



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

RECONSTRUCCIÓN ANALÍTICA DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS DE LA U-4 DE LA PCH DE TIRIO, MICHOACÁN.

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

PRESENTA:
Ing. Fernando Salgado Delgado.

ASESORES:
Dr. Sergio Ricardo Galván González
Philosophiae Doctor (Ph.D.) en Génie Mécanique (Aerothermique numérique)

Dr. Giovanni Delgado Sánchez
Doctorado en Ciencias (Mecánica)



Morelia, Michoacán, septiembre de 2024.

Dedicatoria y Agradecimientos.

A Dios: este proyecto va dedicado a Dios, por darme la fuerza, la paciencia, la sabiduría para que se pudiera llevar a cabo, por ayudarme a superar cada uno de los obstáculos que se presentaron en el camino. Por ponerme en el camino a mi familia y el equipo de trabajo.

A mis padres: Sra. María Gabriela Delgado Castañeda y Sr. Gregorio Salgado Gordillo quienes fueron pieza importante en la elaboración de este proyecto, ya que me apoyaron en todo momento, en mis decisiones y las respetaron. Sin ellos no hubiera podido realizar este proyecto. Gracias.

A mis abuelos: Sr. Gregorio Salgado Melgarejo, Sra. Hermelinda Gordillo Castrejón, Sr. Miguel Delgado Guízar y la Sra. María de la luz Castañeda Romero. Quienes han realizado un papel muy importante, influyendo como unos padres, los cuales me han apoyado a lo largo de mi vida. Siendo un pilar más para lograr cada una de mis metas.

A mis hermanos: Daniel Salgado Delgado y Gregorio Salgado Delgado, porque al igual que mis padres he recibido el apoyo de ellos en cada momento, respaldando cada una de mis decisiones.

A mis asesores: Dr. Sergio Ricardo Galván González, Dr. Giovanni Delgado Sánchez por siempre apoyarme en cada paso de la realización de este proyecto, por su paciencia y tiempo que invirtieron en mí. Sin ellos no se hubiera podido realizar, así que agradezco cada herramienta y capacitación que me dieron, lo cual me servirán en el transcurso de mi vida.

Al equipo de trabajo: en especial al Dr. Francisco Javier Domínguez Mota porque gracias a su paciencia y la gran capacidad que tiene para transmitir sus conocimientos se pudo realizar esta metodología, haciendo un gran aporte en el desarrollo matemático. Al Dr. Miguel Ángel Tamayo Soto por su paciencia, tiempo y apoyo en la realización de la impresión 3D que se realizó en este proyecto. Y por último a la Ing. María Goretti Gama Guzmán, ya que fue un trabajo que se llevó a cabo en conjunto con otra investigación, aportando siempre los conocimientos que adquirió para la realización de este trabajo.

A mis amigos: por siempre estar en los momentos difíciles.

A la FIM: Facultad de Ingeniería Mecánica por la oportunidad de ser parte de esta gran institución, por la confianza y el apoyo brindado.

A CONAHCYT: Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología, quien brinda el apoyo total a los investigadores para la realización de cada uno de estos proyectos.

A Comisión Federal de Electricidad (CFE): En especial al Ing. José Javier Trujillo Hernández quien es director general, Ing. Leonardo Huazano Arredondo encargado de la Subgerencia de producción hidroeléctrica Balsas Santiago, Ing. Jesús Salvador Martínez Calderón superintendente general C.H.'s Zumpimito, Bartolinas; Tirio y San Pedro Porúas, y al Ing. Juan Luis Cabrera Orozco superintendente regional mecánico de la subgerencia de producción hidroeléctrica Balsas Santiago, por el apoyo brindado para la elaboración de este proyecto, así como la facilitación de la unidad 4 de la central hidroeléctrica de Tirio, Michoacán. Contando con su apoyo en el desmontaje del rodete de la turbina tipo Francis para realizar su escaneo. Agradecemos de antemano todo el apoyo que nos brindaron y la atención prestada para este tipo de trabajos de investigación.

Índice.

Capítulo 1	Introducción	1
1.1.	Planteamiento del problema	3
1.2.	Justificación	5
1.3.	Hipótesis	6
1.4.	Objetivos	6
1.4.1.	Objetivo general	6
1.4.2.	Objetivos específicos	7
Capítulo 2	Energía hidráulica	8
2.1.	Turbinas hidráulicas	10
2.1.1.	Turbinas Kaplan	11
2.1.2.	Turbinas Pelton	13
2.1.3.	Turbina Francis	14
2.2.	Rotor de una turbina Francis	17
2.3.	Estado del arte	20
2.4.	Ingeniería inversa	29
2.4.1.	Beneficios de la ingeniería inversa	30
2.4.2.	Desventajas de la ingeniería inversa como la solución para la rehabilitación de PCH (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas)	31
Capítulo 3	Metodología de reconstrucción analítica del rodete de la turbina Francis de la U-4 de la PCH de Tirio, Michoacán	32
3.1.	Extracción de datos en la PCH (pequeña central hidroeléctrica) de Tirio, Michoacán	34
3.1.1.	Central hidroeléctrica de Tirio Michoacán	34
3.1.2.	Localización del rodete de la PCH de Tirio, Michoacán	37
3.1.3.	Molde para la obtención de la forma geométrica del álabe mediante un polímero compuesto	39
3.1.4.	Escaneado del negativo del molde de polímero compuesto	44
3.1.5.	Ensamble del álabe real al rodete de la turbina Francis	46
3.2.	Esqueleto del álabe del rodete de la U-4 de Tirio, Michoacán	48
3.2.1.	Discretización del esqueleto del álabe	49
3.2.2.	Generación del rodete analítico de la turbina Francis de Tirio, mediante el esqueleto de un álabe recto	51

3.2.3. Obtención y mallado del esqueleto del álabe analítico de la turbina Francis de Tirio.	56
3.3. Reconstrucción de la superficie mediante la colocación de un perfil NACA.	60
3.3.1. Integración de Perfiles NACA en el álabe	61
3.3.2. Generación del sólido del álabe en un archivo CAD.....	63
3.3.3. Ensamblaje del álabe en la corona y banda del rodete	65
Capítulo 4 Análisis de resultados.	67
4.1. Álabe analítico reconstruido.	67
4.1.1. Resultados de la metodología.....	68
4.2. Porcentaje de error entre el esqueleto del álabe escaneado y el esqueleto analítico.	70
4.3. Calidad de la reconstrucción del rodete analítico.	73
Capítulo 5 Manufactura en impresión 3D del rodete analítico de la PCH de Tirio, Michoacán en escala 1:1.	76
5.1. Equipo y material utilizado.....	76
5.2. Seccionado del rodete.	78
5.3 Tiempo de impresión y material utilizado	79
5.4. Ensamble de las piezas.	80
5.5 Rodete terminado.....	82
Capítulo 6 Conclusiones y bibliografía.	85
6.1. Conclusiones.	85
6.2. Bibliografía.....	86

Índice de figuras.

Figura. 1.1 Daños en los álabes del rodete de una turbina Francis por problemas de cavitación [1], [2].	2
Figura. 1.2. Rodete de una turbina Francis con álabes dañados como propósito de investigación....	4
Figura. 2.1 Principales componentes de una central hidroeléctrica [3].....	9
Figura. 2.2. Principales componentes de una turbina hidráulica Kaplan [4].....	12
Figura. 2.3 Principales componentes de una turbina hidráulica Pelton [5].	14
Figura. 2.4. Principales componentes de una turbina hidráulica Francis [6].	16
Figura. 2.5. Principales componentes del rotor de una turbina Francis [7].	18
Figura. 2.6. Proceso de recopilación de datos de un álabe mediante un escáner [8].....	22
Figura. 2.7. Aplicación de un molde de silicona de caucho para la extracción de la geometría del álabe [8].....	23
Figura. 2.8. Rodete tipo Francis digitalizado mediante ingeniería inversa para su estudio [9].	24
Figura. 2.9. Se muestra en las Figuras A y B la diferencia entre el álabe escaneado y un álabe tratado con la finalidad de mejorar su superficie [8].	25
Figura 2.10. Álabe discretizado para poder modificar su espesor [10].	26
Figura 2.11. Álabe manufacturado en madera a tamaño real [11].	26
Figura.2.12. Proceso de ingeniería inversa [12].	29
Figura. 3.1 Diagrama de la metodología de reconstrucción del rodete analítico.	33
Figura.3.2. Letrero de identificación de la Central Hidroeléctrica de Tirio [15].	34
Figura.3.3. Rodete de la central hidroeléctrica de Tirio, Michoacán.....	36
Figura. 3.4. Imagen que ilustra el momento en el que se está vaciando la tubería.....	37
Figura. 3.5 Turbina hidráulica tipo Francis	38
Figura. 3.6. Materiales utilizados para la elaboración del molde [16].	39
Figura. 3.7. Polímero creado de la Maizena y la silicona [16].	40
	V

Figura.3.8. Imagen del montaje de la mezcla para la obtención de la geometría de uno de los álabes.	41
Figura.3.9. Molde del álabe obtenido con la mezcla de silicona y Maizena	42
Figura. 3.10 Negativo del molde de polímero compuesto.	43
Figura.3.11. scanner CAPTURE 3D SCANNER [17].	44
Figura. 3.12. Captura de datos.	45
Figura. 3.13. Malla procesada de la nube de puntos recopilada.	46
Figura. 3.14. Álabe en un modelo CAD.....	47
Figura. 3.15. Álabe ensamblado en la corona y banda del rodete de la U-4 de Tirio.	47
Figura.3.16 Extracción del esqueleto del álabe de la turbina Francis de Tirio.	49
Figura. 3.17. Discretización del esqueleto del álabe de la turbina Francis de Tirio.	50
Figura. 3.18. Esqueleto de un álabe recto discretizado.....	51
Figura.3.19. Mallado del esqueleto del álabe recto propuesto.	54
Figura.3.20 Rodete analítico generado con el esqueleto del álabe recto en MATLAB.....	56
Figura. 3.21. Esqueleto del álabe analítico.....	59
Figura. 3.22. Álabe analítico mallado con la interpolación transfinita (TFI).	60
Figura. 3.23. Montaje de un perfil NACA de 5 dígitos en el marco analítico.....	62
Figura.3.24. Álabe analítico con un perfil NACA en sólido	64
Figura. 3.25. Ensamblado del álabe analítico en el rodete de la turbina Francis de Tirio.....	66
Figura.4.1. Álabe reconstruido con herramientas numéricas.	67
Figura. 4.2. Álabe reconstruido analíticamente	69
Figura 4.3. Comparación entre el esqueleto del álabe real y el esqueleto obtenido analíticamente.	70
Figura.4.4. Gráficas que muestran el porcentaje de error en cada una de las cuatro fronteras del esqueleto analítico comparado con el esqueleto real.	72

Figura.4.5. Álabes reconstruido montado en el rodete de la turbina Francis de Tiro.	73
Figura.4.6 Comparación del rodete escaneado sobre el rodete reconstruido.	74
Figura.4.7 Diferencia entre el álabes reconstruido y el álabes escaneado.	75
Figura.5.1. Impresora 3D Ender 3 Max neo [18].	76
Figura.5.2. Material para la impresión (PLA) [19].	77
Figura.5.3. Rodete seccionado.	79
Figura.5.4. Imágenes de algunas de las piezas impresas.	81
Figura.5.5. Rodete analítico ensamblado.	82

Índice de tablas.

Tabla 3.1. Resultados de las pruebas de eficiencia realizadas por LAPEM (El Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales) en 2007 [15].	35
Tabla. 5.1. Tiempo de impresión.	80

RESUMEN.

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHs) en el estado de Michoacán son muy antiguas y requieren de una modernización ya que la ingeniería con la que fueron diseñadas data en algunos casos de más de cincuenta años. Esta modernización se realiza a través de la rehabilitación o repotenciación de la turbina cuyo principal componente es el rodete, que es visto como el elemento clave en la conversión de energía hidráulica en mecánica. Estudios han mostrado que la sola reconstrucción o rediseño del rodete ha sido una alternativa económica, ecológica y técnicamente justificada. Sin embargo, la mayoría de los procedimientos de diseño o rediseño de los rodetes de las turbinas hidráulicas son aplicados por los fabricantes y se desconoce mucha de la información debido a la confidencialidad de los conocimientos adquiridos know-how, ha determinado que las metodologías sean de uso exclusivo de las empresas in-house. Esto ha obligado a los dueños de las turbinas a recurrir al llamado back-art en donde la reconstrucción se realiza tanto en forma artesanal como en forma empírica. La falta de la instrumentación y de las técnicas de medición para definir el rodete ha hecho considerar a la ingeniería inversa como una metodología viable de reconstrucción del rodete.

Por lo tanto, este proyecto pretende, mediante la aplicación de la ingeniería inversa, recuperar el perfil hidrodinámico de los álabes del rodete tipo Francis de la U-4 de CH (Central Hidroeléctrica) de Tirio en Michoacán, mediante el planteamiento de una metodología que su principal función es la implementación de herramientas numéricas.

Este proyecto comprende la simplificación de la geometría escaneada, la discretización de la superficie, la extracción de datos y la aplicación de herramientas numéricas como la interpolación transfinita y la extrapolación para reconstruir rodete de la turbina Francis de Tirio.

Así este desarrollo tecnológico resultado de esta investigación ayudaría a la Subgerencia de Producción Hidroeléctrica Balsas-Santiago de CFE (Comisión Federal de Electricidad) a no depender de los grandes fabricantes de turbinas hidráulicas para alcanzar

su manufactura y asegurar el abastecimiento de energía a las comunidades cercanas además de reducir los costos de transportación desde los grandes centros de generación.

Palabras clave.

Pequeñas centrales hidroeléctricas.

Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Parametrización.

Polinomio tercer grado.

Impresión 3D.

Ingeniería inversa.

Interpolación transfinita (TFI).

Discretización.

Esqueleto del álabe.

ABSTRACT

The Small Hydroelectric Power Plants (SHPs) in the state of Michoacán are very old and require modernization since the engineering with which they were designed dates back in some cases to more than fifty years. This modernization is carried out through the rehabilitation or repowering of the turbine whose main component is the impeller, which is seen as the key element in the conversion of hydraulic energy into mechanical energy. Studies have shown that simply rebuilding or redesigning the impeller has been an economic, ecological and technically justified alternative. However, most of the design or redesign procedures for hydraulic turbine impellers are applied by manufacturers and much of the information is unknown due to the confidentiality of the acquired know-how, which has determined that the methodologies are for exclusive use by in-house companies. This has forced the owners of the turbines to resort to the so-called back-art where the reconstruction is carried out both by hand and empirically. The lack of instrumentation and measurement techniques to define the impeller has led to the consideration of reverse engineering as a viable impeller reconstruction methodology.

Therefore, this project aims, through the application of reverse engineering, to recover the hydrodynamic profile of the blades of the Francis type impeller of the U-4 of CH (Hydroelectric Power Plant) of Tirio in Michoacán, by proposing a methodology that its main function is the implementation of numerical tools.

This project includes the simplification of the scanned geometry, the discretization of the surface, data extraction and the application of numerical tools such as transfinite interpolation and extrapolation to reconstruct the runner of the Francis Tirio turbine.

Thus, this technological development resulting from this research would help the Balsas-Santiago Hydroelectric Production Sub-Management of CFE (Federal Electricity Commission) not to depend on large manufacturers of hydraulic turbines to achieve their manufacturing and ensure the supply of energy to nearby communities. In addition to reducing transportation costs from large generation centers.

Capítulo 1

Introducción

México ha experimentado un notable crecimiento industrial en las últimas décadas, gracias a diversos factores como lo son: su ubicación estratégica, costos competitivos, mano de obra calificada y el tamaño de su mercado interno. Estos elementos han atraído inversiones extranjeras y han contribuido al desarrollo de sectores clave como el automotriz, electrónico, manufacturero, entre otros.

El país ha aprovechado su posición geográfica como puente entre América del Norte y América Latina para establecerse como un importante centro de producción y exportación. Además, la implementación de políticas económicas favorables a la inversión y la participación en acuerdos comerciales internacionales han fortalecido su posición en el ámbito industrial.

Sin embargo, la falta de empresas mexicanas dedicadas a la fabricación de turbomaquinaria puede resultar en costos de instalación más altos debido a la necesidad de adquirir este equipo de empresas extranjeras. Esto puede ser un desafío para el desarrollo de proyectos de energía hidroeléctrica y otras industrias que requieren este tipo de maquinaria.

Una de las turbomáquinas más utilizadas son las turbinas hidráulicas, elemento fundamental para la generación de energía eléctrica. Muchas de estas sufren de daños generados principalmente por la cavitación, que se presenta con el paso del tiempo provocando la erosión del material en el rotor de la turbina. Así la eficiencia de la turbina se disminuye considerablemente.

En la Figura 1.1, se muestran los álabes de una turbina Francis que presentan problemas de desprendimiento de material, debido a la cavitación que se genera a lo largo de los años que se encuentra en funcionamiento.



Figura. 1.1 Daños en los álabes del rodete de una turbina Francis por problemas de cavitación [1], [2].

Debido a los altos costos que se tienen para la rehabilitación de una turbina hidráulica, la primera opción es tratar de recobrar las partes afectadas artesanalmente, aplicando soldadura o placas del mismo material de la pieza afectada con la finalidad de rellenar las imperfecciones que se encuentran regularmente en los álabes del rodete de las turbinas hidráulicas.

Por último, se realiza un rectificado con herramientas de desbaste, evitando realizar una inversión muy grande pero debido a que no se obtienen tolerancias óptimas en cuerpos geométricos tan complejos como estos a la larga presentan problemas de funcionamiento.

Otra alternativa para solucionar este problema es la ingeniería inversa. Es una metodología que se utiliza para obtener información del modelo de cualquier pieza donde se desconozca su fabricación, forma geométrica debido a que fue fabricada hace mucho tiempo o por confidencialidad de las grandes empresas encargadas de fabricar este tipo de maquinaria.

La ingeniería inversa nos ayuda a la obtención de un archivo de Diseño Asistido por Computadora (CAD), que se tiene de un trabajo previo de escaneo. El cual genera una nube de puntos que es procesada en un software de diseño para la obtención del CAD.

Debido a que este CAD nos dará una superficie irregular y dañada debido a que en esas condiciones se encuentra el rodete. En este trabajo se plantea la utilización de herramientas numéricas para reducir considerablemente la recopilación de datos por escaneo y la utilización de la interpolación transfinita (TFI) que nos permita reconstruir de una forma más sencilla y garantizando que la superficie de la geometría sea más uniformemente y nos ayude a incrementar la eficiencia en el funcionamiento de una turbina hidráulica. Todo esto con la finalidad de reemplazar por completo el rodete de una turbina hidráulica en estado deficiente por uno que se encuentre en mejores condiciones de funcionamiento.

1.1. Planteamiento del problema

En México, así como en el estado de Michoacán de Ocampo existen una gran cantidad de PCHs (pequeñas centrales hidroeléctricas) en donde son de suma importancia en la generación de energía eléctrica ya que abastecen a las zonas rurales y urbanas, además de suministrar energía cuando la demanda eléctrica aumenta. Sin embargo, las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHs) en el estado de Michoacán son muy antiguas y requieren de una modernización ya que la ingeniería con la que fueron diseñadas es en algunos casos de más de cincuenta años. Esta modernización se realiza a través de la rehabilitación o repotenciación de la turbina cuyo principal componente es el rodete, que es visto como el elemento clave en la conversión de energía hidráulica en mecánica. Estudios han mostrado que la sola reconstrucción o rediseño del rodete ha sido una alternativa económica, ecológica y técnicamente justificada. Sin embargo, la mayoría de los procedimientos de diseño o rediseño de los rodetes de las turbinas hidráulicas son aplicados por los fabricantes y se desconoce mucha de la información debido a la confidencialidad de los conocimientos adquiridos, lo ha determinado que las metodologías sean de uso exclusivo de las empresas. Esto ha obligado a los dueños de las turbinas a recurrir a la reconstrucción que se realiza en

forma artesanal como en forma empírica. La falta de la instrumentación y de las técnicas de medición para definir el rodete ha hecho considerar a la ingeniería inversa como una metodología viable de reconstrucción del rodete.

En la Figura 1.2, se muestra el rodete de una turbina Francis con más de 100 años en funcionamiento, ubicada en Tirio, Michoacán.



Figura. 1.2. Rodete de una turbina Francis con álabes dañados como propósito de investigación.

1.2. Justificación

En México cada vez es más constante la rehabilitación de PCH, esto debido a que cuentan con muchas décadas de funcionamiento y sus componentes se han estado degradando poco a poco con el paso de los años, afectando directamente a la eficiencia de las centrales hidroeléctricas, uno de los componentes más afectados son los rodets de las turbinas hidráulicas, donde los dueños de las PCHs optan por realizar una reparación de forma artesanal, el cual carece de una estructura hidrodinámica quedando en duda el óptimo funcionamiento de la máquina o en su caso son rehabilitados o reconstruidos directamente con los fabricantes, donde se desconoce mucha de la información debido a la confidencialidad que resguardan las grandes empresas y por otro lado esto genera una gran inversión económica y poco accesible para los dueños de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's), haciendo que la balanza de costo-beneficio se incline más por el costo que por el beneficio, debido a la poca capacidad de generación de energía eléctrica que estas producen.

Otra problemática que se está viviendo actualmente es la falta de recurso hídrico, debido a la contaminación y el calentamiento global.

Por estos motivos este proyecto pretende realizar una reconstrucción del rodete de la PCH de Tirio, Michoacán para obtener los planos y el CAD a detalle del rodete para su posterior manufactura, reparación o reconstrucción del rodete de la turbina, así como obtener mejores rendimientos en cuestión de que se genere la misma energía, pero con menor cantidad de agua. Ya que no se requiere aumentar la eficiencia de la turbina debido a que CFE (Comisión Federal de Electricidad) no estaría en condiciones de generar más energía eléctrica debido a la limitante de los otros componentes, principalmente el generado.

Por tal motivo, este proyecto pretende, mediante la aplicación de la ingeniería inversa, recobrar el perfil hidrodinámico de los álabes del rodete tipo Francis de la U-4 de

CH (Central Hidroeléctrica) de Tirio en Michoacán. Así este desarrollo tecnológico resultado de esta investigación ayudaría a la Subgerencia de Producción Hidroeléctrica Balsas-Santiago de CFE (Comisión Federal de Electricidad) a no depender de los grandes fabricantes de turbinas hidráulicas para alcanzar su manufactura y asegurar el abastecimiento de energía a las comunidades cercanas además de reducir los costos de transportación desde los grandes centros de generación.

1.3. Hipótesis

La rehabilitación o reconstrucción del rodete de una turbina Francis, es un proceso fundamental para mejorar el funcionamiento e incrementar la generación de energía eléctrica de una central hidroeléctrica que cuenta con décadas de funcionamiento, por lo cual se tiene que garantizar una buena reconstrucción del rodete, obteniendo una superficie de los álabes lo más uniformemente posible para garantizar un buen comportamiento hidrodinámico del fluido al momento de impactar en ellos. Esto se podría garantizar obteniendo un rodete analítico mediante ecuaciones matemáticas que nos permitan realizar un diseño uniforme. Por lo tanto, será posible realizar la reconstrucción analítica del rodete de la turbina Francis de la U-4 de la PCH (pequeña central hidroeléctrica) de Tirio, Michoacán.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

- Reconstruir el rodete de la turbina Francis de la U-4 de la PCH de Tirio, Michoacán con la utilización de herramientas numéricas.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Analizar las diferentes metodologías de reconstrucción de los rodetes de tipo Francis de turbinas hidráulicas.
- Obtener una muestra de la geometría y perfil de un álabe del rodete de la turbina Francis de la PCH de Tirio, Michoacán.
- Realizar el escaneo del perfil del álabe obtenido para la obtención de datos del rodete de la turbina Francis de la PCH de Tirio, Michoacán.
- Limpiar y procesar la información obtenida del escaneo para obtener el modelo CAD del rodete de la turbina Francis de la PCH de Tirio, Michoacán, mediante la ingeniería inversa para la obtención de datos.
- Utilizar la metodología de la investigación de “Definición de los parámetros de la forma geométrica de los álabes de la turbina Francis 99.”
- Realizar la construcción y ensamblaje del álabe analítico para obtener el archivo CAD.
- Realizar la impresión en 3D de rodete analítico de la turbina Francis de la CH de Tirio, Michoacán.

Capítulo 2

Energía hidráulica.

La energía hidráulica es una forma de energía renovable que aprovecha el movimiento del agua para generar electricidad. Esta energía se aprovecha principalmente a través de centrales hidroeléctricas, que son instalaciones diseñadas específicamente para convertir la energía cinética y potencial del agua en energía eléctrica.

La central hidroeléctrica está compuesta principalmente por una presa. La presa en una central hidroeléctrica cumple múltiples funciones importantes. Además de generar energía eléctrica, el embalse creado por la presa puede tener varios usos adicionales, como:

1. Control de inundaciones: Almacenar agua durante períodos de lluvias intensas evita que los ríos se desborden y provoquen inundaciones en áreas cercanas.

2. Suministro de agua: El agua almacenada puede utilizarse para abastecer a comunidades locales con agua potable, para riego en la agricultura o para uso en la industria.

3. Recreación: Muchos embalses creados por presas se utilizan también para actividades recreativas como la pesca.

4. Regulación del caudal: Controlar la liberación de agua desde el embalse permite regular el caudal del río aguas abajo, lo que puede ser beneficioso para el ecosistema fluvial y las actividades económicas que dependen del agua.

Después se conecta una tubería con una cierta altura para que el flujo de agua circule por ella al momento de abrir una compuerta para dejar pasar el caudal que el operador o la demanda de energía exija, en cuanto el fluido corre por la tubería obtiene cierta velocidad la cual entra a la turbina haciéndola girar al momento de impactar el rodete de esta aprovechando la energía cinética y potencial que se encuentra en el flujo de agua, ahí se lleva a cabo la transformación de energía hidráulica a mecánica.

El rodete de la turbina está acoplado a un generador mediante una flecha lo cual provoca que al girar el rodete hace girar el rotor que se encuentra dentro del estator, venciendo el campo magnético para poder producir energía eléctrica, y aquí ocurre la siguiente transformación de energía mecánica a energía eléctrica, donde esta es llevada a un transformador para regular el voltaje a uso doméstico y a su vez transportarla por la red para que llegue a las zonas cercanas que la necesitan.

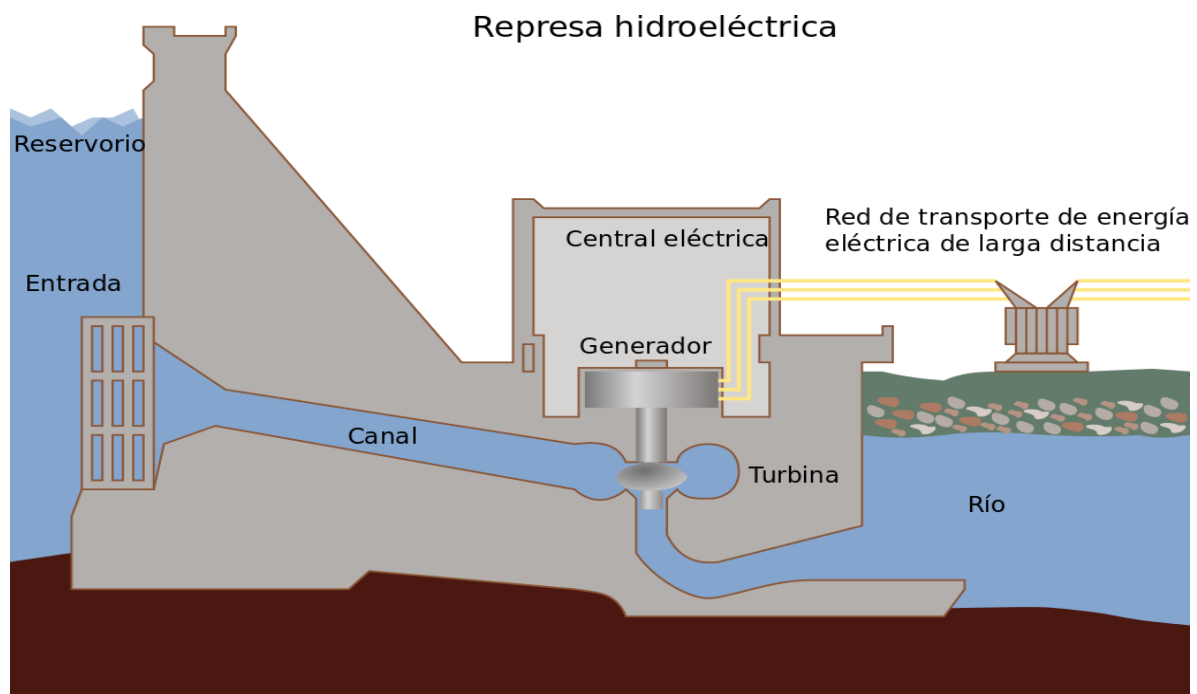


Figura. 2.1 Principales componentes de una central hidroeléctrica [3].

Uno de los elementos más importantes en las centrales hidroeléctricas son las turbinas hidráulicas, ya que son las encargadas de transformar la energía cinética y potencial de un flujo de agua a energía mecánica, aparte de que cuentan con una gran eficiencia de más del 90% a la hora de operar en condiciones específicas. La selección de la turbina hidráulica adecuada es fundamental para optimizar el rendimiento y la eficiencia de una central hidroeléctrica. Factores como el caudal de agua disponible, la altura de la caída de

agua (o cabeza hidráulica) y las características del terreno son determinantes para elegir el tipo de turbina que mejor se adapte a las condiciones específicas de cada proyecto.

2.1. Turbinas hidráulicas.

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar de varias maneras según diferentes criterios:

1. Según la dirección del flujo de agua:

- Turbinas de acción: El agua pasa a través de la turbina con una sola dirección y sale a una presión más baja. Un ejemplo son las turbinas Pelton.
- Turbinas de reacción: El agua pasa a través de la turbina con cambios de presión en su camino. Ejemplos son las turbinas Francis y turbinas Kaplan.

2. Según la dirección del eje:

- Turbinas de eje horizontal: El eje de la turbina es horizontal y gira en un plano horizontal.
- Turbinas de eje vertical: El eje de la turbina es vertical y gira en un plano vertical.

3. Según el modo de obrar del agua:

- Turbinas de acción: Utilizan principalmente la energía cinética del agua para producir energía mecánica.
- Turbinas de reacción: Utilizan tanto la energía cinética como la energía de presión del agua para producir energía mecánica.

Esta clasificación es útil para entender las diferentes características y aplicaciones de cada tipo de turbina hidráulica en la generación de energía eléctrica.

Sin embargo, las turbinas más importantes, conocidas y utilizadas a nivel mundial son:

- Turbinas hidráulicas Kaplan
- Turbinas hidráulicas Pelton.
- Turbinas hidráulicas Francis

2.1.1. Turbinas Kaplan.

Las turbinas Kaplan son turbinas hidráulicas de agua de reacción de flujo axial, diseñadas por el ingeniero austriaco Víctor Kaplan a principios del siglo 20. Son utilizadas en saltos de pequeña altura (menores a 50 m.) y grandes caudales (aproximadamente 15 m/s), impulsadas por una alta presión del flujo que es liberada por una compuerta.

Una de las ventajas de este tipo de turbinas es que sus álabes del rodete son siempre regulables, teniendo forma de una hélice y los álabes del distribuidor también son regulables, esto ayuda a adaptar la turbina a diferentes caudales para que su desempeño sea lo más eficiente posible.

Este tipo de turbinas presentan una serie de ventajas y desventajas.

Ventajas:

1. Los álabes del rodete y de distribuidor son ajustables mientras se está operando.
2. Pueden utilizarse en lugares con poca profundidad.
3. Oponen menos resistencia que las turbinas Francis debido al número menor de álabes.
4. Es la turbina con mayor velocidad específica.
5. Pueden utilizarse en canales sin desviaciones y sin restringir el flujo de agua.

6. Los animales marinos pueden pasar fácilmente sin afectar su funcionamiento.

Desventajas

1. Se debe encontrar completamente sumergida en el agua y cubierta con una carcasa presurizada lo que hace difícil de reparar y reproducir.
2. Los álabes deben ser ajustados al flujo que se esté presentando por lo que es necesario tener un constante monitoreo.
3. Tiene un alto riesgo de cavitación debido a la baja presión.
4. Es una turbina de geometría compleja por lo que su costo de diseño, mantenimiento e instalación es demasiado elevado.

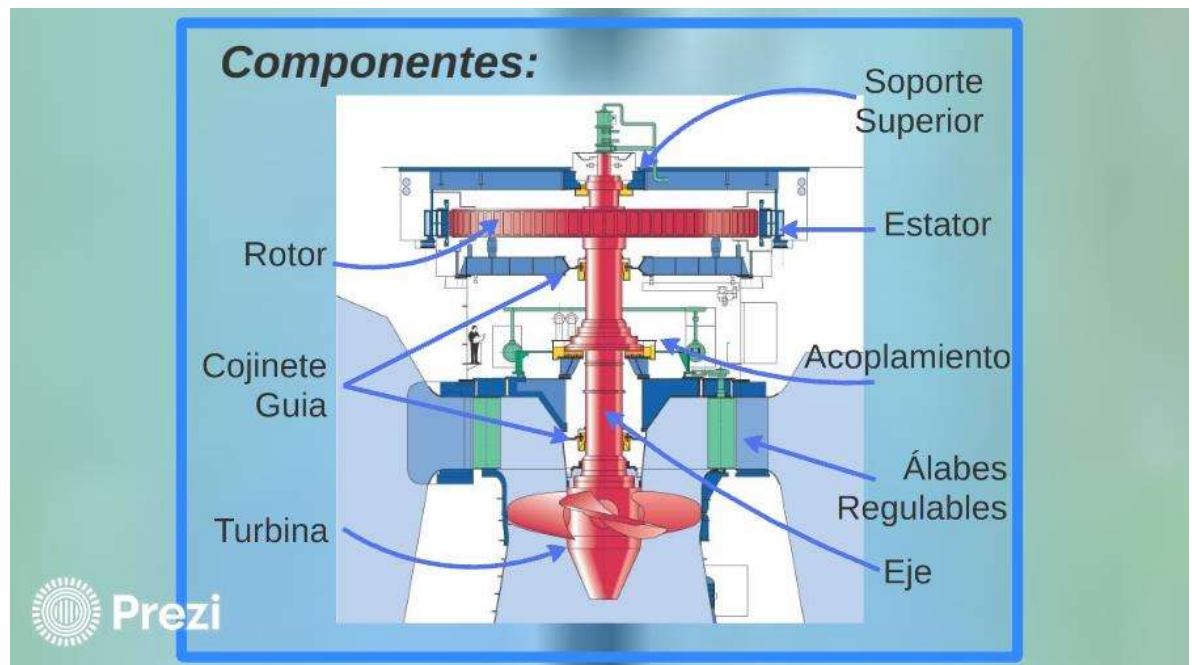


Figura. 2.2. Principales componentes de una turbina hidráulica Kaplan [4].

2.1.2. Turbinas Pelton

Una turbina hidráulica Pelton es una turbomáquina motora de flujo tangencial, admisión parcial y de acción. Diseñada por Allan Pelton en 1879 en California.

Esta turbina está compuesta por una rueda compuesta de cucharas en su periferia, teniendo la función de girar al ser impactadas las cucharas por un chorro de agua que viaja por una larga tubería, donde al final de esta se suministra el agua a la turbina por medio de una válvula de aguja, conocida comúnmente como inyector, lo cual al tener forma de tobera aumenta considerablemente la velocidad del flujo que incide sobre las cucharas.

Son turbinas hidráulicas diseñadas para explotar grandes saltos hidráulicos de más de 1500 metros y de bajo caudal.

Este tipo de turbinas presentan una serie de ventajas y desventajas.

Ventajas:

1. Útiles para saltos de gran altura y caudales relativamente pequeños.
2. Son robustas.
3. Presentan menos peligro de erosión de los álabes.
4. Sus reparaciones son sencillas.
5. Es más fácil regular su presión y velocidad.
6. Gira con alta velocidad, por lo tanto, se puede conectar el generador en forma directa, sin pérdida de transmisión mecánica.

Desventajas

1. La altura mínima para su funcionamiento es de 20 metros.
2. Su instalación inicial requiere una gran inversión.
3. Requiere múltiples inyectores para grandes caudales, para aumentar su eficiencia.
4. Su impacto ambiental es considerable, en el caso de usarse en grandes centrales hidroeléctricas.

5. Presenta altas y bajas eficiencia de producción durante el año, debido a las condiciones meteorológicas.

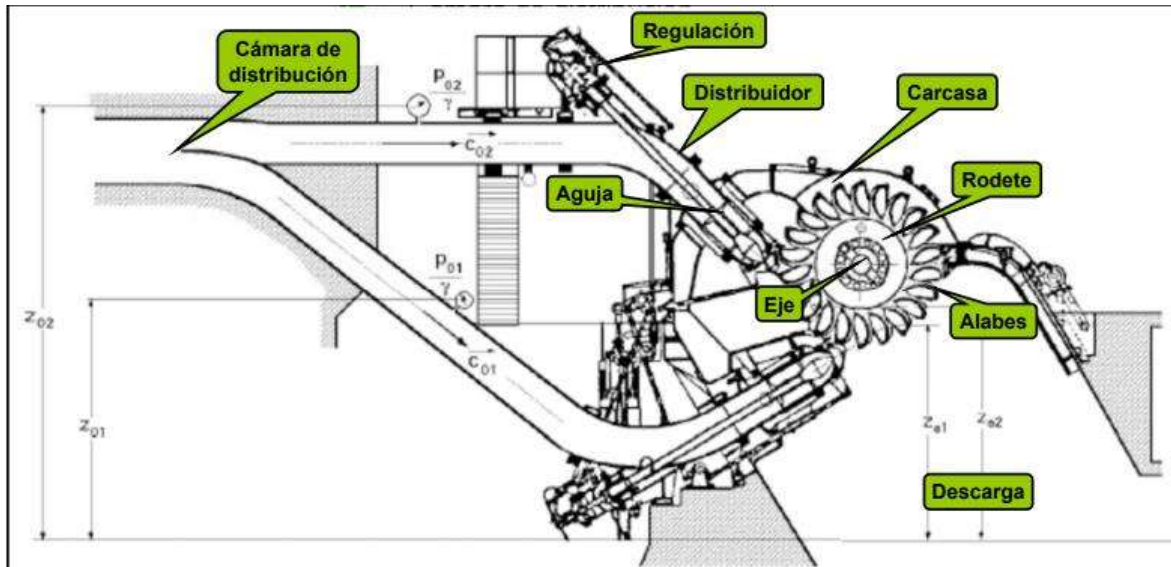


Figura. 2.3 Principales componentes de una turbina hidráulica Pelton [5].

2.1.3. Turbina Francis.

La turbina hidráulica Francis fue diseñada por James B. Francis, es una turbomáquina motora a reacción y de flujo mixto.

Son turbinas que pueden ser diseñadas para un amplio rango de saltos y caudales, operando en rangos de desnivel desde los 2 metros hasta los 800 metros aproximadamente.

La turbina Francis es una de las turbinas hidráulicas más eficientes y ampliamente utilizadas en la generación de energía eléctrica. Su eficiencia se debe a varios principios y métodos científicos utilizados en su desarrollo:

1. **Diseño basado en principios de flujo de fluidos:** La turbina Francis se diseña teniendo en cuenta los principios de flujo de fluidos, especialmente en lo que

respecta al flujo de agua a través de sus álabes. Esto incluye la optimización de la forma y el ángulo de los álabes para maximizar la eficiencia de la conversión de energía hidráulica en energía mecánica.

2. **Análisis matemáticos y gráficos:** Para mejorar el diseño de la turbina Francis, se emplean métodos matemáticos y gráficos avanzados. Esto implica modelado computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) para simular el flujo de agua dentro de la turbina y optimizar su diseño de manera virtual antes de la construcción física.
3. **Optimización de perfiles de álabes:** Los perfiles de álabes de la turbina Francis se optimizan utilizando métodos de análisis numérico y técnicas de diseño asistido por computadora (CAD). Esto permite crear perfiles de álabes que elevan la extracción de energía del flujo de agua y disminuyen las pérdidas por fricción y turbulencia.

Las turbinas Francis se clasifican dependiendo de la velocidad específica del rotor y de las características del salto.

1. **Turbina Francis lenta:** para saltos de gran altura, alrededor de 200 m o más.
2. **Turbina Francis normal:** indica en saltos de altura media entre 200 y 20 m.
3. **Turbinas Francis rápidas y extra rápidas:** apropiadas para saltos de pequeña altura, inferiores a 20 m.

Debido a esto es imposible realizar un diseño general que abarque todos los casos.

Los principales componentes de una turbina Francis son:

1. **Rotor:** el rotor o rodete también conocido como el corazón de la turbina, ya que aquí se hace la transformación de energía hidráulica a energía mecánica, gracias al diseño hidrodinámico que tienen sus álabes para aprovechar al máximo la energía cinética y potencial del agua haciéndolo girar a grandes velocidades. Es también el causante de la alta eficiencia que tienen estas turbinas del más del 90%.

2. **Cámara espiral:** es la encargada de distribuir uniformemente el fluido hacia la entrada del rodete por eso su forma de caracol para que la velocidad del fluido permanezca constante.
3. **Distribuidor:** Está conformado por álabes móviles directores que se encargan de redirigir el flujo de agua que va a impactar a los álabes del rodete. Son móviles para que el operador regule el caudal admitido según sea la energía eléctrica que sea demandada y también para obtener una mejor eficiencia de la máquina.
4. **Tubo de aspiración:** su principal función es darle continuidad al flujo al momento que es expulsado del rodete.



Figura. 2.4. Principales componentes de una turbina hidráulica Francis [6].

Ventajas y desventajas de las turbinas Francis:

Ventajas

1. Su diseño hidrodinámico alcanza eficiencias de más del 90%.
2. Su diseño es de materiales resistentes y gracias a esto pueden permanecer en funcionamiento varias décadas.
3. Pueden ser diseñadas para un gran amplio rango de alturas y caudales.

4. Gracias a la tecnología que existe estas requieren cada vez de menos mantenimiento.

Desventajas

1. No se recomiendan ser utilizadas en alturas mayores a los 800 metros.
2. Con el paso de los años pueden presentar problemas de cavitación.
3. No se recomienda ser utilizadas donde existe una gran variación de caudal.

2.2. Rotor de una turbina Francis

El rotor de una turbina hidráulica Francis es esencial para la conversión de energía hidráulica en energía mecánica. Sus principales partes son:

1. **Banda (o círculo de aros):** Es la estructura circular que conecta los álabes de la turbina. Proporciona estabilidad y resistencia a los álabes durante la operación de la turbina, asegurando que estén correctamente alineados para captar la máxima energía del flujo de agua.
2. **Corona:** También conocida como corona de álabes, es la parte superior del rotor donde están montados los álabes de la turbina. La corona es fundamental para dirigir y controlar el flujo de agua hacia los álabes de manera eficiente, maximizando así la extracción de energía.
3. **Álabes:** Son las partes móviles del rotor que reciben el flujo de agua y lo convierten en energía mecánica al girar. Los álabes están diseñados específicamente para optimizar la interacción con el agua, utilizando perfiles aerodinámicos que minimizan las pérdidas y maximizan la eficiencia de la turbina.

Estas partes del rotor trabajan en conjunto para aprovechar al máximo la energía hidráulica disponible y convertirla en energía mecánica, que luego se transmite al generador

para producir energía eléctrica. El diseño y la calidad de estas partes son fundamentales para el rendimiento y la durabilidad de la turbina hidráulica.



Figura. 2.5. Principales componentes del rotor de una turbina Francis [7].

El diseño de los álabes de un rodete Francis es un proceso complejo que se ve influenciado por su velocidad específica. La velocidad específica (Ecuación 2.1) es un parámetro importante en la selección y diseño de turbinas hidráulicas como la Francis. Esta velocidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N_s = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (2.1)$$

Donde:

- N_s es la velocidad específica (adimensional).
- N es la velocidad rotacional de la turbina (en revoluciones por minuto, rpm).

- H es la altura (en metros, m).
- Q es el caudal de agua (en metros cúbicos por segundo, m^3/s).

La velocidad específica está relacionada inversamente con la altura. Esto significa que a medida que la velocidad específica aumenta, la altura necesaria para la operación óptima de la turbina disminuye.

En el diseño de los álabes de un rodete Francis, la velocidad específica es un parámetro clave que influye en aspectos como el perfil aerodinámico de los álabes, su número, el ángulo de inclinación, entre otros. Un mayor N_s puede requerir álabes con perfiles más delgados y curvados para optimizar la extracción de energía del flujo de agua a velocidades más altas.

2.3. Estado del arte

Es cierto que el diseño de los álabes en las turbinas hidráulicas tipo Francis es un área de considerable complejidad y sigue siendo objeto de investigación en la actualidad. Esto se debe a varios factores:

1. **Forma libre de los álabes:** Los álabes de una turbina Francis tienen una forma libre, lo que significa que su diseño no sigue una forma geométrica común. Esto permite optimizar la interacción entre el flujo de agua y los álabes para aumentar la eficiencia de la turbina.
2. **Optimización aerodinámica:** El diseño de los álabes busca optimizar la aerodinámica para lograr un comportamiento uniforme entre los álabes y el flujo de agua para obtener la máxima extracción de energía. Esto implica consideraciones sobre el perfil de los álabes, el ángulo de ataque, la distribución de presiones, entre otros aspectos.
3. **Reducción de pérdidas:** Otro objetivo clave en el diseño de los álabes es minimizar las pérdidas de energía debido a la fricción, la turbulencia del flujo y otros fenómenos que pueden afectar la eficiencia de la turbina.
4. **Avances en tecnología de simulación:** Con el desarrollo de herramientas de simulación avanzadas, como el modelado computacional de fluidos (CFD), se pueden realizar análisis del flujo de agua alrededor de los álabes. Esto permite optimizar el diseño de manera virtual antes de la fabricación física, ahorrando tiempo y costos en el desarrollo de nuevas turbinas.

En resumen, el diseño de los álabes en las turbinas hidráulicas tipo Francis sigue siendo un área de enfoque debido a su complejidad y la importancia de optimizar su rendimiento para una generación eficiente de energía hidroeléctrica.

En la actualidad debido a la falta de conocimiento acerca del diseño de las turbinas y debido a los costos que genera la rehabilitación del rodete de una turbina hidráulica se ha recurrido por optar por la aplicación de la ingeniería inversa, donde es un método que se

encarga de recobrar el diseño del rodete en conjunto con los álabes, sin embargo la gran desventaja que se presenta es que el diseño que se logra recobrar es un diseño ya con varios años de uso, superficies deformadas y algunos otros inconvenientes en las superficies del elemento escaneado.

Los aparatos encargados de realizar estos procesos de ingeniería inversa se denominan escáner. Son dispositivos fundamentales en el proceso de ingeniería inversa para obtener información de objetos físicos. Algunos puntos clave sobre los escáneres y sus limitaciones incluyen:

1. **Ruido en la captura de datos:** Los escáneres pueden capturar ruido en la forma de pequeñas imperfecciones o irregularidades en la superficie escaneada. Esto puede afectar la calidad de la nube de puntos obtenida, resultando en una representación menos precisa de la geometría.
2. **Costo elevado:** Los escáneres de alta precisión y calidad suelen tener costos elevados, lo que limita su accesibilidad para muchas empresas o profesionales que puedan necesitar realizar procesos de ingeniería inversa de manera frecuente. Esto también puede llevar a la utilización de equipos de escaneo de menor calidad, lo que a su vez puede afectar la calidad de los datos obtenidos.
3. **Calibración y mantenimiento:** Los escáneres requieren una calibración precisa y un mantenimiento adecuado para garantizar resultados óptimos.
4. **Procesamiento de datos:** Después de obtener la nube de puntos, se requiere un proceso de procesamiento de datos para convertirlos en un modelo digital utilizable. Esto también puede requerir software especializado y conocimientos técnicos para obtener resultados precisos.

A pesar de estos desafíos, los escáneres siguen siendo herramientas valiosas en el campo de la ingeniería inversa y la obtención de datos para diversos fines, incluida la recuperación de diseños de turbinas hidráulicas y otros componentes complejos.

En la Figura 2.6 se muestra el momento exacto de la recopilación de datos de un molde mediante un proceso de escaneo.



Figura. 2.6. Proceso de recopilación de datos de un álabe mediante un escáner [8].

Es importante saber que en la última década se han llevado a cabo investigaciones utilizando ingeniería inversa para recuperar el perfil de los álabes de un rodete de turbina hidráulica. Esto permite modificar la superficie de los álabes para realizar estudios detallados utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Algunos aspectos importantes de estas investigaciones podrían incluir:

1. **Recuperación del perfil del álabe:** Utilizando escáneres y técnicas de ingeniería inversa, se puede recobrar el diseño original del perfil del álabe de un rodete de turbina hidráulica.
2. **Modificación y optimización del diseño:** Una vez que se recupera el perfil del álabe, los investigadores pueden modificar la superficie de los álabes para realizar optimizaciones. Esto podría incluir cambios en la forma geométrica, el grosor o la distribución de los álabes para mejorar la eficiencia y el rendimiento de la turbina.
3. **Estudios de dinámica de fluidos computacional (CFD):** Después de modificar los álabes, se deben realizar simulaciones numéricas utilizando CFD para estudiar el

comportamiento de los álabes bajo condiciones reales de operación del flujo de agua. Esto permite evaluar la eficiencia de las turbinas hidráulicas.

4. **Validación experimental:** Además de las simulaciones computacionales, es común realizar pruebas experimentales en laboratorio o en prototipos a escala real para validar los resultados obtenidos a través de la ingeniería inversa y las simulaciones CFD.

Este enfoque integrado de ingeniería inversa, optimización de diseño y simulaciones computacionales es fundamental para avanzar en el diseño y la rehabilitación de las turbinas hidráulicas, sin la necesidad de realizar una gran inversión, evitando acudir a los fabricantes. Permitiendo un mejor entendimiento de su comportamiento bajo diversas condiciones operativas. Estos estudios de investigación se han realizado en Centroamérica y Suramérica [7], [8], [9], [10], [11], [12].

La gran limitante que se presenta a la hora de poder recopilar los datos es al momento de querer obtener la nube de puntos de los álabes, debido a su forma geométrica y las dimensiones del rodete es imposible realizar una buena captura de datos. Por eso algunos trabajos de investigación han optado por la creación de un molde que permita extraer la forma del álabe y así tener un mejor manejo de este.

En la Figura 2.7 se muestra el proceso de obtención del molde de un álabe.

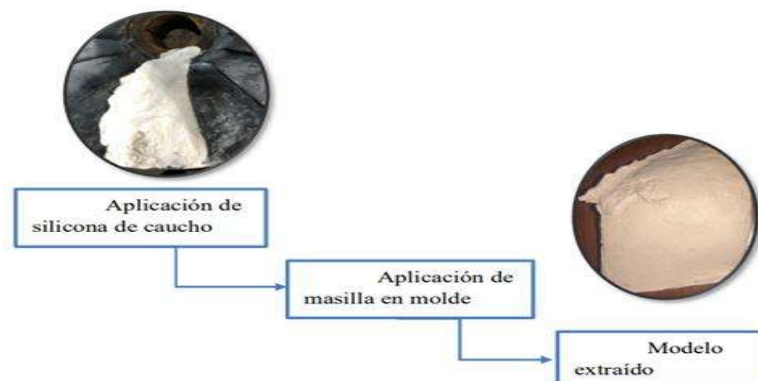


Figura. 2.7. Aplicación de un molde de silicona de caucho para la extracción de la geometría del álabe [8].

Una vez recopilado el álabe lo que realizan es un ensamblaje en la corona y banda, para posteriormente generar un archivo CAD, como se ilustra en la Figura 2.8.

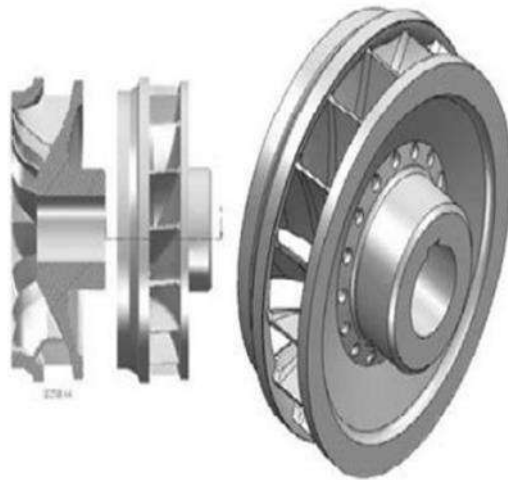


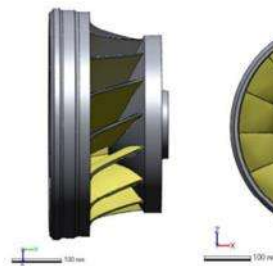
Figura. 2.8. Rodete tipo Francis digitalizado mediante ingeniería inversa para su estudio [9].

Sin olvidar que obtenemos una geometría dañada, de varios años en funcionamiento, lo cual nos presenta desgastes en los álaves y formas irregulares. Por tal motivo muchos investigadores optan por aplicar filtros de suavizado de superficies para crear formas más regulares en los álaves de los rodets de las turbinas hidráulicas. Obteniendo nuevas superficies.

En la Figura 2.9 se ilustra el ensamblado del álabe escaneado en la corona y banda del rodete.



A) Álabes escaneado



B) Rodete con una nueva geometría de álabes.

Figura. 2.9. Se muestra en las Figuras A y B la diferencia entre el álabes escaneado y un álabes tratado con la finalidad de mejorar su superficie [8].

Muchos otros modifican los espesores de entrada y salida para analizar su comportamiento mediante dinámica de fluidos computacional (CFD),[10], y obtener resultados del funcionamiento a la hora de aumentar o disminuir el espesor de los álabes.

En la Figura 2.10 se observa la discretización del álabes mediante puntos discretos.

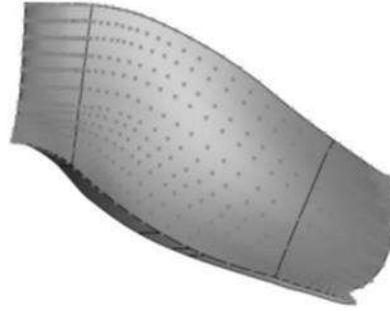


Figura 2.10. Álabes discretizados para poder modificar su espesor [10].

Y, por último, muchos deciden realizar una manufactura de manera ilustrativa [11], para ver más detalladamente la forma física de los álabes, permitiendo tener dimensiones reales en el sitio. Y posteriormente sirvan como moldes para la fabricación de los álabes reales que serán puestos en operación.

En la Figura 2.11 se muestra un prototipo de un álabes fabricado en material de madera.



Figura 2.11. Álabes manufacturado en madera a tamaño real [11].

La mayoría de las investigaciones están enfocadas en pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's). Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs) pueden ser un campo muy fértil para la investigación y el desarrollo de proyectos de rehabilitación. Algunas ventajas y oportunidades clave de enfocarse en las PCHs incluyen:

1. **Menor competencia:** Al no competir directamente con las grandes empresas que se centran en centrales hidroeléctricas de mayor escala, los investigadores tienen más oportunidades de destacarse y obtener financiamiento para proyectos de rehabilitación en PCHs.
2. **Modernización:** Muchas PCHs tienen equipos y tecnologías antiguas que requieren modernización y mejoras para aumentar su eficiencia y prolongar su vida útil. Esto representa un campo de trabajo importante para los investigadores interesados en la ingeniería de turbinas hidroeléctricas y tecnologías asociadas.
3. **Impacto local:** La rehabilitación de PCHs puede tener un impacto directo en comunidades locales al mejorar la disponibilidad y eficiencia de la energía hidroeléctrica, contribuyendo al desarrollo sostenible y la seguridad energética en áreas específicas.
4. **Innovación tecnológica:** Al trabajar en proyectos de rehabilitación en PCHs, los investigadores tienen la oportunidad de desarrollar e implementar nuevas tecnologías y prácticas de ingeniería que luego podrían aplicarse en proyectos más grandes o servir como referencia para la industria.

Enfocarse en la rehabilitación de pequeñas centrales hidroeléctricas no solo ofrece oportunidades de investigación valiosas, sino que también puede tener un impacto positivo significativo en el desarrollo energético y socioeconómico a nivel local y regional.

Con el avance de la tecnología y el desarrollo de nuevos softwares especializados, los procesos de ingeniería inversa han experimentado mejoras significativas en la reconstrucción y rehabilitación de turbinas hidráulicas tipo Francis. Algunos puntos importantes que respaldan esta afirmación incluyen:

1. **Mayor precisión:** Los nuevos softwares de ingeniería inversa permiten una captura de datos más precisa y detallada, lo que resulta en geometrías reconstruidas con mayor confianza al diseño original de los álabes y otros componentes de las turbinas hidráulicas.
2. **Optimización de diseño:** Estos softwares también facilitan la optimización de diseños, permitiendo realizar modificaciones precisas en las geometrías recuperadas para adaptarlas adecuadamente a las necesidades específicas de rendimiento y eficiencia de las turbinas.
3. **Simulaciones avanzadas:** Además de la reconstrucción de geometrías, los softwares de ingeniería inversa se integran fácilmente con herramientas de simulación avanzadas, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), para evaluar el comportamiento de los álabes y otros componentes bajo diferentes condiciones operativas.
4. **Eficiencia y rapidez:** Estas herramientas tecnológicas permiten realizar trabajos de manera más eficiente y rápida, reduciendo los tiempos de diseño y rehabilitación de las turbinas hidráulicas, lo que a su vez puede traducirse en menores costos.

En resumen, la combinación de tecnología avanzada y software especializado ha mejorado significativamente los procesos de ingeniería inversa para la reconstrucción y rehabilitación de turbinas hidráulicas tipo Francis, permitiendo alcanzar niveles más altos de precisión, eficiencia para que se adapten a las necesidades específicas de cada proyecto.

2.4. Ingeniería inversa.

La ingeniería inversa es el proceso llevado a cabo con el objetivo de obtener información o un diseño a partir de un producto u objeto, con el fin de determinar cuáles son sus componentes, de qué manera interactúan entre sí y cuál fue el proceso de fabricación.

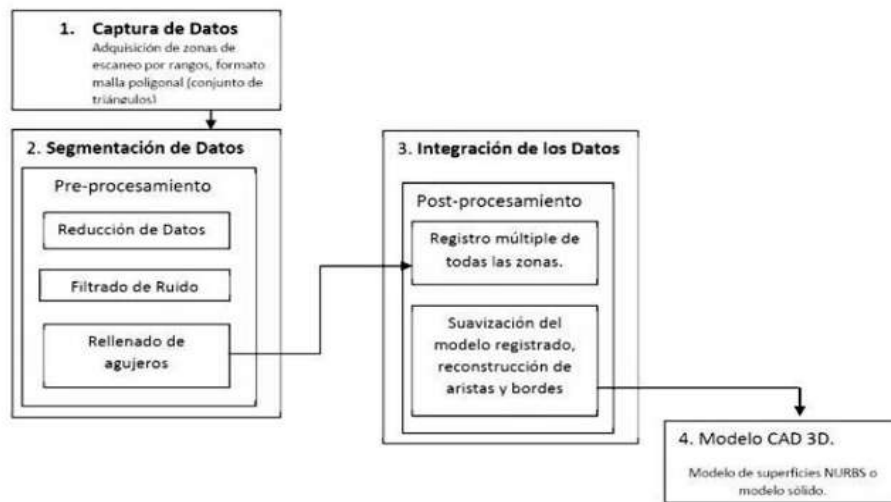


Figura.2.12. Proceso de ingeniería inversa [12].

El método se denomina así porque avanza en dirección opuesta a las tareas habituales de ingeniería, que consisten en utilizar datos técnicos para elaborar un producto determinado [13].

La ingeniería inversa es un método de resolución. Aplicar ingeniería inversa a algo supone profundizar en el estudio de su funcionamiento, hasta el punto de que se pueda llegar a entender, modificar y mejorar dicho modo de funcionamiento [14].

2.4.1. Beneficios de la ingeniería inversa.

1. Reducir la complejidad del sistema: al intentar comprender el sistema se facilita su mantenimiento, y la complejidad existente disminuye.

2. Generar diferentes alternativas: del punto de partida del proceso, principalmente del código fuente, se generan representaciones gráficas, lo que facilita su comprensión.

3. Recuperar y/o actualizar la información perdida (cambios que no se documentaron en su momento): en la evolución del sistema se realizan cambios que no se suelen actualizar en las representaciones de nivel de abstracción más alto, para lo cual se utiliza la recuperación de diseño.

4. Detectar efectos laterales: los cambios que se puedan realizar en un sistema pueden conducir a que surjan efectos no deseados; esta serie de anomalías pueden ser detectadas por la ingeniería inversa.

5. Facilitar la reutilización: por medio de la ingeniería inversa se pueden detectar componentes de posible reutilización de sistemas existentes, pudiendo aumentar la productividad y reducir los costes y los riesgos de mantenimiento [13].

2.4.2. Desventajas de la ingeniería inversa como la solución para la rehabilitación de PCH (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas).

La ingeniería inversa puede ser una solución tentadora para recuperar el diseño de un rodete de turbina hidráulica y sus álabes, especialmente cuando hay limitaciones de conocimiento o recursos para realizar un diseño completamente nuevo. Sin embargo, se tienen desventajas importantes que deben tenerse en cuenta:

1. **Diseño antiguo y desgastado:** El principal inconveniente de la ingeniería inversa en este contexto es que el diseño que se recupera suele ser el de un rodete que ha estado en uso durante varios años. Esto nos da como resultado una geometría que puede presentar desgaste, deformaciones y otros problemas en las superficies del rodete y los álabes, lo que afecta la eficiencia y el rendimiento de la turbina.
2. **Superficies no ideales:** Las superficies escaneadas y recuperadas mediante ingeniería inversa pueden no ser perfectas desde el punto de vista aerodinámico.
3. **Costos de mantenimiento continuo:** Aunque la ingeniería inversa puede proporcionar una solución temporal, a largo plazo puede resultar costosa debido a la necesidad de mantenimiento continuo y posiblemente rehabilitaciones más frecuentes debido a las limitaciones del diseño recuperado.

En última instancia, la ingeniería inversa puede ser una opción útil en ciertas circunstancias, pero es importante tener en cuenta sus limitaciones y considerar alternativas como el desarrollo de capacidades de diseño propias o la colaboración con expertos en turbinas hidráulicas para obtener diseños óptimos y de alto rendimiento.

Capítulo 3

Metodología de reconstrucción analítica del rodete de la turbina Francis de la U-4 de la PCH de Tirio, Michoacán.

En este capítulo se describe la metodología, el proceso de ingeniería inversa y la reconstrucción analítica que se utilizaron para la obtención del rodete de la turbina Francis de la U-4 de la PCH de Tirio, Michoacán. Mediante el uso de herramientas numéricas, se pudo reconstruir el rodete y el álabe de la turbina Francis de Tirio, Michoacán, logrando recrear el modelo asistido por computadora (CAD), utilizando ingeniería inversa. Cabe destacar que se recopiló una cantidad menor de datos del modelo original, lo que permitió evitar un escaneo total del rodete.

Es importante señalar que la reconstrucción con herramientas numéricas se realizó gracias a investigaciones anteriores donde se desarrollaron algoritmos y sub-algoritmos que consta de la obtención de datos discretos y la reconstrucción de la superficie de un álabe de una turbina Francis 99, de la tesis de doctorado del Dr. Giovanni Delgado Sánchez [25] y de la M.C. María Goretti Gama Guzmán, [26].

En la Figura 3.1 se muestra el algoritmo de la metodología de reconstrucción del rodete de la turbina Francis de Tirio, Michoacán. Es importante resaltar que esta metodología puede ser aplicada para cualquier rodete de una turbomáquina.

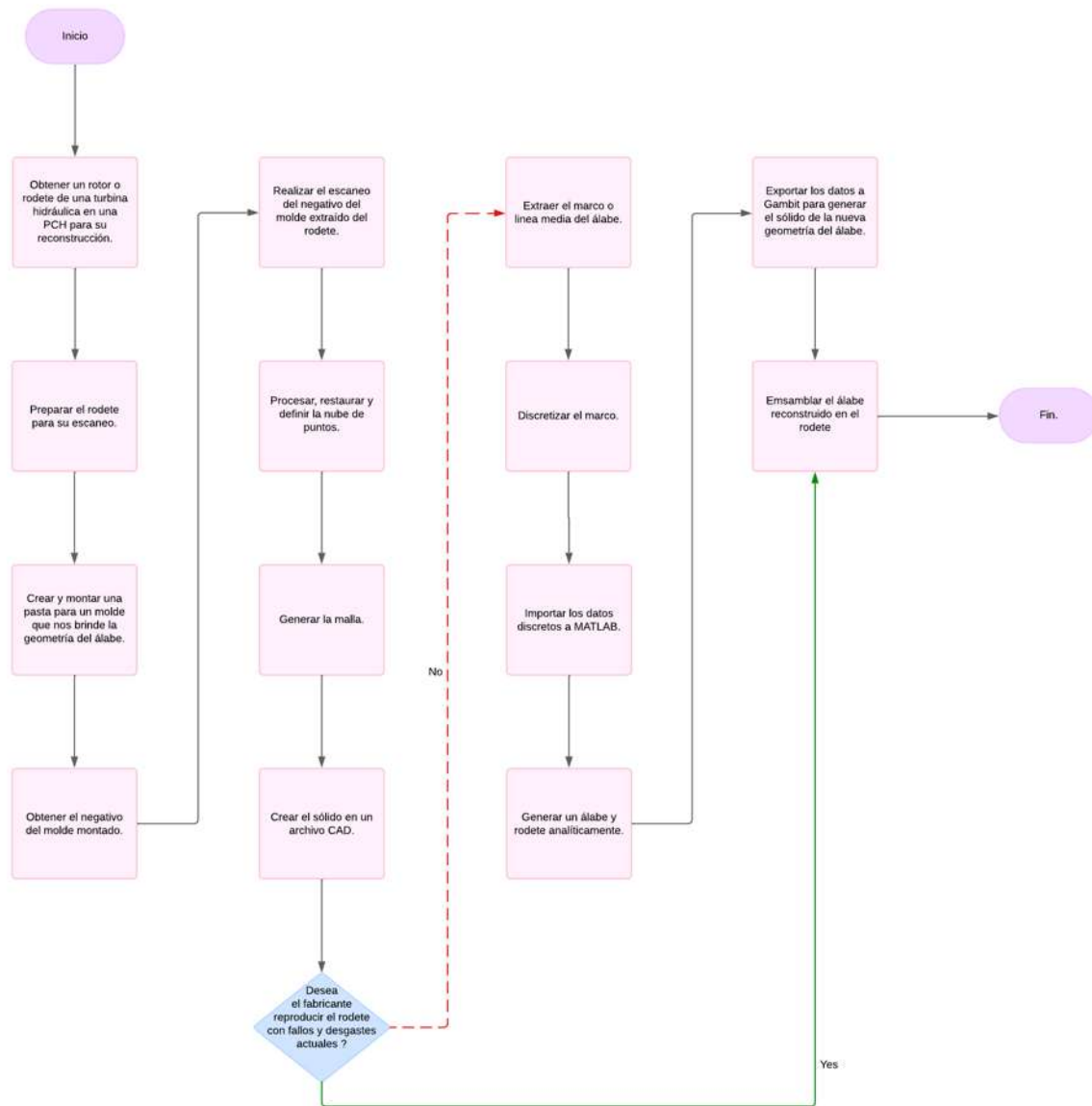


Figura. 3.1 Diagrama de la metodología de reconstrucción del rodete analítico.

3.1. Extracción de datos en la PCH (pequeña central hidroeléctrica) de Tirio, Michoacán.

3.1.1. Central hidroeléctrica de Tirio Michoacán.

La pequeña central hidroeléctrica de Tirio ubicada en el estado de Michoacán, México fue fundada a principios del siglo XX en 1905, por la empresa “La Trinidad” donde los dueños eran José María Ibarrola y Jesús Ibarrola.

En la actualidad esta central cuenta con una capacidad instalada de 1.096 MW, siendo alimentada con el agua del río balsas. En operación se encuentra una turbina Francis que genera 750 KW de energía, contando con más de 100 años en funcionamiento.



Figura.3.2. Letrero de identificación de la Central Hidroeléctrica de Tirio [15].

Esta turbina Francis cuenta con una eficiencia de funcionamiento actual del 72% aproximadamente, mostrado en la Tabla 3.1, según una prueba realizada por LAPEM en 2007, que es el Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM) adscrito a la Dirección Corporativa de Negocios Comerciales. Es un área fundamental de apoyo en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica de la Comisión Federal de

Electricidad (CFE), los servicios esenciales y de ingeniería especializada que se realizan, aseguran la correcta operación, así como el control de calidad de los materiales y equipos adquiridos por la CFE.

Fecha	Prueba No.	Potencia Medida G. E. [kW]	Caída neta de prueba [m]	Potencia Hidráulica [kW]	Flujo volumétrico [m ³ /s]	Eficiencia del Turbogenerador [%]
7 de Febrero de 2007	1 (40%)	230.457	107.63	394.36	0.375	58.43
	2 (50%)	292.643	107.36	464.58	0.442	62.99
	3 (60%)	347.74	107.10	534.99	0.511	65.00
	4 (70%)	407.927	106.74	600.50	0.575	67.93
	5 (80%)	466.23	106.38	662.38	0.637	70.38
	6 (90%)	524.8153	105.94	736.61	0.711	71.24
	7 (100%)	577.3928	105.53	805.32	0.781	71.69

Tabla 3.1. Resultados de las pruebas de eficiencia realizadas por LAPEM (El Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales) en 2007 [15].

Su baja eficiencia se debe a que el rodete se encuentra en estado de deterioro, debido a las irregularidades que presenta su forma geométrica de los álabes. Es evidente que los problemas de deterioro, cavitación y reparaciones improvisadas a lo largo del tiempo han contribuido significativamente a la baja eficiencia de la turbina. La reconstrucción en fundidoras adaptando la forma anterior o dañada también han influido entre la forma actual y el diseño original, lo que agrava la situación



Figura.3.3. Rodete de la central hidroeléctrica de Tirio, Michoacán.

3.1.2. Localización del rodete de la PCH de Tirio, Michoacán.

Lo primero que se realizó al abordar la central hidroeléctrica con ayuda del equipo de mantenimiento de Comisión Federal de Electricidad (CFE), fue el vaciado de las tuberías que alimentan a la turbina para poder desmontar la tapa frontal y hacer la recopilación de datos. En la Figura 3.4 se observa el vaciado de la tubería que alimenta a las turbinas hidráulicas de la central hidroeléctrica de Tirio.



Figura. 3.4. Imagen que ilustra el momento en el que se está vaciando la tubería.

Después se desmontó la tapa de la turbina para poder tener acceso a la parte del lado banda del rodete, cómo se muestra en la Figura 3.5, en donde quedan al descubierto la parte superior de los álabes, para visualizar y recopilar los datos necesarios para la investigación.



Figura. 3.5 Turbina hidráulica tipo Francis

3.1.3. Molde para la obtención de la forma geométrica del álabe mediante un polímero compuesto.

El rodete es de dimensiones pequeñas en comparación con otros que se encuentran en diferentes centrales hidroeléctricas de ahí su clasificación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's), por eso complica demasiado la recopilación de una nube de puntos ya que no se contaba con ningún equipo capaz de escanear hacia el interior del rodete. Por tal motivo se decidió obtener un molde de la geometría de uno de los álabes del rodete, este molde debería de ser fácil de aplicar, de secado rápido debido a la limitante de tiempo que teníamos, no ser demasiado rígido para evitar que se quebrara al momento de ser extraído y que definiera lo mejor posible la superficie geométrica del álabe.

Considerando los factores mencionados anteriormente se decidió por crear un molde a base de una mezcla de silicón transparente y Maizena. Haciendo que el silicón nos garantice un molde que se pueda desmontar sin tener fracturas ya que tiene propiedades similares a las de una liga, la cual se estira y vuelve a su forma original, y la maicena ayuda a evitar que el silicón se quede pegado en la superficie en donde se coloca la pasta para crear el molde que se pueda desmontar con facilidad. Así creando un polímero.

Materiales utilizados:

1. Maizena.
2. Silicón.



Figura. 3.6. Materiales utilizados para la elaboración del molde [16].

Mezclado:

Se procedió a mezclar el silicón con la Maizena para crear una mezcla de textura flexible y fácil de manipular. Este material, debido a su gran flexibilidad y maleabilidad, puede ser aplicado en diversos campos de la industria sin incurrir en altos costos de fabricación. En conclusión, se obtiene un material versátil y de fácil producción, lo que lo hace adecuado para múltiples aplicaciones industriales.

En la Figura. 3.7. la imagen muestra el proceso de mezclado de la Maizena y la silicona



Figura. 3.7. Polímero creado de la Maizena y la silicona [16].

Montaje del molde:

Para extraer la forma del álabe con la mayor precisión posible, se cubrió toda la superficie de un álabe con la pasta previamente creada, como se muestra en la Figura 3.8. Este procedimiento garantiza una captura detallada de las características geométricas del álabe, facilitando su posterior análisis y reconstrucción.

En la Figura 3.8 se observa el proceso de montaje del polímero para la obtención de un molde que nos defina la forma geométrica del álabe.



A) Colocación de la pasta en el álabe del rodete.



B) Periodo de secado del polímero para posteriormente ser extraído.

Figura.3.8. Imagen del montaje de la mezcla para la obtención de la geometría de uno de los álaves.

Una vez obtenido el molde se procedió a sacar el negativo para la creación de otro molde. Este se elaboró con yeso, ya que es una mezcla fácil de preparar y de secado rápido para poder recopilar datos geométricos de la forma del álabe.

En la Figura 3.9 se muestra el molde extraído del rodete de la turbina Francis de Tirio.



Figura.3.9. Molde del álabe obtenido con la mezcla de silicona y Maizena.

En la Figura 3.10 se observa el negativo obtenido del molde de polímero. Observando la forma geométrica del álabe del rodete de la turbina hidráulica.



A) Lado presión.



B) Lado succión.

Figura. 3.10 Negativo del molde de polímero compuesto.

3.1.4. Escaneado del negativo del molde de polímero compuesto.

Para poder realizar el escaneo se utilizó el equipo CAPTURE 3D SCANNER el cual nos proporciona una nube de puntos del modelo que se desea escanear.

El escáner CAPTURE 3D SCANNER mostrado en la Figura 3.11, es un equipo de medición y metrología sin contacto que utiliza tecnología de luz azul para capturar millones de puntos y mediciones 3D de alta resolución. Esta tecnología permite obtener datos precisos y detallados de la superficie escaneada, facilitando el análisis y la reconstrucción de objetos complejos.



Figura.3.11. scanner CAPTURE 3D SCANNER [17].

Debido a que el molde tiene un color que puede ser detectado por el escáner no se requirió realizar un preprocesamiento y se realizó el escaneo completo del álabe. Como se observa en la Figura 3.12.



Figura. 3.12. Captura de datos.

Después de realizar la captura de datos, se obtuvo una nube de puntos y, con la ayuda del software GEOMAGIC FOR SOLIDWORKS y DESIGN X, se llevó a cabo un posprocesamiento de la nube de puntos. Este posprocesamiento incluyó el relleno de huecos en la superficie, la eliminación de picos e irregularidades en los datos, así como el filtrado y la reducción del tamaño y peso del archivo. Todo esto se realizó con el objetivo de generar una malla de buena calidad, mostrada en la Figura 3.13. Adecuada para su posterior análisis y uso en el modelado 3D.

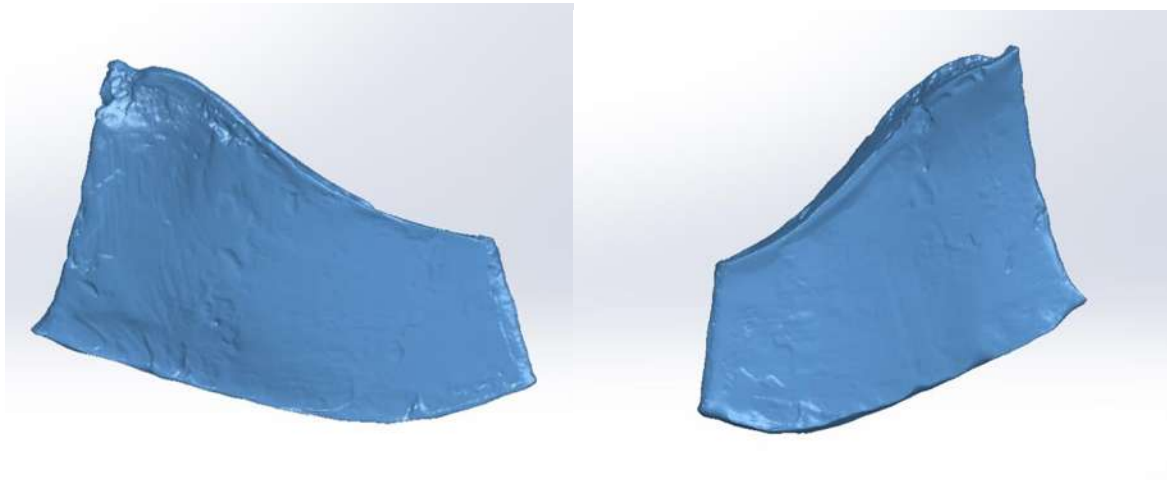


Figura. 3.13. Malla procesada de la nube de puntos recopilada.

3.1.5. Ensamble del álabe real al rodete de la turbina Francis.

Una vez que se obtuvo la malla de buena calidad, se procedió a generar el sólido de manera automática en el software GEOMAGIC FOR SOLIDWORKS. Este proceso incluyó la creación automática de la superficie a partir de la malla, facilitando la generación de un modelo sólido que se ilustra en la Figura 3.14, listo para su análisis y diseño adicional.

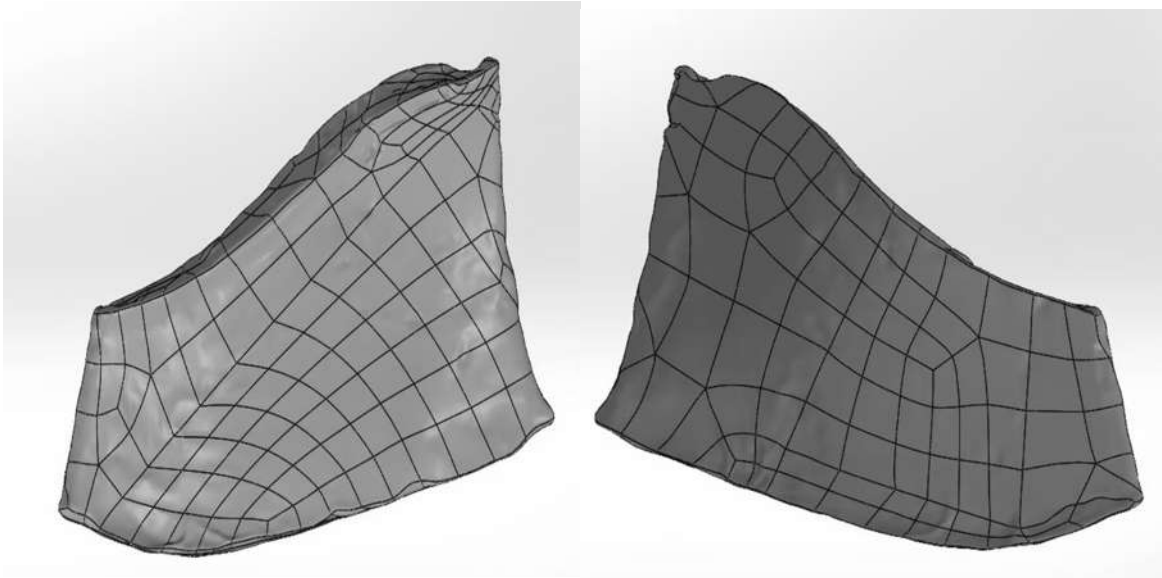


Figura. 3.14. Álabe en un modelo CAD.

Por último, se procedió a ensamblar el álabe en el rodete como se observa en la Figura 3.15.

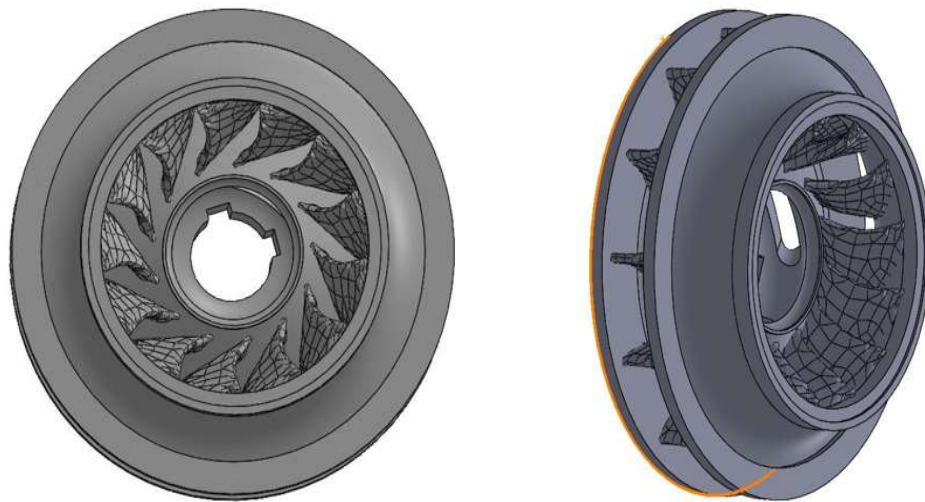
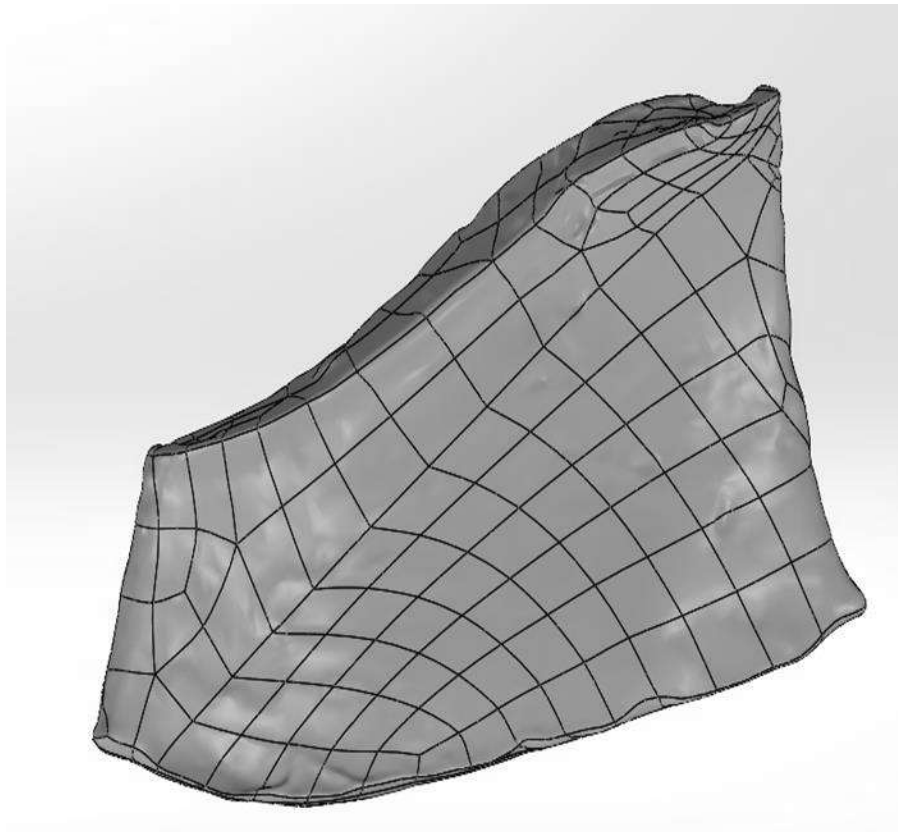


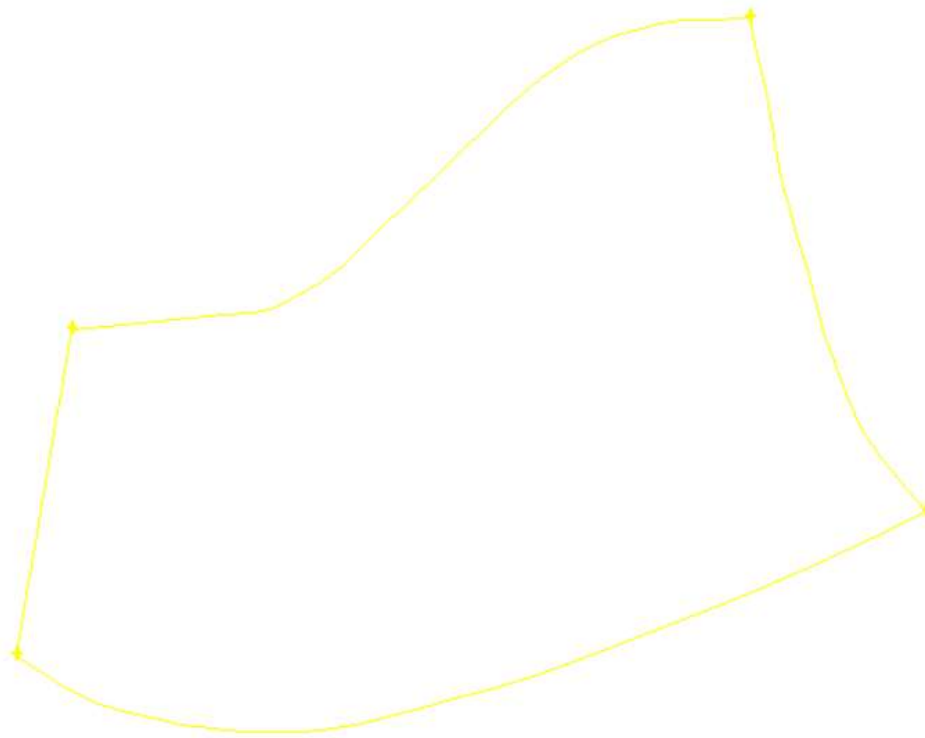
Figura. 3.15. Álabe ensamblado en la corona y banda del rodete de la U-4 de Tirio.

3.2. Esqueleto del álabe del rodete de la U-4 de Tiro, Michoacán.

Para poder emplear nuestra metodología de reconstrucción analítica, es necesario encontrar el marco del álabe (FRAME), es decir, la línea media del álabe, que actúa como su esqueleto. Se realizó una discretización en las fronteras del álabe escaneado para, posteriormente, unir estos puntos y calcular un punto promedio entre cada uno de ellos. Esto permitió generar la línea media del álabe en sus cuatro fronteras: corona, banda, entrada y salida, como se muestra en la Figura 3.16.



A) Álabe del rodete de la turbina Francis escaneado.



B) Esqueleto del álabe de la turbina Francis de Tirio.

Figura.3.16 Extracción del esqueleto del álabe de la turbina Francis de Tirio.

3.2.1. Discretización del esqueleto del álabe.

Después de haber extraído el marco del álabe, se realizó una discretización en sus cuatro fronteras como se muestra en la Figura 3.17. En la parte superior (lado banda) y en la parte inferior (lado corona), se discretiza en 107 puntos cada una. En la entrada se discretiza en 10 puntos y en la salida en 37 puntos. Esta cantidad de puntos, de acuerdo con la investigación del Dr. Giovanni Delgado Sánchez,[27], representa de forma adecuada el

comportamiento de las cuatro fronteras del marco del álabe. Se realizó una modificación en la frontera de entrada debido a que el molde tendría error en las medidas, eso se modificó basándonos en la distancia que existe entre corona y banda.

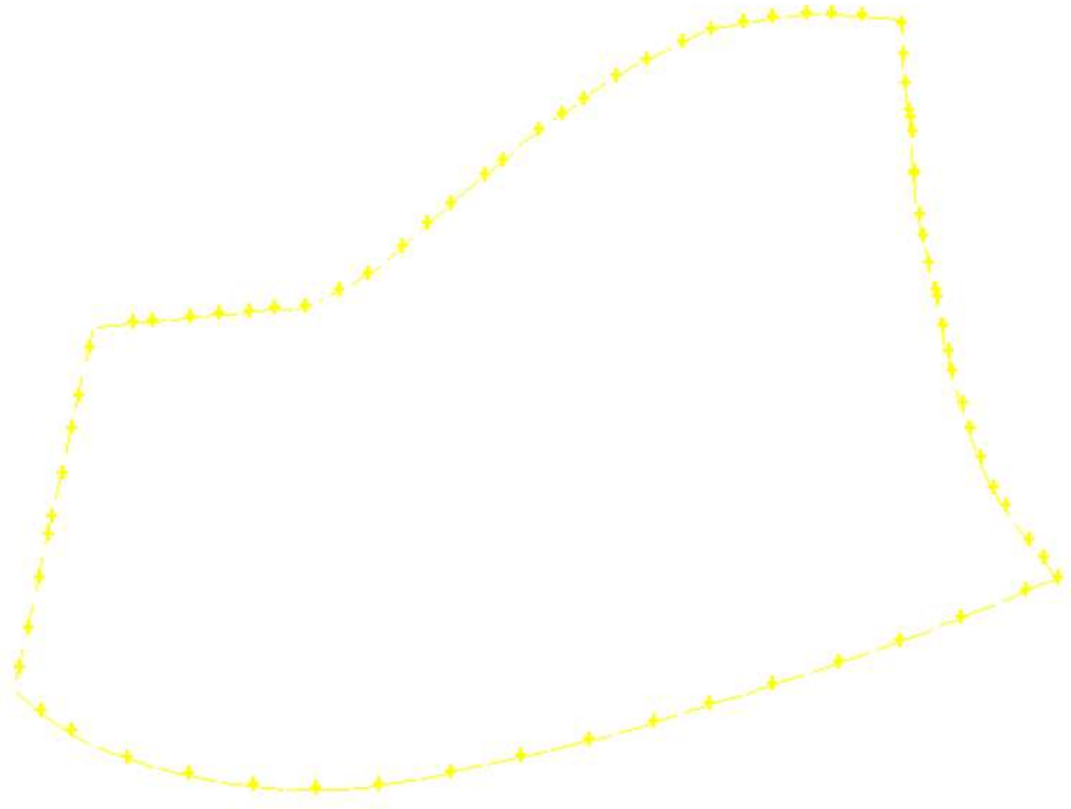


Figura. 3.17. Discretización del esqueleto del álabe de la turbina Francis de Tirio.

3.2.2. Generación del rodete analítico de la turbina Francis de Tirio, mediante el esqueleto de un álabe recto.

Para poder generar el rodete analítico compuesto por corona y banda, se propone un marco de un álabe recto conformado por línea superior, inferior, entrada y salida como se muestra en la Figura 3.18. Este marco debe abarcar correctamente las superficies mencionadas anteriormente en el rodete.

Se discretizan sus cuatro fronteras y se exportan los datos a MATLAB, donde serán procesados los datos para la generación del rodete analítico.

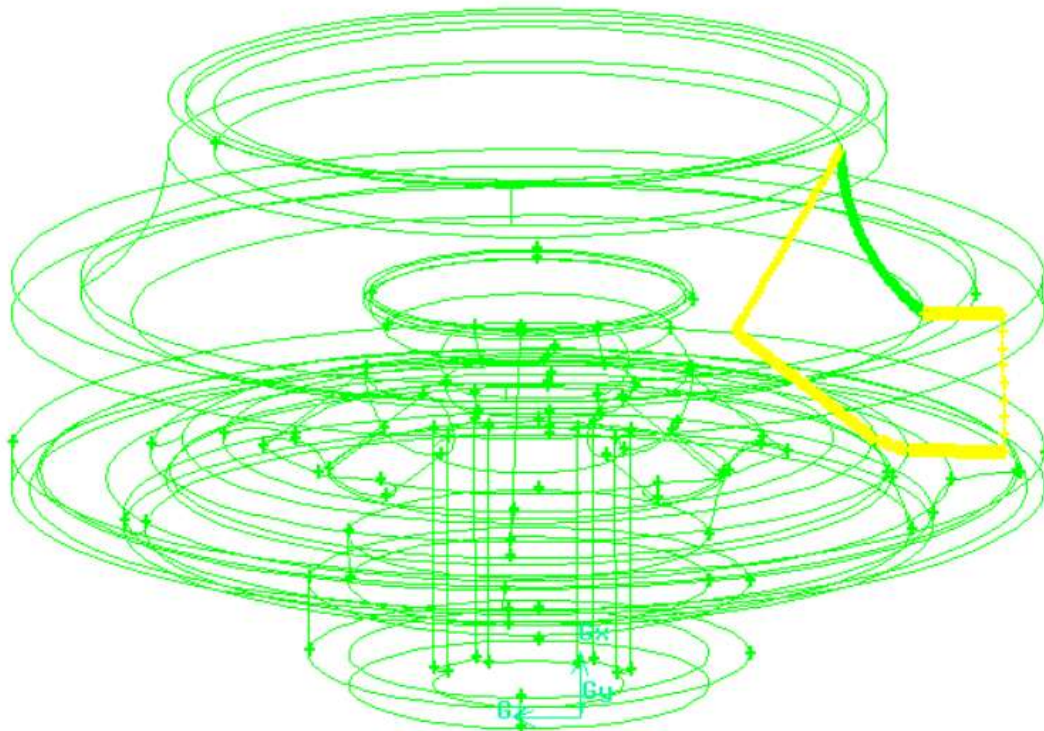


Figura. 3.18. Esqueleto de un álabe recto discretizado.

Después de exportar los datos, se utiliza la Interpolación Transfinita (TFI, por sus siglas en inglés) para obtener puntos discretos dentro de una superficie definida por cuatro fronteras como se muestra en la Figura 3.19. Este proceso es especialmente útil para generar una malla en el interior de una superficie compleja, como el marco de un álabe de turbina. A continuación, se detalla el proceso:

1. **Definición de las fronteras:** Primero, se identifican y definen las cuatro fronteras que conforman el marco del álabe. Estas fronteras son las curvas que delimitan la superficie del álabe y pueden ser descritas matemáticamente mediante polinomios o funciones spline.

2. **Interpolación transfinita:** La TFI se utiliza para interpolar los puntos dentro de la superficie delimitada por las cuatro fronteras. Este método permite generar una malla regular y continua. La TFI se basa en la combinación lineal de interpolaciones unidimensionales a lo largo de cada frontera. Para una superficie parametrizada por u y v , la interpolación transfinita se puede expresar como:

$$P(u, v) = (1-u)P_0(v) + uP_1(v) + (1-v)P_2(u) + vP_3(u) - [(1-u)(1-v)(P_{02} + u(1-v)P_{12} + (1-u)vP_{03} + uvP_{13})] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde $P_0(v)$, $P_1(v)$, $P_2(u)$ y $P_3(u)$ son las interpolaciones a lo largo de las fronteras, y P_{02} , P_{12} , P_{03} , y P_{13} son los puntos en las esquinas de la superficie.

3. **Generación de la malla:** Utilizando la fórmula de TFI, se calculan los puntos interiores de la superficie. Esto se hace evaluando la interpolación para una serie de valores de u y v que van de 0 a 1. El resultado es una malla de puntos discretos que llenan la superficie de manera uniforme y continua.

4. **Aplicación de operaciones matemáticas:** Las operaciones matemáticas involucradas en la TFI aseguran que la malla resultante respete las

condiciones de suavidad y continuidad impuestas por las fronteras. Esto es crucial para mantener la integridad geométrica y funcional del álabe.

5. **Visualización:** La malla generada se visualiza y verifica para asegurar que representa fielmente la superficie del álabe. Cualquier discrepancia puede ser ajustada mediante refinamientos adicionales en el proceso de interpolación.

Beneficios de la TFI

- **Precisión:** La TFI permite una representación precisa de la geometría del álabe.
- **Flexibilidad:** Puede aplicarse a superficies complejas definidas por múltiples fronteras.
- **Continuidad:** Asegura la continuidad y suavidad de la superficie interpolada.

La Interpolación Transfinita es una técnica poderosa para generar mallas precisas y continuas dentro de superficies complejas, como las de los álabes de turbinas, asegurando que la geometría final respete las especificaciones de diseño y funcionamiento.

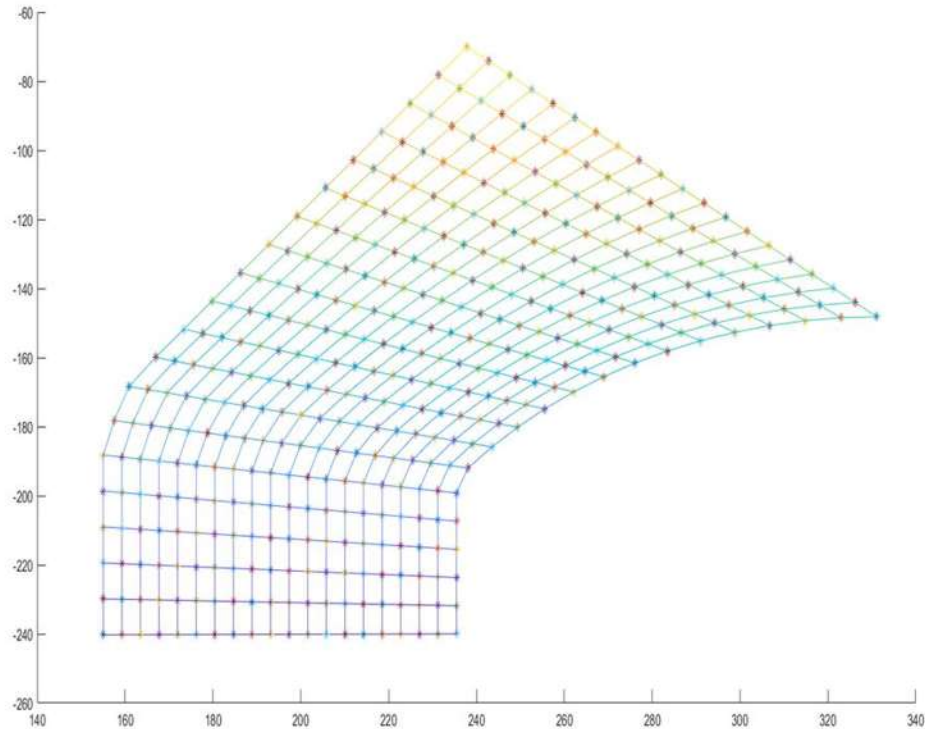


Figura.3.19. Mallado del esqueleto del álabe recto propuesto.

Después de obtener la malla del marco del álabe recto, se puede realizar una rotación matricial respecto al eje coordenado correspondiente a la altura del rodete para generar las superficies de la corona y la banda, que se muestra en la Figura 3.20. Este proceso permite obtener una cantidad significativa de datos alrededor del rodete, lo que facilita la reconstrucción precisa del modelo completo. A continuación, se detalla el proceso:

1. **Obtención de la malla del marco del álabe recto:** Utilizando los datos discretizados, se genera una malla del álabe en su posición recta. Esta malla se realiza mediante la interpolación transfinita (TFI).
2. **Definición de la rotación matricial:** Se define una matriz de rotación que permitirá girar la malla del álabe alrededor del eje coordenado correspondiente a la altura del rodete. La matriz de rotación en 3D puede expresarse como:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3.2.}$$

donde θ es el ángulo de rotación alrededor del eje coordenado (generalmente el eje zz).

3. **Aplicación de la rotación:** La malla del álabe recto se rota utilizando la matriz de rotación. Para cada punto de la malla (x, y, z) , se aplica la transformación:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R(\theta) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 3.3.}$$

4. **Generación de las superficies de la corona y la banda:** A partir de las posiciones rotadas de los álaves, se crean las superficies de la corona y la banda del rodete. Estas superficies se generan interpolando entre las diferentes posiciones del álabe y conectando los puntos correspondientes para formar una malla continua.

5. **Obtención de datos alrededor del rodete:** Al rotar la malla del álabe y generar las superficies de la corona y la banda, se obtiene una gran cantidad de datos que describen la geometría completa del rodete. Estos datos son esenciales para análisis posteriores, como simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y para la fabricación de piezas.

Este método permite una reconstrucción detallada y precisa del rodete, asegurando que se mantengan las características geométricas esenciales para el buen funcionamiento de la turbina. La precisión en la generación de las superficies de la corona y la banda es crucial para maximizar la eficiencia del rodete y, por ende, de la turbina en su conjunto.

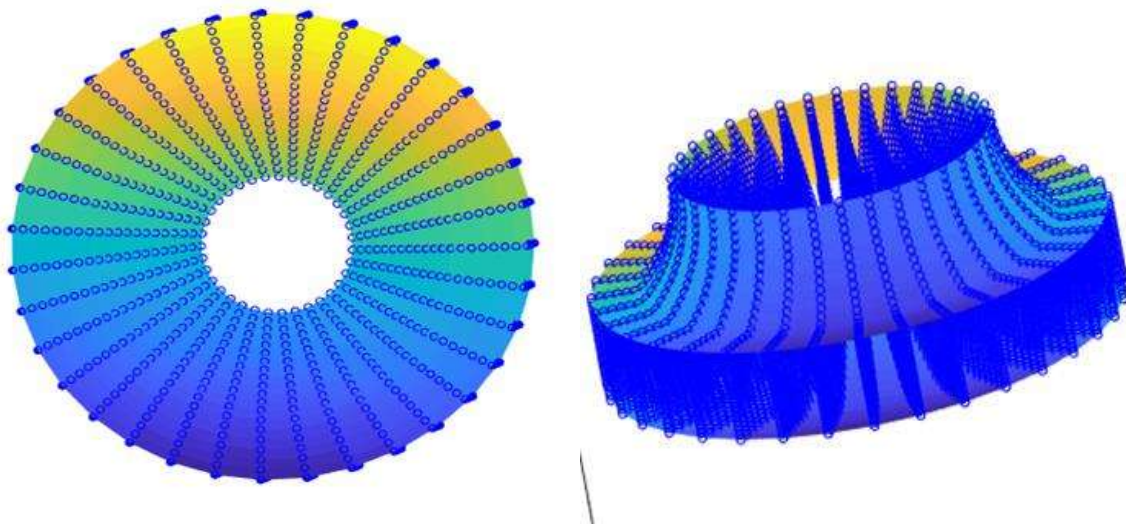


Figura.3.20 Rodete analítico generado con el esqueleto del álabe recto en MATLAB.

3.2.3. Obtención y mallado del esqueleto del álabe analítico de la turbina Francis de Tirio.

Para llevar a cabo la reconstrucción del álabe analítico de una turbina Francis, se puede utilizar un polinomio de tercer grado para procesar los datos discretizados obtenidos del escaneo o medición del álabe. Este enfoque permite representar de manera adecuada el comportamiento de las fronteras del álabe.

El procedimiento general implica los siguientes pasos:

1. **Obtención de datos discretizados:** Los datos del álabe se obtienen mediante escaneo 3D o mediciones precisas, generando una nube de puntos que describe la geometría del álabe.

2. **Ajuste de un polinomio de tercer grado:** Utilizando técnicas de ajuste de curvas, se aplica un polinomio de tercer grado a los datos discretizados. Este polinomio tiene la forma:

$$P(x)=ax^3+bx^2+cx+d \quad P(x)=ax^3+bx^2+cx+d \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde a , b , c , y d son los coeficientes que se determinan a partir del ajuste de los datos.

3. **Representación de las fronteras del álabe:** El polinomio de tercer grado se utiliza para representar las cuatro fronteras del álabe (bordes de entrada y salida, y los perfiles superior e inferior). Este ajuste proporciona una representación matemática continua y suave de las fronteras.

4. **Creación de un nuevo marco:** Con las fronteras definidas mediante funciones matemáticas, se crea un nuevo marco para el álabe. Este marco permite generar un modelo CAD preciso y detallado del álabe, que puede ser utilizado para análisis posteriores y para la fabricación de un nuevo álabe o la reparación del existente.

El uso de un polinomio de tercer grado es especialmente útil porque puede capturar las variaciones suaves y continuas en la geometría del álabe, lo que es crucial para mantener la eficiencia y el rendimiento del diseño original.

Este polinomio de tercer grado, utilizado para la representación del marco de un álabe de la turbina Francis 99, es el resultado de la investigación de maestría de la Ingeniera

María Goretti Gama Guzmán [28]. En su estudio, ella desarrolló una metodología para parametrizar el marco del álabe recto, basándose en las alturas de cada uno de los puntos y en los ángulos que se forman al transformar el marco del álabe recto al marco del álabe real de la turbina Francis 99.

Proceso de parametrización del álabe

1. **Marco del álabe escaneado:** El álabe escaneado se define mediante puntos discretos en un espacio tridimensional, con sus correspondientes alturas y coordenadas. Este marco inicial sirve como la base para la parametrización.
2. **Polinomio de tercer grado:** Para capturar la geometría del álabe, se utiliza un polinomio de tercer grado. Este polinomio es capaz de representar las variaciones suaves y continuas de la superficie del álabe. La forma general del polinomio es:

$$P(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Los coeficientes a , b , c , y d se determinan mediante ajuste de curva a los datos discretizados obtenidos del álabe.

3. **Alturas y ángulos:** La parametrización se realiza teniendo en cuenta las alturas de cada punto del álabe recto y los ángulos necesarios para transformar este marco en el álabe real de la turbina Francis 99. Los ángulos se calculan a partir de la geometría del álabe y su posición relativa en el rodete.
4. **Transformación al álabe analítico:** Utilizando los ángulos y las alturas parametrizadas, se aplica una serie de transformaciones matemáticas para convertir el marco del álabe escaneado al marco del álabe analítico. Estas transformaciones incluyen rotaciones y escalados, que se representan mediante matrices de transformación.

5. **Interpolación Transfinita (TFI):** Una vez que se tiene el marco del álabe analítico, se emplea la Interpolación Transfinita para generar una malla interior de la superficie del álabe. Este método permite obtener puntos discretos mediante operaciones matemáticas, creando una superficie continua a partir de las cuatro fronteras del marco del álabe

En la Figura 3.21 se muestra el marco del álabe analítico obtenido por el polinomio de tercer grado.

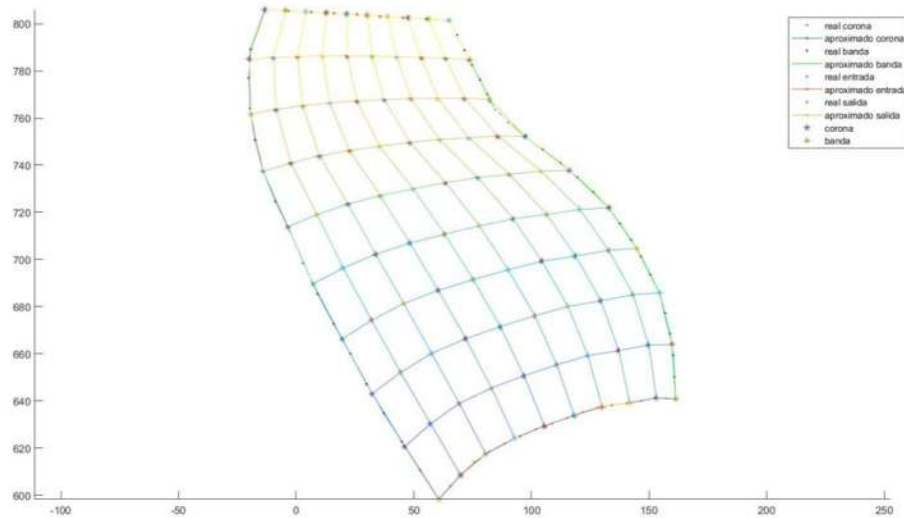


Figura. 3.21. Esqueleto del álabe analítico.

Una vez obtenido el marco del álabe del rodete de la turbina Francis de Tirio, mallamos mediante la interpolación transfinita (TFI), como se muestra en la Figura 3.22. Con la finalidad de garantizar que la superficie sea lo más uniforme posible en todo el álabe.

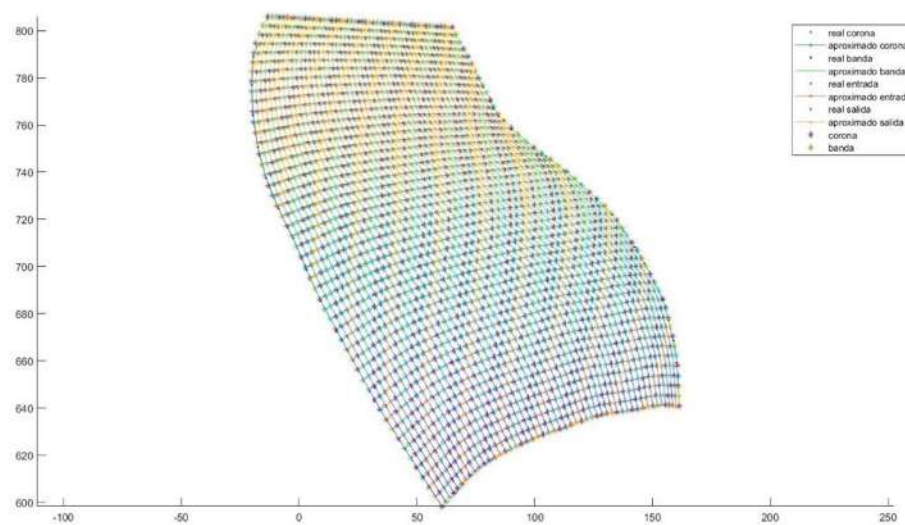


Figura. 3.22. Álabe analítico mallado con la interpolación transfinita (TFI).

3.3. Reconstrucción de la superficie mediante la colocación de un perfil NACA.

El mallado generado mediante la Interpolación Transfinita (TFI) y el polinomio de tercer grado no solo ayuda en la representación precisa del álabe, sino que también permite la integración de perfiles aerodinámicos NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Estos perfiles NACA, ya sean de cuatro o cinco dígitos, son fundamentales para optimizar el rendimiento aerodinámico e hidráulico de los álabes de turbinas. NACA.

3.3.1. Integración de Perfiles NACA en el álabe

A continuación, se detalla cómo el mallado facilita el montaje y alineación de los perfiles, así como el procedimiento de montaje de un perfil NACA.

1. **Montaje de perfiles NACA:**

- **Perfil NACA de cuatro dígitos:** Estos perfiles se definen mediante una serie de cuatro dígitos que describen la curvatura máxima, la posición de la curvatura máxima, el grosor máximo y la longitud del perfil.
- **Perfil NACA de cinco dígitos:** Estos perfiles proporcionan una mayor flexibilidad y precisión, añadiendo un dígito adicional para especificar el ángulo de ataque.

2. **Generación del mallado:** Utilizando la metodología descrita previamente (polinomio de tercer grado y TFI), se genera un mallado preciso de la superficie del álabe. Este mallado sirve como base para integrar los perfiles NACA.

3. **Alineación y montaje de los perfiles:**

- **Superposición en el marco:** Cada perfil NACA se coloca en el marco del álabe, asegurando que la geometría del perfil se alinee correctamente desde la entrada hasta la salida del álabe.
- **Distribución uniforme:** Se montan un total de 10 perfiles desde la parte superior e inferior del marco del álabe, distribuyéndolos uniformemente a lo largo de la superficie.
- **Interpolación entre perfiles:** La TFI se utiliza para interpolar entre los perfiles NACA, garantizando una transición suave y continua entre cada perfil montado.

4. **Consistencia:** El mallado asegura que cada perfil montado sea muy parecido al perfil adyacente, manteniendo la consistencia geométrica y

aerodinámica. Esto es crucial para asegurar un flujo uniforme y eficiente del fluido a través del álabe.

En la Figura 3.23 se muestra el montaje del perfil NACA en el marco del álabe analítico.

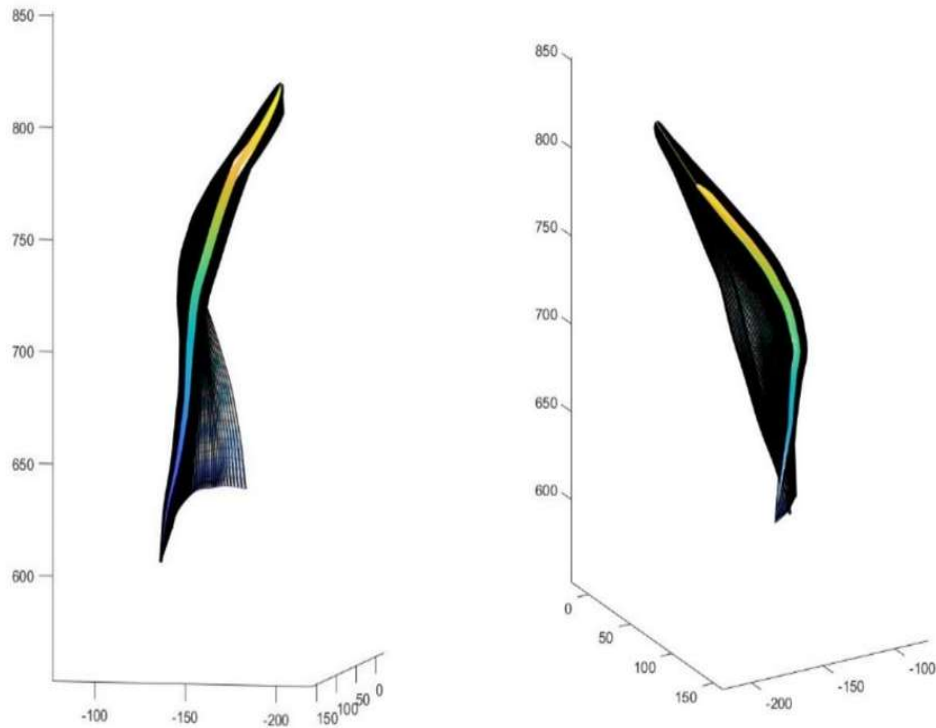


Figura. 3.23. Montaje de un perfil NACA de 5 dígitos en el marco analítico.

3.3.2. Generación del sólido del álabe en un archivo CAD.

Después del montaje de los perfiles NACA y la generación del mallado, se procedió a exportar los datos desde MATLAB a GAMBIT, un programa de diseño asistido por computadora (CAD) especializado en la creación de geometrías para análisis de fluidos y simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD). A continuación, se detalla el proceso de exportación y creación del sólido del álabe en GAMBIT, seguido de su ensamblaje en la corona y banda del rodete, donde en la Figura 3.24 se muestra el álabe reconstruido.

Proceso de exportación y creación del sólido del álabe

1. Exportación de datos desde MATLAB:

- **Generación de datos:** MATLAB se utiliza para procesar los datos del montaje de los perfiles NACA, generando un conjunto de puntos discretos que representan la superficie del álabe.
- **Formato de exportación:** Los datos se exportan en un formato compatible con GAMBIT, como archivos de texto o archivos de puntos XYZ, que contienen las coordenadas de los puntos discretos.

2. Importación en GAMBIT:

- **Importación de puntos:** En GAMBIT, se importan los puntos exportados desde MATLAB. Esto se realiza utilizando las herramientas de importación de puntos o geometrías disponibles en el software.
- **Creación de superficies:** Utilizando los puntos importados, se crean superficies que representen la geometría del álabe. GAMBIT permite la creación de superficies a partir de puntos discretos mediante herramientas de interpolación y creación de splines.

3. **Generación del sólido del álabe:**

- **Extrusión de superficies:** Las superficies generadas se extruyen para crear el sólido del álabe. Este proceso involucra la definición de la altura y las dimensiones del sólido basadas en el diseño del álabe.
- **Definición de fronteras:** Se definen las fronteras del sólido, asegurando que las superficies de entrada, salida, y las superficies laterales del álabe estén correctamente configuradas.

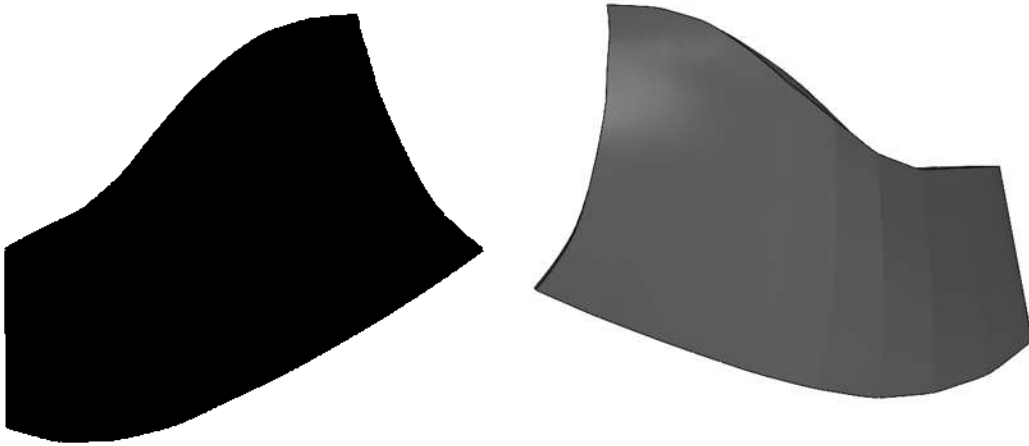


Figura.3.24. Álabe analítico con un perfil NACA en sólido.

3.3.3. Ensamblaje del álabe en la corona y banda del rodete

A continuación, se describe el montaje del álabe analítico en la corona y banda del rodete de la turbina hidráulica tipo Francis de la central hidroeléctrica de Tirio, Michoacán.

1. Creación de la corona y banda:

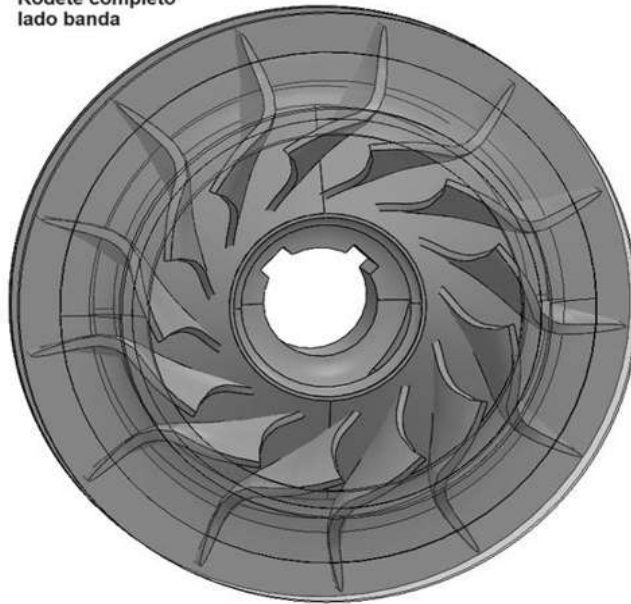
- **Diseño de la corona y banda:** Se diseñan las geometrías de la corona y banda del rodete en GAMBIT. Estos componentes son esenciales para montar los álabes en la estructura del rodete.
- **Definición de posiciones de montaje:** Se definen las posiciones donde los álabes serán montados en la corona y banda. Estas posiciones deben ser precisas para asegurar un ensamblaje correcto.

2. Ensamblaje del álabe en el rodete:

- **Alineación y posicionamiento:** Los sólidos de los álabes se alinean y posicionan en las ubicaciones definidas en la corona y banda. Se asegura que los álabes están montados de manera uniforme y alineados correctamente.
- **Fusión de componentes:** Utilizando las herramientas de ensamblaje de GAMBIT, los álabes se fusionan con la corona y banda, creando un sólido único del rodete. Este proceso incluye la verificación de la integridad geométrica y la eliminación de posibles intersecciones o solapamientos no deseados.

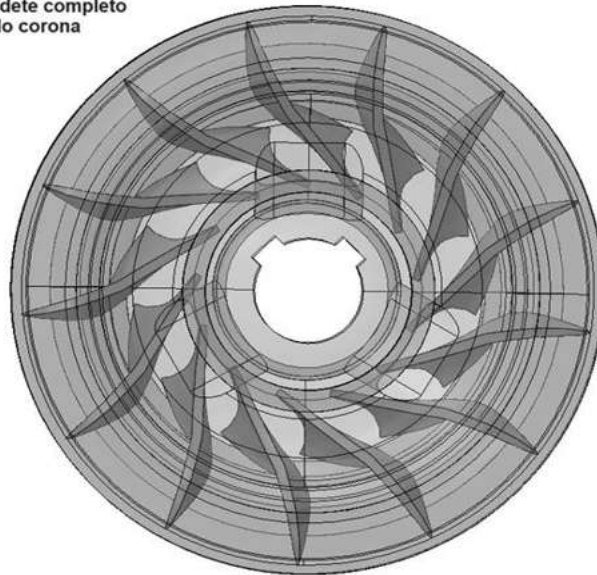
En la Figura 3.25 se muestra el álabe analítico ensamblado en el rodete de la turbina hidráulica tipo Francis de Tirio.

Rodete completo
lado banda



A) Lado Banda. (parte superior).

Rodete completo
lado corona



B) Lado corona (parte inferior).

Figura. 3.25. Ensamblado del álabe analítico en el rodete de la turbina Francis de Tirio.

Capítulo 4

Análisis de resultados.

4.1. Álabes analíticos reconstruidos.

Después de aplicar la metodología descrita, se obtuvo un álabe completamente nuevo, reconstruido analíticamente con una superficie mejor definida en comparación con la del álabe escaneado. El álabe original presentaba un estado muy deteriorado, con problemas de cavitación y al borde del colapso. Esta situación justificó la necesidad de no replicar exactamente el álabe que actualmente está en funcionamiento, sino de crear uno nuevo. En la Figura 4.1 se observa en diferentes posiciones el álabe analítico reconstruido.

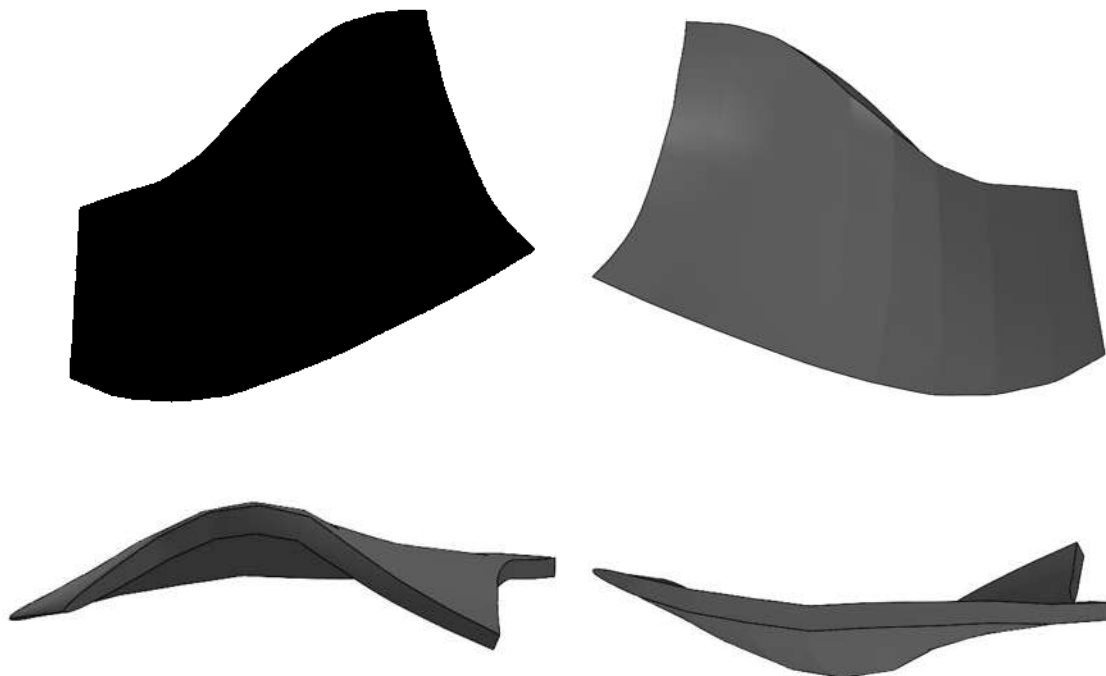


Figura.4.1. Álabe reconstruido con herramientas numéricas.

4.1.1. Resultados de la metodología.

Se describe un análisis de resultados obtenidos de la reconstrucción del álabe analítico de la turbina hidráulica tipo Francis de la central hidroeléctrica de Tirio, Michoacán, en tres pasos, analizando la reconstrucción analítica, el estado del álabe original y las razones por las cuales no se optó por dejar el álabe escaneado originalmente.

1. **Reconstrucción Analítica:**

- **Superficie mejorada:** La aplicación de polinomios de tercer grado y la Interpolación Transfinita (TFI) permitió obtener una superficie del álabe más lisa y precisa, eliminando las irregularidades y defectos presentes en el álabe original.

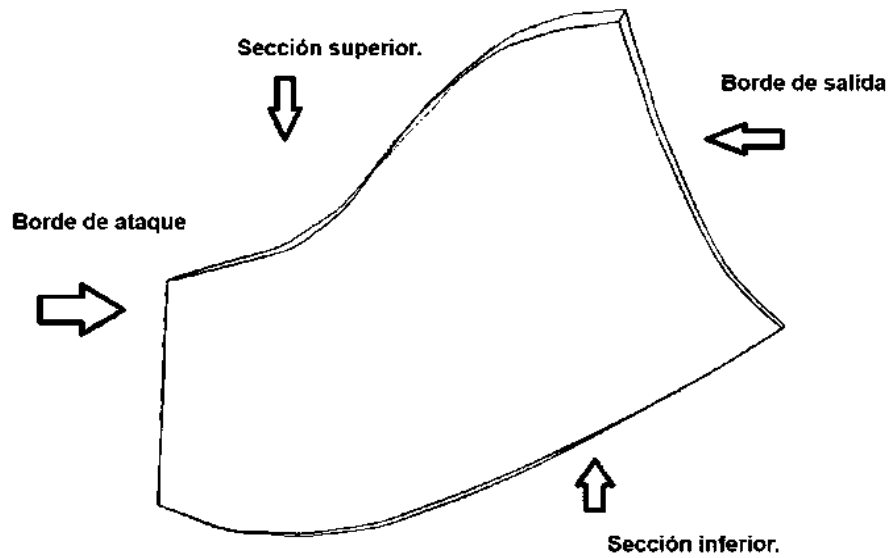
2. **Estado del álabe original:**

- **Problemas de cavitación:** El álabe original sufría de erosión y daños debido a la cavitación, un fenómeno que afecta la superficie de los álabes al formar burbujas de vapor que colapsan, causando desgaste material.
- **Deterioro estructural:** La acumulación de años de uso y reparaciones artesanales había dejado al álabe en una condición estructural comprometida, con formas geométricas deformadas y una eficiencia reducida.

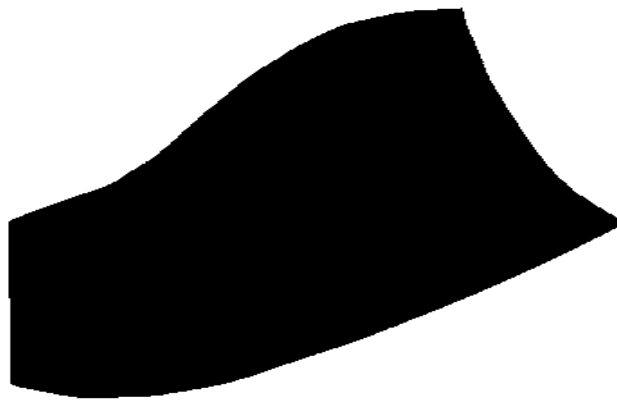
3. **Razones para la no reconstrucción del álabe original:**

- **Condición del álabe original:** Debido al estado crítico del álabe original, replicar su geometría exacta no hubiera sido beneficioso. En cambio, la reconstrucción se enfocó en crear un diseño que restablece y mejora las especificaciones operativas originales.

En la Figura 4.2 se muestra el álabe reconstruido de manera analíticamente en su totalidad con la finalidad de obtener una superficie más pulcra y de una superficie constante evitando irregularidades a lo largo y ancho del álabe.



A) Cuatro fronteras del álabe analítico.



B) Álabe analítico en sólido.

Figura. 4.2. Álabe reconstruido analíticamente.

4.2. Porcentaje de error entre el esqueleto del álabe escaneado y el esqueleto analítico.

Se realizó una comparación entre las coordenadas del esqueleto del álabe escaneado y el esqueleto del álabe analítico obtenido anteriormente para analizar la diferencia entre ellos, como se muestra en la Figura 4.3. Se obtuvieron resultados del orden de $\times 10^{-13}$, lo cual matemáticamente es cero. En la coordenada z, el resultado fue cero debido a que las alturas de cada una de las fronteras no cambian, siendo exactamente las mismas, a continuación, se muestran las gráficas en la Figura 4.4.

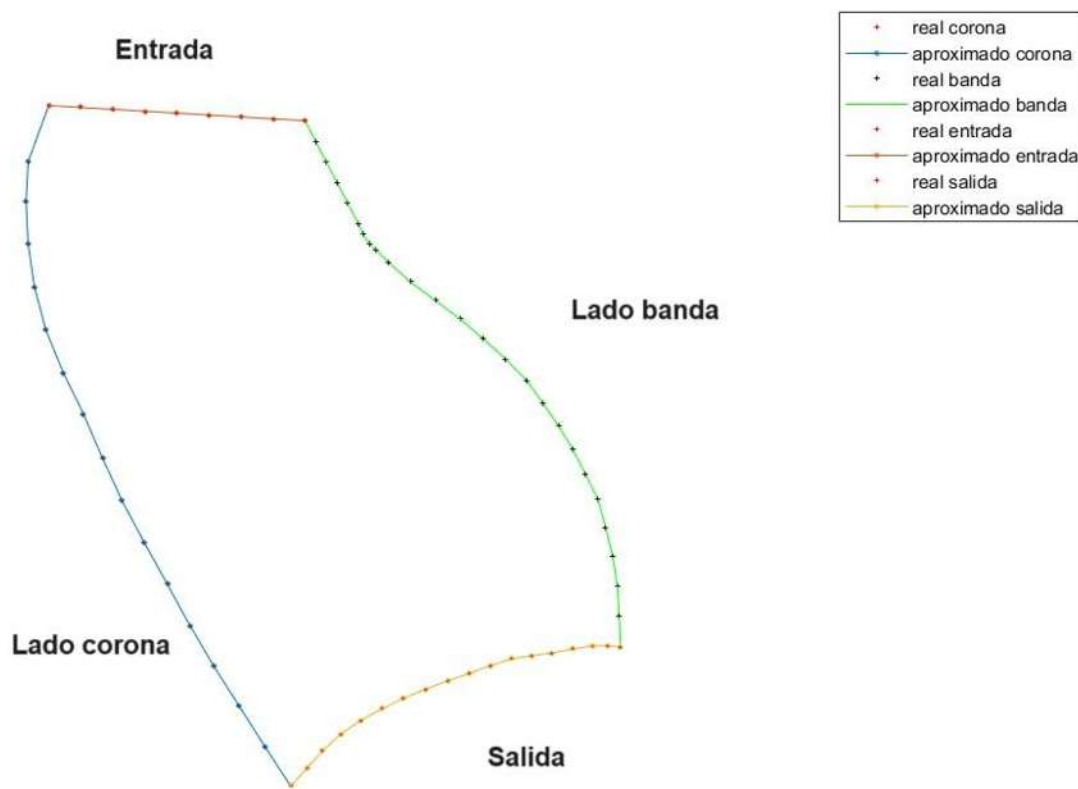
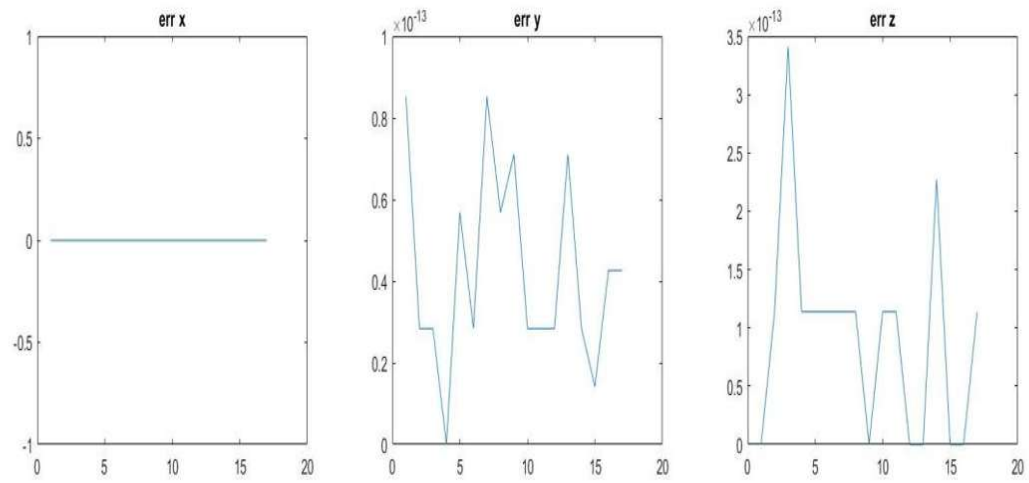
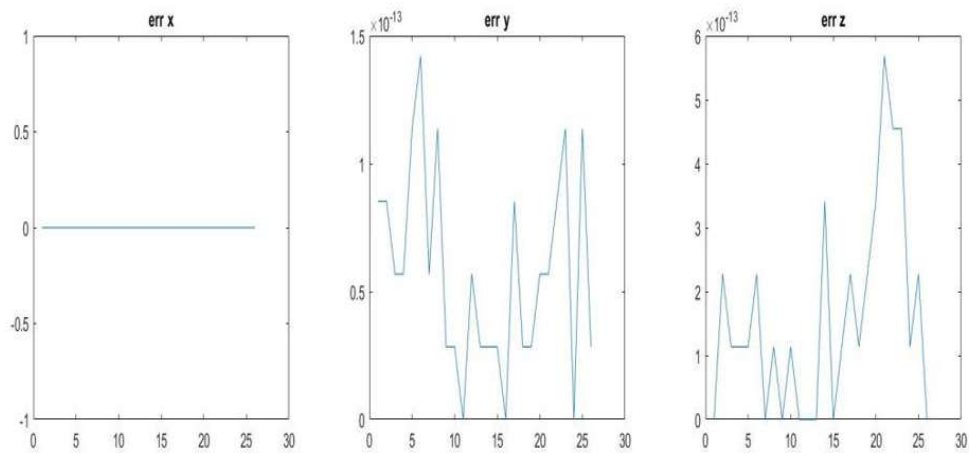


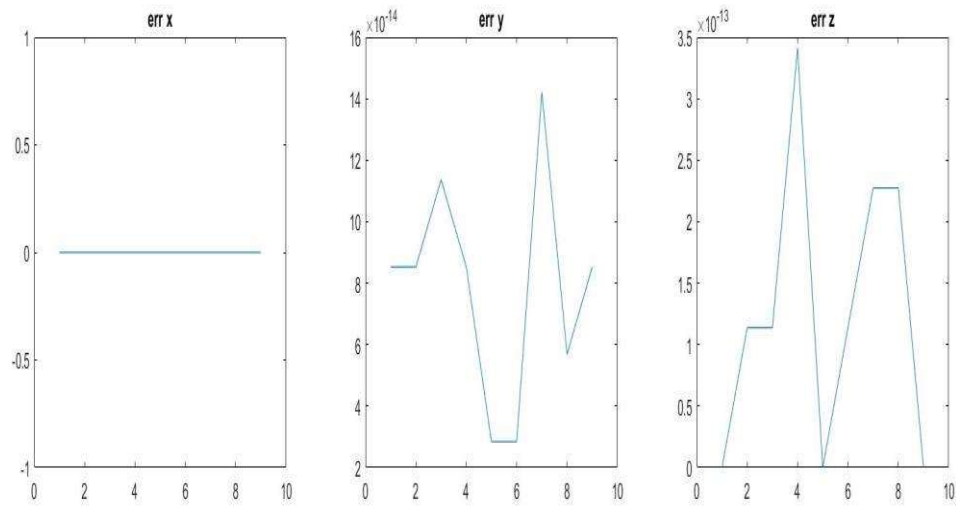
Figura 4.3. Comparación entre el esqueleto del álabe real y el esqueleto obtenido analíticamente.



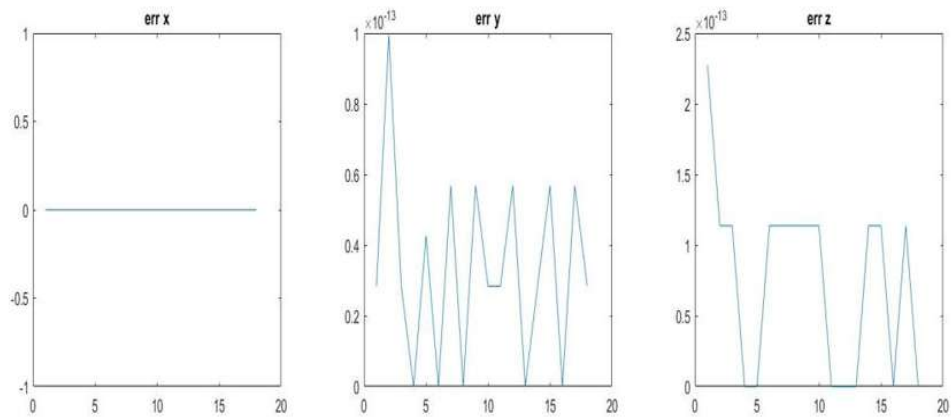
A) Porcentaje de error en la corona (línea inferior).



B) Porcentaje de error en la banda (línea superior).



C) Porcentaje de error en la entrada.



D) Porcentaje de error en la salida.

Figura.4.4. Gráficas que muestran el porcentaje de error en cada una de las cuatro fronteras del esqueleto analítico comparado con el esqueleto real.

4.3. Calidad de la reconstrucción del rodete analítico.

Se realizó una proyección del rodete reconstruido analíticamente sobre el rodete escaneado para poder observar la diferencia de las superficies y la calidad de cada una de ellas. Para evaluar la calidad de la reconstrucción.

Debido a que no se cuentan con parámetros de ningún tipo sobre el rodete, se proyectó espaciadamente en un ángulo de 27.6923077 grados entre cada álabe. En la Figura 4.5. se observa el álabe reconstruido montado sobre el rodete.

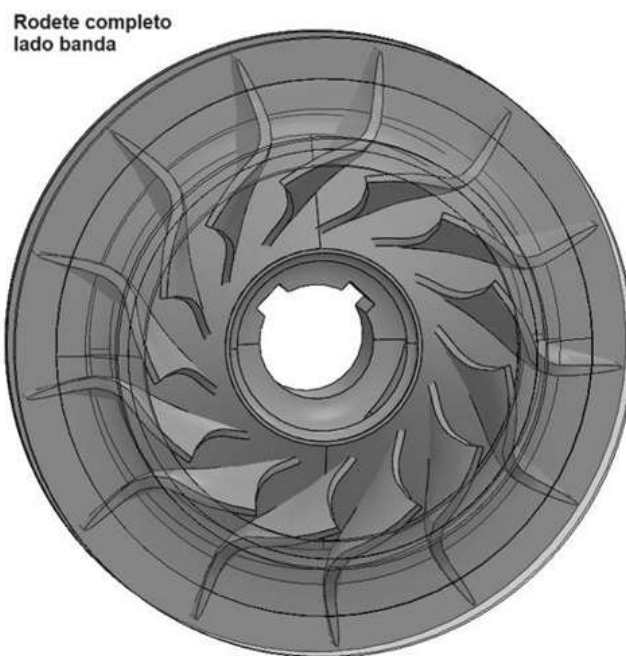


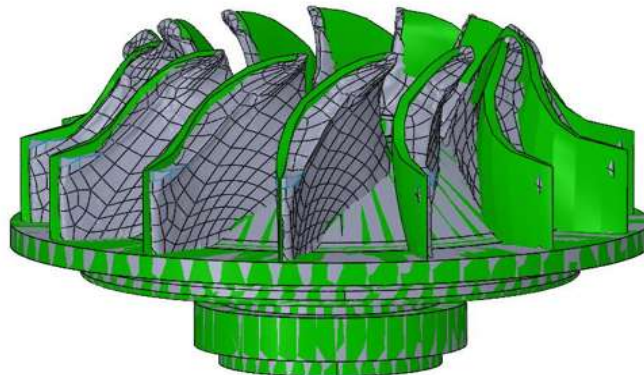
Figura.4.5. Álabe reconstruido montado en el rodete de la turbina Francis de Tirio.

En la Figura 4.6 se muestra la notable diferencia entre el álabe reconstruido y el álabe escaneado obtenido del molde. Se observa una gran disparidad en la superficie, donde el

álabe reconstruido presenta una superficie más uniforme y constante a lo largo y ancho del álabe, mientras que el álabe escaneado exhibe varias irregularidades y deformaciones.



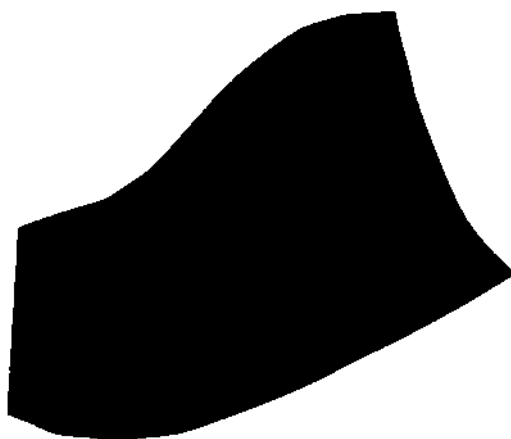
A) Vista superior del rodete analítico.



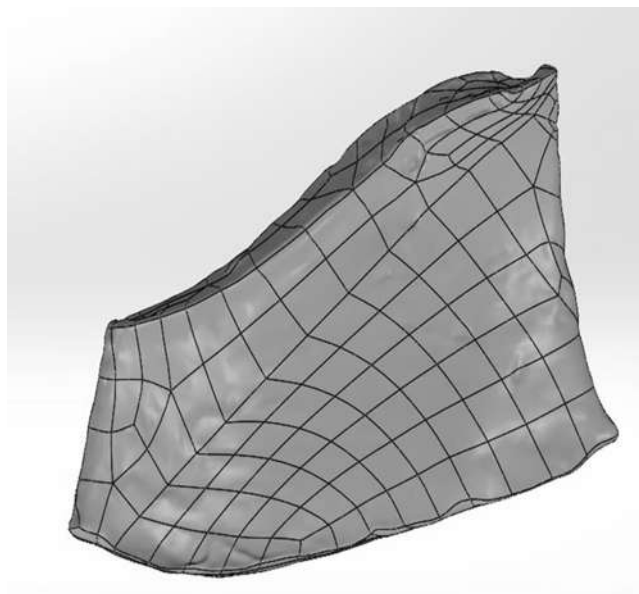
B) Vista lateral del rodete analítico.

Figura.4.6 Comparación del rodete escaneado sobre el rodete reconstruido.

Cabe mencionar que el molde presenta una serie de errores debido a que la altura a la entrada fue incorrecta, ya que el molde tiene irregularidades y no se obtuvo la altura correcta en la entrada. Por ello, se optó por utilizar todo el largo de la entrada del rodete. Debido a esto, se realizaron modificaciones al marco del álabe escaneado. Esta diferencia se muestra en la Figura 4.7.



A) El álabe reconstruido.



B) El álabe escaneado.

Figura.4.7 Diferencia entre el álabe reconstruido y el álabe escaneado.

Capítulo 5

Manufactura en impresión 3D del rodete analítico de la PCH de Tirio, Michoacán en escala 1:1.

5.1. Equipo y material utilizado.

Para realizar la manufactura en 3D en tamaño real del modelo, se utilizó el siguiente equipo:

- **Impresora 3D Ender-3 Max Neo**, que cuenta con una capacidad de impresión de $28,800 \text{ cm}^3$ ($30 \times 30 \times 32 \text{ cm.}$).



Figura.5.1. Impresora 3D Ender 3 Max neo [18].

El material que se utilizó para la impresión fue:

- PLA, un material comercial y de fácil acceso, también llamado ácido poliláctico, es un termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar. A diferencia de otros materiales de la industria hechos principalmente a base de petróleo. Debido a sus orígenes más ecológicos este material ha comenzado a popularizarse dentro de la industria, y hemos comenzado a verlo en aplicaciones médicas y en productos alimentarios.



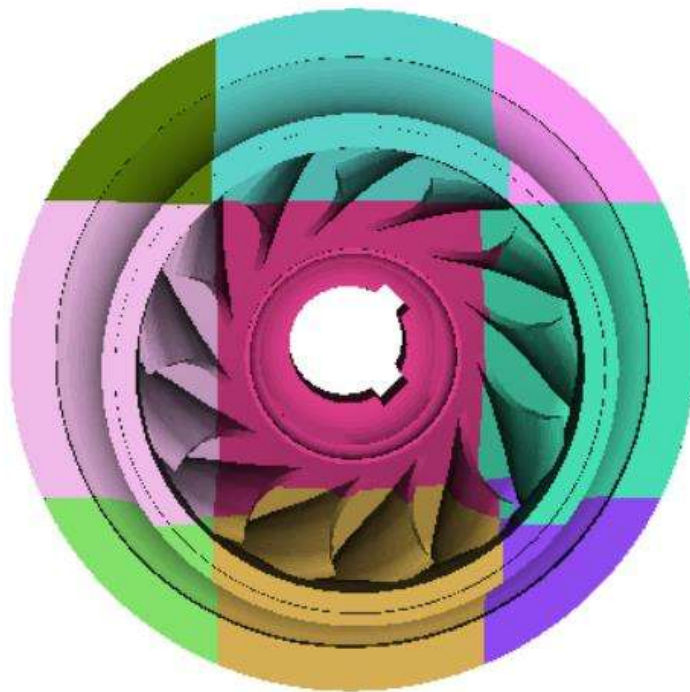
Figura.5.2. Material para la impresión (PLA) [19].

Debido a que la impresión se realizó con fines demostrativos, no se requirió otro material de mayor resistencia. Posteriormente, se realizará la colocación en sitio, donde se podrán rectificar las dimensiones y, probablemente, diseñar un molde para, en trabajos futuros, realizar una fundición que nos ayude a crear un prototipo de prueba.

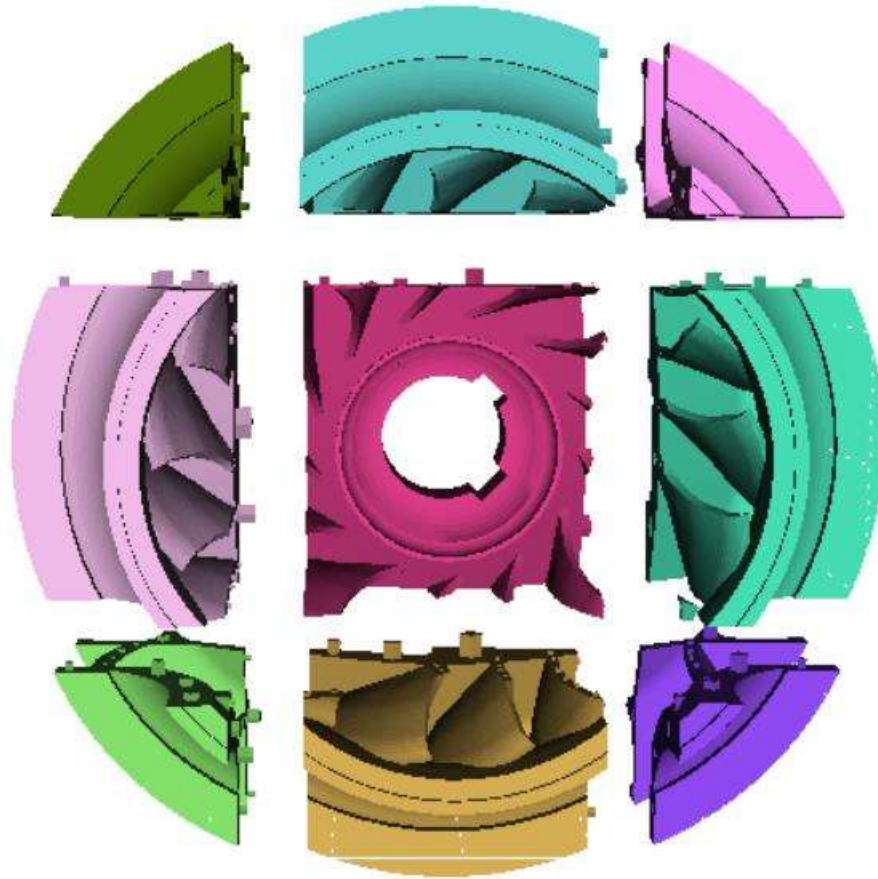
5.2. Seccionado del rodete.

Debido a que el equipo con el que se contaba no tiene la capacidad para imprimir el rodete en una sola pieza se decidió dividir el rodete en un total de 10 piezas. Cada una de estas piezas contará con conectores para poder realizar un ensamblaje más simple. Los conectores macho tuvieron una tolerancia de -0.2 mm respecto de los conectores hembra, con la finalidad de facilitar la unión de cada una de las piezas.

Este proceso se realizó en un software especializado en el diseño y tratamiento de piezas para impresión 3D. a continuación se muestra en la Figura 5.3 el rodete dividido en varias piezas.



A) Rodete completo.



B) Rodete seccionado.

Figura.5.3. Rodete seccionado.

5.3 Tiempo de impresión y material utilizado

Los archivos generados en LUBAN fueron exportados a software CREALITY SLICER, un programa recomendado por el fabricante de la impresora 3D para generación del código G, mismo código que utilizará la máquina para la fabricación de cada una de las piezas.

Cargando los datos recomendados por el software para obtener una impresión de calidad.

Se encontró con un tiempo de impresión de aproximadamente 287 horas y un total de 5 kilos de filamento. Todo esto mostrado en la tabla 5.1.

Partes	Material (Kg)	Impresión (Horas)	Ensamblado (Horas)	Total, de tiempo (horas)
10	5	287	24	311

Tabla. 5.1. Tiempo de impresión.

5.4. Ensamble de las piezas.

Después de haber imprimido cada una de las piezas se procedió a unir las y fijarlas con pegamento epóxico, asegurando una buena fijación de cada una de las piezas, como se muestra en la Figura 5.4.



Figura.5.4. Imágenes de algunas de las piezas impresas.

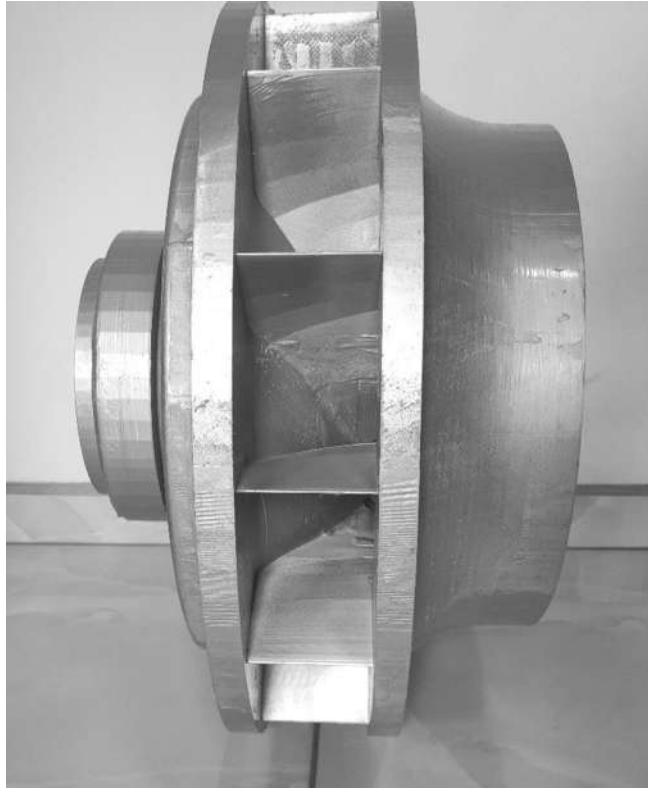


Figura.5.5. Rodete analítico ensamblado.

5.5 Rodete terminado.

En el último paso de este proceso de manufactura, se procedió a realizar un proceso de detallado, que incluyó el lijado de las piezas para corregir imperfecciones, así como su limpieza y el relleno de las áreas que lo necesitaban.

Una vez procesada adecuadamente la superficie, se pudo realizar el pintado del rodete para obtener una mejor presentación. El rodete terminado se muestra en la Figura 5.6.



A) Vista lateral.



B) Vista lateral.



C) Vista trasera.



D) Vista frontal.

Figura.5.6. Rodete analítico impreso en 3D a tamaño real terminado.

Capítulo 6

Conclusiones y bibliografía.

6.1. Conclusiones.

Durante el desarrollo de este proyecto, se comprobó que realizar el escaneo de un rodete requiere una gran inversión económica y una demanda de tiempo excesiva. La recopilación de la nube de puntos implica un tratamiento previo de la pieza a escanear, como su limpieza, ubicación en un lugar estratégico que facilite el escaneo y el posprocesamiento de la nube de puntos, lo que incluye la eliminación de superficies repetidas y la corrección de caras, entre otros.

La obtención del marco del álabe facilita en gran medida la reconstrucción del rodete, ya que solo sería necesario escanear un álabe del rodete de la turbina para poder generar todo el rodete analíticamente. Esto simplifica el posprocesamiento, ahorra tiempo considerablemente y, lo más importante, permite modificar la superficie del álabe para aumentar su rendimiento hidrodinámico.

Mediante la utilización de ingeniería inversa, tenemos valores en porcentaje de error de $\times 10^{-12}$ aproximadamente entre el marco del álabe real y el marco del álabe analítico. Haciendo que este se aproxime demasiado y pudiendo modificar la superficie mediante perfiles NACA para en investigaciones futuras analizar su comportamiento hidrodinámico.

Con esto, se obtiene un archivo CAD que facilita la manufactura del rodete. Para llegar a la construcción de este, se requiere un análisis estructural y de dinámica de fluidos computacional para validar que nuestro modelo será funcional y resistente a las necesidades requeridas, lo cual se deja para trabajos futuros.

Aunque para llegar a la fabricación de este rodete todavía falta mucho, ya que se requieren factores que sean aprobados y que garanticen el buen funcionamiento del rodete, con estas investigaciones estamos cada vez más cerca de poder hacerlo posible.

6.2. Bibliografía.

[1] MetaLine.com. (2024). Compuestos de reparación para rodets en centrales hidroeléctricas. [online]. Disponible: <https://metaline.com/es/aplicaciones/obtención-de-energía-servicios-municipales/centrales-hidroelectricas-reparacion-de-rodets.html>.

[2] Belzona. (1952-2024). Reparación y protección de rodets de turbinas Francis con Belzona.[online].Disponible:https://Khia.belzona.com/Reparación_y_protección_de_rodets_de_turbinas_Francis_con_Belzona

[3] Wikipedia, la Enciclopedia Libre (2024, 8 mayo). *Central hidroeléctrica*. [online] Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Central_hidroel%C3%A9ctrica.

[4] Prezi. (2014, julio 5). Turbina Kaplan. [online] Disponible: <https://prezi.com/0eatwqfyenzi/turbina-kaplan/>.

[5] Renedo J. Carlos, Inmaculada Fernández Diego, Carcedo Haya Juan, Ortiz Fernández Félix. “Máquinas de fluido incompresibles”. Universidad de Cantabria, 2004.

[6] ETERNOO MACHINERY CO., LTD. (2014) Turbinas Francis. [online]. Disponible: <http://es.eternoohydro.com/turbines/francis-turbines.html>.

[7] Cuenca-Navarrete, L., Naranjo-Mantilla, M., and Buele, J. “Estandarización de procesos prioritarios en la recuperación del rodete de una turbina tipo Francis”, *R.D.C.U.T.I.*, Vol. 10, pp. 3, agosto 2021.

[8] E. O. Velasco Morillo, V. H. Hidalgo Diaz, “Desarrollo de un mallado para una turbina tipo Francis de eje horizontal con características similares a las turbinas de hidroimbabura”, Trabajo fin de master, U.T.N., Ibarra Ecuador, 2023.

[9] R. Córdoba, M. de J. Barillas, A. Söderberg. “Aplicación de ingeniería inversa para la reconstrucción de piezas mecánicas con geometrías de alta complejidad en el área de energías renovables”, presentado en Memoria del Seminario de Difusión de Investigaciones 2019.

[10] G. S. Núñez Villacis, C. H. Arroba Arroba. Mg., “Optimización del perfil hidráulico de un rodete tipo Francis de la central hidroeléctrica san francisco”, Trabajo fin de master, Maestría en Mecánica Mención Manufactura Cohorte, U.T.A. Ambato Ecuador, enero-2021.

[11]. M. A. Ugalde Linares, J. J. Villalon López. “Fabricación de un modelo para fundición de un álabe de rodete hidráulico tipo Francis.”, Trabajo fin de ingeniero mecánico, Facultad de Ingeniería Mecánica, U.M.S.N.H., Morelia Michoacán; agosto-2010.

[12]. C. A. Mora Sánchez, V. H. Hidalgo Diaz D.Sc., E. A. Valencia Torres Ph.D., “Análisis de la eficiencia de una turbina tipo Francis con características similares a la de la central hidroeléctrica San Francisco-Ecuador”, Trabajo fin de master, Facultad de Ingeniería Mecánica, E.P.N., Quito, junio, 2018.

[13] Wikipedia, la Enciclopedia Libre (2024, 14 enero). Ingeniería Inversa. [online] Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki?curid=42649#cite_ref-5.

[14] R. Santos Cáceres, O. Cañihua Cayocusi “Propuesta de gestión del mantenimiento preventivo para garantizar la confiabilidad operativa de la pequeña central hidroeléctrica de Herca”, obtener el título de ingeniero electricista, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Informática y Mecánica, U.N.S.A.A.C, Perú, 2023.

[15] C. Monroy Ledezma. “Informe de eficiencia efectuado a la unidad 4 de la C.H. tirio”. Comisión Federal de Electricidad, Irapuato, Guanajuato, K3323-14/07, 2007.

[16] Y., (2015, enero 9). Moldes de silicona caseros, [online]., Disponible: <https://entintarte.blogspot.com/2015/01/moldes-de-silicona-caseros.html>.

[17] CINTEC, (2021), *GEOMAGIC CAPTURE DE 3D SYSTEMS*. [online]., Disponible: <https://www.cientec.com.mx/es/promociones/geomagic-capture-de-3d-systems>

[18] TodoToner.cl, (2024), Ender 3 Max Neo Creality | Tamaño IMP 300x300x320mm | Impresora 3D |. [online], Disponible: <https://www.todotoner.cl/impresoras/impresoras-3d/impresoras/ender-3-max-neo>

[19] Filamentive. (2022, Abril 07), 8.5 kg White PLA 3D Printer Filament, [online], Disponible: <https://www.filamentive.com/product/pla-rpla-8-5-kg-white-large-3d-printer-filament/>.

[20] Ruiz, C. (2020, 13 enero). *Guía completa: el filamento PLA en la impresión 3D - AUROS Colombia*. [online], Disponible: <https://www.auros.com.co/guia-completa-filamento-pla-la-impresion-3d/#:text=El%20filamento%20PLA%2C%20%C3%A1cido%20polil%C3%A1ctico,principalmente%20a%20base%20de%20petr%C3%B3leo.>

[21] Planeta Voxel. (2020, 25 marzo).  *Cómo IMPRIMIR piezas GRANDES en 3D* |  IMPRESIONES GIGANTES  | *Cráneo de T-REX impreso en 3D* [Vídeo, online]. YouTube, Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=uTB0Wt6psjU>

[22] D. Ruiz de Pascual, J. A. Fernandes, A., Lomas, A. Velasco, “*Polímero compuesto (Maicena-Silicona).*” *R.E.M II*, vol. 5, pág. 5, mayo 2019.

[23] L. D. Pérez Rubio, S. R. Galván González, F. J. Domínguez Mota, Á. Cerriteño Sánchez, M. Á. Tamayo Soto, and G. Delgado Sánchez. “Reconstrucción de un álabe de turbina de vapor mediante métodos numéricos.”, en *Memorias del XXVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM.*, Morelia, Michoacán, 2020, pág. 6.

[24] G. Delgado, S. Galván, F. Domínguez-Mota, J. C. García, and E. Valencia. “Reconstruction methodology of a Francis runner blade using numerical tools”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 1237-1247, pág. 10, 2020.

[25] C.F.E, (2024), LAPEM, [online], Disponible: <https://www.cfe.mx/unidadesdenegocio/lapem/pages/default.aspx>.

[26] L. D. Martínez Hernández, S. R. Galván González, G. Delgado Sánchez., “Metodología de reconstrucción en una geometría fracturada de un impulsor centrífugo mediante ingeniería inversa.”, trabajo fin master, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, U.M.S.N.H., Morelia, Michoacán, 2023.

[27] G. Delgado Sánchez, S. R. Galván González, F. J. Domínguez Mota. “Metodología para la reconstrucción de un rodete tipo Francis con la utilización de herramientas numéricas.”, tesis doctoral, Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica, U.M.S.N.H., Morelia, Michoacán, Julio, 2021.

[28] M. G. Gama Guzmán, G. Delgado Sánchez, S.R. Galván González, “Definición de los parámetros de forma geométrica de los álabes del rodete de la turbina Francis 99”, trabajo fin master, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, U.M.S.N.H., Morelia, Michoacán, 2024.

[29] E. Göde, Performance upgrading of hydraulic machinery with the help of CFD, 100 Volumes of 'Notes on Numerical Fluid Mechanics', 299-310, (2009).

[30] G. Delgado Sánchez, S. R. Galván González, F.J. Domínguez Mota, “Metodología para la reconstrucción de un rodete tipo Francis con la utilización de herramientas numéricas” tesis doctoral, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, U.M.S.N.H., Morelia, Michoacán, 2021.

[31] S. Quinghua, Rehabilitation of a low head Francis turbine by runner replacement, 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Design Methods Turbines, Stockholm Sweden, (2004).

[32] L. F. López, Surface parameterization and optimum design methodology for hydraulic turbines, Doctoral dissertation, (2006)

[33] E. Flores, L. Bornard, L. Tomas, J. Liu, and M. Couston, Design of large Francis turbine using optimal methods, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol.15 (No.2), 022023, (2012).

[34] Cateni A., Magri L., and Grego G., Optimization of Hydro Power Plants Performance Importance of Rehabilitation and Maintenance in Particular for the Runner Profiles, 7th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements, Milan, Italia, (2008).

[35] J. Liu, J. Zhao, X. Yang, J. Liu, X Qu, and X. Wang, A reconstruction algorithm for blade surface based on less measured points, International Journal of Aerospace Engineering, Vol. 2015, (2015).

[36] M. Ristic, D. Brujic and I. Ainsworth, Measurement-based updating of turbine blade CAD models: a case study, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol.17, (No. 4), 352-363, (2004).

[37] E. Quispe Ccapacca, A. Paz Valderrama, "Algoritmos para la generación de mallas cuadrilaterales por descomposición jerárquica de dominio", para título profesional de ingeniero en sistemas, Facultad de Ingeniería de Procesos de Sistemas, U.N.S.A. A., Arequipa, Perú, 2018.

[38] H. Paz Portilla, J.C. Serrano Rico, "Diseño y simulación de pico turbina hidráulica mediante CAD y CAE, dirigida a zonas no interconectadas", para título profesional de ingeniero mecánico, Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial., U.P., Pamplona, 2021.

[39] Liang-Chia Chen and Grier CI Lin. Reverse engineering in the design of turbine blades-a case study in applying the mamdp. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 16(2-3):161-167, 2000.

[40] Jian Gao, Xin Chen, Detao Zheng, Oguzhan Yilmaz, and Nabil Gindy. Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application. Advances in Engineering Software, 37(9):592-600, 2006.

[41] Chen Hua She and Chun Chi Chang. Study of applying reverse engineering to turbine blade manufacture. Journal of Mechanical Science and Technology, 21:1580-1584, 2007

[42] Linda M Wills and Philip Newcomb. Reverse engineering. Springer Science & Business Media, 2007.

[43] Yongqing Li, Xiaoping Huang, Chunhe Gong, and Kelvin Wang. An engineering rules-based parameterization approach for turbine blade reverse engineering. In Geometric Modeling and Processing, 2004. Proceedings, pages 311-318. IEEE, 2004.

NOMBRE DEL TRABAJO

Reconstrucción analítica del rodete de la
turbina Francis de la U-4 de la PCH de TI
RIO, MICHOACÁN (1

AUTOR

Fernando Salgado Delgado

RECuento DE PALABRAS

16880 Words

RECuento DE CARACTERES

95480 Characters

RECuento DE PÁGINAS

101 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

7.9MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 3, 2024 8:20 AM CST

FECHA DEL INFORME

Sep 3, 2024 8:21 AM CST

● 22% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 21% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 7% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

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	RECONSTRUCCIÓN ANALÍTICA DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS DE LA U-4 DE LA PCH DE TIRIO, MICHOACÁN.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Ing. Fernando Salgado Delgado	1548104f@umich.mx
Director	Dr. Sergio Ricardo Galván González	giovanni.delgado@umich.mx
Codirector	Dr. Giovanni Delgado Sánchez	sergio.galvan@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	Si	Formato IEES.
Generación de contenido multimedia	No	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Fernando Salgado Delgado. 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 28 de agosto del 2024.