superficiales de los objetos, cruciales para la creación de modelos precisos.

Procesamiento de Datos: Existen destacadas técnicas de procesamiento de datos, como la segmentación y el ajuste de superficies. La segmentación permite identificar y aislar características geométricas esenciales, mientras que el ajuste de superficies facilita la conversión de datos brutos en representaciones geométricas utilizables [27].

• **Técnicas CAD:**

Software CAD: El uso de herramientas de software CAD avanzadas es esencial para manipular y refinar los datos geométricos adquiridos. Las herramientas CAD permiten la creación de modelos tridimensionales detallados, que pueden ser utilizados para análisis y simulaciones adicionales.

Modelado Paramétrico: Permite realizar modificaciones y ajustes precisos en los modelos generados, utilizando herramientas numéricas para poder mejorar su precisión y adaptabilidad.

Reconstrucción de Superficies:

Técnicas de Reconstrucción: Se abordan técnicas como las mallas poligonales y las superficies NURBS, que son fundamentales para representar con precisión la topología y la geometría de los objetos escaneados. Las mallas poligonales son útiles para la representación rápida y eficiente de geometrías complejas, mientras que las superficies NURBS ofrecen una mayor precisión y suavidad en la representación de superficies curvas.

Integración de Datos: La integración de diferentes fuentes de datos y técnicas de reconstrucción mejora la precisión y la calidad de los modelos generados. Esta integración es crucial para obtener representaciones precisas y coherentes de los objetos escaneados.

Desafíos actuales de la ingeniería inversa [27]

Precisión de los Modelos: Mejorar la precisión de los modelos generados a partir de datos escaneados sigue siendo un desafío significativo. La calidad de los datos de entrada y la eficacia de los algoritmos de procesamiento son cruciales para obtener representaciones precisas.

Automatización: La automatización de los procesos de ingeniería inversa puede aumentar significativamente la eficiencia y reducir la dependencia de habilidades humanas avanzadas. El desarrollo de algoritmos y herramientas automatizadas es un área clave de investigación.

Interoperabilidad: La interoperabilidad entre diferentes herramientas y sistemas es esencial para un flujo de trabajo eficiente. Garantizar que los datos y modelos puedan ser transferidos y utilizados sin problemas entre diferentes plataformas es un desafío importante.

3.4 Modelado paramétrico (herramientas numéricas)

Uno de los procesos fundamentales en la ingeniería inversa es el modelado paramétrico o el procesamiento de la información con herramientas numéricas, con esto, se permite el análisis y la modificación en un entorno digital. Esta capacidad es crucial para generar superficies reconstruidas mediante el uso de equipos computacionales.

La elección adecuada de la herramienta numérica depende de un buen entendimiento de su funcionamiento y de los requisitos específicos que se pretenden cubrir. En este contexto, no existe una herramienta numérica única para la ingeniería inversa. En este trabajo, se enfoca principalmente en la interpolación transfinita (TFI) como la herramienta principal utilizada, en este caso para la generación de mallas estructuradas en dominios bidimensionales, básicamente mapea un dominio físico, generalmente complejo, a un dominio paramétrico simple (como un cuadrado o un rectángulo), donde es más fácil definir y manipular coordenadas.

Aplicación de la Interpolación Transfinita (TFI)

Una vez que los datos han sido extraídos, se obtienen las líneas medias que actúan como fronteras para el mapeado generado mediante TFI. Esta malla generada es un esqueleto que describe el desarrollo del álabe, facilitando la configuración del perfil deseado y permitiendo la generación precisa de las superficies del álabe. La técnica de interpolación transfinita se aplica extensamente en la industria aeronáutica y de turbinas de gas para mejorar la eficiencia y el rendimiento de las turbinas mediante la reconstrucción de la forma de los álabes a partir de puntos discretos [1].

Reconstrucción Multidimensional

La interpolación transfinita permite reconstruir una función desconocida a partir de datos dispersos en múltiples direcciones en un espacio multidimensional. Esta técnica es especialmente útil para la reconstrucción de funciones complejas en áreas de alta dimensionalidad. Su objetivo es determinar la forma de la función desconocida en todo el espacio multidimensional utilizando la información disponible en todas las direcciones.

Optimización y Aplicaciones Prácticas

La TFI se destaca como un método eficaz para generar mallas en muchas regiones bidimensionales, aunque su aplicación puede presentar desafíos. Una estrategia común

Modificación del impulsor de una PAT

implica dividir físicamente la región en secciones separadas, cada una con su propia malla, para luego unir las interfaces. Sin embargo, esta aproximación puede generar discontinuidades en las pendientes en las interfaces. Para mitigar estos problemas y lograr una uniformidad en las pendientes, se pueden utilizar polinomios de orden superior combinados como funciones en la interpolación transfinita.

Implementación y Aspectos Técnicos

En la Figura 3.2 se ilustra la relación entre los sentidos lógicos y físicos de la malla generada para asegurar la coherencia de los límites. Es esencial garantizar que ambos límites converjan en un mismo vértice dentro del plano computacional, relacionando el lado izquierdo del plano lógico con los vértices A y B para una integración correcta.

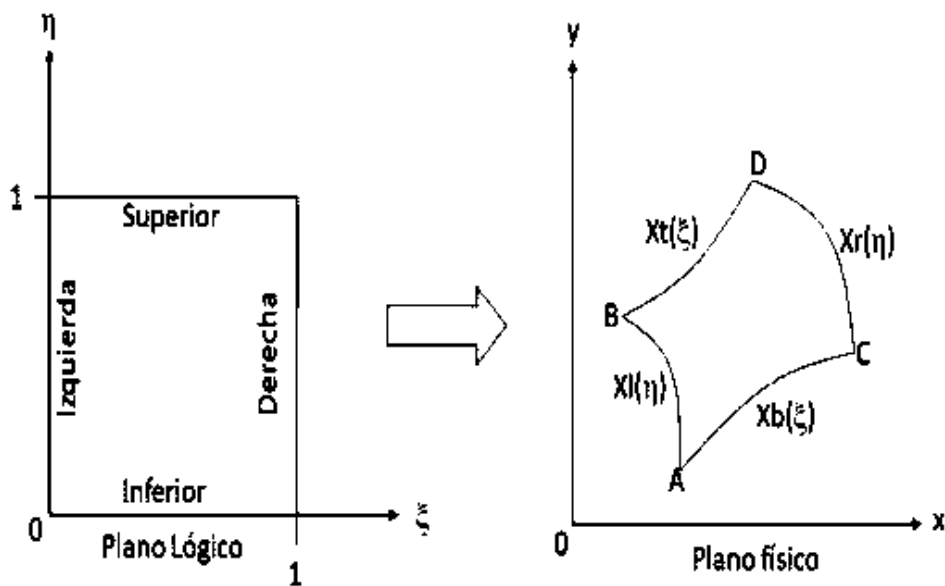


Figura 3. 2. Relación entre el plano lógico y el plano físico [1]

A continuación, se presenta la normalización de los sentidos lógicos con los vértices de la geometría.

$$A = x_b(0) = x_l(0)$$

$$C = x_b(1) = x_r(0)$$

$$D = x_r(1) = x_t(1)$$

$$B = x_l(1) = x_t(0).$$

Para realizar el mapeo y obtener la malla se utilizan las Ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 de la Interpolación transfinita (TFI)[27].

$$x(\xi, \eta) = (1 - \xi)x_i(\eta) + \xi x_r(\eta) + (1 - \eta)x_b(\xi) + \eta x_t(\xi) - (1 - \xi)(1 - \eta)x_b(0) - (1 - \xi)\eta x_t(0) - \xi(1 - \eta)x_b(1) - \xi\eta x_t(1) \text{ ---- (2.1)}$$

$$y(\xi, \eta) = (1 - \xi)y_i(\eta) + \xi y_r(\eta) + (1 - \eta)y_b(\xi) + \eta y_t(\xi) - (1 - \xi)(1 - \eta)y_b(0) - (1 - \xi)\eta y_t(0) - \xi(1 - \eta)y_b(1) - \xi\eta y_t(1) \text{ ---- (2.2)}$$

$$z(\xi, \eta) = (1 - \xi)z_i(\eta) + \xi z_r(\eta) + (1 - \eta)z_b(\xi) + \eta z_t(\xi) - (1 - \xi)(1 - \eta)z_b(0) - (1 - \xi)\eta z_t(0) - \xi(1 - \eta)z_b(1) - \xi\eta z_t(1) \text{ ---- (2.3)}$$

En pocas palabras la interpolación transfinita representa una herramienta robusta y versátil en la ingeniería inversa, facilitando la reconstrucción precisa y la optimización de geometrías complejas como las de los álabes de turbinas. Su aplicación permite superar desafíos técnicos y mejorar significativamente el rendimiento de componentes críticos en diversas industrias de alta tecnología.

Capítulo 4 Metodología

4.1 Metodología para la generación de un rodete para la PAT

En este capítulo se desarrolla la metodología para generar un nuevo rodete para la bomba como turbina cuyo modelo inicial del impulsor original de la bomba fue obtenido mediante escaneo laser. Esta metodología es una adaptación de los algoritmos y subalgoritmos que se utilizan para la reconstrucción de superficies de álabes de bombas, turbinas y compresores fracturados [1]. Esta adaptación fue necesaria debido a 2 factores principales que la metodología citada trabaja con datos extraídos de archivos CAD (Diseño Asistido por Computadora) a pesar de que ya existe una metodología que incluye la limpieza de datos [29] es necesario adaptarla por el segundo factor que no será una reconstrucción si no una generación de un nuevo álabe que se incluirá en alguna PAT. En la figura 4.1 Se presenta la adaptación del algoritmo de la metodología para la generación de un nuevo rodete para las PATs mediante ingeniería inversa.

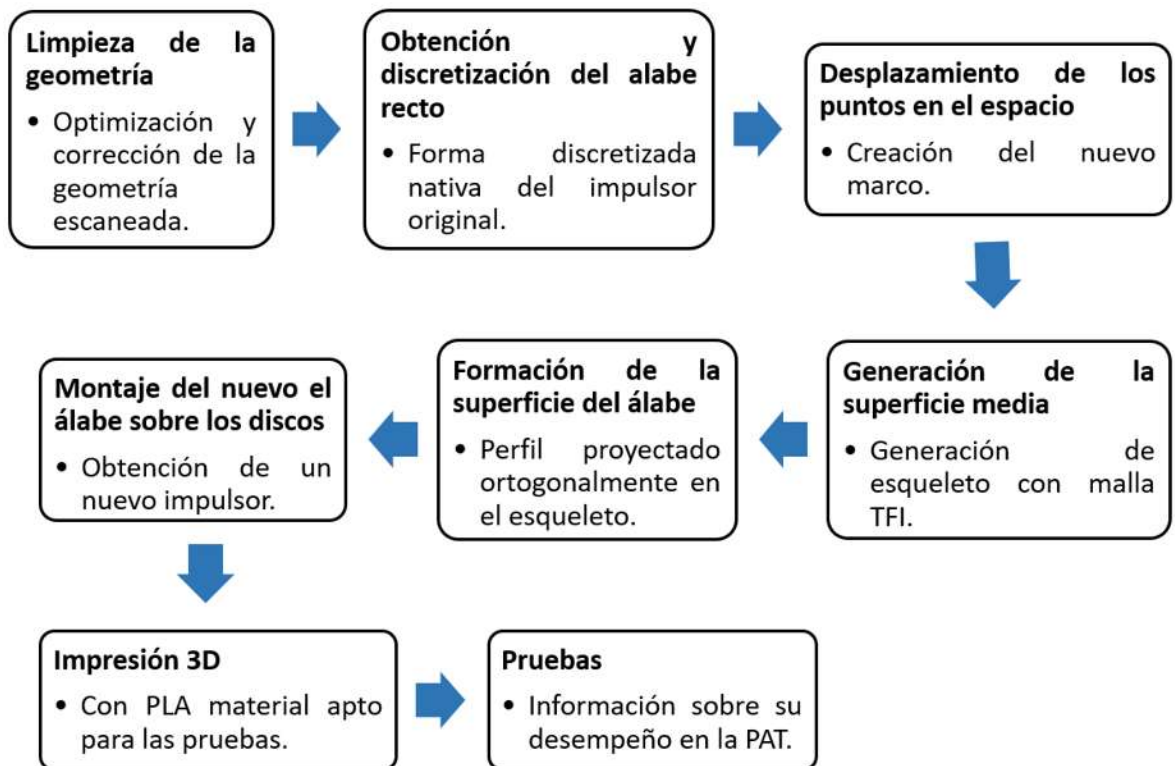


Figura 4. 1. Algoritmo de generación de un nuevo rodete para las PATs

El primer paso consistió en limpiar la geometría y corregir todos los errores brotados en el escaneo del impulsor. Con la geometría limpia y optimizada se extrajo el álabe recto de la sección transversal del impulsor, el cual se discretizó con una serie de puntos en sus 4 fronteras. Dichos puntos, de manera individual fueron trasladados en coordenadas radiales determinado ángulo en el espacio para así asemejarse la geometría que tienen los álabes principales originales de las turbinas funcionales. Con esto, se forma un marco nuevo y mediante la Interpolación Transfinita (TFI) [1] se creó una malla que describe con gran precisión la geometría compleja del nuevo alabe. La superficie media sirve como esqueleto del álabe y permite la proyección ortogonal de algún perfil que genera la superficie del lado presión y el lado succión del álabe [30].

Este nuevo álabe es replicado sobre los discos originales del impulsor para así mismo imprimirlo en 3D y probar su desempeño en un laboratorio de la Universidad EAFIT en Medellín, Colombia.

4.2 Impulsor cerrado original

La metodología empleada en este estudio se aplica al impulsor original de fábrica de una bomba de 1.5 HP, como se describe en el Capítulo 1, sección 2 (1.2). En el presente trabajo, se aborda el diseño de un rodete completamente nuevo. Dado que este rodete es una creación inédita y su interacción con el fluido aún no está definida, los datos operativos específicos de la bomba no se consideran necesarios para esta fase del estudio. Sin embargo, con el fin de proporcionar un contexto más detallado sobre el equipo utilizado, se presenta una tabla que resume algunas variables operativas relevantes de la bomba.

Datos técnicos	Bomba centrífuga marca <i>Goulds</i> con base metálica y guarda acople
Modelo	5SH 2 x 2 ½ x 6
Condiciones de operación	160 GPM @ 20 pies de columna de agua
Motor	TEFC 1.5 HP, 3 HP, 220/240 Volts, 1750 RPM
Impulsor	Impulsor para 5SH 13/16" de diámetro

Figura 4. 2. Datos técnicos de la bomba

En la Figura 4.3 se ilustra el proceso de utilización del escáner, una herramienta fundamental en la captura de características geométricas tridimensionales de objetos. En este caso, el escáner se emplea para digitalizar la bomba y su cuerpo hidráulico. La tecnología de escaneo utiliza un láser que proyecta puntos sobre la superficie del objeto. A través de la emisión de estos puntos láser, el

Modificación del impulsor de una PAT

escáner captura las características geométricas y genera una representación digital en 3D del objeto, la cual está constituida por una malla de triángulos que define la superficie escaneada.



Figura 4. 3. Escaneo de la bomba con precisión de hasta 0.04 mm

La eficacia del escáner depende de la preparación adecuada del objeto. De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, es necesario aplicar puntos reflexivos en la superficie del objeto. Al menos tres de estos puntos deben formar triángulos y deben estar distribuidos de manera uniforme sobre la geometría a escanear. Estos puntos sirven para establecer la orientación del objeto durante el escaneo y asegurar una captura precisa de la geometría. Además, el acabado superficial del objeto influye significativamente en la calidad del escaneo. Las superficies brillantes pueden reflejar de manera irregular el láser, lo que puede degradar la precisión de los datos obtenidos. Por lo tanto, se recomienda aplicar una capa de pintura mate, preferentemente sin brillo, para minimizar los efectos de reflexión y mejorar la calidad del escaneo.

El impulsor objeto de este estudio fue escaneado y posteriormente optimizado en la Universidad EAFIT, en Colombia. Dado que no existen parámetros predefinidos ni denominaciones establecidas para las distintas partes del impulsor, se llevó a cabo un proceso sistemático de asignación de nombres a las partes del modelo para estandarizar su configuración. Esta estandarización es crucial para facilitar el análisis y la comparación de los datos obtenidos durante el proceso de reconstrucción.

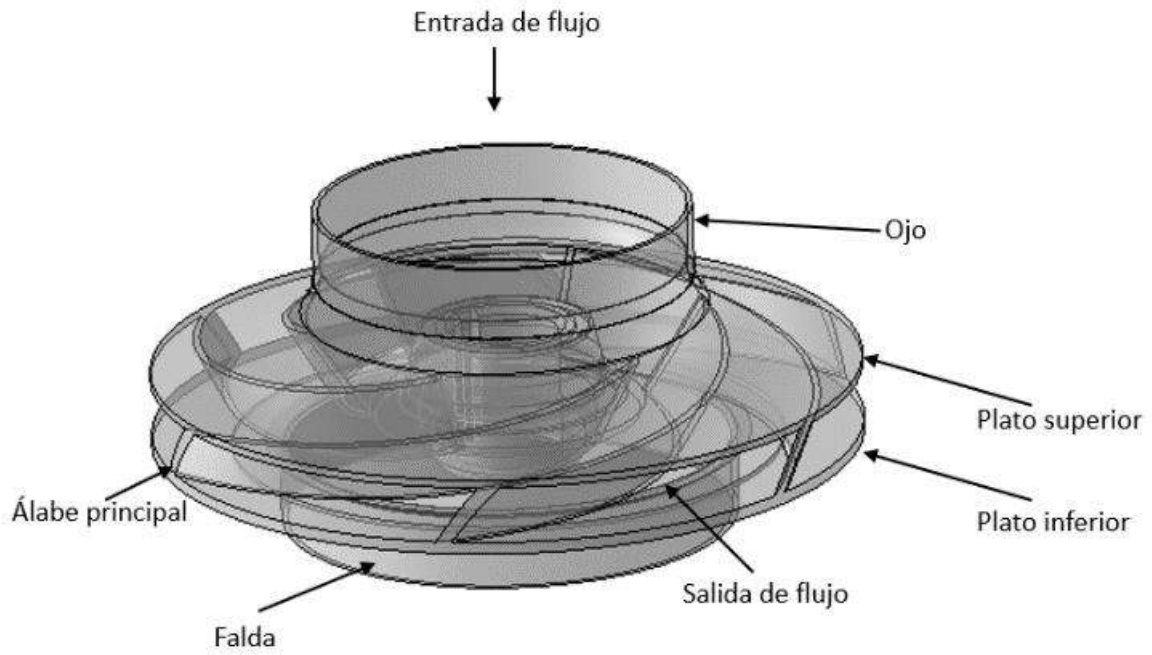


Figura 4. 4. Modelo computacional del impulsor tras ser escaneado



Figura 4. 5. Impulsor real montado en la bomba

4.3 Limpieza de la geometría

El modelo CAD proporcionado por la universidad EAFIT tenía múltiples errores de escaneo y errores de formados derivados por el tipo de escáner e intercambio de programas. Errores como superficies inexistentes, líneas dobles, líneas cruzadas y puntos desorganizados en la superficie. Fue necesario realizar una optimización del modelo para obtener limpiamente el canal de flujo que es el espacio útil entre el disco superior y el disco inferior. Con la optimización reducimos el tamaño del archivo y logramos una mejor visualización sin consumir tanto recurso computacional.

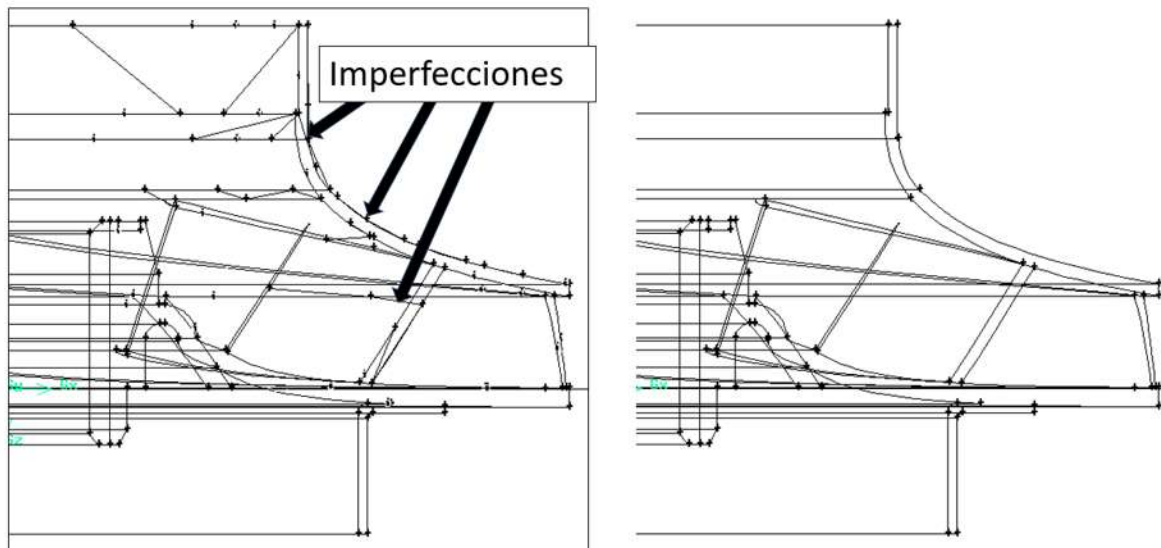


Figura 4. 6. Corrección de errores de escaneo

Para eliminar todas esas imperfecciones con el programa Gambit Fluent que facilitó el procesamiento del archivo debido a que percibe los modelos como una serie de vértices, líneas, caras y volúmenes. Por lo tanto, permite modificar y corregir la geometría correctamente, dejando únicamente los datos aportan información relevante para el análisis.

4.4 Obtención y discretización del álabe recto

La discretización para generar el álabe recto consiste en dividir exactamente el impulsor en 2 partes para poder trabajar con su sección transversal media y así extraer el álabe recto junto con los discos de revolución, esto se realizó con el programa SolidWorks.

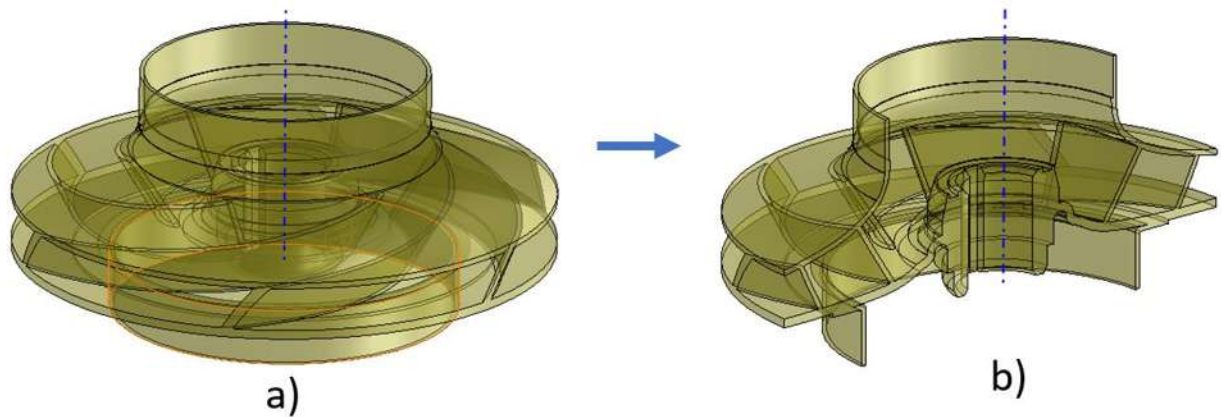


Figura 4. 7. a) Impulsor completo; b) Impulsor partido a la mitad con SolidWorks.

Con el impulsor partido a la mitad es posible discretizar el álabe recto con una serie de puntos en cada una de sus 4 fronteras, para esto es necesario regresar al programa Gambit Fluent y trabajar con el impulsor partido a la mitad.

Por conveniencia y facilidad de procesamiento de los datos se ha decidido nombrar a los ejes que constituyen el álabe recto como entrada, salida, banda y corona por que al hacer esto mantenemos una configuración de orientación para cada situación planteada, independientemente si se trata de una bomba o de una turbina.

Corona: Eje del álabe recto más cercano a la entrada de flujo en el caso bomba y a la salida de flujo en caso turbina.

Banda: Eje del álabe recto más cercano al motor en el caso bomba y más cercano al generador en el caso turbina.

Entrada: Eje del álabe recto más alejado a la flecha de transmisión mecánica en el caso bomba y turbina.

Salida: Eje del alabe recto más cercano de la fecha mecánica en el lado bomba y en el lado turbina. Cuando se trabaja con las *PATs* se sabe que la entrada de flujo en modo bomba será la salida de flujo en modo turbina, también que, la salida de flujo en modo bomba será la entrada de flujo en modo turbina. Por estas configuraciones y para evitar confusiones

la estandarización de corona, banda, entrada y salida siempre serán las de modo turbina para cualquier caso en cualquier modo.

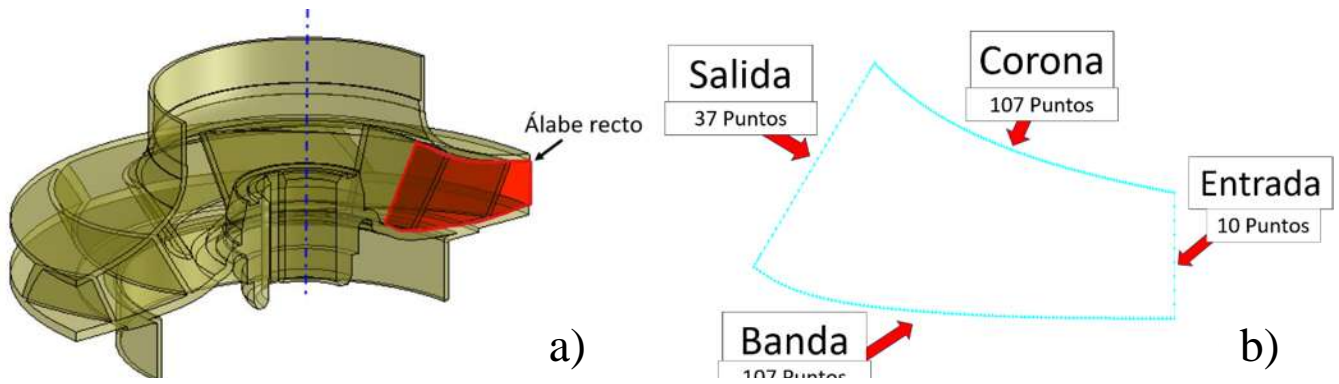


Figura 4. 8. a) Vista del álabe recto en el impulsor. b) Álabe recto discretizado con una serie de puntos en sus 4 fronteras

Por la practicidad de los datos se ha decidido discretizar el álabe recto con la siguiente cantidad de puntos mostrados en la Tabla 4.1.

Lado del álabe recto (Impulsor original)	Puntos
Corona	107
Banda	107
Entrada	10
Salida	37

Tabla 4. 1. Cantidad de puntos por lado

Todos los puntos de la tabla anterior constituyen el álabe recto del impulsor de la bomba, así que cada uno de estos puntos será trasladado cierto ángulo en el espacio para formar un nuevo marco funcional para la PAT en el cual se puede montar algún perfil. Dicho ángulo debe ser asignado a cada punto y para esto hay que extraerlo de la geometría de la turbina Francis 99, esto, sigue formando parte de la discretización y se hace un proceso semejante al anterior, solo que se dejará pendiente el álabe recto extraído y se trabajará ahora con el rodete de la turbina.

Para extraer dichos ángulos se cuenta con el modelo CAD original de la turbina Francis 99, el cual será procesado en Gambit Fluent y SolidWorks para extraer su álabe recto

justamente como lo hicimos anteriormente.

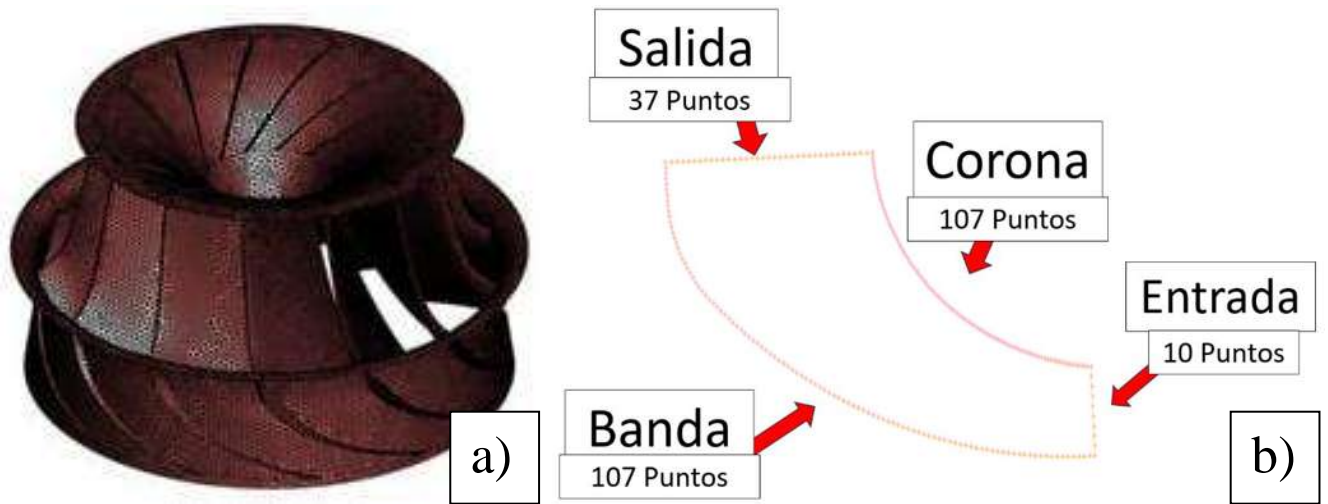


Figura 4. 9. a) Rodete Francis 99; b) Álabe recto del rodete Francis 99

Es importante que el álabe recto del rodete tenga la misma cantidad de puntos que el álabe recto del impulsor (tabla 4.1) por que a cada punto tendrá un ángulo correspondiente asignado. Dicho ángulo se extrae de la referencia en 2 dimensiones del álabe recto con el álabe principal original del rodete Francis que precisamente también tiene que ser discretizado con la misma cantidad de puntos.

Para hacer la discretización es necesario extraer el marco medio el alabe principal, mostrado en la figura 4.10.

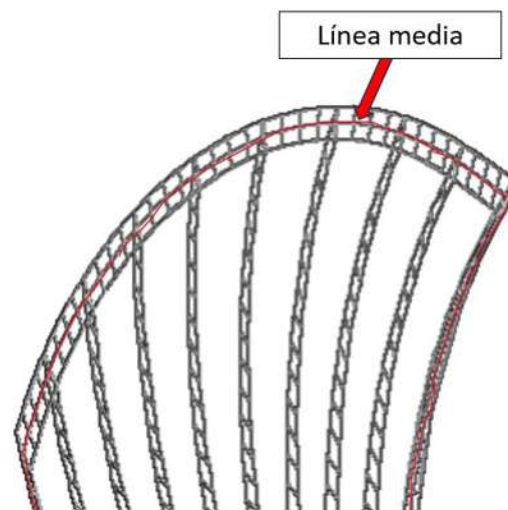


Figura 4. 10. Línea media del álabe principal de la turbina Francis 99 (Acercamiento al borde de salida)

Posteriormente el álabe recto y el marco de álabe principal son colocados su espacio original del rodete para generar 2 vectores, que parten desde el origen $A(0,0,0)$, hasta cada uno de los puntos en cuestión. El vector AB se dirige del origen hacia el punto correspondiente del álabe recto, el vector AC se dirige del origen hacia el punto correspondiente de la línea media del álabe primario (figura 4.11). Así, con estos dos vectores es posible encontrar el ángulo que se forma bidimensionalmente justo como lo hace [31].

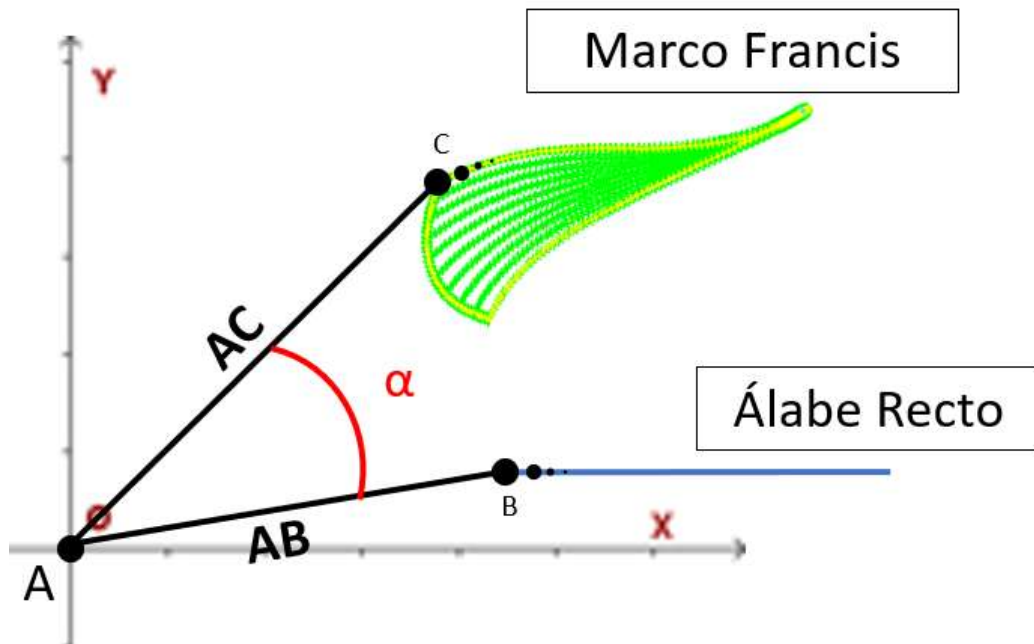


Figura 4. 11. Ángulo α formado por los vectores AC y AB pertenecientes a las direcciones hacia el Marco del álabe principal y el marco recto del rodete respectivamente

Con esto se obtienen 257 ángulos diferentes en plano XY que constituyen básicamente la geometría compleja del álabe principal de la turbina. Con esta referencia geométrica podemos replicar el mismo marco Francis para cualquier tipo de rodete independientemente de su tamaño o geometría partiendo del hecho de haber extraído previamente su álabe recto para asignarle una nueva ubicación a cada uno de sus puntos.

4.5 Desplazamiento de los puntos en el espacio

Ahora regresando a trabajar con el álabe recto extraído del impulsor de la bomba y ya que tenemos para cada punto un ángulo extraído mediante ingeniería inversa, es posible crear un nuevo marco para el álabe de la PAT, este nuevo marco mantendrá las características geométricas de la turbina Francis 99. Utilizando la parametrización como lo hace [31]. Se hace el desplazamiento de los puntos en espacio para formar el nuevo marco mostrado en la figura 4.12.

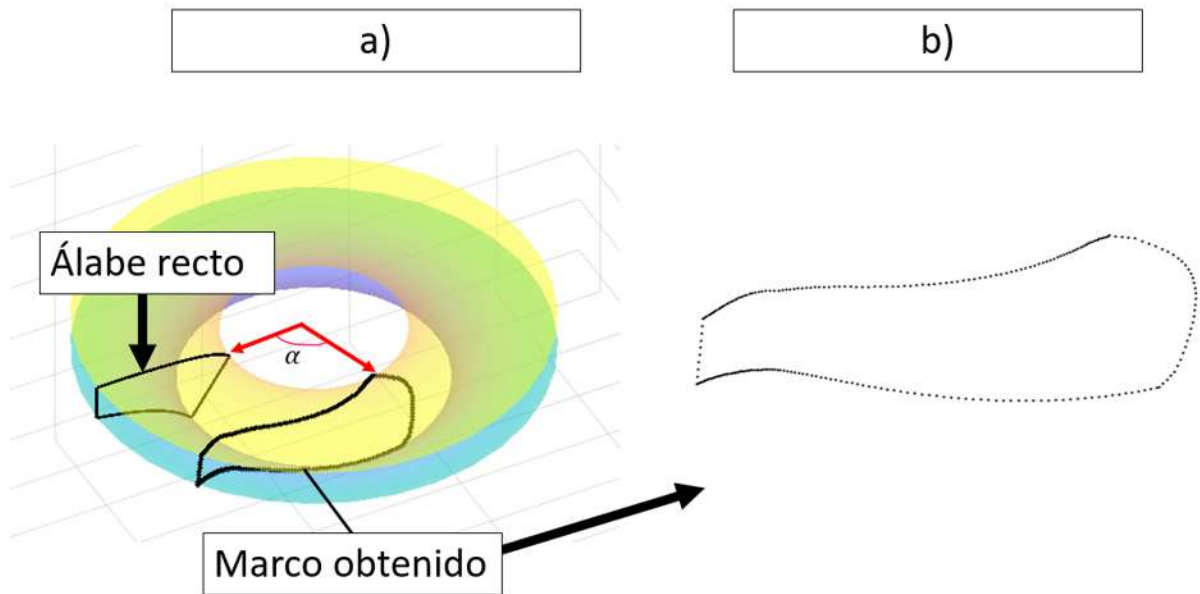


Figura 4. 12. a) Desplazamiento de cada punto del álabe recto; b) Marco obtenido para la PAT

Cuando se han desplazado los 261 puntos en el espacio se obtiene el nuevo marco para la PAT, es necesario montarle algún perfil aerodinámico para que se convierta en un álabe funcional para la bomba como turbina.

4.6 Generación de la superficie media

La superficie media del álabe, también conocida como esqueleto, se utiliza como guía para construir una nueva superficie que se ajuste a las especificaciones geométricas del álabe. Para generar la malla se tiene que tener una dirección para el recorrido de los datos porque si se utiliza un sentido de extracción variable o incorrecto los datos pierden continuidad y sentido lo que da como resultado la pérdida de la relación entre los puntos con los lados geométricos del álabe.

En la Figura 4.13 se propone una dirección para el recorrido basado en el plano lógico. Donde se relaciona cada borde del plano computacional con una dirección de extracción de datos. Se comienza a extraer datos desde el borde inferior con rb (banda), el borde de salida con rr (salida), el borde de ataque se relaciona con rl (entrada) y el borde superior con rt (corona), en ese orden. Siguiendo esta lógica, tendremos 4 fronteras computacionales que se relacionan con los 4 bordes del álabe por crear.

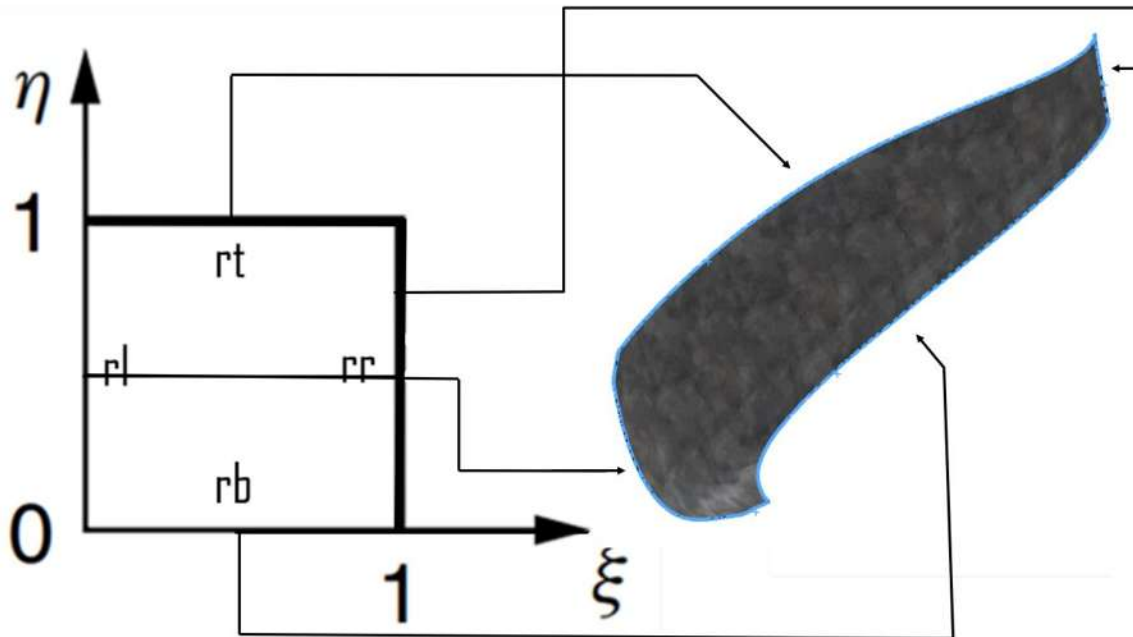


Figura 4. 13. a) Sentido de extracción de datos y los nombres de los sentidos lógicos del álabe.

Es fundamental parametrizar los datos discretos de cada lado mediante interpolación para crear un polígono que actúe como marco. Este marco se utiliza como frontera para generar una malla mapeada utilizando la Interpolación Transfinita (TFI). Una de las múltiples ventajas de emplear una malla generada mediante interpolación transfinita es su simplicidad, así como la facilidad que ofrece para controlar la malla, tanto en términos del número de divisiones como de la ortogonalidad de la misma [1].

En la figura 4.14 se muestra el algoritmo para generar la malla que sirve de superficie media del álabe.

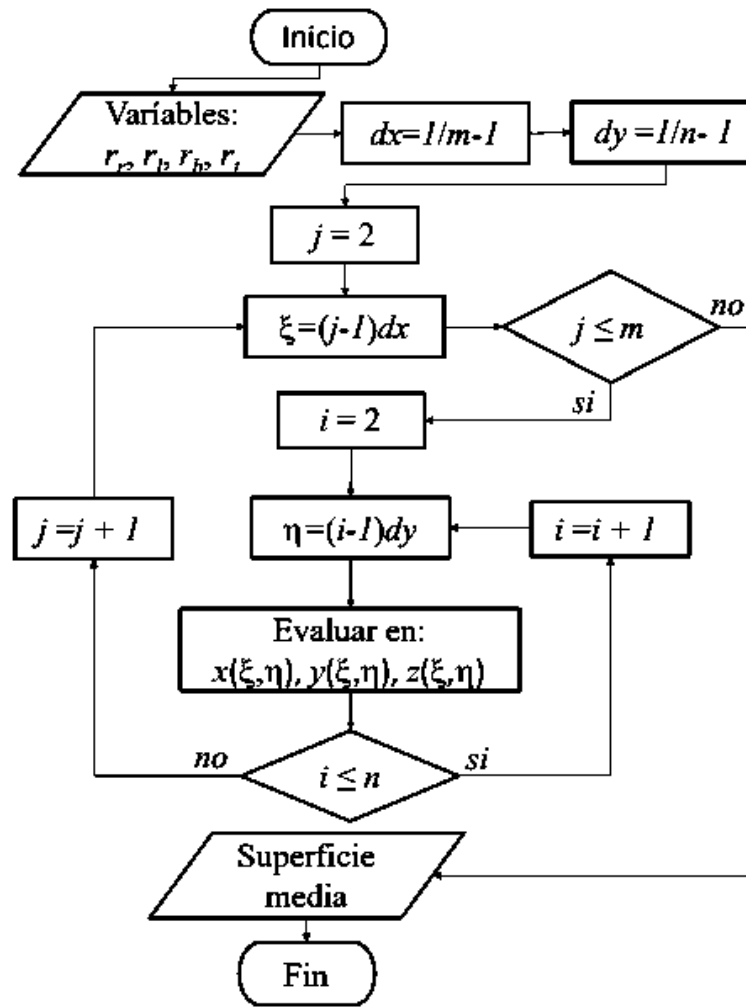


Figura 4. 14. a) Algoritmo para la generación de la superficie media

La parametrización de los datos discretos permite definir con precisión los contornos del polígono que servirá como marco, estableciendo así los límites dentro de los cuales se desarrollará la malla. Esta malla, una vez generada, proporciona una estructura ordenada y regular que facilita el análisis o la simulación de las características geométricas del álabe.

Al establecer el sentido lógico para la generación de la malla, se aplican las ecuaciones de la interpolación transfinita. Estas ecuaciones, detalladas en el capítulo 2 de este trabajo, permiten una transición suave y continua entre los valores discretos iniciales, creando así una malla uniforme y bien distribuida. La metodología propuesta por [1] fue seguida de cerca, revelando que una malla con una división de 100x100 en los valores de ξ y η es adecuada para obtener una superficie media que capture con precisión las características geométricas del álabe.

En la Figura 4.15 se presenta la malla resultante, que constituye la superficie media del álabe.

Esta malla describe detalladamente el comportamiento geométrico del álabe, proporcionando una representación precisa y fiel de su estructura. Se observa que el esqueleto del álabe está completo y no resalta la maya por fuera de él, lo cual es un indicio claro de que la generación de la superficie dentro de los parámetros del marco ha sido exitosa.

La malla generada mediante interpolación transfinita no solo facilita la representación precisa de las características geométricas del álabe, sino que también permite un control preciso sobre los parámetros de la malla. Esto incluye la posibilidad de ajustar el número de divisiones y asegurar la ortogonalidad, lo cual es crucial para obtener resultados precisos en simulaciones y análisis posteriores.

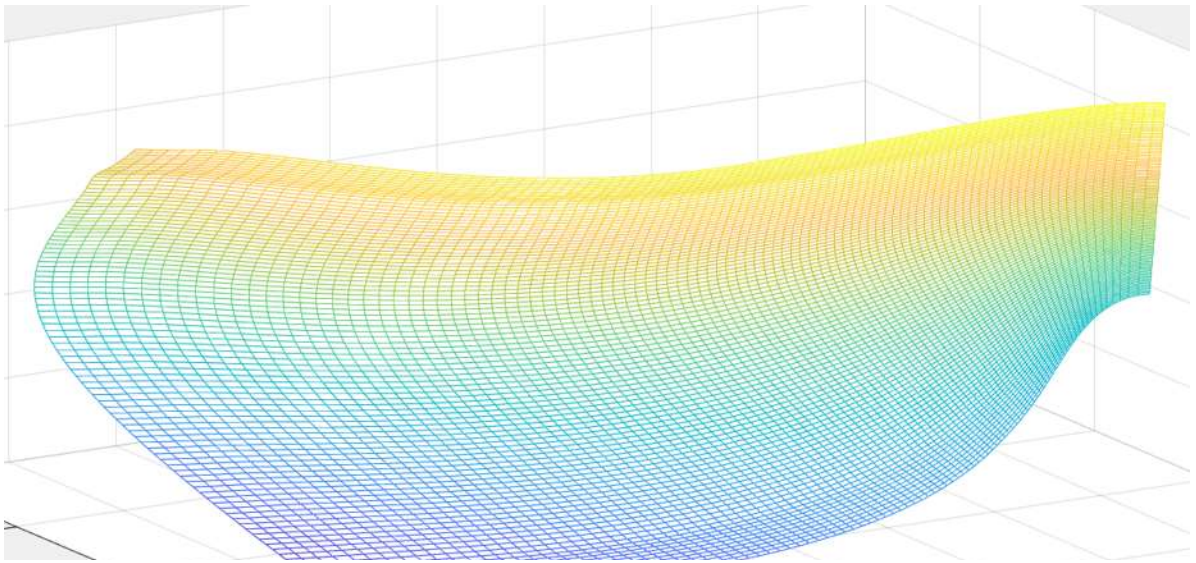


Figura 4. 15. a) Superficie media del álabe (Malla 100 x 100)

4.7 Generación de la superficie del álabe

La generación de un nuevo álabe para la *PAT* inicia con la obtención del esqueleto del álabe y su superficie media. Este esqueleto es una estructura simplificada que representa la forma general del álabe. Sin embargo, para generar las superficies completas del álabe, es necesario montar un perfil detallado sobre este esqueleto.

En la figura 4.16 se observa el perfil del álabe original de la bomba, el cual está pensado para su funcionamiento como bomba, mostrándose redondeado en la sección del borde de entrada y por otro parte afilado en la sección del borde de salida. Esto no será más pensado para su funcionamiento en modo bomba por ende si se desea montar el mismo perfil se tendrían que extraerse todos sus datos y montarse volteado 180° para coincida el afilamiento y el redondeo con el sentido de flujo invertido actual en modo turbina.

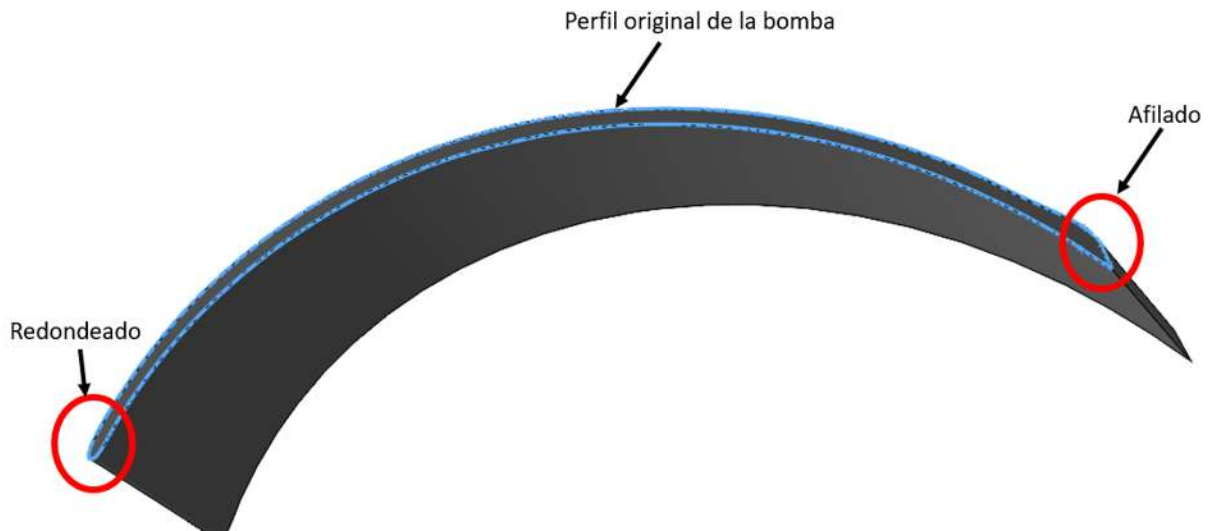


Figura 4. 16. Perfil original del álabe de la bomba

Por la practicidad de los datos y para evitar el montaje invertido del perfil original se ha optado por realizar el montaje como lo hace [1] utilizando un perfil NACA, precisamente un NACA 5. Con este perfil y un algoritmo adaptado que utiliza el producto tensorial ortogonal para aprovechar la superficie media extrapolada es posible construir los lados del álabe, es decir, básicamente hacemos una construcción del alabe proyectando ortogonalmente el perfil a lo largo del esqueleto del álabe.

Proyectando ortogonalmente a lo largo del esqueleto del álabe donde se utilizan 100 divisiones, es decir, $\xi = \eta$. En la Figura 4.17 y 4.18 se observa con alta definición geometría la generación de la superficie del álabe.

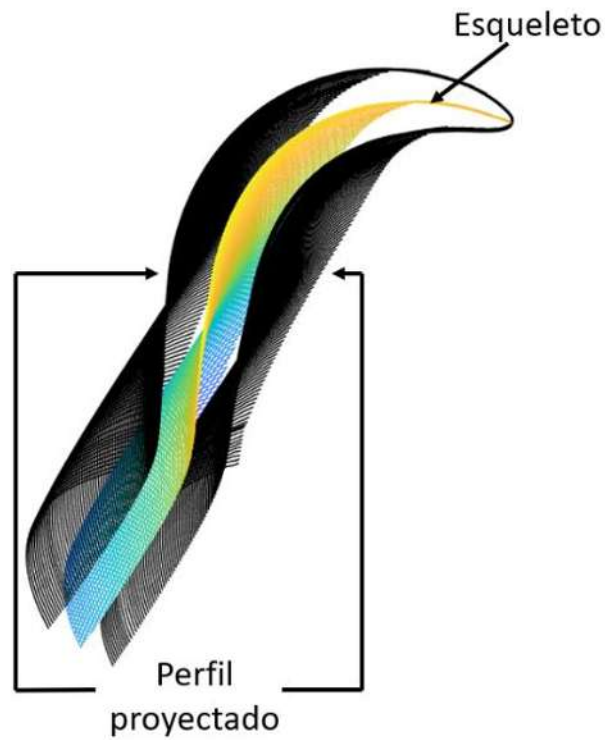


Figura 4. 17. Proyección del perfil a lo largo de la superficie

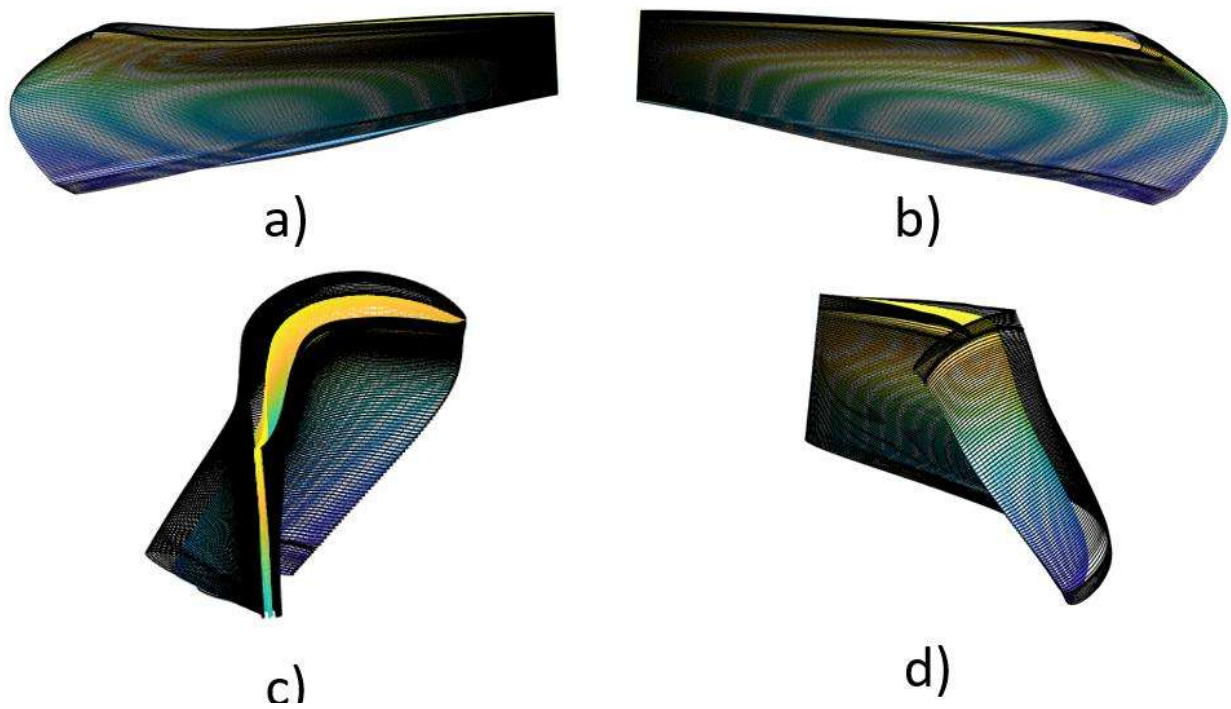


Figura 4. 18. Generación de las superficies del álabe (densidad 100×100)

4.8 Montaje del nuevo álabe sobre los discos

El montaje del álabe en los discos del rodete es una etapa crítica en la fabricación de rodetes para turbinas, con un impacto significativo en su rendimiento, eficiencia y seguridad operativa. Este proceso no solo asegura la correcta posición y fijación de los álabes sobre los discos, sino que también optimiza el flujo de agua y garantiza una distribución uniforme de la energía a lo largo del rodete, aspectos fundamentales para maximizar la eficiencia de la turbina y prolongar su vida útil.

La precisión en el montaje del álabe es esencial para prevenir problemas operativos graves. Un montaje incorrecto puede resultar en distribuciones desiguales de carga sobre los discos, lo cual podría provocar vibraciones excesivas, fatiga prematura de materiales y, en casos extremos, el fallo catastrófico del rodete. Por lo tanto, cada fase de este proceso debe ser ejecutada con meticulosidad para garantizar un funcionamiento seguro y confiable del equipo.

Después de finalizar el diseño y la fabricación del álabe junto con los discos del rodete, se procede a su integración utilizando herramientas avanzadas como SolidWorks. Este software facilita la realización de simulaciones detalladas y ajustes precisos, tal como se describe en las figuras 14.19a y 14.19b del procedimiento. En la etapa inicial, se posiciona la banda del álabe de

manera que establezca el máximo contacto posible con el disco inferior en una posición estratégica y precisa, optimizando así la superficie de contacto para una transferencia eficiente de energía.

Posteriormente, se realiza la revolución del álabe a lo largo de la circunferencia del disco, como se muestra en las figuras 14.19c y 14.19d. Esta operación permite ajustar el número de álabes según los requisitos específicos del diseño, asegurando una distribución equilibrada y uniforme alrededor del rodete. Este paso es fundamental para minimizar cualquier desequilibrio rotacional durante la operación de la turbina, asegurando una operación estable y eficiente.

En las fases finales del montaje, representadas en las figuras 14.19e y 14.19f, se añade el disco superior asegurando un contacto óptimo y firme con la corona del álabe. Este ajuste final es crucial para garantizar que todos los componentes estén alineados correctamente, evitando posibles fracturas y desbalances durante el flujo del fluido a través del rodete.

En resumen, el montaje del álabe en los discos del rodete es un proceso técnico que demanda precisión y cuidado en cada detalle. Mediante el uso de herramientas avanzadas de diseño asistido por computadora y prácticas de montaje rigurosas, se asegura que cada turbina fabricada cumpla con los más altos estándares de rendimiento, eficiencia y seguridad en la industria de generación de energía.

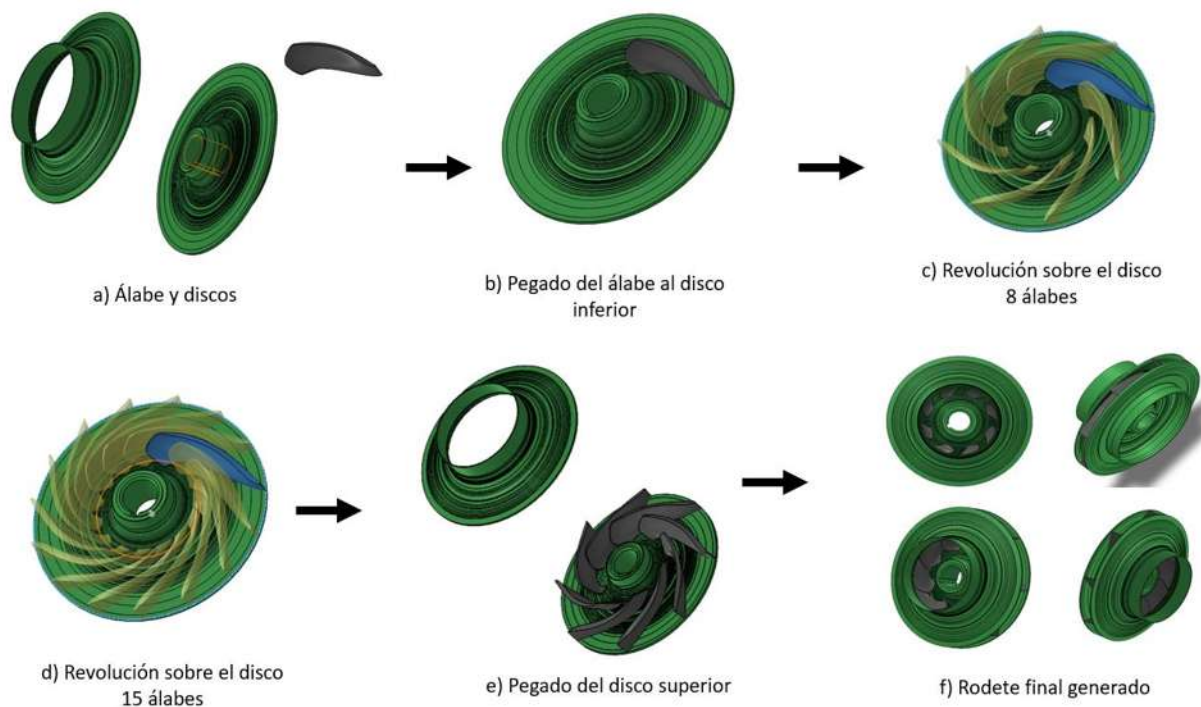


Figura 4. 19. Montaje y revolución del álabe sobre los discos

4.9 Impresión 3d

Inicialmente para poder ejecutar la impresión del nuevo rodete es necesario hacer un prototipado, donde se transforma el archivo del impulsor reconstruido desde un formato IGS a STL, que dicho formato de transformación es el comúnmente utilizado para representar modelos tridimensionales como una colección de triángulos facetados este formato es vital para poder procesar el rodete en un software especializado conocido como "slicers". En este proyecto, se optó por utilizar Ultimaker Cura 5.6.0, una herramienta de código abierto ampliamente reconocida en la comunidad de impresión 3D. Este software realiza una segmentación horizontal del modelo computacional, y asigna beneficiosamente la mejor posición de los soportes del elemento, preparándolo así para la impresión aditiva.

Preparación del Modelo

La preparación del modelo es una fase crítica antes de la impresión. Implica verificar la geometría del modelo, corregir posibles errores y optimizar el diseño para asegurar que el archivo STL generado sea apto para el proceso de slicer. A continuación, se detallan los pasos clave en esta etapa:

- **Verificación de la Geometría:** Se utiliza software de modelado 3D como SolidWorks o Fusión 360 para abrir el archivo IGS y verificar la geometría del impulsor reconstruido. Durante esta etapa, se asegura que todas las superficies y características sean precisas y completas.
- **Corrección de Errores:** Si se encuentran imperfecciones geométricas o discontinuidades en el modelo, se utilizan herramientas de reparación de mallas como MeshLab o Netfabb para corregirlas. Esto es crucial para evitar problemas durante la impresión, como capas mal adheridas o deformaciones del modelo.
- **Optimización del Diseño:** Se ajustan los detalles del diseño para mejorar la manufacturabilidad y la calidad del resultado final. Esto puede incluir la simplificación de estructuras complejas, la reducción de geometría innecesaria y la optimización de las tolerancias para asegurar un ensamblaje adecuado.

Configuración del Setup de la Impresora

La configuración del setup es fundamental para el éxito del prototipado rápido. A continuación, se detallan los parámetros críticos y su impacto en el proceso de impresión:

- **Temperatura de la Boquilla:** Fijada en 200°C, esta temperatura regula la viscosidad del material fundido (en este caso, PLA+), afectando la fluidez y la adherencia entre capas del modelo impreso.
- **Temperatura de la Cama:** Ajustada a 60°C, esta temperatura asegura que la primera capa

Modificación del impulsor de una PAT

del modelo se adhiera correctamente a la plataforma de impresión, minimizando el riesgo de deformaciones y mejorando la estabilidad estructural durante todo el proceso de impresión.

- **Altura de Capa:** Seleccionada en 0.32 mm, define el grosor de cada capa de material depositado. Una menor altura de capa mejora la resolución superficial del objeto impreso, aunque puede prolongar el tiempo total de impresión.
- **Relleno:** Utilizado una densidad de relleno del 20%, este parámetro determina la densidad interna del modelo impreso. Un mayor porcentaje de relleno aumenta la resistencia estructural del objeto final, proporcionando soporte interno y mejorando su durabilidad.
- **Soportes:** Empleados soportes tipo Árbol, generados automáticamente por el software de slicer. Estos soportes son esenciales para áreas del modelo que requieren soporte durante la impresión, facilitando la eliminación posterior sin dañar la pieza impresa.
- **Velocidad de Impresión:** Configurada a 50 mm/s, esta velocidad determina la rapidez con la que la boquilla en este caso de 0.8 mm se desplaza a lo largo de los ejes durante la impresión. Una velocidad adecuada asegura un flujo de material uniforme y evita problemas como el deslizamiento o la acumulación de material.

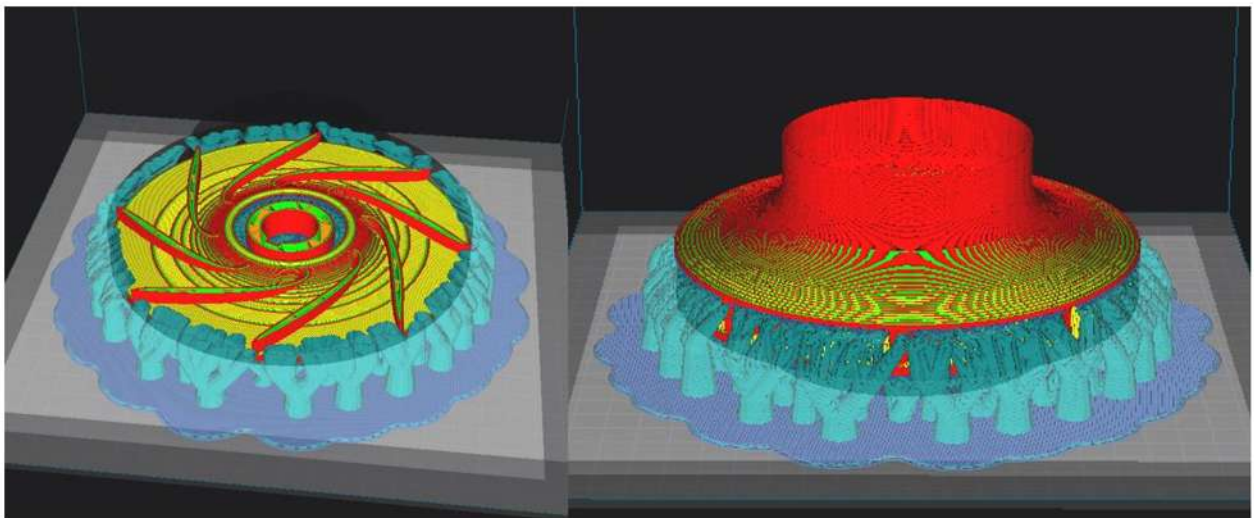


Figura 4. 20. Segmentación previa del rodete en programa

Para la impresión se utilizó una impresora Ender 3, reconocida por su fiabilidad y versatilidad en aplicaciones de prototipado rápido. El material PLA+ se seleccionó por su resistencia mecánica mejorada y su acabado superficial de alta calidad. Este material requiere una temperatura de extrusión entre 190°C y 230°C y una temperatura de cama entre 50°C y 70°C para optimizar la adhesión entre capas y la calidad de impresión.

Durante el proceso de impresión, se presta especial atención a la primera capa, crucial para asegurar una adherencia sólida del modelo a la plataforma de impresión. La Figura 4.21a muestra la primera capa en detalle, mientras que las Figuras 4.21b, 4.21c y 4.21d ilustran el progreso secuencial de la impresión a medida que se construye el objeto capa por capa.

Este enfoque meticuloso en la configuración y ejecución del proceso de impresión 3D no solo garantiza la calidad y precisión del resultado final, sino que también optimiza los recursos y el tiempo de producción. La utilización de tecnología de impresión aditiva y materiales avanzados como el PLA+ juega un papel crucial en la reconstrucción eficiente y precisa de componentes complejos mediante ingeniería inversa.

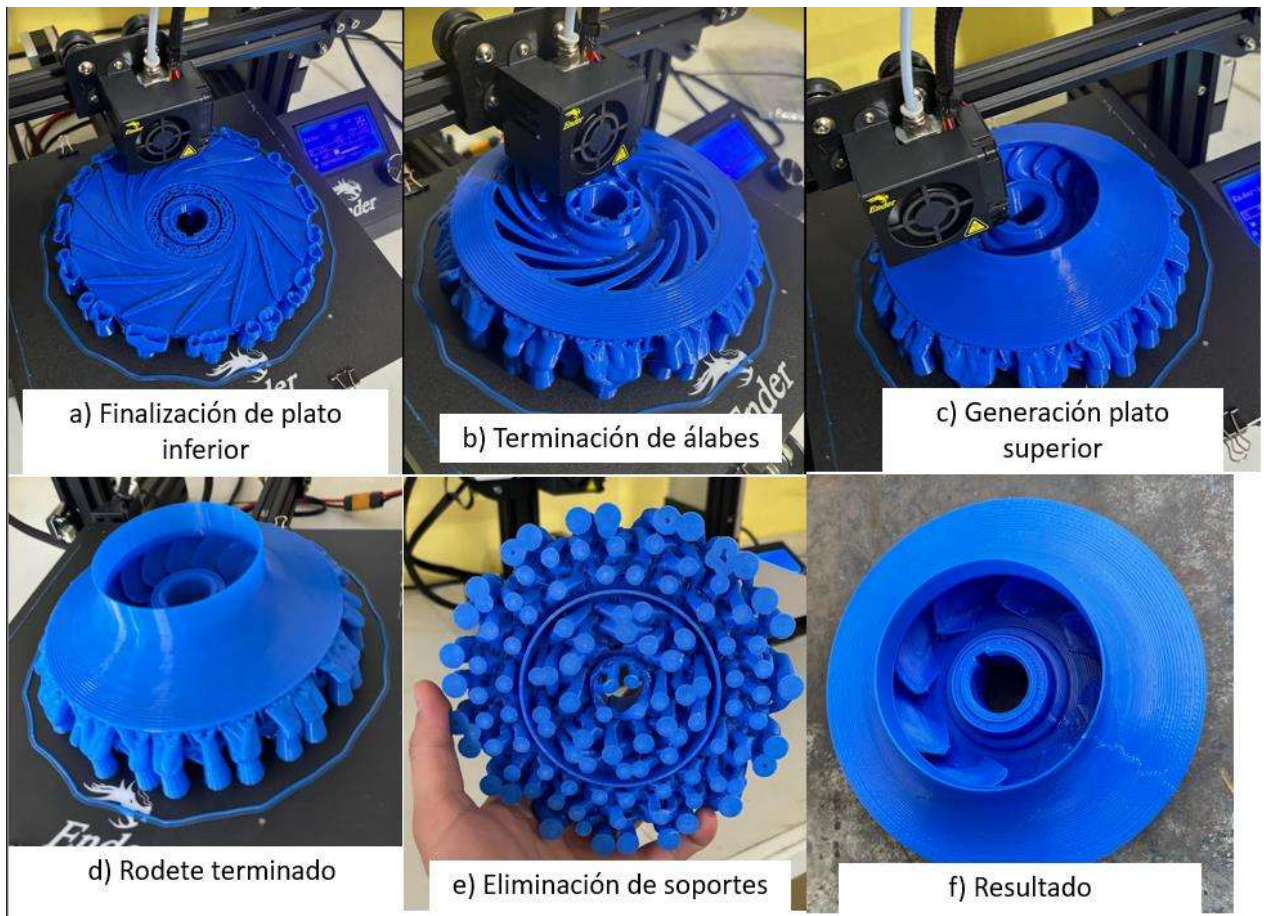


Figura 4. 21. Fases de la impresión 3D

Capítulo 5 Análisis de resultados

5.1 Banco de pruebas EAFIT Colombia

Con el laboratorio ubicado en la universidad EAFIT en Medellín es posible caracterizar el nuevo rodete simulando las condiciones reales de funcionamiento, con esto, se puede construir la curva característica de los cuatro cuadrantes en su operación como turbina. En la figura 5.1 se muestra un esquema del laboratorio.

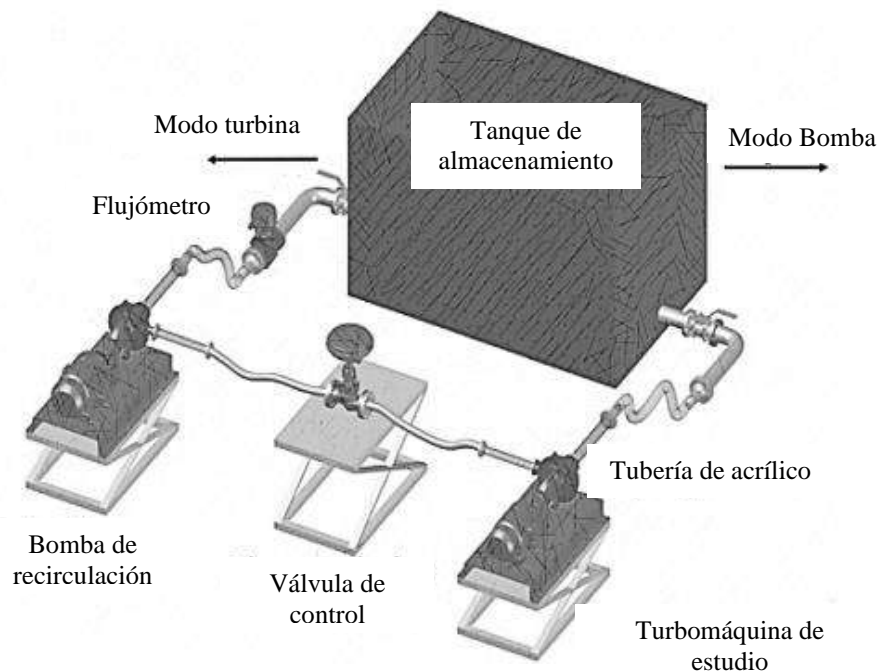


Figura 5. 1. Diagrama esquemático del banco de pruebas [45]

Instrumentación:

Sensores de Flujo: Para medir el caudal a través de la bomba.

Sensores de Presión: Para monitorear la presión en distintos puntos del sistema.

Sensores de Par: Para determinar el torque obtenido.

Sensores de Vibración y Acelerómetros: Instalados en la voluta de la bomba para analizar fenómenos hidrodinámicos.

Sensores de Temperatura: Para registrar la temperatura de funcionamiento.

Sistema de Adquisición de Datos: Una plataforma digital basada en LabVIEW® con controladores del tipo cRIO, [45].

5.2 Obtención de datos

Desde una perspectiva experimental, se llevó a cabo un montaje experimental en el banco de pruebas de turbomáquinas de la Universidad EAFIT en Colombia. Este banco de pruebas, descrito en el artículo publicado por Tobon et al., se utilizó para estudiar el comportamiento de las bombas operando como turbinas (*PAT*).

El procedimiento para obtener las curvas características de las *PAT* emula el comportamiento de un embalse en una central hidroeléctrica. Esto se hace manteniendo constante la carga hidráulica H (medida en metros de columna de agua) y variando la velocidad de rotación de la bomba. La carga hidráulica se describe con la ecuación 5.1:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) \quad 5.1$$

- P_1 es la presión en la zona de alta presión,
- P_2 es la presión en la zona de baja presión,
- V_1 es la velocidad del fluido en la zona de alta presión,
- V_2 es la velocidad del fluido en la zona de baja presión,
- Z_1 es la altura en la zona de alta presión,
- Z_2 es la altura en la zona de baja presión,
- γ es el peso específico del agua.
- g es la aceleración debida a la gravedad.

El proceso se inicia desde el punto de "embalamiento" (donde el torque es igual a cero) hasta alcanzar la mínima velocidad de rotación posible del sistema, que es de 400 revoluciones por minuto (rpm). Las alturas del embalse emuladas fueron 3, 4, 5, 6 y 7 metros.

En cada punto de medición, se tomaron datos de presión en las zonas de alta y baja presión, así como de caudal, torque y velocidad angular. A partir de estos parámetros, se estimaron la potencia hidráulica y la potencia mecánica utilizando las siguientes ecuaciones:

La potencia hidráulica P_H se calcula con la ecuación 5.2:

$$P_H = \gamma * Q * H \quad 5.2$$

donde:

- Q es el caudal,
- γ es el peso específico del fluido,
- H es la carga hidráulica.

La potencia mecánica P_M se calcula con la ecuación 5.3:

$$P_M = T * \omega \quad 5.3$$

- T es el torque,
- ω es la velocidad angular.

Los resultados obtenidos mostraron que la potencia hidráulica máxima fue de aproximadamente 600 W, como se presenta en la figura 5.1 del documento. La potencia mecánica efectiva en el eje, mostrada en la figura 5.2, alcanzó un máximo de aproximadamente 300 W. Esta potencia mecánica es la potencia útil disponible cuando la bomba opera como turbina.

Este estudio proporciona una comprensión detallada del rendimiento de las *PAT* en diversas condiciones operativas, lo que es crucial para optimizar su uso en aplicaciones de generación de energía.

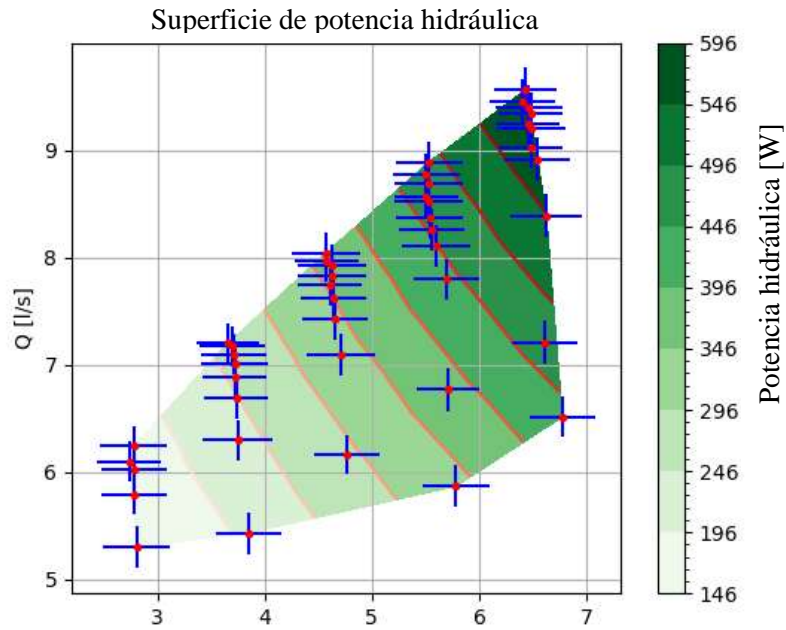


Figura 5. 2. Potencia hidráulica.

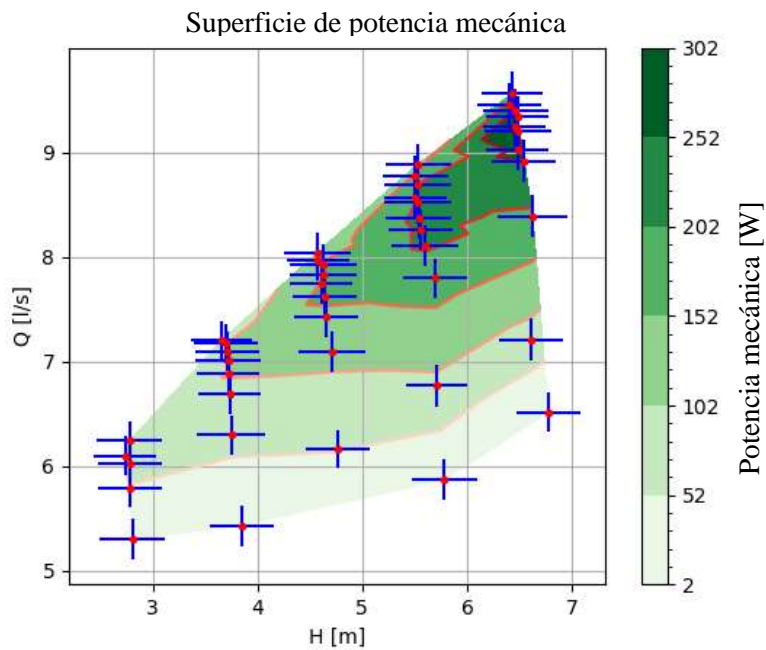


Figura 5. 3. Potencia mecánica

Para comprender mejor el rendimiento de un sistema hidráulico, es útil definir la "colina de operación" del sistema a partir de las líneas de isoeficiencia. Las líneas de isoeficiencia permiten estimar las áreas en las que se produce la mayor conversión de potencia hidráulica a potencia mecánica. Este análisis se realiza utilizando un rodete que ha sido rediseñado e impreso.

Modificación del impulsor de una PAT

En la Ilustración 3, se muestra esta colina de operación. En el gráfico, se puede observar una zona de máxima eficiencia que alcanza aproximadamente el 55%. Esta eficiencia máxima se logra cuando el sistema opera con un caudal de 8.5 litros por segundo (l/s) y una altura de 5.5 metros.

Esta información es crucial para optimizar el funcionamiento del sistema, ya que permite identificar las condiciones en las que se obtiene el mejor rendimiento del rodete y, por ende, del sistema hidráulico en su totalidad.

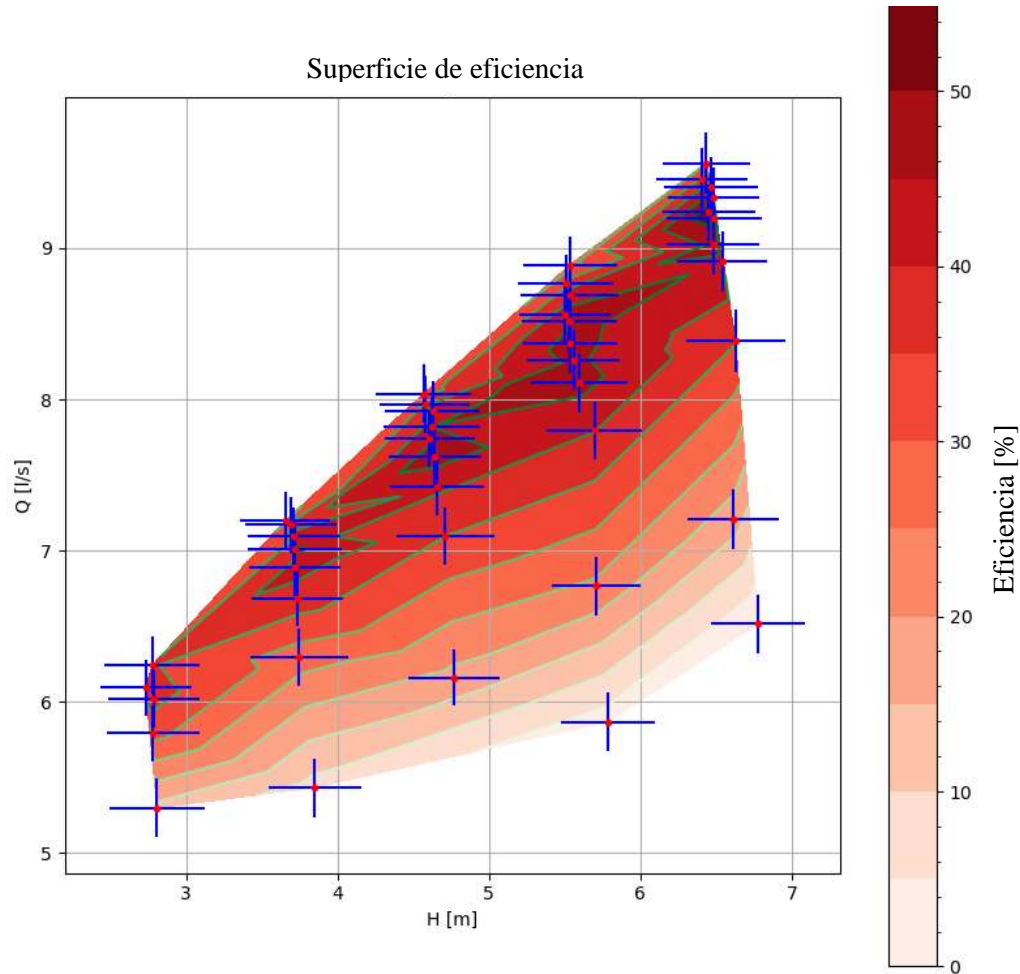


Figura 5. 4. Colina de operación

Para analizar el comportamiento del sistema de manera adimensionalizada, se utilizan números adimensionales que están descritos en la norma BS EB 60193:2019, [32]. Esta norma define dos números adimensionales importantes: Q_{ED} y n_{ED} . Estos números permiten adimensionalizar el caudal y la velocidad rotacional del sistema en relación con la energía y el diámetro de referencia del rodete.

Los números adimensionales se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{E}} \quad 4)$$

$$n_{ED} = \frac{nD}{\sqrt{E}} \quad 5)$$

- Q_{ED} representa el caudal.
- D es el diámetro de referencia del rodete.
- E es la energía.
- n_{ED} es la velocidad rotacional.

Estos parámetros, así como su significado en el contexto de la curva de cuatro cuadrantes para turbomáquinas, están detallados tanto en la norma BS EB 60193:2019 [32] como en varios artículos científicos publicados. Entre estos artículos se encuentran los trabajos [33-40].

Con estos números adimensionales, se construye la curva tipo “S” para el cuadrante de turbina. Esta curva permite visualizar todos los puntos de operación y su eficiencia, como se muestra en la Ilustración 4.

La interpretación de esta curva demuestra que el diseño del rodete y su fabricación mediante procesos de impresión 3D pueden llevar a resultados sobresalientes en la conversión de energía cuando se utilizan las bombas en función de turbina.

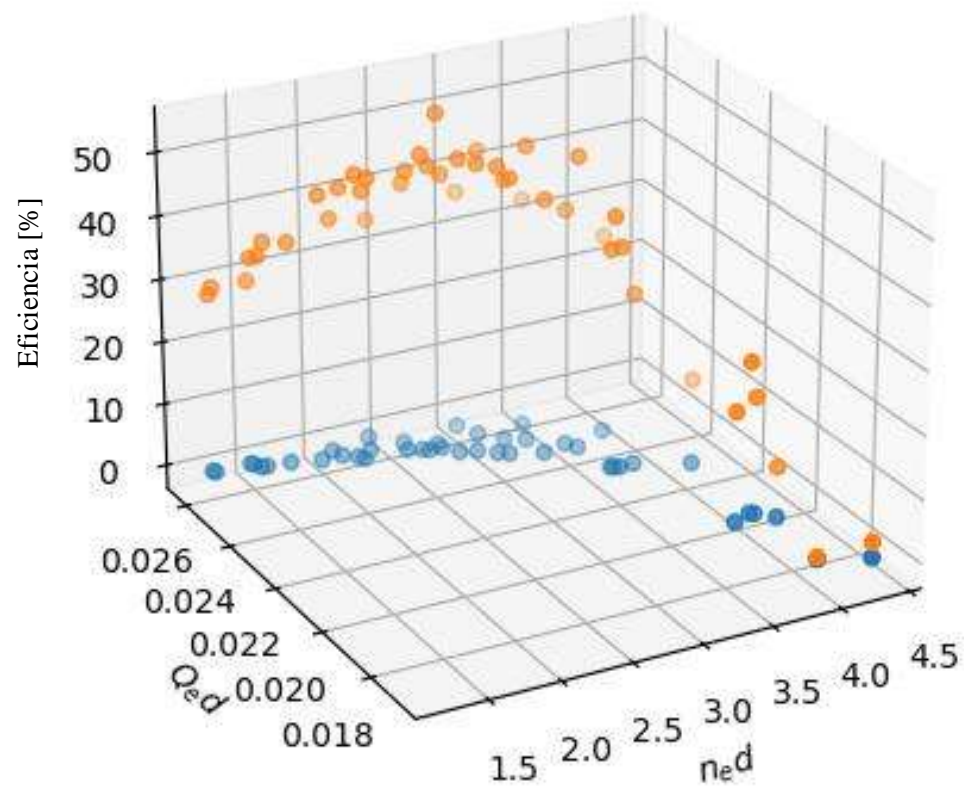


Figura 5. 5. Curva “S”

Conclusiones y sugerencias

Las bombas están diseñadas principalmente para funcionar en modo impulsión, lo cual limita su desempeño cuando se utilizan en modo inverso. En este contexto, el diseño del impulsor tradicional impone restricciones significativas en la eficiencia operativa, resultando en una eficiencia máxima de 35.45%. Este nivel de eficiencia es característico de las bombas en su configuración original debido a las limitaciones inherentes al diseño del impulsor y su adaptación a las condiciones de funcionamiento inverso.

Sin embargo, el reemplazo del impulsor original por un rodete rediseñado utilizando técnicas avanzadas como la ingeniería inversa y algoritmos sofisticados para el diseño de álabes ha demostrado una mejora significativa en la eficiencia. La adaptación del rodete ha permitido alcanzar una eficiencia de hasta un 55%. Este incremento es especialmente relevante ya que indica que, al optimizar el diseño del rodete con materiales más pesados que ofrezcan mayor inercia, es posible alcanzar mejoras adicionales en la eficiencia. El uso de materiales más robustos podría proporcionar también una mayor estabilidad estructural que el PLA, por ende, un mejor aprovechamiento de la energía.

Los resultados obtenidos sugieren que el algoritmo de diseño empleado para crear el rodete red aún tiene margen de mejora. Se recomienda considerar la inclusión de factores de escalamiento en el algoritmo para asegurar que el álabe rediseñado mantenga con precisión los parámetros originales del diseño y, de esta forma, maximizar su rendimiento. La optimización del algoritmo podría permitir ajustes más finos que potencialmente podrían mejorar aún más la eficiencia del rodete.

Para validar completamente los beneficios del rodete rediseñado, es necesario llevar a cabo una evaluación comparativa de la eficiencia del impulsor original bajo las mismas condiciones de operación y utilizando el mismo material de fabricación. Esta evaluación permitirá confirmar si las mejoras observadas son efectivamente atribuibles al rediseño del rodete.

Además, será valioso explorar diferentes configuraciones de diseño de álabes para determinar si pueden superar la eficiencia lograda con el rodete de la turbina Francis 99. La investigación de nuevos diseños podría ofrecer oportunidades adicionales para optimizar el rendimiento de la bomba en modo inverso y maximizar su eficiencia en aplicaciones prácticas.

Bibliografía

- [1] Delgado, G., Galván, S., Dominguez-Mota, F., García, J. C., & Valencia, E. (2020). Reconstruction methodology of a Francis runner blade using numerical tools. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34, 1237-1247.
- [2] Fernando S. Delgado, Galván, Dominguez-Mota, Delgado. (2023). Reconstrucción del álabe del rodete francis de la U-4 de Tirio; Michoacán.
- [3] Fatih Birol, International Energy Agency (2020). *Key World Energy Statistics 2020*
- [4] Ulyses Joshua Rosas Godínez “La carencia de un adecuado seguimiento a los mantenimientos diarios de las unidades de cada central Hidroeléctrica de la República Mexicana”. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023
- [5] Stefanizzi, M., Torresi, M., Fortunato, B., and Camporeale, S. M. (2017). Experimental Investigation and Performance Prediction Modeling of a Single Stage Centrifugal Pump Operating as Turbine. *Eng. Proced.* 126, 589–596. doi:10.1016/j.egypro.2017.08.218
- [6] Binama, M., Su, W.-T., Li, X.-B., Li, F.-C., Wei, X.-Z., and An, S. (2017). Investigation on Pump as Turbine (PAT) Technical Aspects for Micro Hydropower Schemes: A State-Of-The-Art Review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 79, 148–179. doi:10.1016/j.rser.2017.04.071
- [7] O. A. Jaramillo, M. A. Borja, and J. M. Huacuz, "Using Hydropower to Complement Wind Energy: A Hybrid System to Provide Firm Power," *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 1887-1909, 2004.
- [8] Jain, S. V., Swarnkar, A., Motwani, K. H., and Patel, R. N. (2015). Effects of Impeller Diameter and Rotational Speed on Performance of Pump Running in Turbine Mode. *Energ. Convers. Manag.* 89, 808–824. doi:10.1016/j.enconman.2014.10.036
- [9] Arulmurugu & Pandian, Vasanthakumar. (2015). Numerical investigation of centrifugal pump as turbine. *Advances and Applications in Fluid Mechanics.* 17. 147-163. 10.17654/AAFMApr2015_147_163.
- [10] Yang, S.-S.; Kong, F.-Y.; Chen, H.; Su, X.-H. Effects of Blade Wrap Angle Influencing a Pump as Turbine. *J. Fluids Eng.* 2012, 134, 061102.
- [11] Wang, Tao & Xiang, Ru & Yu, He & Zhou, Min, 2023. "Performance improvement of forward-curved impeller with an adequate outlet swirl using in centrifugal pump as turbine," *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 204©.
- [12] ITT *Goulds* Pumps, G&L SERIES SSH-C and SSH-F Installation, Operation and Maintenance Instructions, www.goulds.com
- [13] Tao Wang, Chuan Wang, Fanyu Kong, Qiuqin Gou, Sunsheng Yang,

Theoretical, experimental, and numerical study of special impeller used in turbine mode of centrifugal pump as turbine, *Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.156>.

[14] Jain S., Swarnkar A., Motwani K., Patel R., Efectos del diámetro del impulsor y la velocidad de rotación sobre el rendimiento de la bomba funcionando en modo turbina, *Conversaciones de energía. Gestionar*, vol. 89, págs. 808-824, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.036>

[15] Mohd Azlan, Ai-khalid, Hushairi Zen, Misran (2016). CFD Modelling of Pump as Turbine with Various Number of Blade for Microhydro System. DOI:10.33736/jaspe.171.2016

[16] Shi, FengXia & Yang, JunHu & Wang, XiaoHui. (2018). Analysis on the effect of variable guide vane numbers on the performance of pump as turbine. *Advances in Mechanical Engineering*. 10.168781401878079. 10.1177/1687814018780796.

[17] Yang S-S, Wang C, Chen K, Yuan X. Research on Blade Thickness Influencing Pump as Turbine. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014;6. doi:10.1155/2014/190530

[18] ©2024 Michael Smith Engineers “Centrifugal pumps - Useful Information” The UK’s Leading Pump Specialist.

[19] HYDRAULIC TURBINES Design, Erection and Operation By Hermod Brekke 2016

[20] Alves, J., et al. (2019). Design and performance evaluation of Francis turbines. *Renewable Energy*, 140, 597-612. doi:10.1016/j.renene.2019.03.104

[21] Nourbakhsh, A. (2015). Performance characteristics of Francis turbines under part-load conditions. *Journal of Fluids Engineering*, 137(5), 051102. doi:10.1115/1.4029232

[22] Peña, G. E. O. (2019). Artículo.Turbina Francis. Dfg. <https://doi.org/10.3458/journal456.46756>

[23] Nasir, Abdulbasit & Dribssa, Edessa & Girma, Misrak. (2024). The pump as a turbine: A review on performance prediction, performance improvement, and economic analysis. *Heliyon*. 10. e26084. 10.1016/j.heliyon.2024.e26084.

[24] H. Ramos, A. Borga, Pumps as turbines: an unconventional solution to energy production, *Urban Water*, Volume 1, Issue 3, 1999, Pages 261-263, ISSN 1462-0758, [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00016-9).

[25] Pedro Fernandez Diez, Turbinas Hidráulicas, Universidad de Cantabria departamento de ingeniería eléctrica y energética.

[26] Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2017). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education

[27] Buonamici F, Carfagni M, Furferi R, Governi L, Lapini A, Volpe Y. Reverse engineering modeling methods and tools: a survey. *Computer Aided Design and Applications*. 2018;15(3):443-64. doi: 10.1080/16864360.2017.1397894

[28] Joe F Thompson, Bharat K Soni, and Nigel P Weatherill. *Handbook of grid generation*. CRC press, 1998.

Modificación del impulsor de una PAT

[29] Luis David Martínez Hernández, Dr. Sergio Ricardo Galván González, Giovanni Delgado Sánchez. Metodología de reconstrucción en una geometría fracturada de un impulsor centrífugo mediante ingeniería inversa. Morelia, Michoacán, 2023.

[30] M., & M. J. P. Farrashkhalvat, Basic Structured Grid Generation: With an introduction to unstructured grid generation. Elsevier. 2003.

[31] Ing. María Goretti Gama Guzmán, Dr. Sergio Ricardo Galván González, Dr. Giovanni Delgado Sánchez, Definición de los parámetros de forma geométrica de los álabes del rodete de la turbina Francis 99. Morelia, Michoacán, 2024.

[32] Standard, BS EB 60193:2019 Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines—Model acceptance tests, 1st ed. London: British Standard, 2019.

[33] Z. Wang, B. Zhu, X. Wang, and D. Qin, “Pressure Fluctuations in the S-Shaped Region of a Reversible Pump-Turbine,” *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 1, p. 96, Jan. 2017, doi:10.3390/en10010096.

[34] H. Wang, J. Wang, R. Gong, C. Shang, D. Li, and X. Wei, “Investigations on Pressure Fluctuations in the S-Shaped Region of a Pump-Turbine,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, p. 6683, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206683.

[35] Z. Zuo, H. Fan, S. Liu, and Y. Wu, “S-shaped characteristics on the performance curves of pump-turbines in turbine mode—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 836–851, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.312.

[36] D. Li, Z. Zuo, H. Wang, S. Liu, X. Wei, and D. Qin, “Review of positive slopes on pump performance characteristics of pump-turbines,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, no. August 2018, pp. 901–916, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.036.

[37] F. Botero, V. Hasmatuchi, S. Roth, and M. Farhat, “Non-intrusive detection of rotating stall in pump-turbines,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 48, no. 1–2, pp. 162–173, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.ymsp.2014.03.007.

[38] F. J. Botero-Herrera, D. F. Tobón-Espinosa, and R. Moreno-Sánchez, “Everything you need to know before working with a pump as a turbine,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2024, doi: 10.17533/udea.redin.20240410.

[39] D. F. Tobon Espinosa, “Estudio numérico y experimental de fenómenos hidrodinámicos que ocurren en bombas centrífugas como turbinas,” Master Thesis, EAFIT, Medellín, 2016.

[40] Ulyses Joshua Rosas Godínez “La carencia de un adecuado seguimiento a los mantenimientos diarios de las unidades de cada central Hidroeléctrica de la República Mexicana”. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Carlos Alberto Molina Tirado

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE UNA BOMBA.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:398392286

Fecha de entrega

25 oct 2024, 11:30 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

25 oct 2024, 11:35 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE UNA BOMBA.pdf

Tamaño de archivo

3.1 MB

77 Páginas




16,669 Palabras

95,818 Caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 17%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica	
Título del trabajo	VALORACIÓN ENERGÉTICA DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA FUNCIONANDO COMO TURBINA MEDIANTE EL REDISEÑO DE LOS ÁLABES	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Ing. Carlos Alberto Molina Tirado	2220172a@umich.mx
Director	Dr. Sergio Ricardo Galván González	sergio.galvan@umich.mx
Codirector	Dr. Giovanni Delgado Sánchez	giovanni.delgado@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Miguel Villagómez Galindo	mae.cs.ingenieria.mecanica@umich.mx


Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	ChatGPT

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	Si	Traductor
Revisión y corrección de estilo	Si	Office Word
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Carlos Alberto Molina Tirado 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 19 de octubre del 2024