



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MANUFACTURA DE IMPULSOR SEMIABIERTO DE
COMPRESOR CENTRIFUGO CON LA APLICACIÓN
DE HERRAMIENTAS NUMÉRICAS

TESIS

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

PRESENTA:

Ing. Luis David Martínez Hernández

ASESORES:

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

Dr. Giovanni Delgado Sanchez
Doctorado en Ciencias (Mecánica)



Morelia, Michoacán, octubre del 2023

Dedicatoria y Agradecimientos

Gracias a Dios, sin su ayuda, nada de esto sería posible. Agradezco Su misericordia hacia mí y la oportunidad de vivir en una época en la que los retos en la ingeniería abundan.

Quiero agradecer a mi madre, Adela Hernández Romay, por su amor incondicional y su apoyo a lo largo de este trabajo. Que Dios nos conceda muchos años de vida para poder disfrutar de su bendición.

De igual manera, quiero agradecer a mi compañera, Claudia Lizeht Pedroza Álvarez, quien me ha acompañado en los últimos años de mi vida. Que Dios nos conceda más años juntos de la misma manera.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Definición del problema	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Justificación	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivos	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
2. Ingeniería inversa	9
2.1. Diferencia entre ingeniería inversa y diseño	10
2.2. Etapas de la ingeniería inversa	10
2.2.1. Análisis físico y de la documentación	11
2.2.2. Digitalización y adquisición de datos	12
2.2.3. Herramientas numéricas	13
2.2.4. Creación de modelo CAD	15
2.2.5. Prototipado	16
3. El impulsor del compresor centrifugo	18
3.1. Historia general de los impulsores centrífugos	18
3.2. Compresores centrífugos	20
3.3. Tipos de impulsores centrífugos	21
3.3.1. Impulsor abierto-succión al frente de flujo radial	22
3.3.2. Impulsor semicerrado succión al frente de flujo radial	22
3.3.3. Impulsor cerrado succión al frente de flujo radial	23
3.3.4. Impulsor de flujo axial	23
3.4. Funcionamiento del impulsor centrifugo en turbocompresores	24
3.5. Álabes del impulsor	27
4. Metodología para la reconstrucción de álabe principal	30
4.1. Impulsor semiabierto centrifugo fracturado	32
4.2. Limpieza de geometría	33
4.2.1. Optimización de geometría	33
4.3. Selección de datos relevantes	34

4.3.1.	Discretización	34
4.3.2.	Extracción de datos discretos	35
4.3.3.	Discriminación de datos discretos	36
4.4.	Extrapolación de marco del álabe	37
4.5.	Generación de superficie media del álabe	38
4.6.	Generación de superficie del álabe	40
4.6.1.	Extracción de perfil del álabe	40
4.6.2.	Proyección ortogonal en superficie media del álabe	42
4.7.	Modelado de álabe divisor	43
5.	Análisis de resultados	46
5.1.	Análisis de resultados de álabe principal	46
5.1.1.	Análisis de sensibilidad	47
5.2.	Análisis de resultados de álabe divisor	48
5.2.1.	Análisis de malla del álabe divisor	48
5.3.	Analisis de resultados del impulsor	50
5.4.	Prototipado rápido	51
5.4.1.	Preparación del modelo	51
5.4.2.	Configuración del setup de la impresora	52
5.4.3.	Impresión 3D	52
5.5.	Resultados del prototipado rápido	53
6.	Conclusiones	55

Índice de figuras

1.1. Daños en cuerpo de álabe ocasionados por operación [5].	2
1.2. Impulsor con álabes dañados en operación como objeto de estudio	3
1.3. Obtención de modelo computacional mediante la extensión de las superficies fracturadas del álabe [8]	4
1.4. Proceso de reconstrucción del alabe de una turbina [9]	5
1.5. Obtención del álabe reconstruido partiendo de un álabe real sin parámetros [1]	6
2.1. Proceso de la ingeniería inversa, desde el modelo físico hasta el modelo computacional [10]	10
2.2. Nube de puntos de un álabe [15]	12
2.3. Discretización para la adquisición de datos [16]	13
2.4. Relación entre el Plano Lógico y el Plano Físico [17]	14
2.5. Obtención de modelo computacional mediante ingeniería inversa [19]	15
2.6. Prototipado rápido [10]	17
3.1. Representación del primer impulsor centrifugado registrado en la historia (Imagen generada mediante Dall-E)	19
3.2. Bomba centrifuga inventada por Denis Papin [23]	19
3.3. Crystal Palace donde se presentaron distintos modelos de impulsores centrifugos [24]	20
3.4. Representación de un impulsor centrifugo [27]	21
3.5. Impulsor de diseño abierto [28]	22
3.6. Impulsor semicerrado de flujo radial [29]	22
3.7. Impulsor de diseño cerrado [30]	23
3.8. Impulsor de diseño de flujo axial [31]	23
3.9. Corte transversal de un turbocompresor multipasos [26]	24
3.10. Impulsor centrifugo y la relación física con los fluidos [34]	25
3.11. Diagrama de velocidades en los álabes de un impulsor [33]	26
3.12. Borde inferior de un álabe	27
3.13. Borde superior de un álabe	28
3.14. Borde de ataque de un álabe	28
3.15. Lado succión de un álabe	28
3.16. Lado presión de un álabe	29
4.1. Algoritmo de reconstrucción de la superficie del álabe del impulsor centrifugo	31
4.2. Impulsor real y modelo computacional del impulsor tras ser escaneado	32
4.3. Limpieza geométrica del impulsor	33

4.4.	Corrección de errores de escaneo	34
4.5.	Discretización de los bordes del álabe	35
4.6.	Sentido de extracción de datos y los nombres de los sentidos logicos del álabe	36
4.7.	Representación de los datos discretos que describen las fronteras del álabe	37
4.8.	Selección de datos que se encuentran antes de la fractura.	37
4.9.	Extrapolación del marco fracturado	38
4.10.	Algoritmo para generar malla [1]	39
4.11.	Esqueleto de 100×100	40
4.12.	Sección completa sin fractura	40
4.13.	Perfil inferior del álabe	41
4.14.	Datos discretos del perfil inferior	41
4.15.	Perfil analítico inferior del álabe	42
4.16.	Algoritmo de montaje de perfil [1]	42
4.17.	Reconstrucción de las superficies del álabe del impulsor centrifugo con una densidad de mallado de 1000×1000 nodos.	43
4.18.	Álabe divisor y sus características	44
4.19.	Altura B del álabe reconstruido	44
4.20.	Comparación de la altura B entre ambos álabes	45
4.21.	Álabe divisor reconstruido	45
5.1.	Reconstrucción de álabe principal mediante herramientas numéricas	46
5.2.	Superficie media fracturada	47
5.3.	Vista inferior del álabe en malla con ruido	47
5.4.	Álabe reconstruido con ruido	48
5.5.	Reconstrucción de álabe principal mediante herramientas numéricas	48
5.6.	Superficie media generada sin extrapolación de marco	49
5.7.	Perfil extraído del álabe divisor	49
5.8.	Álabe divisor lado inferior	50
5.9.	Impulsor reconstruido	50
5.10.	Comparación entre el impulsor fracturado y el impulsor reconstruido	51
5.11.	Preparación del modelo	52
5.12.	Fases de la manufactura aditiva.	53
5.13.	Impulsor reconstruido	54

Índice de tablas

3.1. Partes principales de un turbocompresor centrifugo	25
4.1. Nombre de las fronteras del modelo computacional y la cantidad de datos extraídos	36
5.1. Configuración del Set Up de impresión	52

RESUMEN

Las fracturas en los álabes de turbomáquinas son comunes debido a las condiciones extremas de operación, lo que puede provocar problemas como la desalineación y, por ende, paros de emergencia. La reconstrucción de los álabes fracturados es una alternativa a la compra de un impulsor nuevo. La falta de empresas mexicanas dedicadas a la generación de tecnología o manufactura de turbomáquinas limita el conocimiento sobre la construcción y reparación de estas máquinas. En este trabajo se propone una metodología donde se adaptan los algoritmos y subalgoritmos propuestos por Delgado Sánchez [1] para la reconstrucción de los álabes de un impulsor centrífugo semiabierto que presenta fracturas entre el borde superior e inferior. El trabajo se basa en la ingeniería inversa y 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 el álabe fracturado y completar la geometría faltante.

PALABRAS CLAVE: ÁLABE, FRACTURA, EXTRAPOLACIÓN, RECONSTRUCCIÓN, INGENIERÍA INVERSA.

ABSTRACT

Fractures in turbomachinery blades are common due to extreme operating conditions, which can lead to problems such as misalignment and thus to emergency shutdowns. The reconstruction of fractured blades is an alternative to the purchase of a new impeller. The lack of Mexican companies dedicated to the generation of technology or manufacture of turbomachines limits the knowledge about the construction and repair of these machines. In this work a methodology is proposed where the algorithms and subalgorithms proposed by Delgado Sanchez [1] are adapted for the reconstruction of the blades of a semi-open centrifugal impeller that presents fractures between the upper and lower edge. The work is based on reverse engineering and involves simplification of the scanned geometry, surface discretization, data extraction and application of numerical tools such as transfinite interpolation and extrapolation to reconstruct the fractured blade and complete the missing geometry.

Capítulo 1

Introducción

México es uno de los principales países industrializados de América Latina y el Caribe, aun así, no existen suficientes empresas mexicanas dedicadas a la fabricación y generación de tecnología para turbomáquinas. Esto genera una serie de carencias que se reflejan en la industria mexicana [2].

Para cumplir con esta demanda, resulta inevitable adquirir turbomáquinas en el extranjero, lo que implica un aumento en los costos de mantenimiento.

Es común en la industria mexicana que, durante un paro de emergencia, una de las razones por las que este se prolonga es la escasez de expertos nacionales familiarizados con los nuevos métodos de reparación de turbomáquinas.

Ante la falta de estos, se recurre al servicio técnico del fabricante, que en su mayoría son extranjeros, esta situación genera un sobre costo y demora en el proceso de reparación. Estas carencias se ven más o menos dependiendo del equipo industrial, pero donde es más notable es en los turbocompresores [3].

Debido a que los turbocompresores son ampliamente reconocidos como el componente central de numerosos procesos, es necesario que funcionen de manera continua, a excepción de los períodos de mantenimiento programados. Por esto se le considera un equipo crítico, el cual es monitoreado constantemente. Una de las fallas que conlleva múltiples problemas en la operación normal del turbocompresor son las que se relacionan con el impulsor, esto puede ser cuando existen fracturas, deformaciones, abolladuras, picaduras, erosiones en el cuerpo del impulsor [4].

En la Figura 1.1 se muestran los álabes de una turbina que sufrieron daño en operación, como se mencionó anteriormente, está es una de las fallas más comunes en equipos rotativos.



Figura 1.1. Daños en cuerpo de álabe ocasionados por operación [5].

Cuando esto sucede, es necesario el paro de emergencia del equipo y realizar la reparación. Por esto mismo, múltiples técnicos, ingenieros e investigadores han puesto manos a la obra. Una metodología muy usada en la industria mexicana es tratar de recrear la geometría del impulsor de manera artesanal, lo cual se logra con base en la aplicación de aporte de soldadura, completando la superficie soldando placas del mismo material del cuerpo del impulsor y rectificando la superficie con herramientas de desbaste. Con esto se obtienen resultados regulares con costos económicos muy bajos. Sin embargo, al ser una reparación a un cuerpo con geometría muy compleja, no se pueden reparar con los parámetros geométricos requeridos de fábrica para un desempeño óptimo. Esto a la larga genera problemas de desalineación, vibraciones fuera de rango, puntos calientes y, por ende, se acorta la vida útil del equipo, reduciendo también los ciclos entre mantenimiento [6].

Otra alternativa es apelar al servicio técnico del equipo. Como se observó, los impulsores al ser de importación, los tiempos de procura y asistencia son largos, y al tener dependencia directa del dictamen del fabricante, el usuario está obligado a aceptar los costos, que por lo general son muy altos.

La tercera alternativa, se relaciona con metodologías alternativas con fundamentos matemáticos y científicos que han surgido gracias a nuevos enfoques para abordar estos problemas. Una de ellas es la ingeniería inversa. Esta metodología, como lo dice el nombre, consiste en simplificar el complejo modelo del álabe y reducirlo a una serie de curvas y líneas fácil de manipular. Esto se logra partiendo con el escaneo del impulsor para obtener el modelo digital. El escaneo del impulsor genera una nube de puntos que representa la geometría del impulsor. Esta nube de puntos se procesa para obtener un archivo de Diseño Asistido por Computadora (CAD) o de Manufactura Asistida por Computadora (CAM).

Este archivo contiene las superficies que representan la geometría completa del impulsor. Después de limpiar y discretizar estas superficies, así como extraer los datos, se obtiene un conjunto discreto de datos que representan las líneas medias de los bordes del álabe. Estos

datos discretos facilitan la aplicación de herramientas numéricas. En este caso la aplicación de la Interpolación Transfinita (TFI) y la Extrapolación permiten reconstruir la geometría faltante del álabe y como resultado poder manufacturar un nuevo impulsor con los álabes reconstruidos y sustituirlo por el impulsor fracturado [7].

1.1. Definición del problema

El impulsor es considerado el corazón del turbocompresor. Normalmente, el impulsor está sometido a variables extremas de operación, así como a una operación continua. Esto provoca que los álabes, donde se produce la transferencia de cantidad de movimiento, sufran daños como desgaste, fracturas y, por ende, pérdida de material.

En la Figura 1.2 se muestra el impulsor objeto de estudio, donde se puede observar que todos los álabes presentan fracturas con la misma característica.

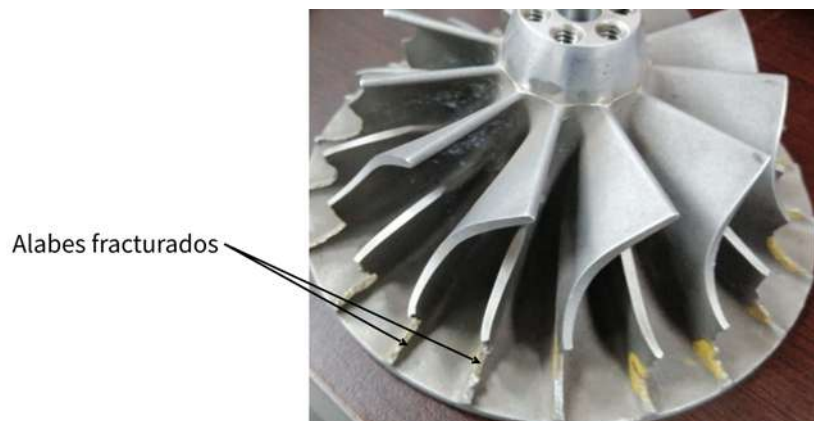


Figura 1.2. Impulsor con álabes dañados en operación como objeto de estudio

El impulsor que se estudia en este trabajo pertenece a un turbocompresor con servicio de aire y todos sus álabes están fracturados en el borde de salida.

Es importante destacar que no se cuenta con documentación del impulsor. Se desconocen los parámetros geométricos y de operación, y además se han extraviado los restos fracturados del álabe. Esta última condición impide conocer cuál era la forma original del álabe. Las partes que se conservan muestran la complejidad geométrica del álabe.

1.2. Antecedentes

El álabe es el elemento principal de la turbomáquina, y en algunos casos presenta geometrías complejas que resultan difíciles de modelar si no se cuentan con los parámetros de construcción. La reconstrucción de álabes es un campo de investigación en sí mismo, con metodologías basadas en herramientas numéricas e ingeniería inversa.

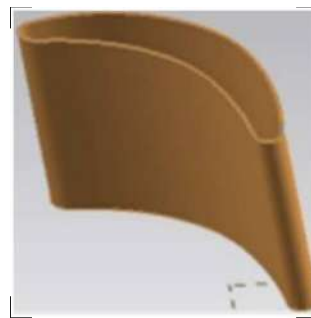
En los antecedentes de este trabajo, se recapitularán las metodologías que involucran herramientas numéricas más importantes para la reconstrucción y reparación de álabes. Es importante realizar esta recopilación, ya que, al comprender los avances en este campo, se podrá valorar objetivamente la contribución del presente trabajo.

En el artículo "Geometric model reconstruction through a surface extension algorithm for remanufacturing of twist blades"[8] presenta un algoritmo de extensión de superficie para la reconstrucción de modelos geométricos de aspas de torsión, que puede ser útil en la manufacturación de piezas.

El algoritmo de extensión de superficie se basa en la extracción de características de la superficie de la pieza original y la generación de una superficie extendida a partir de estas características. Los alcances de este artículo son que presenta un algoritmo útil en la manufacturación de piezas y una metodología que utiliza la simulación numérica para validar los resultados de la regeneración del álabe como se muestra en Figura 1.3.



(a) Álabe físico fracturado



(b) Álabe reconstruido mediante la extensión de las superficies completas

Figura 1.3. Obtención de modelo computacional mediante la extensión de las superficies fracturadas del álabe [8]

Las limitaciones de este artículo son que el estudio se enfoca en la manufacturación de álabes con una torsión de su geometría y no se evalúa la aplicabilidad del algoritmo de extensión de superficie en otros tipos de piezas.

En el artículo "Damaged turbine blade model reconstruction strategy based on cross-sectional curves registration"[9]. Se ha propuesto una estrategia integral basada en el registro de curvas de sección transversal (CSC) para la reconstrucción precisa de los álabes dañados.

La metodología propuesta consta de varios pasos clave, como se muestra en la Figura 1.4.

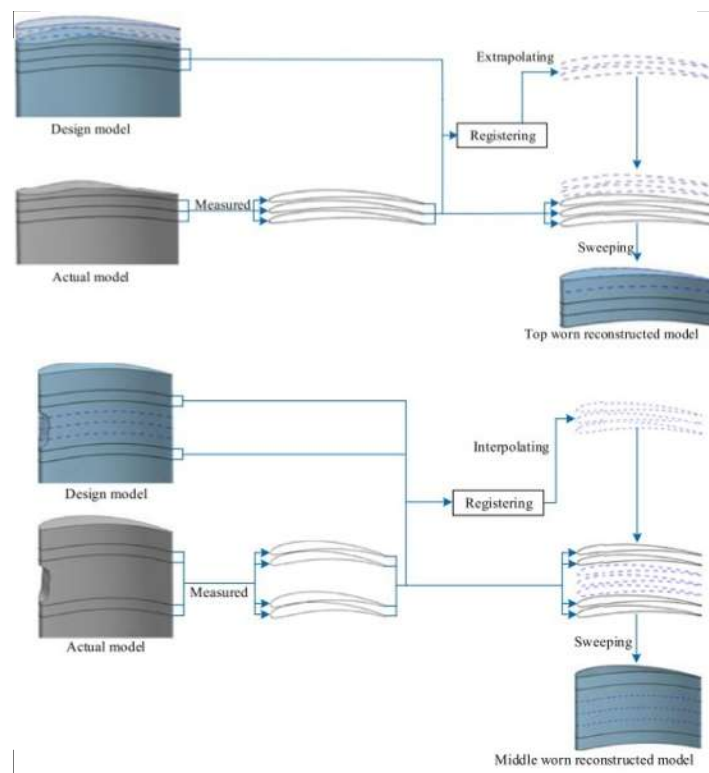


Figura 1.4. Proceso de reconstrucción del álabe de una turbina [9]

En primer lugar, se confirman los datos de los álabes en la máquina, lo que implica obtener los puntos medidos del modelo del álabe y convertirlos al sistema de coordenadas de la máquina. Luego, se procede a medir el cuerpo del álabe utilizando una máquina de medición por coordenadas o un dispositivo de inspección visual. Los datos recopilados de la superficie del álabe se utilizan en conjunto con técnicas de ingeniería inversa para construir la superficie media del álabe dañado.

Posteriormente, se extraen las curvas de sección transversal (CSC) no dañadas a partir de los datos medidos. Esto se logra mediante la generación de un conjunto de planos paralelos que permiten seccionar el cuerpo del álabe. Sin embargo, es posible que las CSC en el área dañada estén incompletas y no sean adecuadas para el registro, por lo que se pueden omitir aquellas que crucen dicha área.

Luego, se procede a calcular la transformación rígida y de deformación entre pares de CSC. Este paso es crucial para reconstruir el álabe con alta precisión, ya que la distorsión del cuerpo del álabe implica una transformación rígida de las CSC, que incluye traslación y rotación. Asimismo, la expansión o contracción provoca un desplazamiento en el par de CSC.

Finalmente, como precisión se reconstruye el modelo extrapolando o interpolando las CSC no dañadas de la pala actual cerca del área dañada. Se crea una superficie del álabe reconstruido mediante la barrida de las CSC medidas, siendo esta superficie la mejor aproximación para reconstruir el modelo del álabe dañado.

En el artículo "Reconstruction methodology of a Francis runner blade using numerical tools"[1] se enfoca en la reconstrucción de álabes de turbinas hidráulicas, con énfasis en los álabes del tipo Francis. La metodología se divide en tres pasos principales: Extracción, Reconstrucción y Evaluación, y ofrece una solución integral para recuperar modelos CAD originales de álabes dañados o desgastados. Es decir, con la obtención de un mínimo número de datos discretos, se puede generar una nube de datos ordenados de tal manera que represente la geometría del alabe., como se muestra en la Figura 1.5.

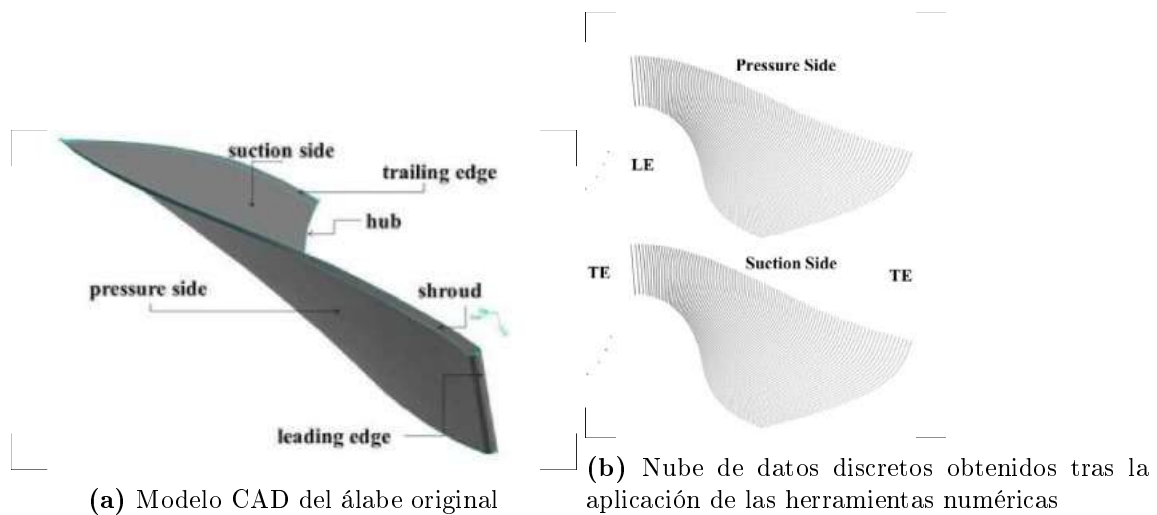


Figura 1.5. Obtención del álabe reconstruido partiendo de un álabe real sin parámetros [1]

En la etapa de Extracción, se diseñaron algoritmos especializados que permiten extraer las características principales de los álabes. Estos algoritmos utilizan técnicas avanzadas de generación de mallas numéricas y corte de superficies para obtener los datos necesarios para el proceso de reconstrucción.

La etapa de Reconstrucción propone una metodología numérica en 3D para reconstruir la geometría del álabe. Lo destacado de esta metodología es su independencia de los parámetros de diseño, lo que permite una definición continua y suave de la superficie de la pala. Esta característica contribuye a una reconstrucción más realista y completa de los álabes dañados o desgastados.

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

En cuanto a los alcances del artículo, se destaca que la metodología propuesta se enfoca en

la reconstrucción numérica de las geometrías complejas de los álabes del rodete Francis, consideradas superficies de forma libre. La metodología se distingue por su capacidad de lograr una definición continua y suave de la superficie del álabe, independiente de los parámetros de diseño. Asimismo, se ha demostrado que la metodología puede ser utilizada exitosamente para recuperar las características de forma de cuchillas dañadas o desgastadas, incluso en ausencia de un modelo CAD original.

No obstante, es importante considerar ciertas limitaciones de la metodología propuesta. En primer lugar, se requiere una cantidad significativa de datos discretos para lograr una definición continua y suave de la superficie de la pala, lo cual puede representar un desafío en ciertos casos.

En resumen, la reparación de álabes es un tema de importancia en la industria, y las metodologías para solucionarlo han evolucionado a través del tiempo gracias a los avances en software y hardware. Las técnicas de ingeniería inversa y las herramientas numéricas han permitido la reconstrucción y rediseño de geometrías con alta confiabilidad, alcanzando la calidad ofrecida por las empresas que venden la tecnología. Al presentar los antecedentes de este campo de investigación se espera que el lector pueda comprender la relevancia de este trabajo para el futuro de la industria.

1.3. Justificación

El impulsor que se estudia, como se explicó en la definición del problema, es irreparable mediante técnicas tradicionales debido a las características de la fractura. Es importante destacar que no se cuenta con planos constructivos ni datos de operación que puedan proporcionar indicios sobre la configuración geométrica original del álabe. Además, las partes desprendidas del borde de salida del impulsor están extraviadas.

Una justificación adicional para esta investigación es que se basa en una adaptación del trabajo titulado "Metodología para la reconstrucción de un rodete tipo Francis con la utilización de herramientas numéricas"[1]. En ese estudio, se logró reconstruir una geometría "limpia" del rodete y se obtuvo un archivo CAD que permite fabricar el modelo reconstruido utilizando tecnología CNC o mediante fundición. Sin embargo, en el presente trabajo, se utilizará una geometría "sucia", obtenida mediante escaneo digital. Esta diferencia marca un avance significativo en la línea de investigación, ya que se trabajará con un impulsor que presenta daños generados en condiciones reales. Esto brinda la oportunidad de considerar la metodología presentada en este trabajo como una alternativa viable que puede aplicarse al campo de la reparación de turbomáquinas.

1.4. Hipótesis

La aplicación de herramientas numéricas en la reconstrucción de geometrías complicadas, como los álabes de impulsores, permite la reconstrucción efectiva de la geometría faltante en álabes fracturados y desgastados causados por daños de operación.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Manufacturar un impulsor semiabierto de compresor centrifugo con la aplicación de herramientas numéricas

1.5.2. Objetivos específicos

- Limpiar la geometría del impulsor obtenido mediante ingeniería inversa.
- Reconstruir álabe fracturado del impulsor centrifugo.
- Construir modelo del impulsor centrifugo.
- Manufacturar por técnica aditiva.

Capítulo 2

Ingeniería inversa

La ingeniería inversa comienza con un producto o proceso terminado y trabaja hacia atrás de manera lógica para descubrir la tecnología subyacente. Esto indica que la ingeniería inversa se centra en el proceso y el análisis de la reinención en contraste con la creación y la innovación, que juegan un papel más destacado en la invención. Entonces, la ingeniería inversa es un proceso para descubrir cómo se produce una pieza y no para explicar por qué motivo está diseñada de esa manera.

Partiendo de lo anterior, podemos decir que la ingeniería inversa es una técnica que consiste en ir hacia atrás. Para la creación de un producto o proyecto, el sentido común dicta comenzar por el principio, pero la ingeniería inversa nos sugiere invertir el proceso de creación mediante un sistema que nos permite obtener información sobre su funcionamiento o estructura. Es como preparar una receta de cocina al revés, partiendo del plato final para descubrir los ingredientes que contiene [10].

Conocer esta información en un objeto que fue diseñado mediante los principios físicos que la ingeniería requiere permite obtener información importante. Esta información ayuda a determinar cómo fue construido, las leyes físicas que lo rigen. Esto es útil ya que otorga la posibilidad de mejorar el funcionamiento del objeto de estudio o desarrollar soluciones para problemas muy complejos.

La ingeniería inversa es multidisciplinaria y tiene aplicación en distintos campos, como la recuperación de información de imágenes y señales, la identificación de modelos de sistemas dinámicos y la de procesos y resolución inversa de problemas.

El proceso de la ingeniería inversa comienza con la recolección de datos y la formulación de distintos modelos matemáticos que describan el sistema. A partir de ahí, se utilizan los modelos matemáticos con un enfoque iterativo para ajustar los parámetros del modelo hasta encontrar una solución satisfactoria. Esto requiere una combinación de habilidades técnicas y creativas para desarrollar soluciones efectivas a problemas complejos. Es necesario aclarar que en este capítulo se abordará la ingeniería inversa enfocada en el impulsor dañado [11].

2.1. Diferencia entre ingeniería inversa y diseño

Existe una confusión en los resultados que se obtienen del diseño y la ingeniería inversa. Ya que la finalidad de ambos es obtener un producto o una solución a ciertos problemas. Es importante entender que el diseño y la ingeniería inversa son dos disciplinas complementarias que se utilizan en diferentes etapas del proceso de desarrollo de un producto o sistema.

El diseño es el proceso de creación y planificación de un producto o sistema con el objetivo de cumplir con los requisitos y expectativas del cliente. En resumen, el diseño se enfoca en definir las características y especificaciones del producto, también en desarrollar un plan de producción y crear un prototipo o modelo que resuelva las necesidades del cliente. Por otro lado, la ingeniería inversa es una técnica que se utiliza para reconstruir un producto o sistema existente. Se enfoca en comprender cómo funciona un producto y cómo puede mejorarse o desarrollar un producto similar a uno ya existente [12].

Cuando la información no existe o no está disponible debido a que la información de diseño está restringida o se trata de un producto discontinuado, es cuando la ingeniería inversa toma mayor protagonismo. Es el caso de las partes que componen las turbomáquinas, ya que se consideran secretos industriales. A menudo, el diseño y la ingeniería inversa se utilizan juntos en diferentes etapas del proceso de desarrollo [13].

2.2. Etapas de la ingeniería inversa

En la Figura 2.1 se observa el proceso de la ingeniería inversa, partiendo desde el objeto real hasta llegar modelo computacional.

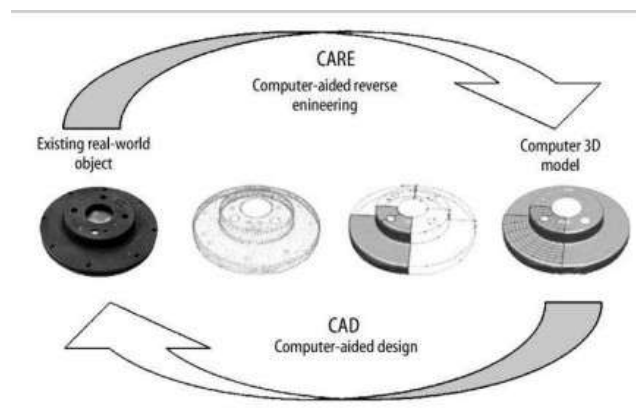


Figura 2.1. Proceso de la ingeniería inversa, desde el modelo físico hasta el modelo computacional [10]

Para llevar a cabo el proceso de la ingeniería inversa se enuncian las principales etapas:

1. Análisis físico y de la documentación: Consiste en la inspección visual y dimensional del impulsor existente para identificar su geometría y el estado de esta además la revisión de documentación técnica relacionada con el objeto de estudio, esto incluye dibujos técnicos y diagramas de operación.
2. Adquisición de datos: Se recolecta información geométrica y dimensional del objeto de estudio.
3. Modelado y representación: Se crea un modelo virtual utilizando la información recopilada
4. Reconstrucción y modelado: Se recrean las partes necesarias de la geometría original del impulsor, utilizando el modelo virtual y las técnicas matemáticas adecuada.
5. Verificación y prueba: Se verifica la precisión y calidad de la recreación de las partes faltantes de la geometría.
6. Creación modelo CAD

Estás etapas son importantes para reconstruir un impulsor con técnicas de ingeniería inversa y puede variar.

2.2.1. Análisis físico y de la documentación

En este subtema, se busca establecer una etapa que generalmente no se considera en la aplicación de la técnica de ingeniería inversa: la inspección física y la revisión exhaustiva de la documentación del objeto de estudio. La omisión de esta etapa no se debe al descuido de los expertos en el campo, sino más bien al avance que ha experimentado esta técnica. En sus inicios, la ingeniería inversa se utilizaba principalmente para replicar productos terminados. Sin embargo, en la actualidad, como se muestra en este trabajo, también se emplea como método para obtener modelos CAD inexistentes o extraviados, lo que permite realizar análisis y manufactura de modelos discontinuados o restringidos.

El análisis físico y la revisión exhaustiva de la documentación son fundamentales ya que ayudan a comprender la situación actual y proporcionan una base sólida para la ingeniería inversa. En este caso, el objetivo es comprender el funcionamiento, la estructura y los componentes de cada una de las palas que componen el impulsor. Esto permite obtener un producto de ingeniería inversa con características funcionales y orientadas a su construcción y uso en la vida real.

La inspección visual o el análisis físico, en conjunto con el análisis de la documentación, nos permite observar dos fases del objeto: las ideas teóricas del diseñador y lo que realmente se logró en la fabricación. En resumen, se pueden detectar las vulnerabilidades del diseño y comparar la exactitud y fiabilidad de la información proporcionada. Además, esto permite identificar algunos vestigios de la técnica de manufactura utilizada, lo cual es fundamental para garantizar una ingeniería inversa precisa y efectiva [14].

2.2.2. Digitalización y adquisición de datos

En la industria la mayoría de los objetos fabricados son diseñados utilizando software de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Debido a que a veces el modelo digital no existe, está extraviado o puede ser tan antiguo que nunca existió el modelo CAD. Una alternativa para esto es digitalizar la pieza de interés para posteriormente obtener una serie de datos discretos que representan la geometría escaneada.

Los dispositivos de digitalización o escaneo permiten obtener una multitud de puntos que están descritos mediante coordenadas cartesianas (x, y, z) y representan la geometría del objeto escaneado. Cada coordenada representa un dato discreto y el conjunto de datos discretos a través de la superficie discreta de la geometría se le conoce como nube de puntos.

En la Figura 2.2 se aprecia la nube de puntos que describe un álabe. Se aprecia que la nube de puntos obtenida representa el volumen de la geometría escaneada pero no delimita con precisión las fronteras del mismo, por este motivo es importante procesar la nube de datos para generar una serie de polígonos que ofrezcan datos con mayor precisión.

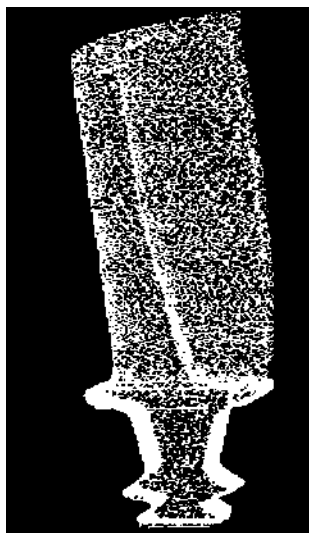


Figura 2.2. Nube de puntos de un álabe [15]

Tras simplificar la nube de puntos, se puede comenzar con la adquisición de datos como se observa en la Figura 2.3

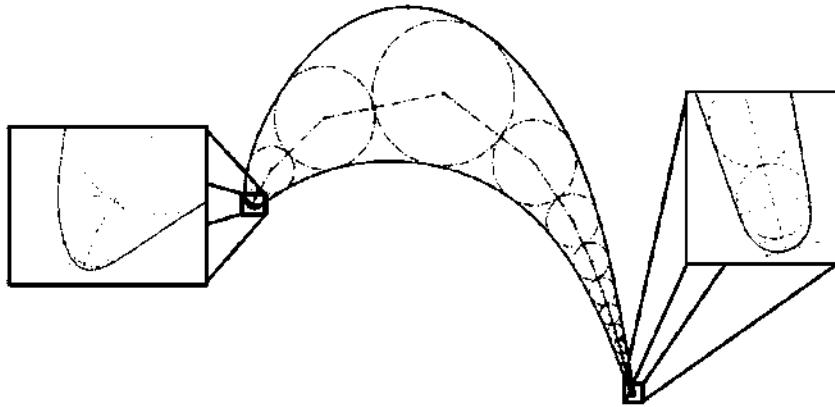


Figura 2.3. Discretización para la adquisición de datos [16]

La adquisición de datos permite obtener información detallada sobre la geometría discretizada, esto es esencial para obtener la información requerida para utilizarla según lo requiera el experto. Los datos adquiridos pueden ser procesados mediante herramientas numéricas y algorítmicos.

2.2.3. Herramientas numéricas

Uno de los pasos más importantes de la ingeniería inversa es el procesamiento de la información obtenida. Los resultados permiten el análisis y modificación en un entorno digital. Esto es útil porque permite generar superficies reconstruidas mediante equipos de computación [14].

La elección de la herramienta numérica requiere de un conocimiento profundo de su funcionamiento y de la necesidad que se busca suplir. Por ende, no hay una herramienta numérica única para la ingeniería inversa. Para este trabajo se explica el uso de la interpolación transfinita ya que fue la principal herramienta numerica utilizada.

Tras extraer los datos, se obtienen las líneas medias que funcionan como fronteras del mapeado generado por la Interpolación Transfinita (TFI). La malla generada por el mapeo es un esqueleto que describe el desarrollo del ábalo y orienta el montaje del perfil deseado, logrando la generación de las superficies del ábalo. La reconstrucción de álabes con interpolación transfinita es una técnica utilizada en la industria aeronáutica y de turbinas de gas para mejorar la eficiencia y el rendimiento de las turbinas. La técnica de interpolación transfinita se utiliza para reconstruir la forma de los álabes de la turbina mediante la interpolación de la forma de los álabes en puntos discretos [1].

El uso de la interpolación transfinita permite la reconstrucción de una función desconocida a partir de un conjunto de datos dispersos en varias direcciones en un espacio multidimensional. Esta técnica es útil para reconstruir funciones complejas en áreas de alta dimensionalidad. El objetivo es que, dado un conjunto de datos dispersos en varias direcciones en el espacio

multidimensional, se puede determinar la forma de la función desconocida en todo el espacio multidimensional utilizando la información disponible en todas las direcciones.

La TFI es un método eficaz para mallar muchas regiones bidimensionales sin complicaciones. Aunque puede ser aplicado de diversas formas, una técnica común consiste en dividir la región física en secciones separadas, cada una con su propia malla, y luego unir las interfaces. Sin embargo, esta estrategia puede generar problemas de discontinuidad en las pendientes en las interfaces. Para solucionar este inconveniente y lograr una uniformidad en las pendientes, se puede utilizar la TFI de polinomios de mayor orden combinados como funciones.

En la Figura 2.4 se muestra la relación de los sentidos lógicos y físicos de la malla generada para asegurar que los límites de la malla se unan. Es necesario hacer que coincidan los dos límites en un mismo vértice dentro del plano computacional. Relacionando el lado izquierdo del plano lógico con el vértice A y el vértice B.

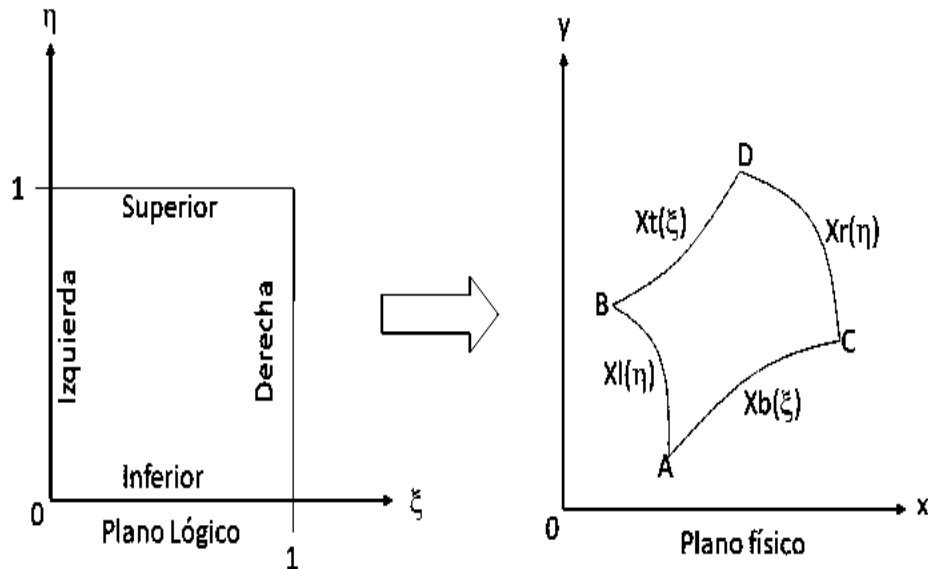


Figura 2.4. Relación entre el Plano Lógico y el Plano Físico [17]

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

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

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

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

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

Para realizar el mapeo y obtener la malla se utilizan las Ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 de la

Interpolación Transfinita (TFI) [17].

$$x(\xi, \eta) = (1 - \xi)x_l(\eta) + \xi x_r(\eta) + (1 - \eta)x_b(\xi) + \eta x_t(\xi) - (1 - \xi)(1 - \eta)x_b(0) - (1 - \xi)\eta x_t(0) - \xi(1 - \eta)x_b(1) - \xi\eta x_t(1) \quad (2.1)$$

$$y(\xi, \eta) = (1 - \xi)y_l(\eta) + \xi y_r(\eta) + (1 - \eta)y_b(\xi) + \eta y_t(\xi) - (1 - \xi)(1 - \eta)y_b(0) - (1 - \xi)\eta y_t(0) - \xi(1 - \eta)y_b(1) - \xi\eta y_t(1) \quad (2.2)$$

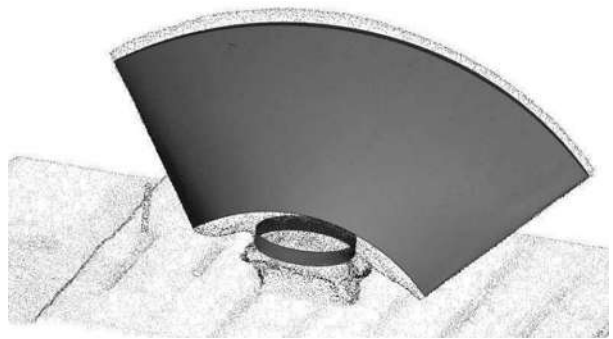
$$z(\xi, \eta) = (1 - \xi)z_l(\eta) + \xi z_r(\eta) + (1 - \eta)z_b(\xi) + \eta z_t(\xi) - (1 - \xi)(1 - \eta)z_b(0) - (1 - \xi)\eta z_t(0) - \xi(1 - \eta)z_b(1) - \xi\eta z_t(1) \quad (2.3)$$

2.2.4. Creación de modelo CAD

La finalidad de la ingeniería inversa aplicada a la reconstrucción de álabes es obtener un modelo CAD preciso. En la Figura 2.5 se ilustra el proceso de obtención de un modelo computacional a partir del álabe real. El desafío consiste en generar modelos precisos que puedan ser fabricados y reemplazar aquellos álabes dañados o que hayan desviado su comportamiento de los parámetros para los que fueron diseñados. Además, se busca reducir significativamente el tiempo de diseño del producto [18].



(a) álabe físico



(b) Álabe obtenido mediante ingeniería inversa

Figura 2.5. Obtención de modelo computacional mediante ingeniería inversa [19]

El objetivo de esta etapa es crear un modelo digital preciso y detallado que refleje las características del objeto original, incluyendo sus formas, dimensiones y otras propiedades

relevantes. Esto permite la visualización del objeto reconstruido en la pantalla de la computadora, lo que permite manipularlo para verlo desde diferentes ángulos y perspectivas. Este modelo digital se puede utilizar para documentar las características del objeto original y proporcionar un registro preciso de sus propiedades. Además, el modelo digital permite realizar análisis computacionales de la superficie, interactuando con un fluido y facilitando el análisis de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). Esto resulta muy útil en aplicaciones donde se busca mejorar o modernizar el objeto reconstruido.

2.2.5. Prototipado

Cuando se combinan la ingeniería inversa y el prototipado rápido, se obtiene una poderosa herramienta para el desarrollo de productos. La ingeniería inversa permite capturar y digitalizar la geometría de un producto existente, ya sea para realizar mejoras o replicarlo de manera más eficiente. Luego, el prototipado rápido utiliza estos datos para crear rápidamente prototipos físicos que pueden ser evaluados y validados antes de invertir recursos en la producción en masa.

En la Figura 2.6 se muestra el resultado tras obtener datos por ingeniería inversa, procesarlos y adaptarlos para hacer un prototipado rápido.



Figura 2.6. Prototipado rápido [10]

El prototipado rápido y la ingeniería inversa son dos áreas interrelacionadas que se utilizan para agilizar y mejorar el proceso de diseño y fabricación de productos. El prototipado rápido es una técnica que permite la fabricación rápida y eficiente de prototipos físicos de productos. Utiliza tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, para construir objetos capa por capa a partir de datos digitales. Estos prototipos pueden ser utilizados para evaluar la forma, función y viabilidad de un diseño antes de pasar a la etapa de producción a gran escala.

Dependiendo de las dimensiones del objeto, los tiempos de producción pueden ser de varios días, especialmente con piezas complejas o cuando se requieren largos tiempos de enfriamiento. Aunque pueda parecer lento, sigue siendo mucho más rápido que las técnicas de producción tradicionales, como el mecanizado. Esta producción relativamente rápida permite analizar las partes en una etapa muy temprana del diseño, lo que reduce el costo resultante del diseño. Los costos también se pueden reducir porque los procesos de prototipado rápido son completamente automatizados y solo requieren la habilidad de artesanos individuales para acabar la pieza [20].

Capítulo 3

El impulsor del compresor centrífugo

El impulsor es el corazón de la turbomáquina, específicamente del turbocompresor. Al revisar la bibliografía, se observa que el origen del impulsor es incierto ya que no hay registros claros sobre su invención, diseño o manufactura. Por lo tanto, se puede concluir que fue creado para satisfacer alguna necesidad y que su diseño obedece a la mera intuición, al igual que la primera persona que utilizó una cáscara de coco para recolectar agua. A medida que la tecnología ha avanzado los diseños de los álabes se han vuelto más complejos, con la intención de mejorar la transferencia de energía.

Gracias a las investigaciones de Euler, quien descubrió una forma simplificada basada en las leyes de Newton, se pueden predecir algunos modelos y conocer cómo influye la geometría en la distribución del flujo, así como diseñar de manera óptima y respetuosa con el flujo del servicio. En este capítulo se presenta una revisión histórica de los impulsores centrífugos, así como la clasificación de los impulsores comerciales y su recomendación de uso. Al final se abordan algunos conceptos físicos que involucran los álabes del impulsor con el fluido [21].

3.1. Historia general de los impulsores centrífugos

Para hablar de impulsores centrífugos, es necesario tener en cuenta las necesidades humanas, ya que estos forman parte de máquinas más grandes, como bombas, turbinas o compresores. Particularmente en los turbocompresores ya que estas máquinas fueron creadas con el objetivo de facilitar tareas humanas que son complicadas o peligrosas de realizar. Estas tareas pueden ser tan simples como transportar agua o tan complejas como elevar la presión en un fluido o extraer energía secundaria de fuentes de energía primaria, como en el caso de las turbinas hidráulicas o los turbocompresores [22].

El antecedente registrado más antiguo de un impulsor centrífugo se remonta al año 1772. Se trata de un impulsor con 10 álabes construido de madera, encontrado en una mina abandonada en Portugal. Se estima que este impulsor fue fabricado en el siglo V como se muestra

en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Representación del primer impulsor centrífugo registrado en la historia (Imagen generada mediante Dall-E)

La discusión sobre quién inventó el impulsor centrífugo es debatible. Algunos atribuyen el logro a Leonardo Da Vinci (1452-1519), ya que fue el primero en documentar el uso de la fuerza centrífuga para elevar agua.

Otros mencionan a Denis Papin (1647-1712), quien en 1698 fue uno de los pioneros en el uso de las fuerzas centrífugas. La explicación detallada de las fuerzas centrífugas se encuentra en el siguiente subtema. Papin propuso la creación de vórtices mediante álabes, que se parecían más a palas que a los álabes modernos, como se observa en la Figura 3.2. Las palas, al estar instaladas en una pieza circular, generaban fuerzas centrífugas.

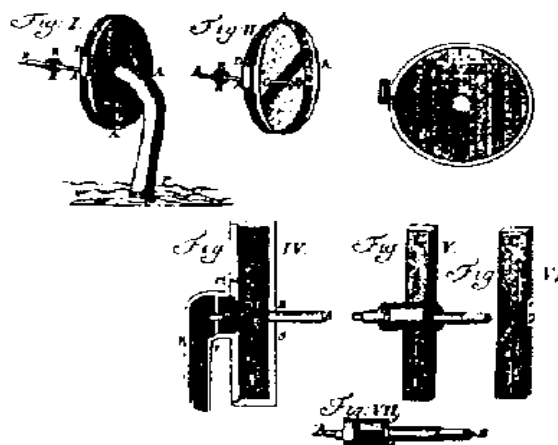


Figura 3.2. Bomba centrífuga inventada por Denis Papin [23]

En 1732, Kernelien Le Demour y Daniel Gabriel Fahrenheit en 1736 escribieron sobre diseños de impulsores centrífugos, pero no se menciona un uso práctico.

En el año 1754, Euler propuso un modelo matemático que aplicaba las leyes de Newton a los impulsores centrífugos, conocido como la ecuación de Euler. Aunque comúnmente se piensa que este modelo se desarrolló para turbinas hidráulicas y se ignoró en la aplicación de impulsores centrífugos, en realidad ha sido utilizado para ambos tipos de equipos. El desarrollo del impulsor centrífugo para bombas y compresores se ha dado de forma paralela, y los conocimientos adquiridos en el diseño de ambos equipos se han compartido entre sí.

Uno de los eventos que propició el desarrollo de esta tecnología fue la presentación del impulsor centrífugo en el Crystal Palace, Figura 3.3, en 1851. En esa exhibición se presentaron diversas configuraciones de impulsores centrífugos que alcanzaban eficiencias de hasta el 68 %, algo que nunca se había visto con otros diseños.



Figura 3.3. Crystal Palace donde se presentaron distintos modelos de impulsores centrífugos [24]

Para el año 1910-1930 la investigación, experimentación y diseño de impulsores centrífugos, fue un tema relevante. Actualmente, la frontera del conocimiento no se encuentra tan desarrollada, aun se intentan resolver problemáticas, como el rediseño para aumentar la eficiencia, la reparación de álabes, así como el estudio avanzado por medio de análisis computacional [24].

3.2. Compresores centrífugos

Los compresores son máquinas cuya finalidad es proporcionar energía a los fluidos compresibles (gases y vapores) sobre los que operan para aumentar su presión y hacerlos fluir. En esta última característica, se diferencian de los sopladores y ventiladores, que manejan grandes cantidades de fluidos compresibles (como el aire) sin modificar significativamente su presión, y tienen funciones similares a las bombas de fluidos incompresibles [25].

El compresor centrífugo es un tipo de compresor dinámico que logra la compresión mediante impulsos giratorios y la aplicación de las fuerzas de la inercia al gas. Normalmente, el compresor consta de más de dos etapas, cada una compuesta por un impulsor y un difusor, y el

único elemento rotativo es el impulsor. El diseño de los compresores se basa en la necesidad de comprimir gases para aumentar su presión y desplazarlos de un punto a otro. Esto es muy útil, ya que muchas aplicaciones industriales requieren la compresión de gases[26].

En la Figura 3.4 se muestra el impulsor centrífugo es un dispositivo mecánico que utiliza la fuerza centrífuga para impulsar líquidos o gases. Consiste en un disco o rueda con varios álabes rectos o álabes curvos que giran alrededor de un eje central. Cuando el impulsor gira, la fuerza centrífuga empuja el líquido o gas hacia el borde del disco, donde los álabes lo agarran y lo impulsan hacia la salida.

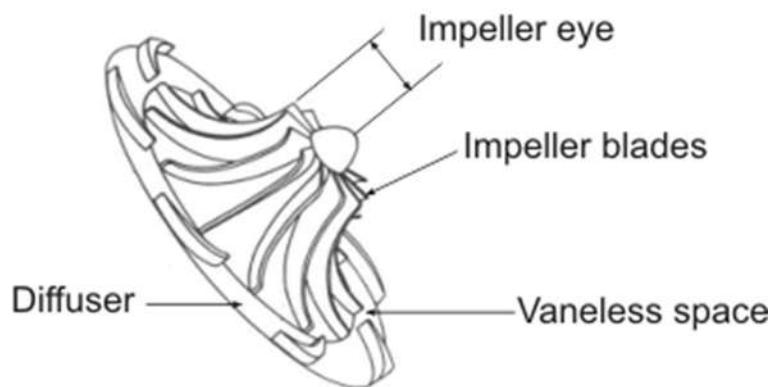


Figura 3.4. Representación de un impulsor centrífugo [27]

Hay una clasificación importante de impulsores, ya que de ello depende el servicio, es decir, el tipo de flujo que podrán desplazar. Los impulsores se pueden clasificar en distintas categorías. Para este trabajo, se consideró que la clasificación más importante es aquella que involucra la configuración geométrica y el servicio, es decir, si se utilizarán para mover aire, gas, fluidos con partículas, entre otros. Una de las grandes limitantes, que se ha discutido a lo largo de este trabajo, es la escasez de datos, ya que mucha de esta información es propiedad de los fabricantes y se encuentra contenida en manuales que se comparten en forma de cursos o capacitaciones técnicas con los usuarios finales. A continuación, se presentan los diseños más importantes y comunes en la industria.

3.3. Tipos de impulsores centrífugos

Los impulsores se pueden clasificar en distintas categorías. Para este trabajo, se consideró que la clasificación más importante es aquella que involucra la configuración geométrica y el servicio, es decir, si se utilizarán para mover aire, gas, fluidos con partículas, entre otros.

3.3.1. Impulsor abierto-succión al frente de flujo radial

Este tipo de impulsores, trabajan con flujos paralelos a los álabes. Se usa para mover grandes cantidades de flujo con poca cantidad de energía. Algo importante de este impulsor, es que puede mover flujo con partículas, algunos ejemplos de estos son: Agua de lluvia, irrigación, mezclado, agitación. Como se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Impulsor de diseño abierto [28]

3.3.2. Impulsor semicerrado succión al frente de flujo radial

En la Figura 3.6 se presenta el diseño del impulsor. Este tipo de diseño ha demostrado tener un bajo nivel de presión en la caja del sello y reducir los esfuerzos de empuje. Dependiendo del diseño, puede contar con orificios de equilibrado. Teóricamente, se puede variar el diámetro para aumentar la capacidad en galones, la cabeza y los caballos de fuerza. Se utiliza en servicios de desplazamiento de flujos fibrosos.



Figura 3.6. Impulsor semicerrado de flujo radial [29]

3.3.3. Impulsor cerrado succión al frente de flujo radial

En la Figura 3.7 se muestra un impulsor que se utiliza para flujos limpios, es de alta eficiencia por ende más caro, cuenta con anillos de desgastes removibles, para ajustar holgura de claros entre el cuerpo de la carcasa y el impulsor. Ideal para usar en aplicaciones de alto requerimiento de energía.



Figura 3.7. Impulsor de diseño cerrado [30]

3.3.4. Impulsor de flujo axial

En la Figura 3.8 Se presenta el diseño para un flujo totalmente paralelo al impulsor, con capacidad de desplazar grandes cantidades de flujo con baja capacidad de cabeza. Son de uso en ejes verticales que se encuentran sumergidos. Ideal para servicios de agua de tormenta, irrigación, mezclado.



Figura 3.8. Impulsor de diseño de flujo axial [31]

Queda claro que el diseño de los álabes determina su uso, así como la dirección del flujo. Esta información está determinada por los fabricantes, quienes usualmente realizan la

selección del impulsor. Después de esto, no se dispone de más información sobre el diseño, medidas internas de la geometría, etc. Esto limita la capacidad para reparar estas piezas. Una de las grandes limitantes, que se ha discutido a lo largo de este trabajo, es la escasez de datos, ya que mucha de esta información es propiedad de los fabricantes y se encuentra contenida en manuales que se comparten en forma de cursos o capacitaciones técnicas con los usuarios finales [32].

3.4. Funcionamiento del impulsor centrifugo en turbo-compresores

Un compresor centrífugo es una máquina dinámica con una dirección de flujo continuo de fluido que recibe energía del impulsor, el cual está conectado al eje central. Esta energía se transforma en presión con la ayuda del impulsor y el estator

Dado que no es posible observar el desempeño del turbocompresor en un ambiente real, a menos que la carcasa estuviera hecha de vidrio, lo cual sería la fantasía de cualquier persona interesada en las turbomáquinas, se han hecho simplificaciones y reducciones para facilitar la matematización del comportamiento de este equipo.

En la Figura 3.9 y en la Tabla 3.1 se muestra el turbocompresor multipasos y sus partes principales. Se utiliza este compresor para introducir los conceptos físicos que gobiernan la máquina, ya que es el equipo que cuenta con más investigación. Pero el comportamiento de un equipo rotativo con álabes es muy similar [33].

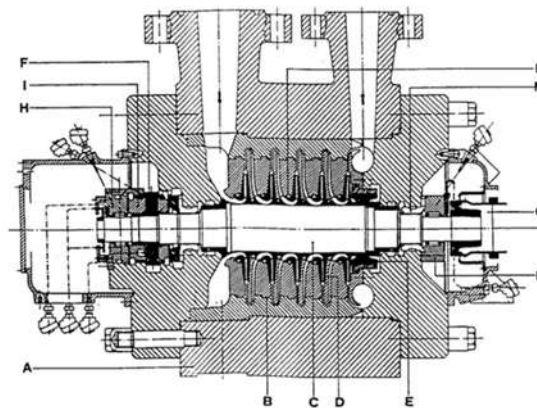


Figura 3.9. Corte transversal de un turbocompresor multipasos [26]

A,B	Carcaza
C	Rotor
D	Impulsor
E	Tambor de equilibrio
F	Collarín de empuje
G	Chumacera
H	Chumacera de empuje
I	Chumacera de contacto
L	Sellos de laberinto
M	Pista de aceite

Tabla 3.1: Partes principales de un turbocompresor centrífugo

En la Figura 3.10 se presentan algunos aspectos físicos que involucran al impulsor. Generalmente el fluido entra perpendicularmente al eje y gira en la entrada del impulsor. Esto para fluir a través del impulsor.

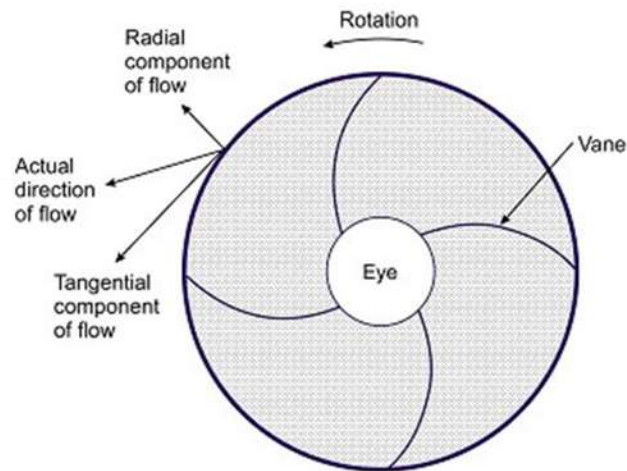


Figura 3.10. Impulsor centrífugo y la relación física con los fluidos [34]

En la Figura 3.11 se observa como el flujo a través del impulsor se desarrolla de manera perpendicular a la superficie de los álabes. Esto es más sencillo si se analizan los diagramas de velocidad de un impulsor de un compresor centrífugo.

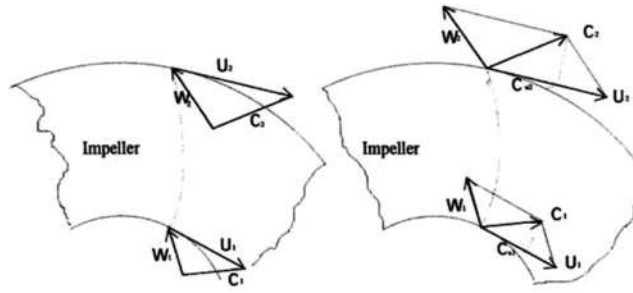


Figura 3.11. Diagrama de velocidades en los álabes de un impulsor [33]

La fuerza centrífuga aplicada del impulsor al flujo. Esto tiene como resultado un aumento de la velocidad del flujo, al salir del impulsor el flujo pasa por el difusor [35], donde este se desacelera y por ende una subida de presión. Si se habla de aumento de presión, esto se logra mediante los elementos fijos, como lo son; alineadores y el difusor.

$$P_m = \frac{G}{2g_C} [(C_2^2 - C_1^2) + (U_2^2 - U_1^2) + (W_1^2 - W_2^2)] = \frac{G}{2g_C} (C_2^2 U_2^2 - C_1^2 U_1^2) \quad (3.1)$$

En la Ecuación 3.1 se presenta la expresión que describe la presión del flujo a la salida del impulsor. Donde $\frac{C_2^2 - C_1^2}{2g_C}$ representa un incremento de la energía cinética a través del impulsor. La velocidad absoluta C_1 que entra al impulsor, incrementa en la magnitud C_2 , que deja el impulsor. Hasta donde se ha analizado, se observa que no hay ninguna relación entre el aumento de la energía cinética y la presión que se genera en el impulsor. Pero la presión si incrementa cuando el fluido atraviesa el difusor. Dependiendo el diseño del impulsor, puede ocurrir un aumento de presión en el impulsor en relación a los términos: $\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g_C}$ y $\frac{W_1^2 - W_2^2}{2g_C}$.

El término $U_2^2 - U_1^2$ mide el aumento en el campo de presión que se da en el impulsor. Y el término $\frac{W_1^2 - W_2^2}{2g_C}$. Está asociado con la velocidad relativa del flujo que entra y sale en el impulsor.

Hay un término muy importante al hablar de equipos centrífugos. Esto es el cabezal. Que es un concepto que nos sirve para determinar la energía requerida para mover una unidad de masa de un fluido de un lugar a otro. En pocas palabras, es el trabajo que un compresor ejerce por unidad de masa de gas de vapor. Esto se puede definir como se muestra en la Ecuación 3.2.

$$P_m = \frac{1}{g_C} \left[\frac{C_2^2 - C_1^2}{2g_C} \right] \quad (3.2)$$

El coeficiente de flujo, se utilizan en el diseño, dimensionamiento de compresores y en la estimación de los cambios de cabeza, que como se observa, están relacionadas con la velocidad del impulsor. Por lo tanto, cualquier cambio en este coeficiente, estará relacionado directamente con daños e imperfecciones en los álabes del impulsor. Y se utiliza para conocer

la condición del turbo compresor. A continuación, se presenta en la Ecuación 3.3.

$$\phi = \frac{Q}{AU} \quad (3.3)$$

Donde:

Q= Taza de flujo (ft^3/s)

A= Área (ft^2)

U= Velocidad de flujo (ft/s)

Reescribiendo está expresión se obtiene la Ecuación 3.4.

$$\phi = \frac{700Q}{D^3N} \quad (3.4)$$

Donde D es el diámetro y N la velocidad del rotor [22].

3.5. Álaves del impulsor

El álabe es la parte más importante del impulsor, es necesario estandarizar las partes que lo componen. Al observar con detenimiento, el álabe está limitado por cuatro fronteras. A continuación, se define el nombre de las partes más importantes del álabe.

En la Figura 3.12 se observa el borde inferior, se designa de esa manera ya que es la parte continua al plato del impulsor, y sobre ella está construido el álabe.

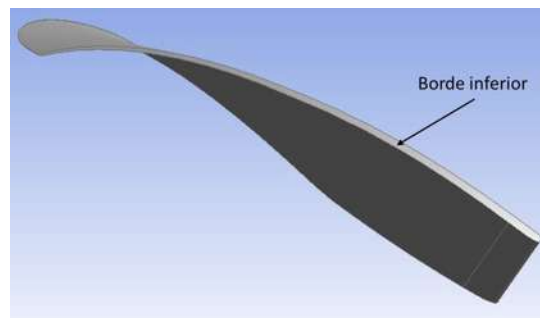


Figura 3.12. Borde inferior de un álabe

Del lado opuesto está el borde superior, como se muestra en la Figura 3.13. La cual es el límite más alto del álabe. Entonces el álabe está delimitado entre el borde inferior y borde superior.

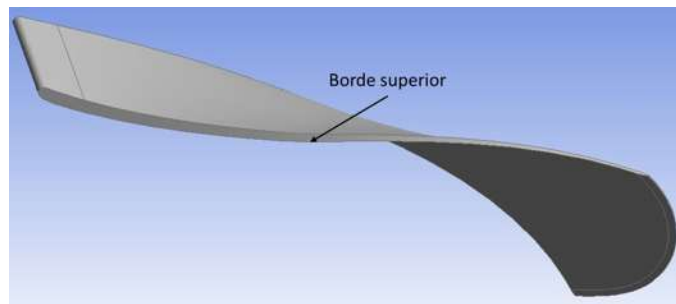


Figura 3.13. Borde superior de un álabes

En la Figura 3.14 se muestra el borde de ataque es el primer borde que entra en contacto con el fluido.

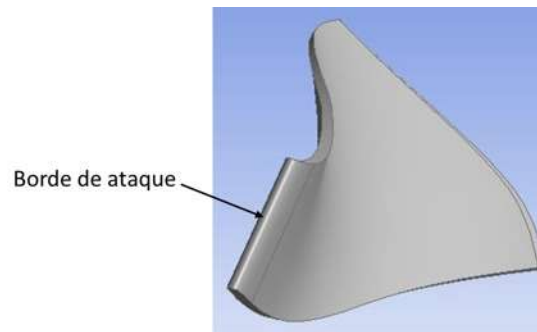


Figura 3.14. Borde de ataque de un álabes

En la Figura 3.15 se muestra el borde de salida, el cual se encarga de expulsar el fluido con aceleración, mientras que el lado de succión es donde el flujo ingresa a través del álabes.

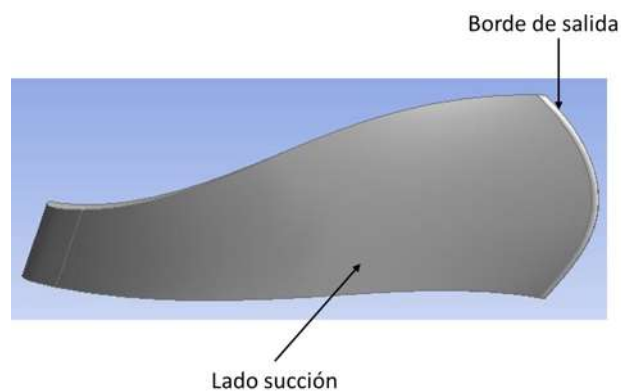


Figura 3.15. Lado succión de un álabes

En la Figura 3.16 se muestra el lado presión que es el lado del álabes que entrega el flujo

al difusor.

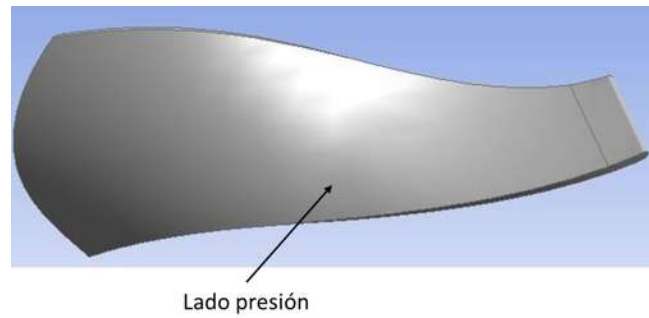


Figura 3.16. Lado presión de un álabe

Una vez que se ha estandarizado el nombre de las partes de un álabe y se han mencionado sus funciones de manera descriptiva se espera que haya mayor comprensión de la terminología técnica en el capítulo siguiente.

Capítulo 4

Metodología para la reconstrucción de álabe principal

En este capítulo se desarrolla la metodología para representar y completar la superficie fracturada del álabe de un impulsor semiabierto centrífugo perteneciente a un turbocompresor con servicio de aire, cuyo modelo fue obtenido mediante escaneo láser. Esta metodología es una adaptación de los algoritmos y subalgoritmos utilizados para reconstruir la superficie de los álabes de una turbina Francis 99. Esta adaptación fue necesaria ya que la metodología citada trabaja con datos extraídos de archivos CAD (Diseño Asistido por Computadora) limpios, es decir, modelos bien definidos donde todas las superficies se unen correctamente, no hay líneas o arcos duplicados que se interfieran, así como puntos o líneas innecesarias [1]. En la Figura 4.1 Se presenta la adaptación del algoritmo de la metodología para la Reconstrucción de la geometría fracturada de un impulsor centrífugo de un turbocompresor mediante ingeniería inversa.

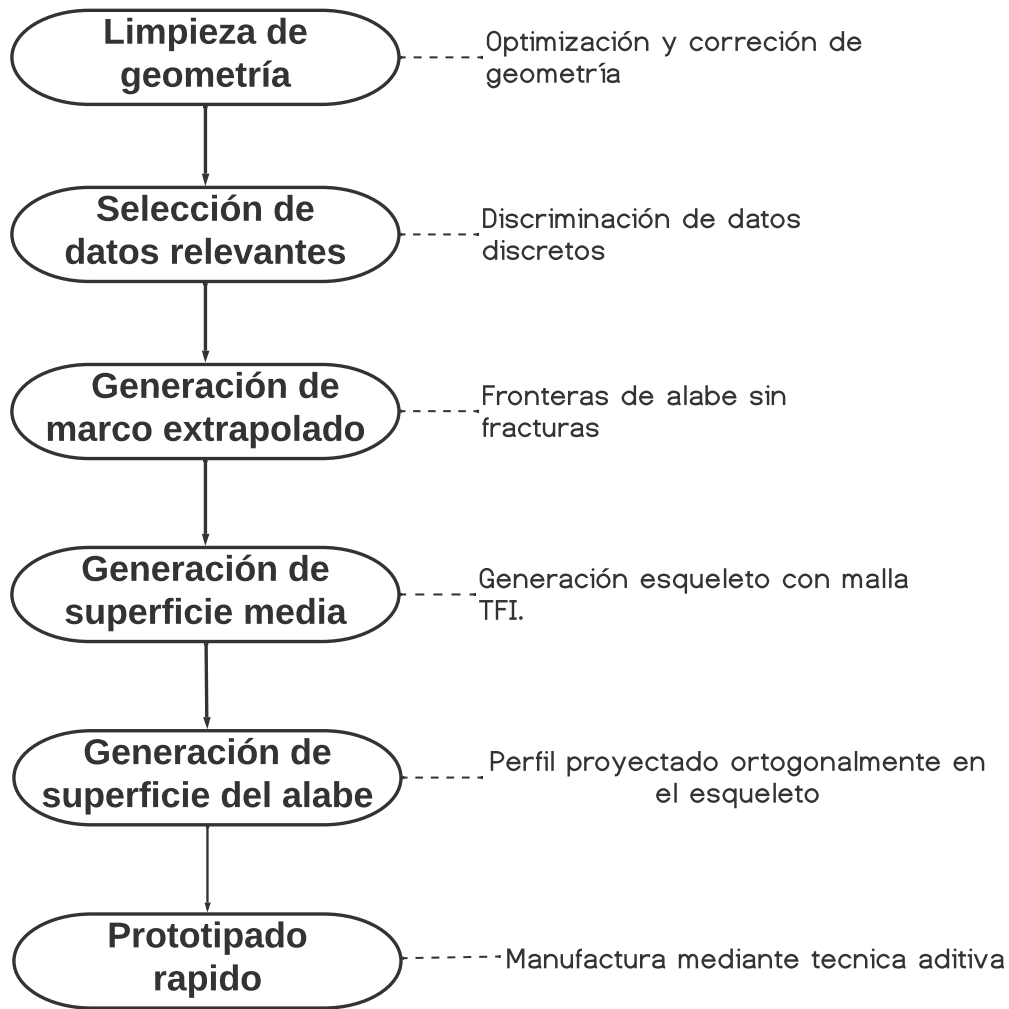


Figura 4.1. Algoritmo de reconstrucción de la superficie del álabe del impulsor centrífugo

El primer paso consiste en limpiar la geometría y corregir los errores de escaneo. Con la geometría optimizada, se procede a extraer los datos para poder seleccionar los datos relevantes, es decir, hacer una discriminación de datos y escoger los datos antes de la fractura. Tras escoger una serie de datos que permitan extrapolar el marco y completar la geometría fracturada, se genera un nuevo marco extrapolado. Este nuevo marco funciona como frontera del álabe y ayuda a generar una malla tras hacer un mapeo con ayuda de la TFI (Interpolación transfinita). La malla obtenida es la superficie media del álabe que describe la geometría compleja del álabe con gran precisión. La superficie media sirve como esqueleto del álabe que permite la proyección ortogonal de un perfil de álabe que genera la superficie del álabe en los lados de presión y succión. Dado que los datos del modelo fueron obtenidos mediante un escaneo y presentan múltiples errores de construcción, una forma de evaluar la reconstrucción de la geometría fracturada es comparar cualitativamente que la reconstrucción esté en el espacio del modelo escaneado y que los álabes reconstruidos queden proyectados sobre los antiguos álabes fracturados en el plato del impulsor. Esto indica que la reconstrucción es

precisa y se ajusta adecuadamente a la geometría original del modelo.

Por último, se realiza un prototipado rápido para obtener una versión preliminar del impulsor. Esta versión preliminar es de mucho valor debido a que ayuda a demostrar los resultados obtenidos mediante las herramientas numéricas y la ingeniería inversa. Otro motivo es que el impulsor real, tiene un diámetro de aproximadamente 15 cm. Esto hace que se pueda manufacturar mediante técnica aditiva y poder hacer una comparación física, entre el impulsor fracturado y el impulsor reconstruido.

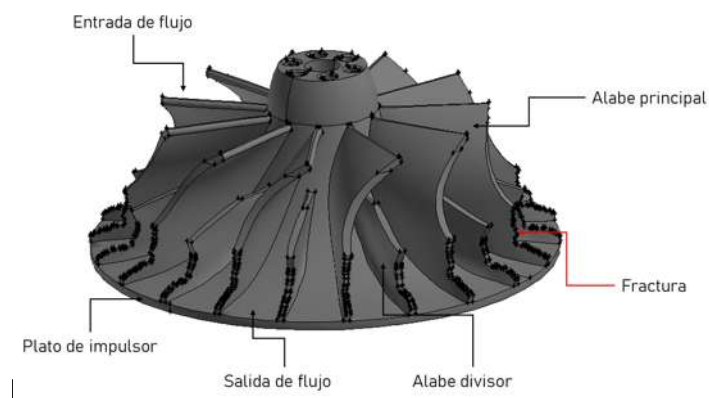
4.1. Impulsor semiabierto centrífugo fracturado

La metodología se aplicará a los álabes fracturados de un impulsor semiabierto centrífugo que pertenece a un turbocompresor con servicio de aire. Debido a que se aborda la reconstrucción desde una perspectiva geométrica, los datos de operación no son necesarios. Aun así, para dar más contexto del equipo, se describen algunas de las variables de operación más importantes.

Se estima que opera a aproximadamente 5200 rpm. En la Figura 4.2a se observa que cuenta con 22 álabes, 11 principales y 11 divisores. Se cree que el material es una aleación de aluminio con níquel. Es importante señalar que todos los álabes están dañados en el borde de fuga. En la Figura 4.2b se observa el modelo digital que se obtuvo a través de un escaneo, este modelo conserva las fracturas. Debido a que no hay parámetros o asignación de nombres a los lados del impulsor, se procede a estandarizar la configuración del impulsor, es decir, la dirección de los flujos y las partes importantes del impulsor.



(a) Impulsor físico con álabes fracturados



(b) Impulsor en modelo digital con fracturas

Figura 4.2. Impulsor real y modelo computacional del impulsor tras ser escaneado

4.2. Limpieza de geometría

4.2.1. Optimización de geometría

El modelo digital del impulsor obtenido mediante un escaneo presenta múltiples errores, como superficies inexistentes, líneas dobles, así como cuerpos extraños. Es necesario optimizar el modelo hasta obtener solamente el álabe, ya que esto reduce el tamaño del archivo y consume menos recurso computacional. Esto también permite visualizar de manera más clara la superficie del álabe, facilitando la discretización de este para posteriormente extraer los datos.

En la Figura 4.3a se muestra el impulsor escaneado, se observa como representa el modelo real con mucho detalle, pero los detalles como el casquillo y plato del impulsor impiden manipular el álabe. Es necesario eliminar el plato del álabe, así como el casco y barrenos del impulsor como se muestra en la Figura 4.3b

Con la eliminación de los detalles que no aportan información relevante del álabe se procede a escoger el álabe que represente con más detalle la fractura y las superficies del álabe, tras escoger cualitativamente se procede a eliminar el resto de los álabes como se muestra en la Figura 4.3c. Hacer esta limpieza del impulsor permite visualizar el álabe y observar con mayor detalle los errores generados por el escaneo.

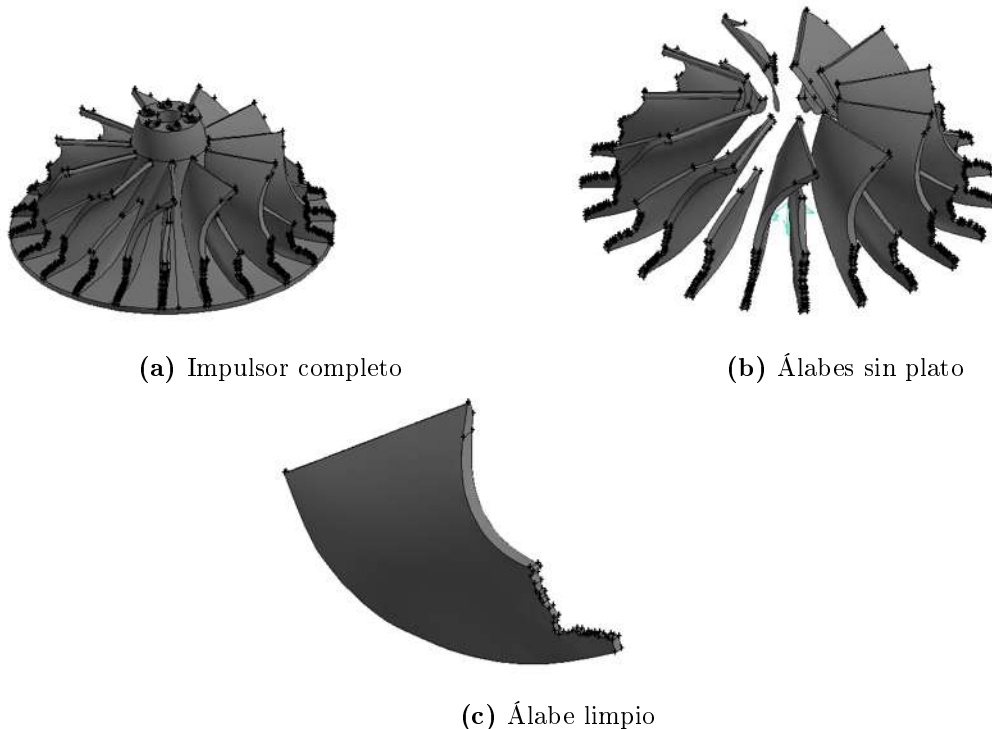


Figura 4.3. Limpieza geométrica del impulsor

Después de haber retirado el plato del impulsor se observan una serie de defectos. En la Figura 4.4, donde se muestra que el borde inferior se encuentra abierto debido a un error de escaneo, así como el borde de ataque cuenta con una línea de construcción que no está en el centro del borde de ataque, por esto se procedió a construir estas caras y eliminar los datos extraños.

Para manipular la geometría se utilizó el software Gambit Fluent, el cual facilita el procesamiento del archivo ya que percibe los modelos como una serie de vértices, líneas y caras, por ende permite modificar la geometría.

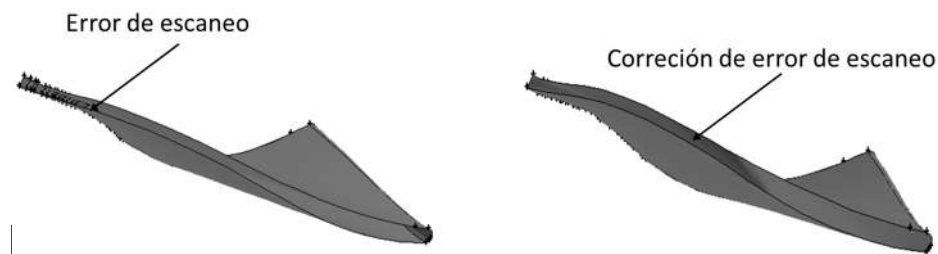


Figura 4.4. Corrección de errores de escaneo

4.3. Selección de datos relevantes

4.3.1. Discretización

La discretización consiste en generar cortes equidistantes a lo largo de los bordes del ala. Estos cortes generan puntos o vértices que describen el comportamiento de una línea en el espacio. Cada vértice contiene una coordenada (x, y, z) , lo que permite extraer los datos que describen el comportamiento de las curvas del ala. Si la geometría es muy curva, se necesitarán más cortes para poder representarla de manera más precisa. No hay una forma exacta de calcular el número de puntos necesarios para lograr la discretización, ya que esto se elige de manera discrecional y cualitativa.

En la Figura 4.5 se observa la discretización en cada una de las 4 caras que delimitan el ala así como los nombres asignados a cada uno de los bordes del ala. Esta discretización permite obtener las líneas medias de cada una de las caras del ala.

Como se mencionó, cada punto contiene información y cada punto construye una línea que representa la geometría del ala. Por lo tanto, es muy importante garantizar la integridad y la consistencia de los datos, es decir, que el dato discreto se encuentre sobre la superficie y no fuera de ella. Una forma de asegurar esto es proyectando el vértice sobre la geometría, es decir, haciendo que el vértice forme parte de la geometría.

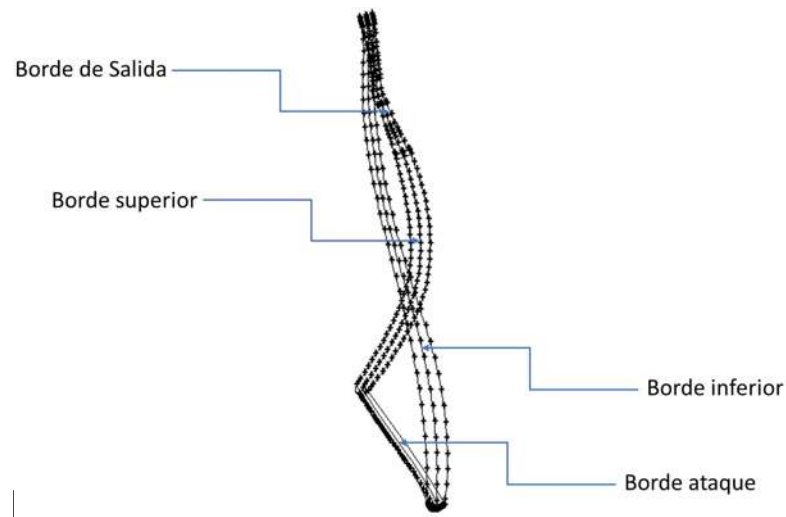


Figura 4.5. Discretización de los bordes del álabe

4.3.2. Extracción de datos discretos

La extracción de datos consiste en obtener los datos de cada uno de los vértices que discretizaron la geometría del álabe. Para extraer los datos se tiene que elegir una dirección de extracción. Si se utiliza un sentido de extracción incorrecta o inconsistente los datos pierden consistencia lo que puede dar como resultado la pérdida en la relación entre los puntos y la relación con los lados geométricos del álabe.

En la Figura 4.6 se propone un sentido de extracción basado en el plano lógico. Donde se relaciona cada borde del plano computacional con una dirección de extracción de datos. Se comienza a extraer datos desde el borde inferior con rb , el borde de salida con rr , el borde de ataque se relaciona con rl , el borde superior con rt , en ese orden. Siguiendo esta lógica, tendremos 4 fronteras computacionales que se relacionan con los 4 bordes del álabe físico.

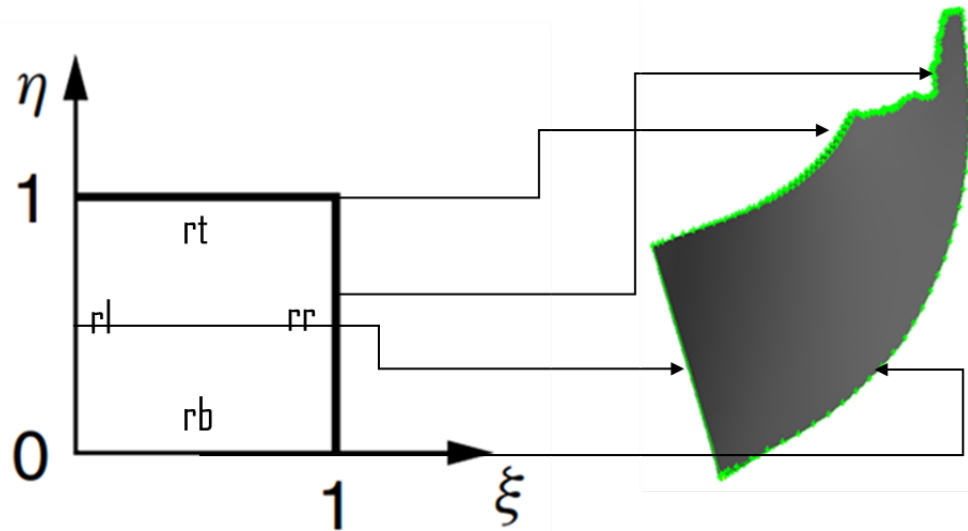


Figura 4.6. Sentido de extracción de datos y los nombres de los sentidos lógicos del álabe

Tras la extracción se obtuvieron en total se obtuvieron 152 datos. En la Tabla 4.1 se muestra la relación entre los bordes del álabe en el modelo computacional así como los nombres según el plano lógico y la cantidad de datos extraídos en cada frontera del álabe.

No.	Nombre por borde	Nombre Logico	No. Datos.
1	Borde de ataque	rl	48
2	Borde inferior	rb	36
3	Borde de salida	rr	33
4	Borde superior	rt	35

Tabla 4.1: Nombre de las fronteras del modelo computacional y la cantidad de datos extraídos

4.3.3. Discriminación de datos discretos

Tras la discretización se realiza la representación gráfica de los datos discretos extraídos, lo cual ayuda a detectar visualmente si hay algún dato que no tenga coherencia con los demás, ya que cada dato representa la frontera del álabe.

En la Figura 4.7 se grafican los datos discretos, es importante acotar que los datos discretos describen las líneas medias de los bordes del álabe, estas líneas medias se denominaran "L.M", por ende las 4 bordes del álabe están definidas por datos discretos.

Al observar el lado definido como L.M Borde ataque, es evidente que los datos discretos describen la fractura del álabe la cual representa la parte faltante de la geometría.

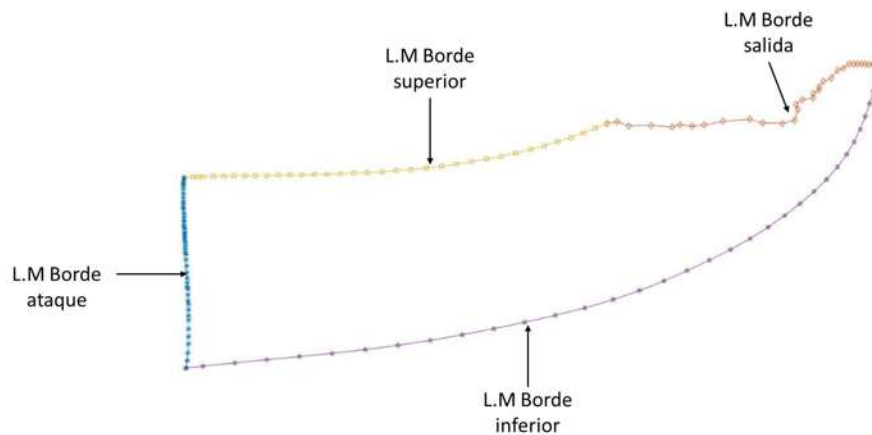


Figura 4.7. Representación de los datos discretos que describen las fronteras del álabe

En la Figura 4.8, se puede observar que los datos discretos de la L.M del Borde de ataque se conservan parcialmente sin datos dañados por la fractura, al igual que los datos de la L.M del Borde superior están parcialmente. Al discriminar estos datos, es decir, seleccionar solo una porción de datos sin ruido, se facilita la extrapolación para completar los datos faltantes debido a la fractura.

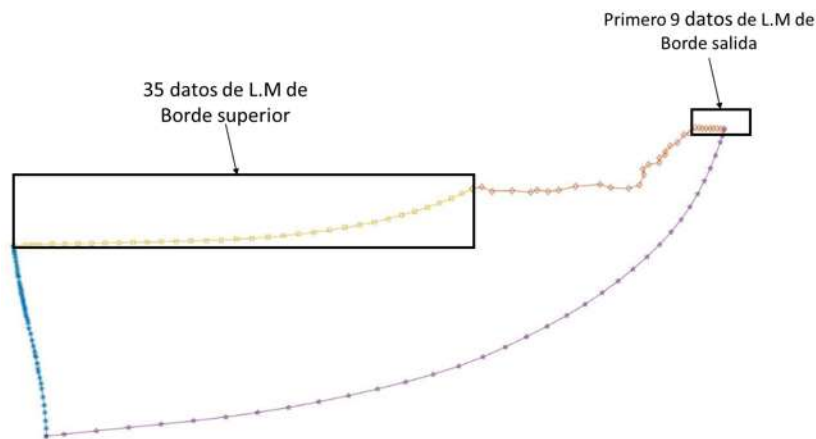


Figura 4.8. Selección de datos que se encuentran antes de la fractura.

Para lograr esto, se optó por seleccionar los datos que están antes de la fractura. Siguiendo los recorridos lógicos, se seleccionan 35 datos de la L.M del Borde superior y solo los primeros 9 datos que se encuentran antes de la fractura para la L.M del Borde de salida.

4.4. Extrapolación de marco del álabe

Tras seleccionar cuidadosamente los datos que no reproducen la fractura, los datos quedan de la siguiente manera: 2 fronteras completas en la L.M Borde de ataque, L.M Borde inferior

y se cuenta con los primeros 9 datos de L.M Borde de salida y con 35 datos de L.M Borde superior. A partir de estos datos, se realiza una extrapolación de la L.M Borde superior hasta llegar al dato no.9 de la L.M Borde de ataque. Es importante asegurarse de que la extrapolación quede contenida al interior del plato del impulsor, ya que de lo contrario el álabe quedaría fuera del plato y sería imposible instalarlo en la flecha del turbocompresor. En la Figura 4.9 se observan los datos discretos extrapolados que construyen un vector entre la L.M Borde inferior y la L.M Borde superior. Este vector construye una línea que reemplaza al borde de ataque, permitiendo recuperar los datos faltantes mediante este procedimiento.

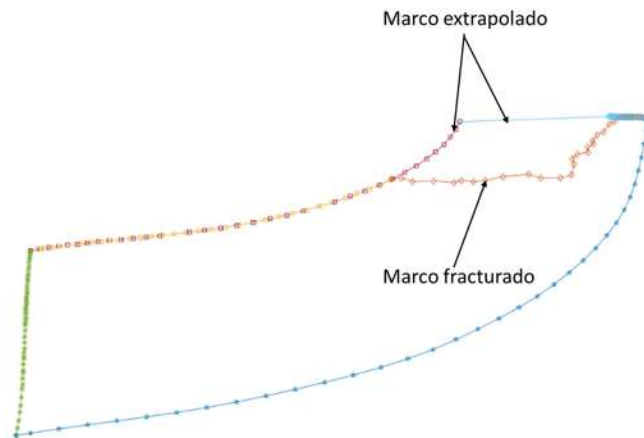


Figura 4.9. Extrapolación del marco fracturado

4.5. Generación de superficie media del álabe

La superficie media del álabe, también conocida como esqueleto del álabe, se utiliza como guía para construir una nueva geometría o superficie que se ajuste a las especificaciones geométricas del álabe. Al tener el esqueleto como referencia, se puede garantizar que la nueva geometría se ajuste correctamente a la estructura original del álabe.

En la figura 4.10 se presenta el algoritmo para para generar la malla que sirve de superficie media del álabe.

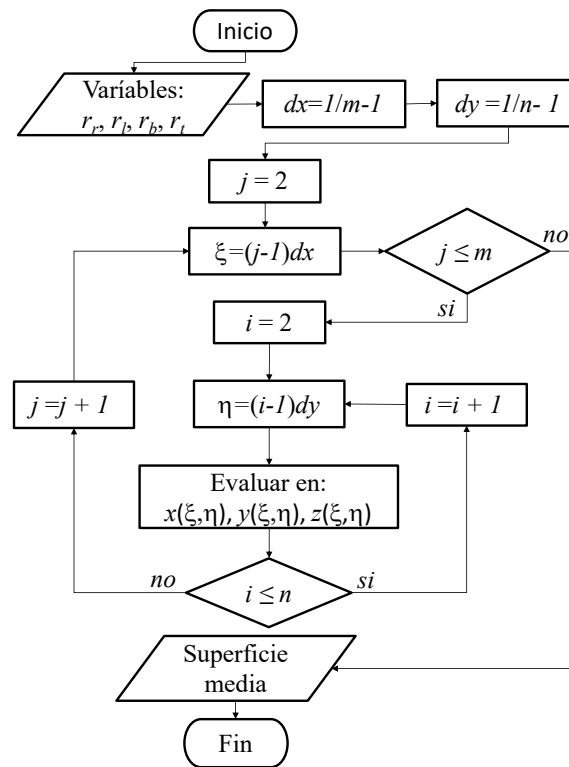


Figura 4.10. Algoritmo para generar malla [1]

Es necesario parametrizar mediante una interpolación los datos discretos para generar un polígono que representa el marco. Este marco sirve como frontera para generar una malla mapeada con la Interpolación transfinita (TFI). Una de las múltiples ventajas de utilizar una malla generada por interpolación transfinita es la simplicidad y facilita el control de la malla, el número de divisiones y la ortogonalidad de la misma [17].

Tras designar el sentido lógico de la generación de la malla así como la aplicación de las ecuaciones de la interpolación transfinita, estas ecuaciones se explicaron a detalle en el capítulo 2 de este mismo trabajo y siguiendo la metodología propuesta por Delgado Sánchez [1] donde se descubrió que una malla con una división de 100x100 en los valores de ξ y η son suficientes para obtener una superficie media que logran describir con detalle las características geométricas del álabes.

En la Figura 4.11 se observa la malla que es la superficie media del álabes, que describe con detalle el comportamiento geométrico del álabes.

Se observa que el esqueleto del álabes está completo y no se encuentra fracturado como el original, esto indica que la reconstrucción de la geometría del álabes fracturado se logró con éxito.

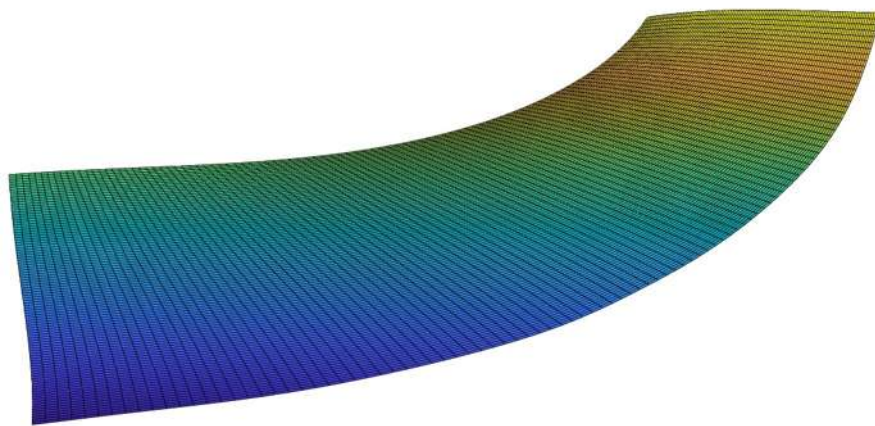


Figura 4.11. Esqueleto de 100×100

4.6. Generación de superficie del álabe

4.6.1. Extracción de perfil del álabe

Tras obtener el esqueleto del álabe, la superficie media, es necesario montar un perfil sobre el esqueleto para generar las superficies del álabe.

En la Figura 4.12 se observa que a causa de la fractura del álabe el borde de salida es casi inexistente existiendo un bordo pequeño de la geometría. Esta situación impide conocer si hay cambios de grosor a lo largo del álabe ya que solo existe un diminuto borde que se mantiene integro.

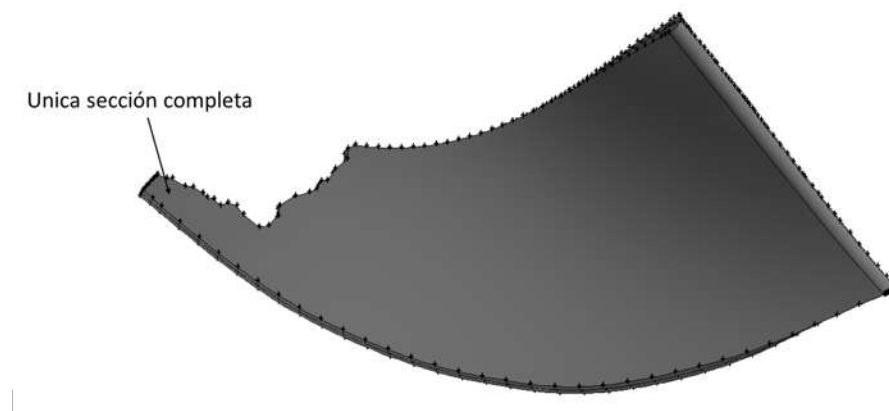


Figura 4.12. Sección completa sin fractura

En la Figura 4.13 se observa la sección inferior del álabe, esa sección representa el grosor del álabe y permite proyectar ese perfil de forma ortogonal a lo largo del esqueleto del álabe extrapolado.

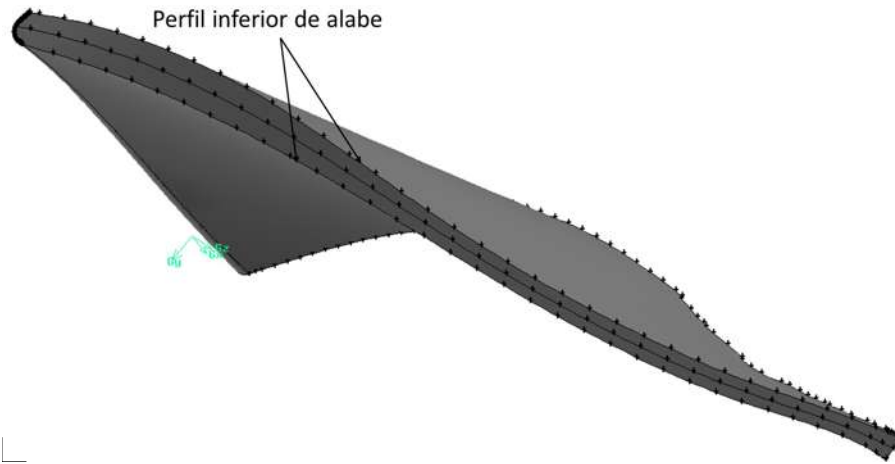


Figura 4.13. Perfil inferior del álabe

Se necesita realizar cortes a lo largo de las líneas que construyen el perfil inferior del álabe para extraer los datos y hacer la representación del perfil inferior como se muestra en la Figura 4.14 donde las líneas que construyen las secciones presentan las curvas características de una geometría complicada.

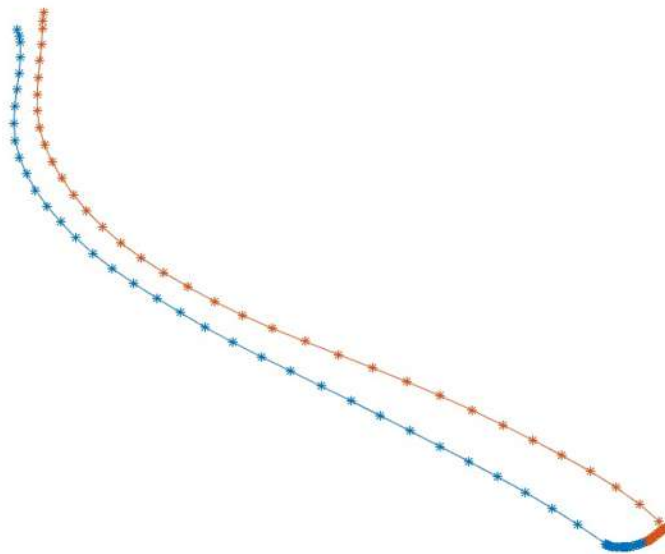


Figura 4.14. Datos discretos del perfil inferior

La Interpolación Transfinita permite hacer un mapeo y controlar el número de puntos que construyen el perfil inferior, es decir parametrizar el perfil. En la Figura 4.15 se muestra la configuración de perfil con una configuración de 100x100 de ξ y η respectivamente.

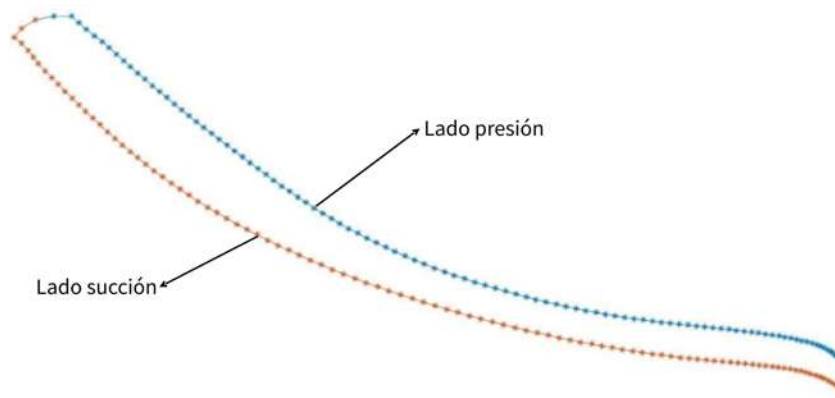


Figura 4.15. Perfil analítico inferior del álabe

4.6.2. Proyección ortogonal en superficie media del álabe

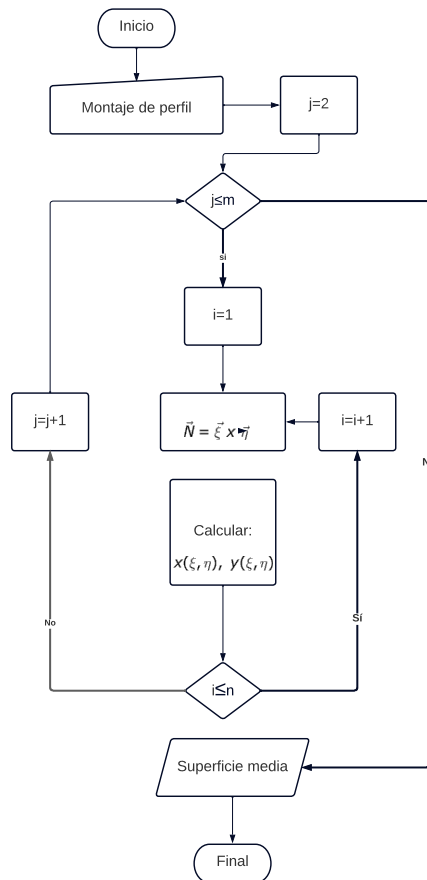


Figura 4.16. Algoritmo de montaje de perfil [1]

Tras haber extraído el perfil del álabe, para obtener la superficie del álabe es necesario proyectar el perfil ortogonalmente a lo largo del esqueleto del álabe.

En la Figura 4.16 se muestra el algoritmo adaptado para el montaje del perfil propuesto

por Delgado Sánchez [1]. Este algoritmo aprovecha el uso del producto tensorial ortogonal para utilizar la superficie media extrapolada como referencia y poder reconstruir el lado de presión y de succión del álabe. Lo anterior permite generar un modelo del álabe reconstruido sin fracturas

Tras aplicar el algoritmo, donde el perfil se proyecta ortogonalmente a lo largo del esqueleto del álabe donde se utilizan 100 divisiones, es decir, $\xi = \eta$. En la Figura 4.17a se observa la reconstrucción de la superficie del álabe con alta definición de la geometría.

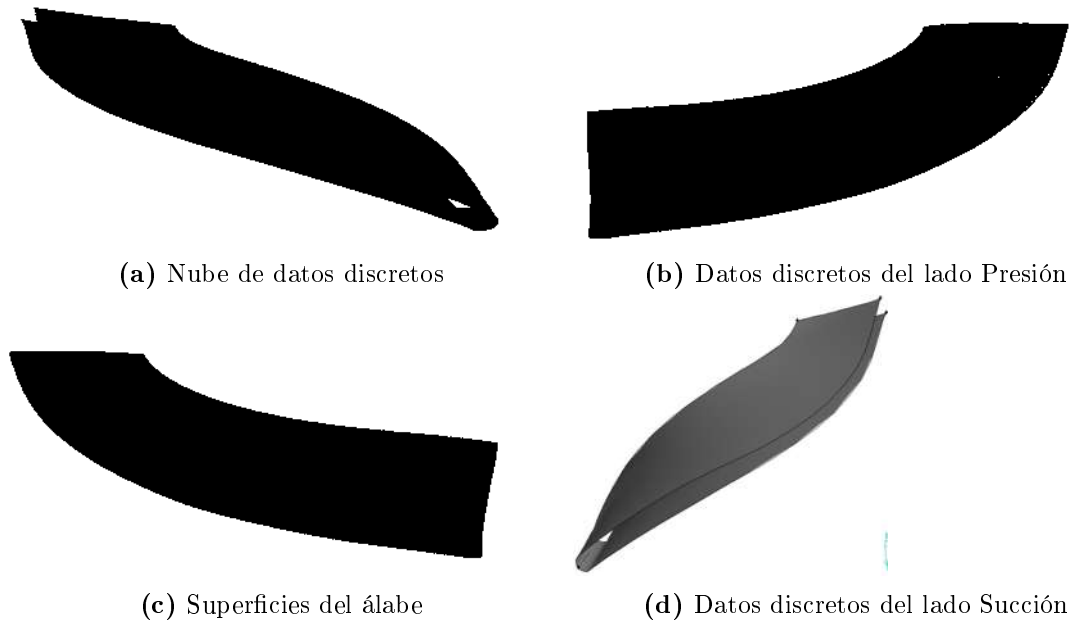


Figura 4.17. Reconstrucción de las superficies del álabe del impulsor centrífugo con una densidad de mallado de 1000×1000 nodos.

4.7. Modelado de álabe divisor

En este apartado se propone una alternativa para modelar el álabe divisor del impulsor. Debido a que las características del álabe divisor son distintas la metodología presentó algunos inconvenientes al generar la malla. Esto se explicará con más detalle en el siguiente capítulo.

En la Figura 4.18 se observa el álabe divisor obtenido tras limpiar la geometría completa del impulsor. Se muestra que el álabe presenta una fractura entre el borde de salida y el borde superior. Es importante notar que el borde de ataque presenta un ángulo agudo respecto al borde inferior, así como, que el borde de ataque es totalmente plano. Todas estas características son opuestas a las del álabe principal.

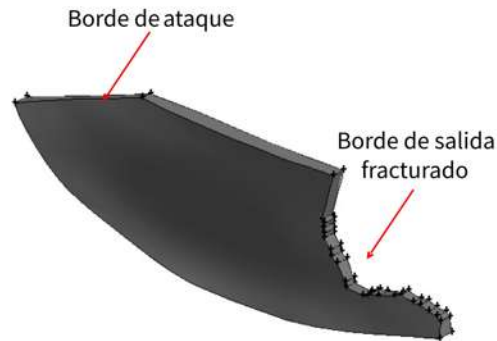


Figura 4.18. Álabe divisor y sus características

En la Figura 4.19 se presenta el álabe reconstruido con las herramientas numéricas y en seguida el álabe fracturado, podemos inferir que la altura que separa el borde superior del borde inferior es la misma para los ambos álabes. Esta altura se le denominó B. La altura B se encontró gracias a la reconstrucción numérica del álabe principal fracturado, y se utiliza para completar la parte fracturada en el álabe divisor.

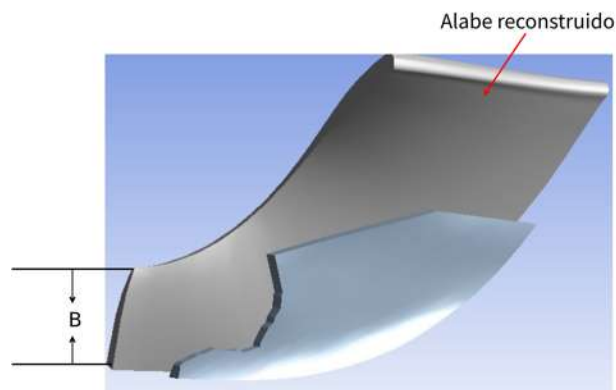


Figura 4.19. Altura B del álabe reconstruido

La geometría del álabe divisor se podría denominar como simple comparado con otros álabes. Aun con esto, modelar el álabe sin tener parámetros es un reto, por este motivo se optó por proyectar el álabe divisor fracturado sobre el álabe principal reconstruido como se muestra en la Figura 4.20. También se observa de manera visual que la altura y el espesor del álabe divisor es casi la misma que la del álabe principal.

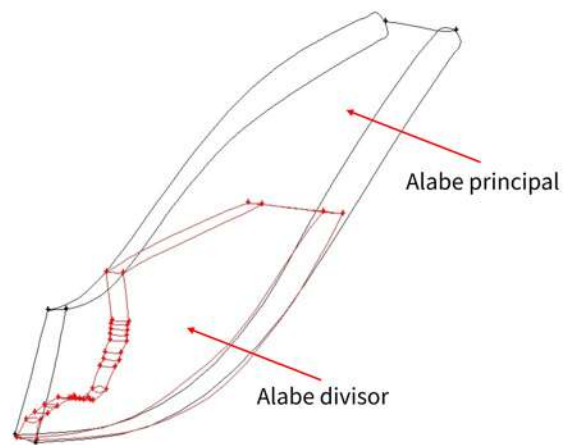


Figura 4.20. Comparación de la altura B entre ambos álabes

En la Figura 4.21 se observa el álabes divisor completado. Se aprecia como la proyección fue de utilidad para completar la parte fracturada del álabes.

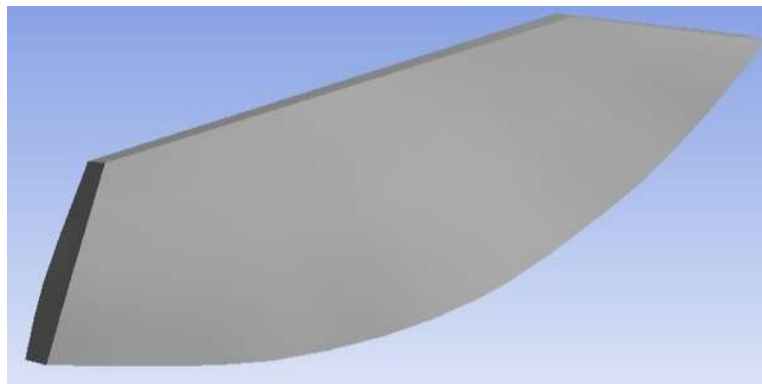


Figura 4.21. Álabes divisor reconstruido

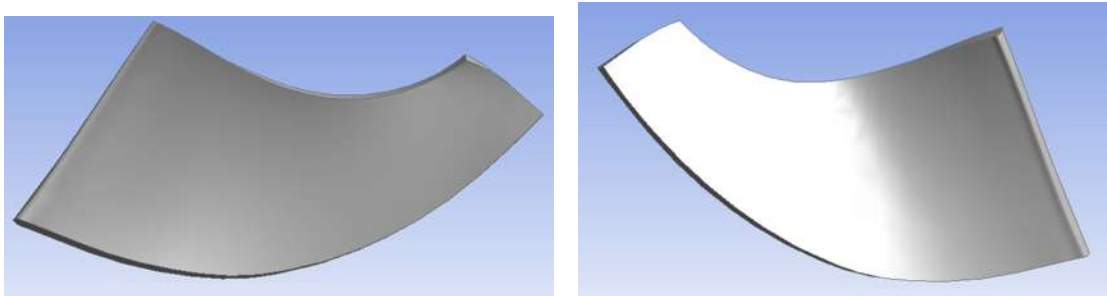
Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1. Análisis de resultados de álabe principal

Tras haber aplicado la metodología al modelo obtenido mediante ingeniería inversa, se obtuvo el álabe principal reconstruido.

En las Figuras 5.1a y No5.1b se observan el álabe principal reconstruido en su lado presión y succión. Este álabe cuenta con la mayoría de las características del diseño original debido a que fue reconstruido tomando de referencia el álabe fracturado. El borde de ataque podría tener algunas diferencias geométricas con respecto al diseño original, debido a que la forma del borde de ataque es una propuesta y este borde fue manipulado mediante la extrapolación del marco del álabe.



(a) Lado succión de álabe principal reconstruido (b) Lado presión de álabe principal reconstruido

Figura 5.1. Reconstrucción de álabe principal mediante herramientas numéricas

Esta metodología toma más relevancia ya que demuestra que se puede reconstruir un álabe fracturado que es irreparable con técnicas tradicionales. Gracias a que el modelo del álabe puede ser exportado a distintos tipos de archivos soportados por software de diseño asistido por computadora (CAD), abre la posibilidad de poder ser manufacturado mediante técnicas de fundición o de herramientas con control numérico por computadora (CNC), así como análisis desde la perspectiva de la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD).

5.1.1. Análisis de sensibilidad

La finalidad de discretizar y extraer los datos es construir un marco, que sirve como frontera que delimita el mapeo de la interpolación transfinita (TFI). Tras aplicar el proceso de discretización y extracción de datos a un álabe fracturado, se obtiene un marco fracturado. En la Figura 5.2 se observa la malla generada con el marco fracturado, se observan torceduras así como la malla con ruido.

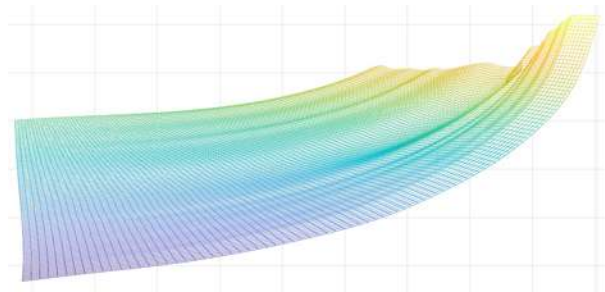


Figura 5.2. Superficie media fracturada

La malla fracturada, funciona como superficie media del álabe, la cual es la referencia para montar ortogonalmente cualquier perfil de álabe. En la Figura 5.3 se presenta el resultado de montar el perfil del mismo álabe sobre la malla obtenida.

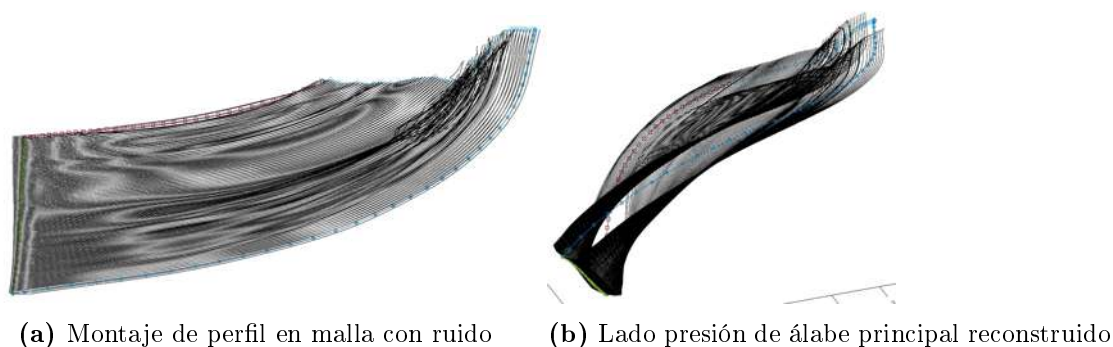
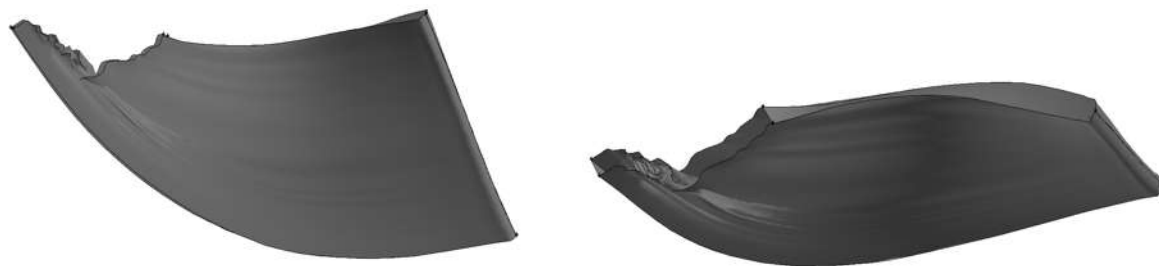


Figura 5.3. Vista inferior del álabe en malla con ruido

En la Figura 5.4 se observan las superficie generadas tras utilizar la superficie media con ruido, donde se observan torceduras, generación de caras inexistentes así como arrugas en la superficie del lado presión y succión.



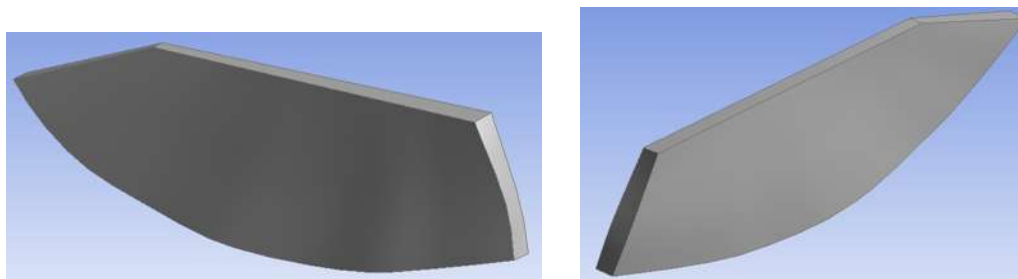
(a) Lado succión de álabe principal reconstruido con malla fracturada (b) Lado presión de álabe principal reconstruido con malla fracturada

Figura 5.4. Álabe reconstruido con ruido

Tras observar que la malla es sensible a los cambios abruptos de dirección en las fronteras que delimitan el mapeo. Analizando esto, extrapolar el borde de salida tras haber montado el perfil es complicado, lo más viable es extrapolar el marco, como se realizó en este trabajo, para no comprometer la calidad de la malla.

5.2. Análisis de resultados de álabe divisor

En la figura 5.5 se observa el álabe divisor modelado utilizando como referencia la altura B del álabe principal reconstruido. Es necesario notar que la configuración geométrica del álabe divisor es sencilla, debido a que el borde superior y el borde de ataque, son rectos y planos; siendo el borde inferior el único que es curvo.



(a) Lado succión de álabe principal reconstruido (b) Lado presión de álabe principal reconstruido

Figura 5.5. Reconstrucción de álabe principal mediante herramientas numéricas

5.2.1. Análisis de malla del álabe divisor

En el análisis de malla del álabe principal se demuestra que es necesario extrapolar el marco del álabe para obtener una malla útil para la reconstrucción. Las características geométricas del álabe divisor, provoca que la metodología para extrapolar el marco sea insuficiente comparado con la extrapolación del álabe principal. En la Figura 5.6 se observa un

dobles en la malla generado por un fallo en la extrapolación del marco.

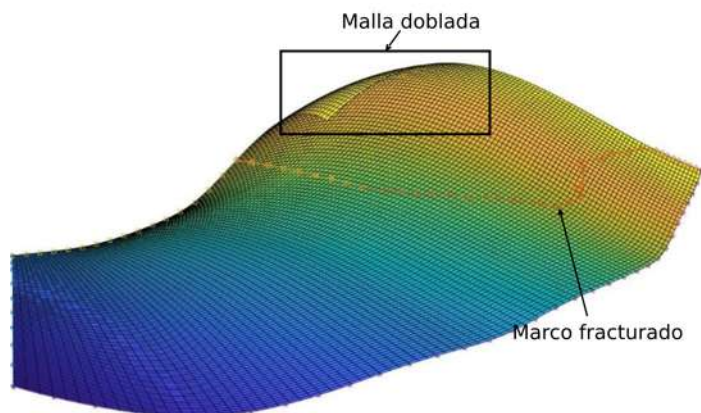


Figura 5.6. Superficie media generada sin extrapolación de marco

Un problema específico del álabe divisor está relacionado con los errores de escaneo, debido a que el álabe es corto y pequeño, acceder a la base del álabe es complicado. Esto genera que se obtenga un perfil de álabe que no corresponde al de la realidad.

En la Figura 5.7 se observa perfil extraído presenta curvaturas que no corresponden al álabe, es decir el perfil debería tener la misma evolución en el lado presión y en el lado succión, como se observó en el álabe principal. En este álabe se observa que los lados presión y succión del perfil son asimétricos.

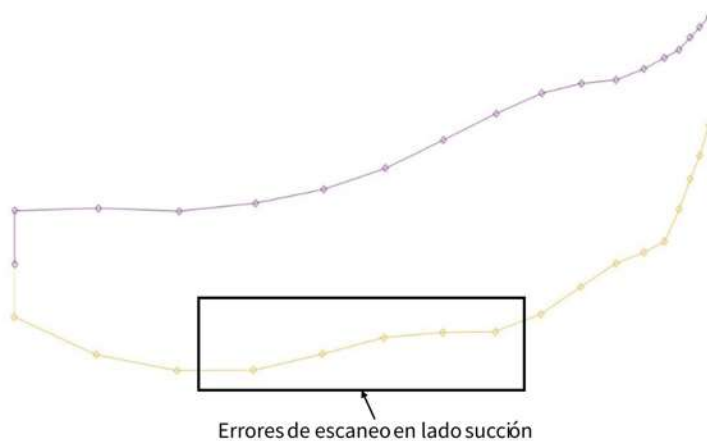


Figura 5.7. Perfil extraído del álabe divisor

En la Figura 5.8 se observa que la suma de estos problemas, el problema de la extrapolación así como el error de escaneo en la sección inferior del álabe, genera que el álabe reconstruido sea de mala calidad. Es decir, con imperfecciones, torceduras de la superficie y cambios aleatorios en el grosor del álabe. Por estos factores, el álabe se modelo tomando de

referencia la altura B que se encontró mediante la reconstrucción numérica, como se presentó en el capítulo anterior.

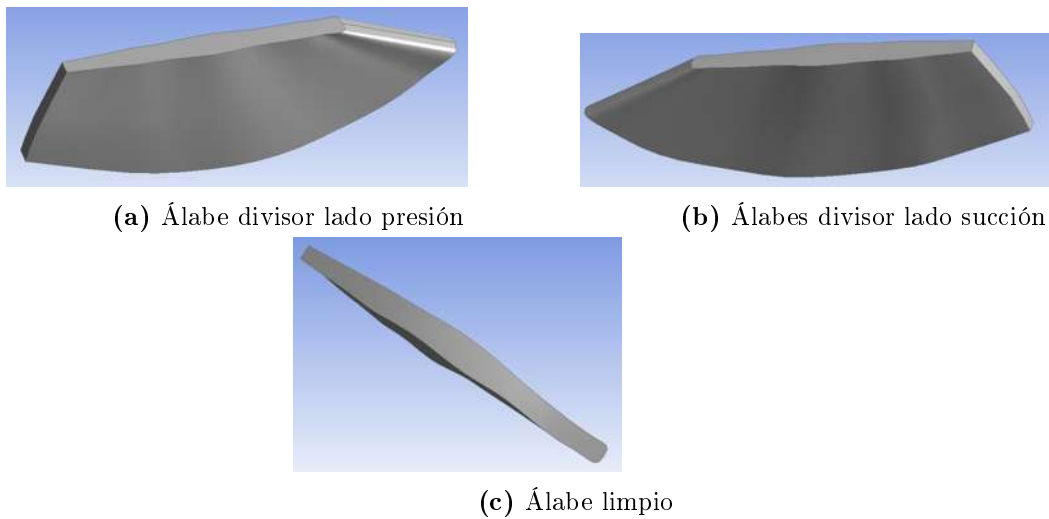


Figura 5.8. Álabes divisor lado inferior

5.3. Analisis de resultados del impulsor

Para evaluar la calidad de la reconstrucción, se comparará la geometría de los álabes con reconstruidos con la geometría de los álabes fracturados originales obtenida mediante escaneo.

En la Figura 5.9 , se presentan los álabes reconstruido montado sobre el plato del impulsor y proyectado espaciadamente en un ángulo de 32.72 grados sexagesimales entre cada álabes. Debido a que el plato del impulsor no tiene parámetros para ser modelado, es necesario modelar el plato mediante técnicas de ingeniería inversa en el modelado, es decir aproximar curvas y líneas. Con esto se logra proponer un nuevo impulsor sin fractura.

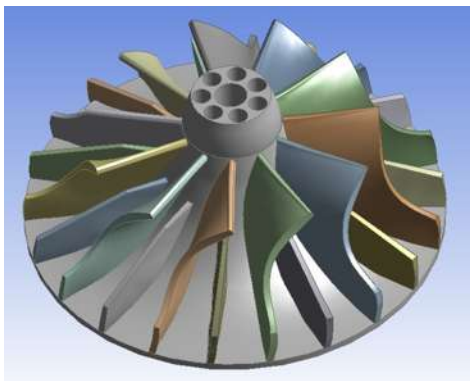


Figura 5.9. Impulsor reconstruido

En la Figura 5.10 se observa el impulsor reconstruido proyectado sobre el impulsor con los álabes fracturados, la geometría de color verde representa el modelo reconstruido y se observa como los álabes nuevos están justamente sobre los álabes fracturados.

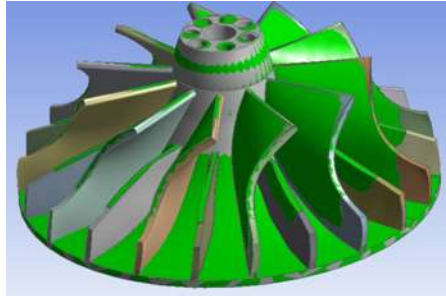


Figura 5.10. Comparación entre el impulsor fracturado y el impulsor reconstruido

Para validar la reconstrucción se llevó a cabo un análisis visual de la posición relativa del álabe reconstruido respecto al plato del impulsor y al álabe fracturado original. Se aseguró que el álabe reconstruido esté contenido dentro del plato del impulsor y que su posición relativa coincida con la posición original del álabe fracturado. Si la posición del álabe reconstruido no cumple con estas condiciones, se consideraría que las condiciones de instalación han cambiado y el impulsor propuesto no es viable.

Es importante tener en cuenta que el modelo original obtenido por escaneo presenta naturalmente múltiples errores, por lo que la validación de la reconstrucción basada únicamente en la comparación de distancias no es viable.

5.4. Prototipado rápido

El prototipado rápido es una herramienta que permite visualizar las características del modelo obtenido mediante la ingeniería inversa. Con la manufactura aditiva se reducen los costos y tiempos, esto es de mucha utilidad ya que este método de manufactura permite visualizar la calidad de la reconstrucción de los álabes fracturados [36].

5.4.1. Preparación del modelo

Para el prototipado rápido es necesario exportar el archivo del impulsor reconstruido obtenido de igs. a STL. Este tipo de archivo permite ser procesado en un tipo de software denominado "slicers", para este trabajo se utilizó el software libre, Prusa Slicer. El slicer

rebana el modelo computacional de manera horizontal, como se muestra en la Figura 5.11.

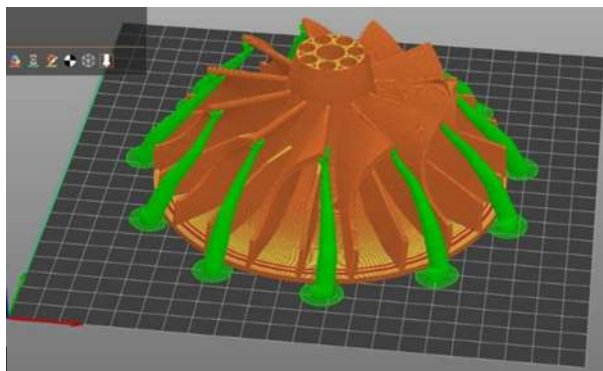


Figura 5.11. Preparación del modelo

5.4.2. Configuración del setup de la impresora

La configuración del set up es lo más importante del prototipado. Esto es porque con la configuración, se obtienen las instrucciones en código g. El código g contiene las instrucciones que se utilizan para controlar la impresora 3D, es decir, guiar los movimientos y operaciones de la boquilla. En la Tabla 5.1 se presentan estas configuraciones.

<i>Parametro</i>	<i>Valor/Tipo</i>
Temperatura Boquilla	205°C
Temperatura Cama	65°C
Altura de capa	0.15mm.
Relleno	17%
Soportes	Tipo Arbol
Velocidad	40 mm/s

Tabla 5.1: Configuración del Set Up de impresión

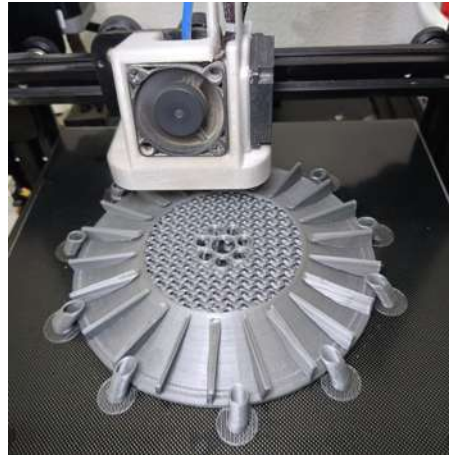
5.4.3. Impresión 3D

Para realizar la impresión se utilizó una impresora Ender 3. El material que se utilizó para la impresión es PLA +, este material requiere una temperatura entre 190 °C-230°C, una temperatura de cama entre 50°C-70°C y se estimó un tiempo de 23 horas.

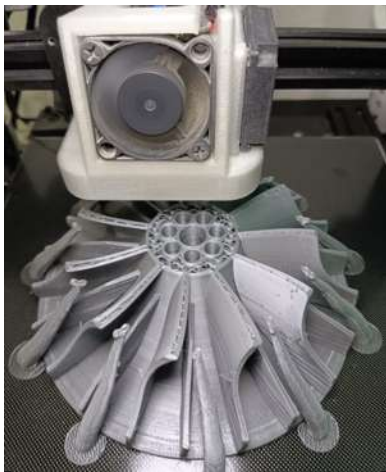
Un aspecto técnico que considerar es la primera cama de impresión, como se muestra en la Figura 5.12a, debido a que esta capa es la que asegura la fijación de la pieza en la cama. En las Figuras 5.12b,5.12c,5.12d se observa el progreso de la impresión.



(a) Primera cama de impresión



(b) Impresión después de 7 horas.



(c) Impresión tras 18 horas



(d) Impresión tras 22 horas

Figura 5.12. Fases de la manufactura aditiva.

5.5. Resultados del prototipado rápido

En la Figura 5.13a se presenta la vista inferior del impulsor, en la Figura 5.13b se observa la vista superior del impulsor y en la Figura 5.13c se presenta la vista isométrica del impulsor. Con esto se demuestra que la reconstrucción de las partes faltantes del álabe, mediante herramientas numéricas es posible.



(a) Vista inferior del impulsor



(b) Vista superior del impulsor



(c) Vista isométrica del impulsor

Figura 5.13. Impulsor reconstruido

Capítulo 6

Conclusiones

En el transcurso de este trabajo, se ha demostrado que la metodología propuesta ha permitido con éxito la reconstrucción de un álabe principal y divisor de un impulsor a través de técnicas de escaneo e ingeniería inversa. La clave para lograr esta reconstrucción radica en la meticulosa limpieza de la geometría distorsionada y la selección de datos relevantes en el proceso.

La extrapolación, utilizada para abordar los datos faltantes debidos a la fractura, ha demostrado ser una herramienta numérica invaluable para la creación de modelos computacionales con aplicaciones potenciales en la manufactura. Es esencial destacar que la selección cuidadosa de los datos que no presentan fracturas es un paso crítico que facilita esta extrapolación, permitiendo la creación de un marco extrapolado que actúa como la frontera del álabe reconstruido.

La adaptación de algoritmos y subalgoritmos previamente propuestos por [1] ha resultado en la generación de una malla de 100×100 a través de interpolación Transfinita. Esta malla sirve como esqueleto del álabe y posibilita la proyección ortogonal de cualquier perfil de álabe, lo que amplía las aplicaciones prácticas de la metodología.

Es importante señalar que, aunque el borde de ataque del álabe reconstruido podría presentar algunas diferencias geométricas en comparación con el diseño original, la mayoría de las características esenciales del diseño original se conservan en el álabe reconstruido, como se ha verificado mediante la comparación de ambas geometrías.

En última instancia, la metodología presentada en este trabajo no se limita únicamente al caso estudiado, el cual representa el peor escenario, es decir, el desprendimiento de material en las fronteras del álabe. Esta metodología tiene un potencial significativo para la reparación de álabes fracturados en general, aunque la adaptación de los algoritmos de extrapolación puede ser necesaria para abordar situaciones específicas.

Bibliografía

- [1] Giovanni Delgado, Sergio Galván, Francisco Dominguez-Mota, JC García, and Esteban Valencia. Reconstruction methodology of a francis runner blade using numerical tools. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34:1237–1247, 2020.
- [2] PANAMÁ CNC. Competitividad al día no. 426 resultados del índice global de innovación 2021. 2021.
- [3] Sulzer. Kits de reparación sulzer. *E10339 es 2.2016, Copyright © SULZER Ltd. 2016*, 2016.
- [4] Rama SR Gorla and Aijaz A Khan. *Turbomachinery: design and theory*. Crc Press, 2003.
- [5] Lucjan Witek, Arkadiusz Bednarz, and Feliks Stachowicz. Fatigue analysis of compressor blade with simulated foreign object damage. *Engineering Failure Analysis*, 58:229–237, 2015.
- [6] AK Bhaduri, TPS Gill, SK Albert, K Shanmugam, and DR Iyer. Repair welding of cracked steam turbine blades using austenitic and martensitic stainless-steel consumables. *Nuclear Engineering and Design*, 206(2-3):249–259, 2001.
- [7] 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.
- [8] Jian Gao, Hao Wen, Zhiyuan Lin, Haidong Wu, Si Li, Xin Chen, Yun Chen, and Yunbo He. Geometric model reconstruction through a surface extension algorithm for remanufacturing of twist blades. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2):382–390, 2017.
- [9] Changya Yan, Weiqiang Wan, Kuntao Huang, Lei Liu, and Chen-Han Lee. A reconstruction strategy based on csc registration for turbine blades repairing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61:101835, 2020.

- [10] Vinesh Raja and Kiran J Fernandes. *Reverse engineering: an industrial perspective*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [11] Robert P Hesketh, Kauser Jahan, AJ Marchese, C Stewart Slater, John L Schmalzel, TR Chandrupatla, and Ralph A Dusseau. Multidisciplinary experimental experiences in the freshman engineering clinic at rowan university. In *1997 Annual Conference*, pages 2–297, 1997.
- [12] Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, Gerhard Pahl, and Wolfgang Beitz. Embodiment design. *Engineering Design: A Systematic Approach*, pages 199–403, 1996.
- [13] Wego Wang. *Reverse engineering: Technology of reinvention*. Crc Press, 2010.
- [14] Josef Hoschek and Werner Dankwort. *Reverse engineering*. Springer, 1996.
- [15] 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.
- [16] Luis David Pérez Rubioa, Sergio Ricardo Galván González, Francisco Javier Domínguez Motab, Ángel Cerriteño Sánchez, Miguel Ángel Tamayo Sotoa, and Giovanni Delgado Sánchez. Reconstrucción de un álabe de turbina de vapor mediante métodos numéricos.
- [17] Joe F Thompson, Bharat K Soni, and Nigel P Weatherill. *Handbook of grid generation*. CRC press, 1998.
- [18] Linda M Wills and Philip Newcomb. *Reverse engineering*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [19] D Nedelcu, SL Bogdan, and I Pădurean. The reverse engineering of a blade runner geometry through photogrammetry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 393, page 012126. IOP Publishing, 2018.
- [20] Kwan H Lee and H Woo. Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping. *Computers & Industrial Engineering*, 38(1):21–38, 2000.
- [21] Shafiqur Rehman, Md Mahbub Alam, Luai M Alhems, and M Mujahid Rafique. Horizontal axis wind turbine blade design methodologies for efficiency enhancement—a review. *Energies*, 11(3):506, 2018.
- [22] Earl Logan Jr. *Handbook of turbomachinery*. CRC Press, 2003.
- [23] Bartholomeus Petrus Maria Van Esch. Simulation of three-dimensional unsteady flow in hydraulic pumps. *Enschede, Netherlands*, 1997.

- [24] Abraham Engeda. Early historical development of the centrifugal impeller. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, volume 78668, page V005T16A001. American Society of Mechanical Engineers, 1998.
- [25] Pedro Fernández Díez. Compresores. *Santander, España*, 5, 2000.
- [26] Paul C Hanlon. *Compressor handbook*. McGraw-Hill Professional, 2001.
- [27] Ahmed Qurmoshi. Qurmoshi 18844405 final report. 12 2018.
- [28] Yuliang Zhang, Zuchao Zhu, Yingzi Jin, Baoling Cui, Yi Li, and Huashu Dou. Experimental study on a centrifugal pump with an open impeller during startup period. *Journal of Thermal Science*, 22(1):1–6, 2013.
- [29] A Farid Ayad, Hamed M Abdalla, and A Abou El-Azm Aly. Effect of semi-open impeller side clearance on the centrifugal pump performance using cfd. *Aerospace Science and Technology*, 47:247–255, 2015.
- [30] Hamidreza Bozorgasareh, Javad Khalesi, Mohammad Jafari, and Heshmat Olah Gazori. Performance improvement of mixed-flow centrifugal pumps with new impeller shrouds: Numerical and experimental investigations. *Renewable Energy*, 163:635–648, 2021.
- [31] Lijian Shi, Jun Zhu, Fangping Tang, and Chuan Wang. Multi-disciplinary optimization design of axial-flow pump impellers based on the approximation model. *Energies*, 13(4):779, 2020.
- [32] Flowserver. *Principios de Diseño de la Bomba Centrífuga*. Servicios Educativos, 2016.
- [33] Anthony Giampaolo. *Compressor handbook: principles and practice*. CRC Press, 2020.
- [34] Simon Hooton. Centrifugal impeller design types and uses. <https://www.northridgepumps.com/article-312-centrifugal-impeller-design-types-and-uses>, 2021. Accessed: 2023-06-15.
- [35] Robert L Mott. *Applied fluid mechanics*, volume 1. Pearson Educación, 2006.
- [36] Francisco Javier Sánchez Jiménez, Arturo Fernández de la Puente Sarriá, and Julián Llorente-Geniz. Técnicas de prototipado rápido. In *XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, 2004.