



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA

**DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FORMA GEOMÉTRICA DE
LOS ÁLABES DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS 99.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA

PRESENTA:

Ing. María Goretti Gama Guzmán

ASESORES:

Dr. Sergio Ricardo Galván González

Philosophiae Doctor (Ph.D.) en Géne Mecanique

(Aerothermique numérique)

Dr. Giovanni Delgado Sánchez



Morelia Michoacán, septiembre 2024.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A MIS ASESORES: Dr. Sergio Ricardo Galván González, Dr. Giovanni Delgado Sánchez y el Dr. Francisco Javier Domínguez Mota por su valioso tiempo que me brindaron y el apoyo para trabajar en este proyecto de investigación.

A MIS PADRES: Gabriela Gama y Gerardo Gómez por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes incluyendo este, por su motivación constante para alcanzar mis metas.

A DIOS: por haberme dado una familia maravillosa quienes han creído siempre en mí dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificios enseñándome a valorar todo lo que tengo.

A MI AMIGO INCONDICIONAL: Fernando Salgado Fernando que siempre ha sido un gran compañero en esta etapa y me ha brindado su ayuda y su tiempo incluso en momentos difíciles ayudándome hasta donde sus alcances se lo permitían y por ser una persona comprensiva conmigo.

ÍNDICE.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	6
1.3 HIPÓTESIS	8
1.4 OBJETIVOS	9
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	9
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	10
2.1. ENERGÍA HIDRÁULICA	10
2.2. CENTRAL HIDROELÉCTRICA	12
2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS	13
2.3.1. TURBINA KAPLAN	15
2.3.2. TURBINA FRANCIS	15
2.4. APLICACIONES DE LAS TURBINAS FRANCIS	18
2.5. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LAS TURBINAS TIPO FRANCIS	18
2.6. ÀLABES DEL RODETE	19
2.7. ESTADO DEL ARTE	20
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DE LA RECONSTRUCCIÓN DEL ÀLABE DE LA TURBINA FRANCIS 99. 25	
3.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	28
3.2. OBTENCIÓN DE DATOS DEL ÀLABE PRINCIPAL DEL RODETE	29
3.2.1- ÀLABE DEL RODETE DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS 99.	29
3.2.2 PROPONER UN ÀLABE RECTO EN EL RODETE	30
3.2.3 EXTRACCIÓN DEL MARCO DEL ÀLABE REAL DE LA TURBINA FRANCIS 99	32
3.3 GENERACIÓN DEL RODETE Y EL MARCO ANALITICO DE LA TURBINA FRANCIS 99.	34
3.3.1. MALLADO DEL MARCO DEL ÀLABE RECTO MEDIANTE LA TFI	34
3.3.2 REVOLUCIÓN DEL ÀLABE RECTO PARA GENERAR LA BANDA Y LA CORONA.	36
3.3.3 CÁLCULO DE LOS ÀNGULOS DEL MARCO DEL ÀLABE RECTO AL MARCO DEL ÀLABE REAL.	39
3.4 AJUSTE DE CURVAS	54
3.4.1 AJUSTE BANDA	55

3.4.2 AJUSTE CORONA.....	57
3.4.3 AJUSTE ENTRADA	59
3.4.4 AJUSTE SALIDA.....	61
3.5 PARAMETRIZACIÓN DE LAS CURVAS	63
3.5.1 MALLA DEL ÀLABE ANALÍTICO	65
3.5.2 MONTAJE DEL PERFIL NACA.....	65
3.5.3- SERIE NACA DE 4 DÍGITOS	68
3.5.4 SERIE NACA DE 5 DÍGITOS	68
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	72
4.1 GRÁFICAS RESULTANTES DE LA PARAMETRIZACIÓN	72
4.2 SUPERFICIE.....	84
4.3 ÀLABE ANALÍTICO	85
4.4 RODETE ANALÍTICO DE LA TURBINA FRANCIS 99	88
4.5. COMPARACIÓN DE RODETES.	90
4.6. IMPRESIÓN 3D A ESCALA DEL RODETE ANALÍTICO DE LA TURBINA FRANCIS 99.....	92
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA.....	94
5.1. CONCLUSIONES.....	94
5.2 BIBLIOGRAFÍA	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Esquema de una Central Hidroeléctrica [1].	1
Figura 1.2.- Turbina Francis [2].	2
Figura 1.3.- Componentes del rodete de Turbina Francis [3].	3
Figura 1.4.-Álabe de turbina Francis [3].	3
Figura 2.1.- Construcción de presas [4].	11
Figura 2.2.-Corriente de ríos [4].	11
Figura 2.3.- Partes de una central hidroeléctrica [2].	12
Figura 2.4.- Clasificación de Turbinas de Acción y Reacción [2].	13
Figura 2.5.- Turbina Pelton [5].	14
Figura 2.6.- Turbina Kaplan [5].	15
Figura 2.7.- Componentes de una Turbina Francis [5].	17
Figura 2.8.- Turbina Francis [2].	19
Figura 2.9- Lados del álabe [3].	20
Figura 2.10. Aproximación por superficies de un álabe de una turbina hidráulica Francis [6].	21
Figura 2.11.- Superficie de álabe [7].	22
Figura 2.12. Distribución de error en lado presión [3].	23
Figura 2.13. Distribución de error lado succión [3].	23
Figura 2.14. (a) Datos obtenidos experimentalmente con un perfilómetro, (b) curva paramétrica ajustada por interpolación polinomial sobre el perfil NACA 2414 [8].	24
Figura 3.1.- Diagrama de las etapas de la metodología para realizar la construcción del álabe.	28
Figura 3.2.- Geometría del rodete de la turbina Francis 99.	30
Figura 3.3.- Álabe recto propuesto en el rodete de la turbina Francis 99.	31
Figura 3.4.- Álabe real de la turbina Francis 99.	32
Figura 3.5.- Marco del álabe real y marco del álabe recto de la turbina Francis 99.	33
Figura 3.6.- Malla del álabe recto propuesto en Matlab mediante la TFI.	35
Figura 3.7.- Aproximación por múltiples segmentos lineales [9].	36
Figura 3.8.- Segmento de curva aproximado con teorema de Pitágoras [9].	36
Figura 3.9.- Banda y Corona del rodete de la turbina Francis 99.	38
Figura 3.10.- Revolución de la banda por medio del álabe recto.	38
Figura 3.11.- Banda y Corona analíticos del rodete.	39
Figura 3.12.- Cálculo de los ángulos	40
Figura 3.13.- Ajuste de un conjunto de datos de una función [10].	54

Figura 3.14.-Gráfica de ajuste de banda.	55
Figura 3.15.- Gráfica de ajuste de Corona.....	57
Figura 3.16.-Gráfica de ajuste de la entrada.....	59
Figura 3.17.- Gráfica de ajuste de la salida.	61
Figura 3.18.- Álabe resultante de la parametrización.....	63
Figura 3.19.- Banda y corona con fronteras del álabe real y álabe analítico.	64
Figura 3.20.- Malla del álabe analítico.	65
Figura 3.21.- Esquema de un perfil aerodinámico con sus componentes. [14].	67
Figura 3.22.- Ecuaciones básicas para formar un perfil [14].....	68
Figura 3.23.- Álabe analítico con el perfil NACA 5.....	71
Figura 4.1.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la corona.	72
Figura 4.2.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la corona.	73
Figura 4.3.- Gráficas del porcentaje de error en la envergadura del álabe en la corona.	74
Figura 4.4.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la banda.	75
Figura 4.5.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la banda.	76
Figura 4.6.- Gráfica del porcentaje de error de la envergadura del álabe en la banda.	77
Figura 4.7.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la entrada.	78
Figura 4.8.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la entrada.....	79
Figura 4.9.- Gráficas del porcentaje de error de la envergadura del álabe en la entrada.	80
Figura 4.10.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la salida.....	81
Figura 4.11.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la salida.....	82
Figura 4.12.- Gráficas del porcentaje de error de la envergadura del álabe en la salida.	83
Figura 4.13.-Error en las superficies del álabe de la turbina Francis 99.	84
Figura 4.14.- Diferentes vistas del álabe analítico, a) plano z+, b) plano y+, c) plano x+ y d) vista isométrica.....	86
Figura 4.15. Estructura del álabe analítico.....	87
Figura 4.16. Geometría del rodete analítico en Gambit.	88
Figura 4.17.- Interior del rodete analítico de la Turbina Francis 99.....	89
Figura 4.18.- Interior del Rodete de la Turbina Francis 99.....	89
Figura 4.19.- Comparación de rodetes de la Turbina Francis 99.	91
Figura 4.20. Impresión 3D del rodete analítico de la turbina Francis 99.	92
Figura 4.21. Impresión 3D del rodete real de la turbina Francis 99.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 Ángulos de la banda.....	41
TABLA 3.2 Ángulos de la corona.....	46
TABLA 3.3 Ángulos de la entrada.....	51
TABLA 3.4 Ángulos de la salida.....	52
TABLA 3.5 Resultados del polinomio de la banda.....	56
TABLA 3.6 Resultados del polinomio de la corona.....	58
TABLA 3.7 Resultados del polinomio de la entrada.....	60
TABLA 3.8 Resultados del polinomio de la salida.....	62
TABLA 3.9 Valores de m y kl	70

RESUMEN

En la actualidad a nivel nacional en México como a nivel estatal en Michoacán se encuentra un gran potencial hídrico, sin embargo, esta energía no se aprovecha al máximo debido a que las pequeñas centrales hidroeléctricas se encuentran en estado de deterioro por lo que esto lleva a que tengan una eficiencia muy debajo de lo normal. Un gran problema es que su rehabilitación se tiene que realizar directamente con los fabricantes ya que se desconoce por completo los métodos empleados para la fabricación de las turbinas, lo cual nos lleva a que su costo sea muy elevado. Se trabajó en la parte fundamental de la Turbina Francis 99 que es el rodete el cual está constituido por álabes.

El álabe de un rodete es el elemento clave de la conversión de energía, su desgaste debido a la presencia de cavitación, sedimentos o fatiga como consecuencia de años de operación de la turbina provoca fallas en el rodete que podrían causar inactividad en la planta. La urgencia de su reconstrucción o reparación requiere de los dibujos de diseño sin embargo no suelen contener información técnica detallada y por esta razón su reparación es manual utilizando plantillas 2D, este proceso ha influido en la geometría del álabe al acumularse importantes desviaciones lo que provoca que la geometría real sea diferente a la original. El objetivo de este proyecto, es presentar una metodología en donde se realice una parametrización de la geometría del álabe, solamente utilizando el marco. En esta investigación se tratará de utilizar los menos parámetros posibles para poder llegar a la geometría del álabe real. Se utilizarán softwares mediante la metodología a realizar los cuales son Gambit y Matlab. La manipulación de los parámetros de diseño de la geometría del álabe puede brindar una gran variedad de perfiles de álabes para este tipo de turbinas hidráulicas.

PALABRAS CLAVE

1. Parametrización.
2. Ajuste de curvas.
3. Polinomio de tercer grado.
4. Ángulos.
5. Álabe analítico.
6. Interpolación Transfinita.

ABSTRACT

Currently, at the national level in México and at the state level in Michoacán, there is great water potential, however, this energy is not used to the maximum because the small hydroelectric plants are in a state of deterioration, which leads to that have an efficiency well below normal. A big problem is that its rehabilitation has to be carried out directly with the manufacturers since the methods used to manufacture the turbines are completely unknown, which leads to their cost being very high. Work was done on the fundamental part of the Francis 99 Turbine, which is the impeller which is made up of blades.

The blade of a runner is the key element of energy conversion; its wear due to the presence of cavitation, sediment or fatigue as a result of years of turbine operation causes failures in the runner that could cause plant downtime. The urgency of its reconstruction or repair requires design drawings, however they do not usually contain detailed technical information and for this reason its repair is manual using 2D templates, this process has influenced the geometry of the blade by accumulating important deviations, which causes the real geometry to be different from the original. The objective of this project is to present a methodology where a parameterization of the blade geometry is carried out, only using the framework. In this research we will try to use the fewest possible parameters in order to arrive at the geometry of the real blade. Software will be used through the methodology to be carried out, which are Gambit and MATLAB. Manipulation of the design parameters of the blade geometry can provide a wide variety of blade profiles for this type of hydraulic turbines.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La energía hidráulica es una fuente de energía limpia y renovable que aprovecha la fuerza de los ríos y saltos de agua para generar electricidad, aunque presenta desafíos como los costos iniciales elevados, su capacidad para proporcionar un suministro estable y eficiente de energía la convierte en una opción crucial en la matriz energética mundial.

Rehabilitar turbinas en centrales hidroeléctricas más antiguas es una inversión crucial para mantener y mejorar la eficiencia de generación de energía. Al sustituir componentes clave como el rodete y los álabes, se pueden reducir las pérdidas de energía, minimizar la cavitación y disminuir los costos de mantenimiento a largo plazo. Este proceso no solo prolonga la vida útil de las instalaciones, sino que también optimiza su rendimiento y confiabilidad.

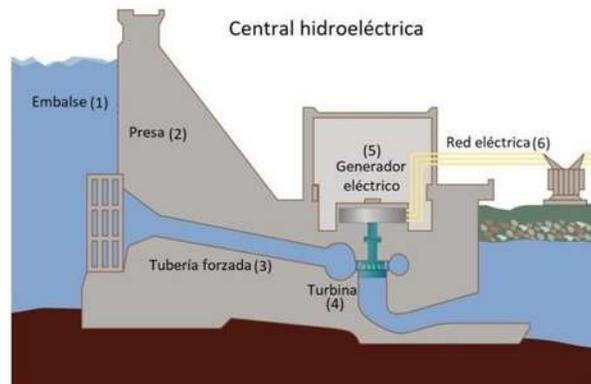


Figura 1.1- Esquema de una Central Hidroeléctrica [1].

El monitoreo y análisis del comportamiento de una turbina hidroeléctrica son esenciales para garantizar que funcione de manera óptima y eficiente. Conocer y gestionar los parámetros clave permite reducir costos de mantenimiento. La implementación de

sistemas de control en tiempo real y el uso de técnicas avanzadas de análisis y modelado son herramientas cruciales para alcanzar estos objetivos.

La turbina Francis es una opción excelente para proyectos hidroeléctricos debido a su alta eficiencia, durabilidad y capacidad de adaptación a diferentes condiciones de operación. A pesar de los altos costos iniciales, la inversión se ve compensada por su rendimiento superior y su larga vida útil. Estas turbinas, cuando se diseñan y mantienen adecuadamente pueden proporcionar un suministro confiable y eficiente de energía durante muchas décadas.



Figura 1.2.- Turbina Francis [2].

El rodete y los álabes de una turbina son componentes críticos en la conversión de energía hidráulica a energía mecánica. El diseño eficiente de los álabes, incluyendo su ángulo, curvatura y materiales, es esencial para maximizar la eficiencia de la turbina y minimizar los problemas como la cavitación. Al optimizar estos elementos, las turbinas pueden operar de manera más efectiva, asegurando una generación de energía confiable y duradera.

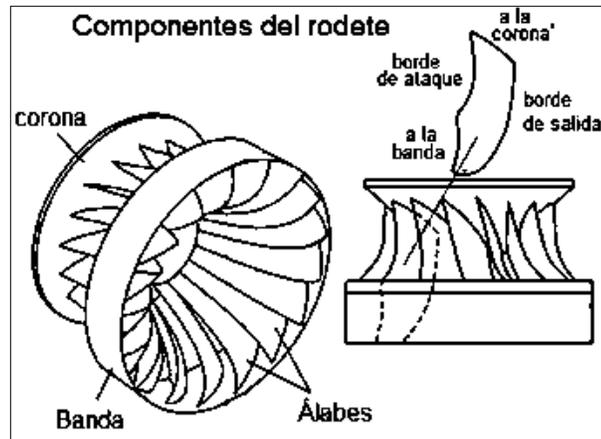


Figura 1.3.- Componentes del rodete de Turbina Francis [3].

La rehabilitación de las turbinas, especialmente la sustitución de componentes clave como el rodete, puede tener un impacto significativo en la eficiencia y el rendimiento energético de estas máquinas. Al reemplazar partes desgastadas o dañadas, se puede restaurar la capacidad de generar energía de manera más eficiente.

La importancia de este estudio es el hecho de comprender las variables involucradas en el diseño paramétrico de los álabes del rodete de la turbina Francis 99, aportando importantes herramientas que pueden ser utilizadas en futuros estudios.

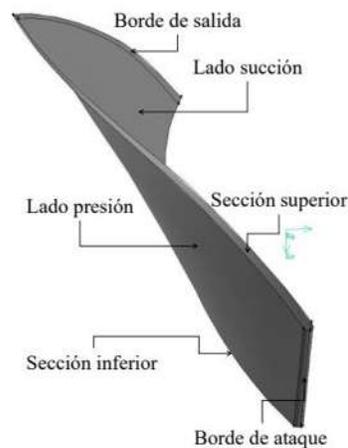


Figura 1.4.-Álabe de turbina Francis [3].

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las centrales hidroeléctricas ofrecen un gran potencial de crecimiento en la generación de electricidad, especialmente cuando se combinan con nuevos conocimientos y tecnologías que permiten un desarrollo más eficiente, sostenible y adaptable a las condiciones cambiantes del medio ambiente y demanda energética.

Las mini centrales hidroeléctricas cuentan con turbinas tipo Francis en las cuales ha disminuido su eficiencia. El mantenimiento de estas turbinas tiene un costo elevado, sin embargo, es necesario para que su rendimiento mejore.

La turbina Francis tiene un componente muy importante llamado rodete, aquí es donde se lleva a cabo el proceso de la conversión de energía, los resultados de las rehabilitaciones modernas muestran que los diseños nuevos de los rodetes instalados en las estructuras que ya existen, si pueden mejorar la potencia de la planta.

Por lo tanto, gran parte de la energía que se genera en la turbina hidráulica depende de la conversión de energía del rodete, el cual se determina por la forma geometría de los álabes del rodete.

Si bien la aproximación paramétrica por secciones ofrece una forma flexible de describir los perfiles de los álabes del rodete, también presenta desafíos en términos de complejidad y sobrecarga de parámetros. La investigación continua busca superar estas limitaciones y desarrollar enfoques más eficientes y efectivos para el diseño óptimo de los álabes del rodete de la turbina Francis 99.

El enfoque paramétrico de los álabes del rodete de una turbina es una respuesta eficaz a la falta de datos proporcionados por los fabricantes, permitiendo a los investigadores desarrollar soluciones innovadoras y optimizadas que pueden mejorar el rendimiento de las turbinas hidroeléctricas.

En México el 12% de la generación total de energía en México la proporcionan 60 centrales hidroeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mediante la cual se obtiene mediante turbinas hidráulicas de las cuales la mayoría son tipo Francis.

Por lo tanto, utilizar el marco del álabe recto como base para la variación de los parámetros de la forma geométrica de los álabes de la turbina Francis 99 puede ser un enfoque eficaz para lograr el diseño deseado con la menor cantidad de parámetros posibles. Este enfoque simplificado puede facilitar la optimización del diseño y ayudar a garantizar la eficiencia y la funcionalidad del rodete.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las turbinas hidráulicas son elementos esenciales en las centrales hidroeléctricas, ya que muestran un alto rendimiento, las turbinas son capaces de convertir más del 90% de la energía cinética del agua en energía mecánica.

Las pérdidas de energía son inevitables en cualquier máquina, incluidas las turbinas hidráulicas. Estas pérdidas toman un papel importante en la determinación del rendimiento global de la turbina. Uno de los principales tipos de pérdidas en las turbinas hidráulicas está relacionado con el rodete. El choque de entrada, que ocurre cuando el agua fluye hacia el rodete, y el cambio brusco de velocidad de los filetes de agua al salir y chocar con los bordes de los álabes del rodete, puede causar pérdidas significativas de energía.

Reducir estas pérdidas y mejorar el rendimiento de la turbina es un objetivo clave en el diseño y la operación de las centrales hidroeléctricas. Esto se puede lograr mediante el diseño cuidadoso de los componentes de la turbina y la optimización de la geometría de los álabes.

El conjunto de todas las pérdidas determina el rendimiento de la turbina, en las turbinas actuales el rendimiento es elevado y oscila entre el trabajo 85 y 90%, en una misma turbina los rendimientos pueden ser variables porque dependen naturalmente del caudal ya que la altura es constante.

Por lo tanto, obtener un nuevo perfil del álabe para una turbina Francis 99 mediante el estudio y la variación de los parámetros de la forma geométrica de los álabes establecidos en el rodete es una estrategia prometedora para mejorar el rendimiento de estas turbinas. Este enfoque paramétrico puede ayudar a adaptar las turbinas Francis para que sean más eficientes y competitivas en el mercado de la energía, permitiendo que las centrales hidroeléctricas pequeñas respondan mejor a las fluctuaciones de la demanda de energía y aprovechen de manera más efectiva los recursos hídricos disponibles.

La falta de acceso a los planos de diseño de los componentes de las turbinas puede ser un desafío significativo para la rehabilitación y el desarrollo de nuevas mejoras en estas máquinas. En ausencia de esta información detallada, la búsqueda de alternativas como el

uso de parámetros geométricos y herramientas numéricas para desarrollar nuevos perfiles de álabes del rodete es una estrategia sólida. El enfoque en los parámetros geométricos de diseño de los álabes del rodete es una forma eficaz de abordar este problema, ya que permite explorar y ajustar la geometría de los álabes sin depender exclusivamente de los planos de diseño proporcionados por fabricantes.

1.3 HIPÓTESIS

Utilizando la parametrización podemos obtener una nueva geometría de los álabes del rodete de la turbina tipo Francis 99.

Siento entonces posible estudiar las características del diseño obtenido del álabe del rodete en base a los parámetros de diseño.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Definir los parámetros de la forma geométrica de los álabes del rodete de la turbina Francis 99.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar las diferentes configuraciones de rodetes de turbinas hidráulicas
- Estudiar los principales parámetros de diseño para la construcción del álabe del rodete de la turbina Francis 99.
- Variar los parámetros de diseño del álabe de la turbina Francis 99.
- Construir diferentes configuraciones de álabes para el rodete de la turbina Francis 99.
- Impresión 3D del rodete de la turbina Francis 99.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1. ENERGÍA HIDRÁULICA

La energía hidráulica es aquella que aprovecha el movimiento del agua para generar energía, se obtiene a partir del aprovechamiento de la energía cinética y la energía potencial del agua.

La principal aplicación de la energía hidráulica actualmente es la obtención de electricidad, la obtención de la energía hidráulica puede variar, puesto que el movimiento del agua se puede obtener de distintas formas.

Construcción de presas

La construcción de presas es una forma muy utilizada para generar electricidad a través de la energía hidroeléctrica. Se construye una estructura que retiene el agua de un río o arroyo, creando un embalse, puede ser de tipos diferentes como de arco o enrocado, o de gravedad, dependiendo del terreno y del caudal del río.

El embalse permite almacenar grandes cantidades de agua, y el nivel del agua puede ser controlado por medio de compuertas o válvulas para regular el flujo. Cuanto mayor sea el salto, más energía se puede generar. El agua liberada fluye por medio de una tubería de presión hacia la sala de máquinas, ahí el agua impacta sobre la turbina, haciendo que gire. La turbina está conectada a un generador, el cual convierte energía mecánica en energía eléctrica. La electricidad generada por el generador suele tener un voltaje bajo.



Figura 2.1.- Construcción de presas [4].

Corriente de ríos

Es un método que se utiliza para la generación de electricidad, la corriente de los ríos es la encargada de mover la turbina, pero aquí un inconveniente es la capacidad de controlar el flujo de agua.



Figura 2.2.-Corriente de ríos [4].

2.2. CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Una central hidroeléctrica es una instalación diseñada para convertir la energía del agua en electricidad y su funcionamiento se basa en componentes clave.

Las principales características de una central hidroeléctrica desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son la potencia y la energía.

●FUNCIONAMIENTO

La presa acumula agua en el embalse, que puede ser una reserva, creando una diferencia de altura que se utilizara para generar energía.

A través de canales y túneles, el agua se dirige desde el embalse a las turbinas, el flujo de agua impacta a las turbinas haciéndolas girar.

La energía mecánica de las turbinas se transfiere al generador eléctrico rotativo, que convierte esta energía en electricidad.

El agua que ha pasado por las turbinas se libera a través del canal de descarga, regresando al cauce del río.

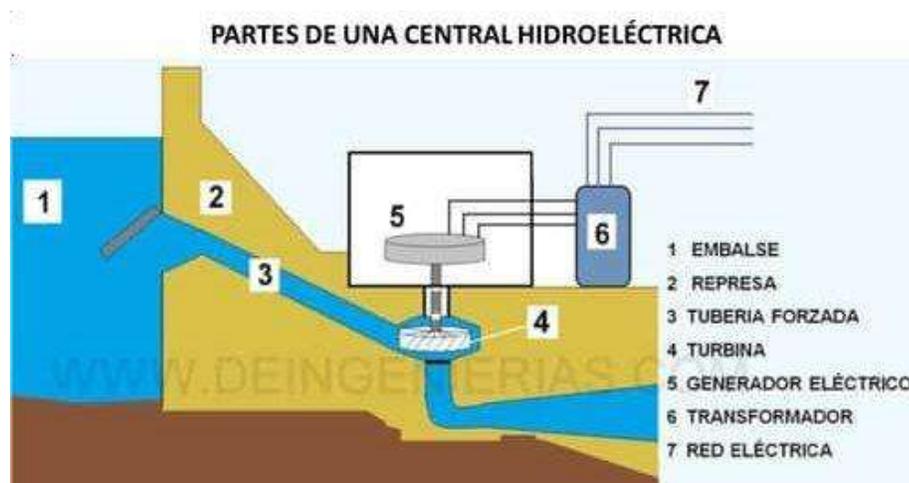


Figura 2.3.- Partes de una central hidroeléctrica [2].

2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS

Las turbinas pueden clasificarse de acuerdo a su grado de reactividad, hay dos tipos: de acción y de reacción.

- **Acción:** la incidencia del agua y el sentido del giro del rodete coincide con el punto en el que se produce el choque del agua sobre los álabes. Toda la energía cinética con la que llega el agua a la turbina es utilizada para su giro [2].

- **Reacción:** el sentido del giro del rodete no coincide con la dirección de entrada y salida del agua. Estas turbinas utilizan energía cinética y de presión para mover el rodete y la presión del agua a la salida es inferior a la de la entrada [2].

Las turbinas también pueden clasificarse según la dirección en que entra el agua:

- **Turbinas Radiales-axiales:** el agua entra en el rodete de forma radial para posteriormente cambiar de dirección y salir paralela al eje de rotación de la turbina, es decir axial o en la dirección del eje [2].

- **Turbinas axiales:** el agua entra y sale paralela al eje de rotación de la turbina [2].

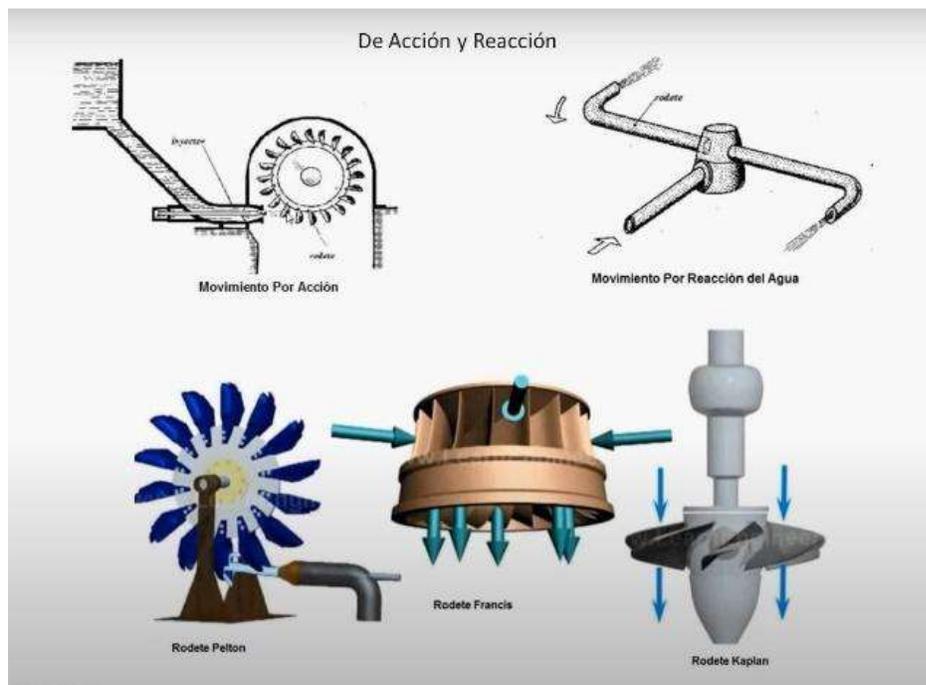


Figura 2.4.- Clasificación de Turbinas de Acción y Reacción [2].

TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS

- Pelton
- Kaplan
- Francis

2.3.1. TURBINA PELTON

Es uno de los tipos de turbinas hidráulicas más eficientes, es una turbomáquina motora de flujo tangencial, admisión parcial y de acción. Consiste en un rodete dotado de cucharas en su periferia, las cuales están especialmente realizadas para convertir la energía de un chorro de agua que incide sobre las cucharas [5].

La turbina Pelton está diseñada para explorar grandes saltos hidráulicos de bajo caudal. Existen turbinas Pelton de diversos tamaños, hay turbinas de varias toneladas montadas en vertical sobre cojinetes hidráulicos en centrales hidroeléctricas. Las turbinas Pelton más pequeñas sólo de pocos centímetros se usan en equipamientos domésticos [5].



Figura 2.5.- Turbina Pelton [5].

2.3.1. TURBINA KAPLAN

Son unas de las turbinas más eficientes de agua, son de reacción y de flujo axial, se emplean en saltos de pequeña altura y grandes caudales, las amplias palas o álabes de la turbina son impulsadas por agua a alta presión liberada por una compuerta [5].

Los álabes del rodete de la turbina Kaplan son siempre regulables y tienen la forma de una hélice, mientras que los álabes de los distribuidores pueden ser fijos o regulables, si ambos son regulables se dice que es una turbina Kaplan verdadera, si solo son regulables los álabes del rodete se dice que es una turbina Semi-Kaplan [5].

Las turbinas Kaplan son de admisión axial, mientras que la Semi-Kaplan pueden ser de admisión radial o axial [5].



Figura 2.6.- Turbina Kaplan [5].

2.3.2. TURBINA FRANCIS

La turbina Francis fue desarrollada por James B. Francis, se trata de una turbomáquina motora a reacción y de flujo mixto. Son turbinas hidráulicas que se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los dos metros hasta cientos de metros [5].

Las turbinas hidráulicas eran utilizadas para accionar molinos de diversos tipos, aunque eran muy ineficientes. James B. Francis mejoró estos diseños y desarrolló una turbina que contaba con el 90% de eficiencia, aplicando principios y métodos de prueba produjo la turbina más eficiente, esos métodos matemáticos y gráficos mejoraron el nivel de desarrollo alcanzado en lo referente al diseño de las turbinas, siendo así que sus métodos analíticos permitieran diseños de turbinas de alta eficiencia [5].

COMPONENTES DE LA TURBINA FRANCIS

- CÁMARA ESPIRAL

Su función es que el fluido a la entrada del rodete se distribuya uniformemente, la forma en espiral se debe a que la velocidad del fluido debe permanecer constante, la sección transversal circular es la más utilizada [5].

- PREDISTRIBUIDOR

Se compone por álabes fijos, su función es estructural que es mantener la estructura de la caja espiral y concederle rigidez transversal [5].

- DISTRIBUIDOR

Se constituye por álabes móviles directores, su función es dirigir el agua hacia los álabes del rodete y regular el caudal admitido, modificando la potencia de la turbina de manera que se ajuste en lo posible a las variaciones de carga de la red eléctrica [5].

- ROTOR O RODETE

Aquí se lleva a cabo el intercambio de energía entre la máquina y el fluido, la energía del fluido al momento de pasar por el rodete es una suma de energía cinética, potencial y de presión, la turbina convierte esta energía en energía mecánica que se manifiesta en el giro del rodete [5].

El rodete puede tener diversas formas dependiendo del número específico de revoluciones para el cual esté diseñada la máquina, esto dependerá del salto hidráulico y del caudal de diseño [5].

●TUBO DE ASPIRACIÓN

Se encuentra a la salida de la turbina, su función es darle continuidad al fluido y se recupere el salto perdido en las instalaciones que están por encima del nivel de agua a la salida. Se construye de forma de difusor para que se genere un efecto de aspiración [5].

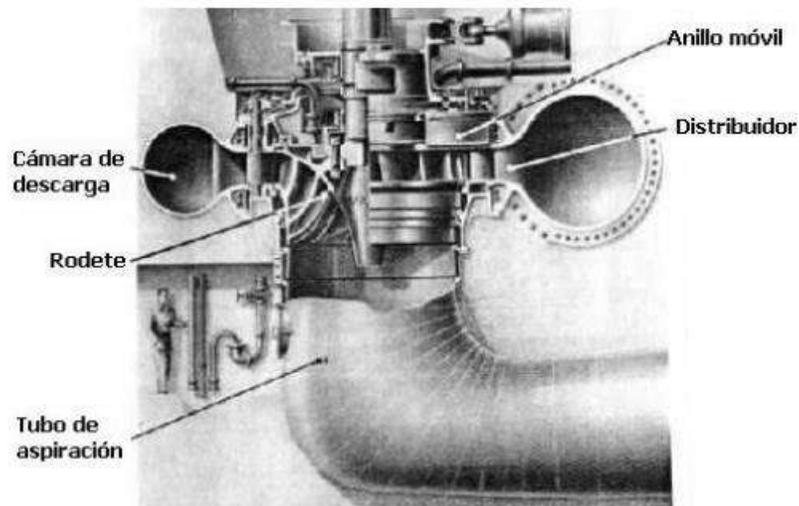


Figura 2.7.- Componentes de una Turbina Francis [5].

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

VENTAJAS

- Tienen un bajo costo de mantenimiento con respecto a otras turbinas.
- Pueden ser instaladas en espacios reducidos por sus pequeñas dimensiones.
- Su diseño es robusto, por lo que duran décadas en funcionamiento.
- Su diseño hidrodinámico permite bajas pérdidas, así que se garantiza un alto rendimiento.

DESVENTAJAS

- Su diseño no está recomendado para alturas mayores a 800 m.
- Se necesita controlar el comportamiento de la cavitación.

- La entrada de agua sucia con partículas puede generar importantes problemas a la turbina.

- Son muy costosas de diseñar, fabricar e instalar.

2.4. APLICACIONES DE LAS TURBINAS FRANCIS

Se utilizan para producir electricidad, se diseñan de forma individual para cada aprovechamiento hidroeléctrico para que se logre el máximo rendimiento posible.

Suelen utilizarse también para el bombeo y almacenamiento hidroeléctrico, donde se utilizan dos embalses, uno a cota superior y otro inferior que sería el contra embalse.

El embalse superior se llena mediante la turbina, aquí tiene el funcionamiento como bomba, esto durante los periodos de baja demanda eléctrica, y después se usa como turbina para generar energía eléctrica durante la alta demanda eléctrica.

En algunas ocasiones se han fabricado turbinas Francis para la producción individual de energía para alturas menores de 52 metros.

Las turbinas Francis están diseñadas individualmente para que cada sitio opere con la mayor eficiencia posible para un flujo de agua, generalmente más del 90%. La flexibilidad de estas turbinas las convierte en una opción excelente para adaptarse a variaciones en la demanda energética y a la topografía local.

2.5. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LAS TURBINAS TIPO FRANCIS

La turbina Francis es una de las turbinas hidráulicas más comunes, esta turbina es radial, de flujo mixto [2].

Una turbina Francis está compuesta principalmente de una cámara de descarga, que es por donde entra el agua, una voluta o cámara espiral, encargada de la distribución uniforme del agua, un rodete constituido por un número determinado de álabes y un tubo de aspiración, por el cual sale el agua de la turbina [2].

En las turbinas Francis el agua que viene del ducto entra perpendicularmente al eje de la turbina y sale paralela a este. El agua entra a la turbina por la cámara de descarga, de allí va al rodete el cual es impulsado por el agua y comienza a girar, para controlar el caudal de agua en el rodete se usan unas paletas directrices de manera circular, el cual se denomina distribuidor, estas paletas se mueven sobre un pivote individual [2].

Las paletas directrices del distribuidor son accionadas mediante un anillo móvil que conecta todas las paletas, el anillo móvil es a su vez accionado mediante el regulador de velocidad de la turbina. Luego de pasar por el rodete, el agua sale de la turbina por el tubo de aspiración [2].



Figura 2.8.- Turbina Francis [2].

2.6. ÀLABES DEL RODETE

En las máquinas motoras, ya sean turbinas hidráulicas o térmicas, el rodete transforma parte de la entalpía del fluido en energía mecánica en el eje [3].

Se denomina álabe a cada una de las paletas curvas de una turbina, los álabes están sometidos a grandes esfuerzos de fatiga al trabajar en condiciones extremas donde soportan grandes fuerzas vibratorias [3].

Los álabes forman parte de las turbinas de gas, turbinas de vapor, turbinas hidráulicas, turbocompresores, ventiladores y otros equipos rotatorios [3].

Los álabes desvían el flujo de corriente para intercambiar cantidad de movimiento del fluido con un momento de fuerza en el eje [3].

La superficie que recibe una fuerza mayor es llamada zona de presión, por el contrario, aquella en que la fuerza ejercida por el flujo es menor, es llamada zona de succión.



Figura 2.9- Lados del álabe [3].

2.7. ESTADO DEL ARTE

Las técnicas para la reconstrucción de un álabe consisten en generación de una superficie a partir de un conjunto de perfiles, esto depende del número y características de las secciones, así como de las técnicas que se utilizan para ensamblar los perfiles.

NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)

El método por superficies se obtiene generalmente de una formulación analítica, lo que limita su interés ya que no se tiene interacción con los parámetros reales de la geometría del álabe para su manipulación, este método lo utilizan especialistas en el tema.

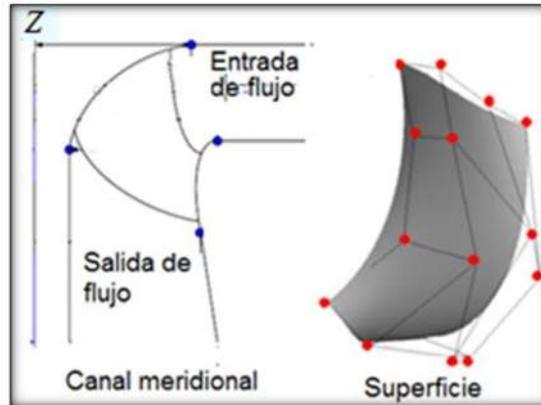


Figura 2.10. Aproximación por superficies de un álabe de una turbina hidráulica Francis [6].

- Luis Ferrando López en 2006 realizó la parametrización superficial y metodología de diseño óptimo en turbinas hidráulicas.

Introdujo una definición paramétrica no tradicional de las formas de los álabes, el uso de las superficies en lugar de curvas seccionales reduce el número de parámetros de diseño, esta reducción de parámetros es significativa la forma de los álabes se describe de forma realista, después esta representación geométrica la utilizó en una metodología de optimización de diseño.

- Ece Ayli en 2016, determinó y generalizó los efectos de los parámetros de diseño en el rendimiento del rodete de la turbina Francis.

Se examinaron cuatro rodetes de turbinas para obtener características universales para los parámetros, se variaron los parámetros de diseño hidráulico dentro de un rango definido y se evaluaron sus efectos sobre el rendimiento.

- Jair Alexander Yáñez Sánchez en marzo 2017, obtuvo un diseño paramétrico de álabes para turbinas Francis, aplicó el modelo de Kristine Gjosaeter (2011) y lo adaptó a condiciones de operación, y uso el modelo de erosión de Finii para un perfil en dos dimensiones obtenido del modelo paramétrico para mostrar idoneidad de la simulación.

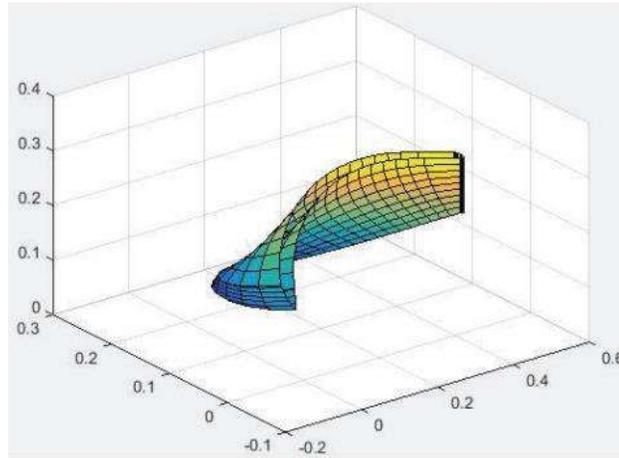


Figura 2.11.- Superficie de álabe [7].

●Giovanni Delgado Sánchez en Julio 2021, realizó la metodología para la reconstrucción de un rodete tipo Francis con la utilización de herramientas numéricas.

Se desarrolló una metodología completa de reconstrucción numérica de los álabes en 3 dimensiones, en donde la definición geométrica de los álabes del rodete dependiera de pocos parámetros de diseño.

Se utilizó el método de la interpolación Transfinita (TFI), que es un método para la generación de mallas algebraicas.

Ajustaron el modelo numérico al modelo físico de los álabes del rodete.

Se hizo la reconstrucción del álabe de la turbina Francis 99.

Las Figuras 2.12 y 2.13, ilustran las distribuciones de error de forma entre las superficies analíticas y las superficies reales del álabe del rodete, el error máximo fue de 1 mm.

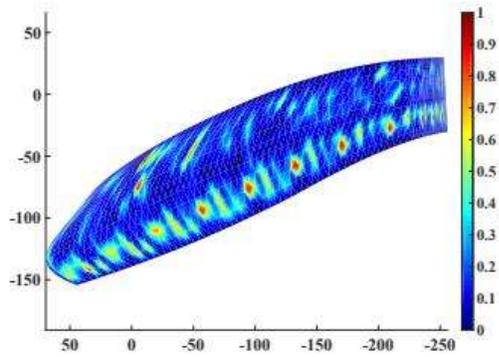


Figura 2.12. Distribución de error en lado presión [3].

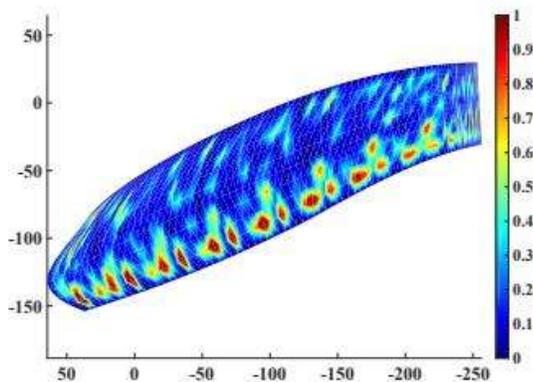


Figura 2.13. Distribución de error lado succión [3].

- Shingai en 2006 utilizó los perfiles NACA para definir las secciones del álabes con alrededor de 100 parámetros.

- Edwin Román Hernández; Víctor Iván Moreno Oliva; Eduardo Campos Mercado, en 2022 realizaron una metodología que permite estimar los parámetros geométricos asociados a la nomenclatura de los perfiles de la serie NACA de cuatro dígitos [8].

La caracterización se realiza a partir de una nube de puntos del perfil aerodinámico bajo estudio obtenida por medio de un perfilómetro óptico, mediante interpolación polinomial se caracteriza el intradós y extradós obteniendo curvas paramétricas para calcular la curvatura máxima, su posición y el espesor máximo del perfil bajo prueba [8].

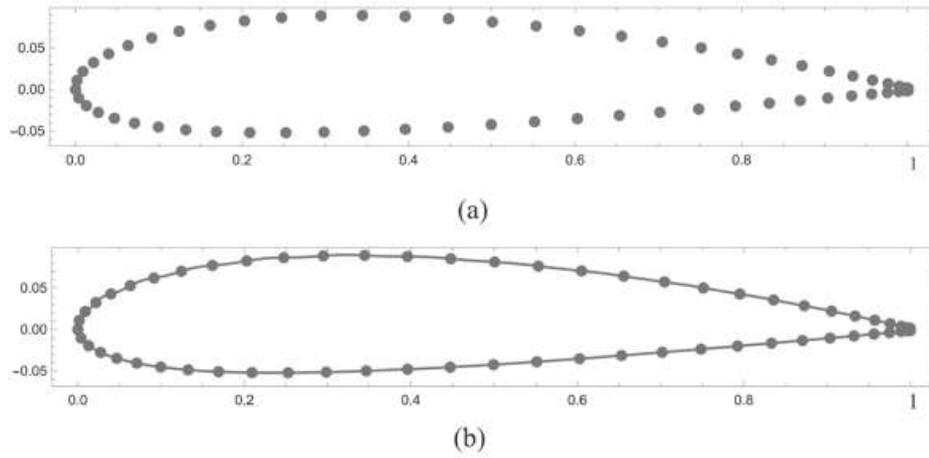


Figura 2.14. (a) Datos obtenidos experimentalmente con un perfilómetro, (b) curva paramétrica ajustada por interpolación polinomial sobre el perfil NACA 2414 [8].

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE LA RECONSTRUCCIÓN DEL ÁLABE DE LA TURBINA FRANCIS 99.

El enfoque de la reconstrucción para llegar al perfil geométrico del álabe del rodete de la turbina Francis 99 mediante el marco de un álabe recto es, sin duda, una estrategia innovadora. Esta metodología puede proporcionar varias ventajas significativas en términos de simplicidad y eficiencia en el diseño, que son cruciales en la ingeniería moderna. Aquí hay algunos puntos clave que explican cómo y por qué este enfoque es beneficioso:

1. Simplicidad en el Diseño

- **Reducción de la complejidad geométrica:** El uso de un álabe recto como marco de referencia simplifica las ecuaciones y las representaciones geométricas necesarias para describir el perfil del álabe. Esto hace que el diseño inicial sea más directo y menos propenso a errores.
- **Facilidad de Modificación:** Un álabe recto es más fácil de ajustar y modificar durante el proceso de diseño. Las modificaciones pueden implementarse y verificarse rápidamente sin la necesidad de recalcular complejas geometrías curvas.

2. Eficiencia en el Proceso de Diseño

- **Ahorro de Tiempo:** Al simplificar la geometría inicial, se reduce el tiempo necesario para crear y ajustar el diseño del álabe. Esto permite una iteración más rápida y un desarrollo más ágil del proyecto.
- **Optimización de Recursos:** La simplificación del diseño inicial puede llevar a una mejor utilización de los recursos computacionales y humanos. Menos tiempo invertido en la creación y ajuste del diseño significa más tiempo disponible para la optimización y el análisis detallado del rendimiento.

3. Mejor Control y Precisión

- **Mejora en la Calidad del Diseño:** Un enfoque más simple y directo permite una mayor precisión en la definición del perfil del álabe. Esto puede traducirse en una mejor adaptación del diseño a las condiciones operativas específicas de la turbina Francis.
- **Facilidad en el Análisis y Validación:** Con un diseño más sencillo, el análisis computacional y experimental del rendimiento del álabe puede realizarse de manera más eficiente y precisa, asegurando que el perfil final cumpla con los requisitos de eficiencia y durabilidad.

4. Innovación en el Proceso de Ingeniería

- **Adopción de Nuevas Metodologías:** El uso de un marco de álabe recto para la reconstrucción del perfil geométrico puede abrir nuevas posibilidades en el diseño y la fabricación de álabes, promoviendo la innovación en el campo de la ingeniería de turbinas hidráulicas.
- **Integración con Tecnologías Avanzadas:** Este enfoque puede ser particularmente beneficioso cuando se combina con tecnologías avanzadas como la fabricación aditiva y la simulación computacional, permitiendo diseños más personalizados y optimizados.

La descripción general de la metodología utilizada para llevar a cabo esta parametrización utilizando herramientas numéricas tiene como primer lugar la definición de los parámetros clave en donde se pueden incluir la envergadura, el radio, el ángulo, la curvatura entre otros, como segundo lugar la selección del álabe recto como referencia inicial para la parametrización, este álabe servirá como plantilla básica que se modificara mediante la variación de los parámetros definidos anteriormente, para después desarrollar el modelo paramétrico utilizando herramientas numéricas como el software Matlab y el software Gambit. Por último, se obtiene un diseño de álabe analítico.

Gambit es un software de preprocesamiento de malla utilizado principalmente en la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD). En este contexto Gambit se puede utilizar para crear la geometría del álabe de la turbina en un entorno CAD tridimensional y preparar la geometría y la malla para su posterior análisis en MATLAB.

Matlab es un entorno de programación y análisis numérico que ofrece diversas herramientas para el procesamiento de datos. En este contexto Matlab se puede utilizar para importar la geometría y malla del álabe generadas en Gambit, desarrollar algoritmos y scripts para parametrizar el álabe, lo que implica definir y ajustar parámetros que describen su forma y características.

3.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

En la Figura 3.1, se muestra el diagrama de las etapas a realizar de la reconstrucción del álabe de la turbina Francis 99.

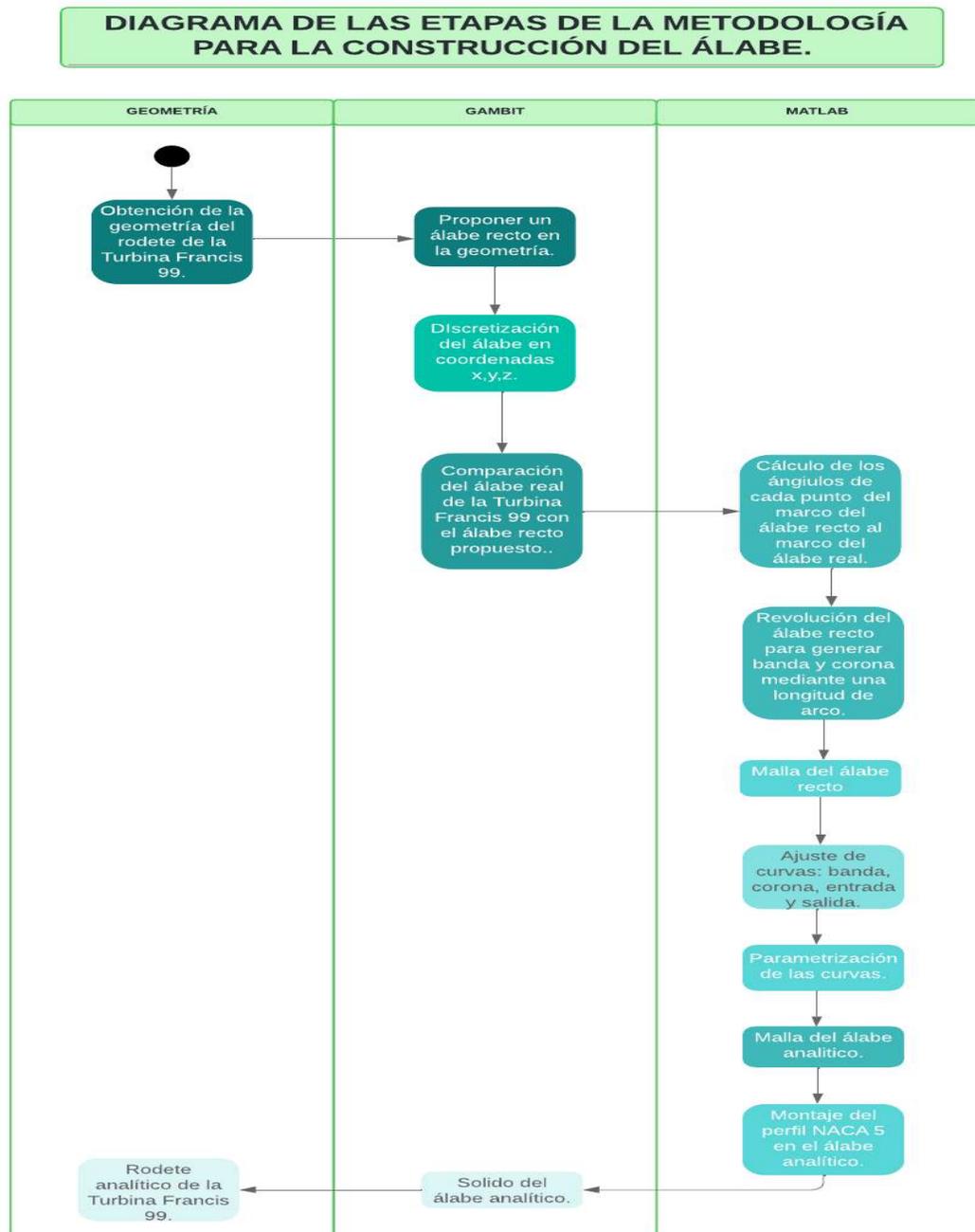


Figura 3.1.- Diagrama de las etapas de la metodología para realizar la construcción del álabe.

3.2. OBTENCIÓN DE DATOS DEL ÀLABE PRINCIPAL DEL RODETE.

3.2.1- ÀLABE DEL RODETE DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS 99.

Noruega se destaca como un líder mundial en la producción de energía renovable, principalmente gracias a su amplia red de plantas hidroeléctricas. Como el mayor productor de energía hidroeléctrica en Europa y el sexto más grande del mundo, el país ha establecido una infraestructura sólida y avanzada en este sector.

El Centro de Energía Hidroeléctrica de Noruega

El Centro de Energía Hidroeléctrica de Noruega juega un papel crucial en la gestión y el desarrollo de las turbinas hidroeléctricas, como la turbina Francis 99. Este centro no solo se encarga del mantenimiento y la optimización de estas turbinas, sino que también impulsa la investigación y el desarrollo mediante la provisión de recursos y datos accesibles a la comunidad científica y de ingeniería.

Plataforma Abierta de Diseño

Una de las iniciativas más destacadas del Centro de Energía Hidroeléctrica de Noruega es la creación de una plataforma abierta que contiene el diseño completo de la geometría del rodete de la turbina Francis 99. Esta plataforma tiene varios objetivos y beneficios clave:

1. **Facilitar la Investigación:** Al proporcionar acceso abierto a los datos de diseño, los investigadores de todo el mundo pueden utilizar esta información para llevar a cabo estudios numéricos y experimentales. Esto fomenta la colaboración internacional y el avance en el conocimiento y la tecnología de las turbinas hidroeléctricas.
2. **Promover la Innovación:** Con la disponibilidad de datos precisos y detallados, los investigadores pueden explorar nuevas metodologías y técnicas de diseño, optimización y reconstrucción geométrica. Esto puede llevar a mejoras significativas en la eficiencia y el rendimiento de las turbinas.

3. **Educación y Formación:** La plataforma abierta también sirve como un recurso educativo valioso para estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería hidráulica. Pueden estudiar y analizar un diseño real de alta calidad, lo que les proporciona una comprensión más profunda de los principios y prácticas en la ingeniería de turbinas.
4. **Fomentar la transparencia y la colaboración:** Al hacer que los datos estén disponibles públicamente, el Centro de Energía Hidroeléctrica de Noruega promueve la transparencia en la investigación y la colaboración entre diferentes instituciones y países. Esto puede acelerar el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas y mejores prácticas en el sector.

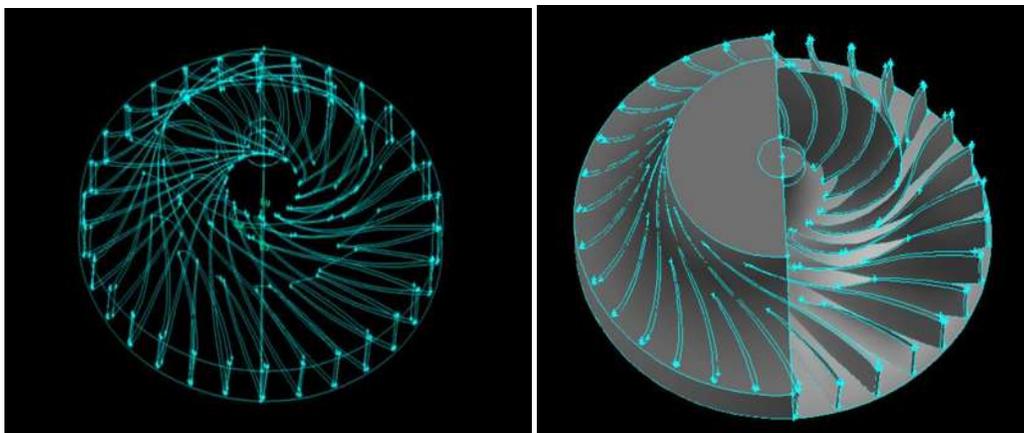


Figura 3.2.- Geometría del rodete de la turbina Francis 99.

3.2.2 PROPONER UN ÀLABE RECTO EN EL RODETE

Proponer un marco de un àlabe recto que esté conformado por las cuatro fronteras (entrada, salida, línea superior y línea inferior) es un enfoque meticuloso que puede simplificar y optimizar el proceso de reconstrucción del rodete de una turbina Francis. Este método tiene como objetivo abarcar precisamente las cuatro fronteras para una reconstrucción analítica exacta del rodete. Aquí se detallan los pasos de este enfoque:

Pasos en el proceso de reconstrucción utilizando el marco del álabe recto:

1 Definición de las fronteras:

- **Entrada:** La línea que marca el inicio del álabe donde el flujo de agua entra en contacto con el álabe.
- **Salida:** La línea que marca el final del álabe donde el flujo de agua sale del álabe.
- **Línea Superior (banda):** La frontera superior del álabe que está en contacto con la banda.
- **Línea inferior (corona):** La frontera inferior del álabe que está en contacto con la corona.

2 Creación del álabe recto inicial:

Modelar un álabe recto inicial que abarque exactamente las cuatro fronteras definidas anteriormente. Este modelo sirve como base para las transformaciones geométricas posteriores.

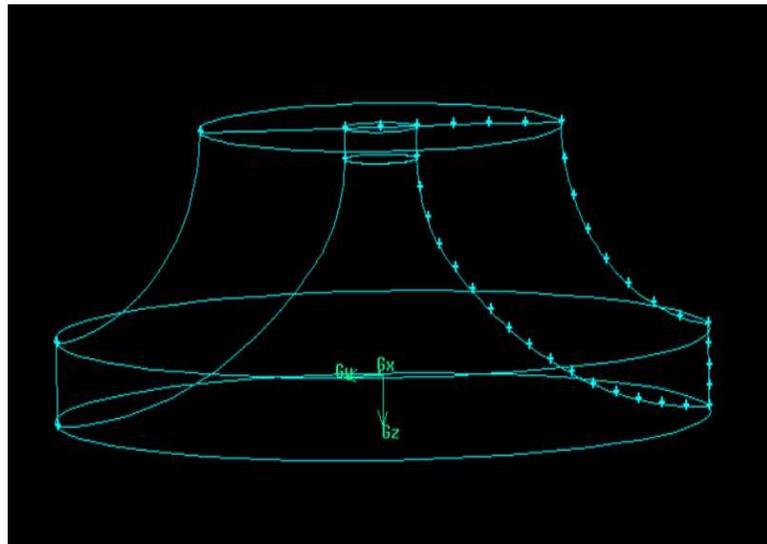


Figura 3.3.- Álabe recto propuesto en el rodete de la turbina Francis 99.

Se hizo la discretización del álabe recto propuesto en el rodete, la línea superior se discretizó en 107 puntos, la línea inferior se discretizó en 107 puntos, la línea de entrada en 10 puntos y la línea de salida en 37 puntos. Esta discretización se realizó tomando como referencia la investigación del Dr. Giovanni Delgado Sánchez [6], donde nos menciona que con esta cantidad de datos se describe correctamente el comportamiento de las cuatro fronteras de un marco de un álabe de geometría compleja.

3.2.3 EXTRACCIÓN DEL MARCO DEL ÀLABE REAL DE LA TURBINA FRANCIS 99

La extracción del marco de un álabe real de la turbina Francis 99 es un paso crucial en el proceso de reconstrucción del álabe mediante herramientas numéricas. Al partir de un álabe recto, se busca simplificar el proceso inicial de diseño y luego ajustar este marco para replicar la geometría compleja del álabe real. Este enfoque tiene varias ventajas, como se mencionó anteriormente, en términos de simplicidad, eficiencia y precisión.

En la Figura 3.4.- Se muestra el álabe real de la turbina Francis 99, el cual está conformado por 10 secciones las cuales son de color verde, el marco del álabe real está pintado de color amarillo, en el cual se observa la discretización en puntos.

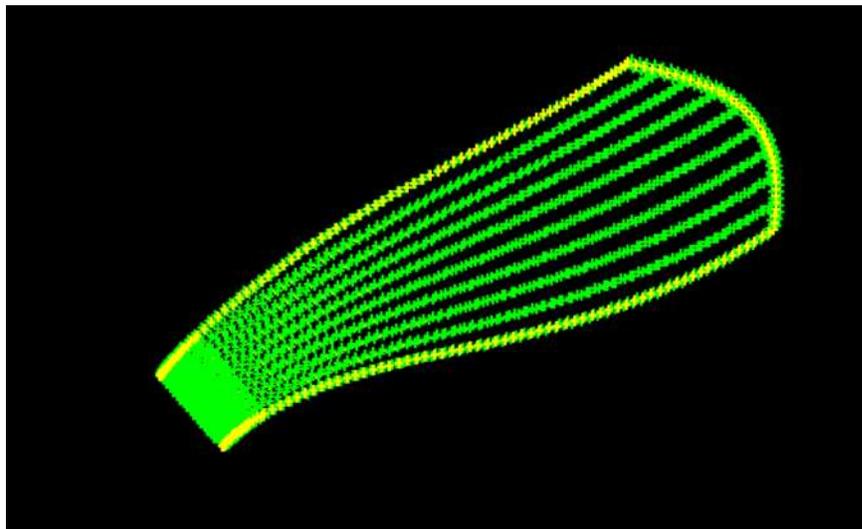


Figura 3.4.- Álabe real de la turbina Francis 99.

En la Figura 3.5, se muestra el marco del álabe recto en color verde y el marco del álabe real de la turbina Francis 99 en color azul.

Se puede observar las curvaturas del álabe real, lo cual hace ver la clara diferencia entre los marcos de los álabes, el objetivo de este trabajo es que del marco del álabe recto se pueda llegar al marco del álabe real

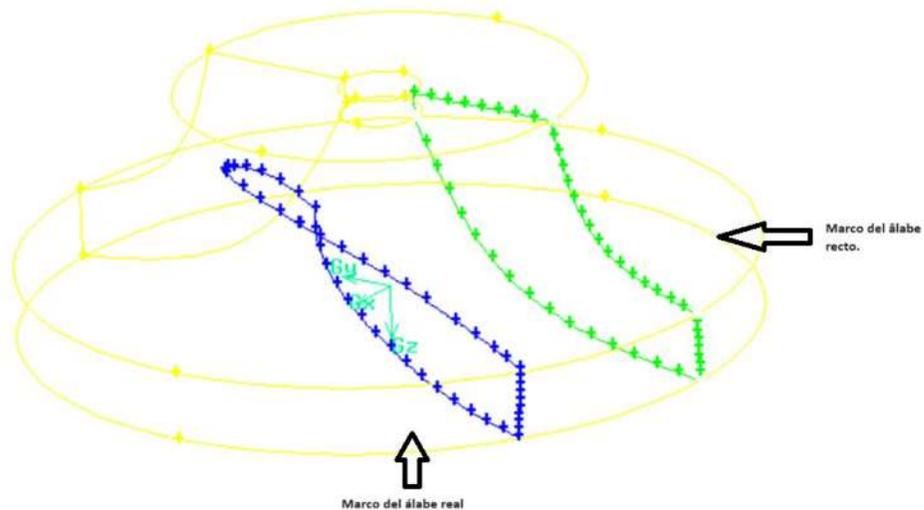


Figura 3.5.- Marco del álabe real y marco del álabe recto de la turbina Francis 99.

3.3 GENERACIÓN DEL RODETE Y EL MARCO ANALITICO DE LA TURBINA FRANCIS 99.

Para obtener el rodete analítico se procedió a realizar una discretización de las cuatro fronteras del álabe recto como se mencionó anteriormente. Con el propósito de realizar un mallado mediante la Interpolación Transfinita (TFI), que es un método que consta de un conjunto de líneas medias al interior de cuatro fronteras. Que se describe de mejor manera posteriormente.

3.3.1. MALLADO DEL MARCO DEL ÀLABE RECTO MEDIANTE LA TFI.

La Interpolación Transfinita (TFI) es una técnica poderosa para la generación de mallas en dominios con geometrías complejas, como los álabes de una turbina Francis. Este método es particularmente adecuado para crear mallas estructuradas, lo que facilita el análisis numérico posterior mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Generación de Mallas con el Método TFI

Interpolación Transfinita (TFI) es un procedimiento algebraico que se utiliza para generar mallas dentro de un dominio definido por sus fronteras. La TFI utiliza funciones de interpolación que se ajustan entre los límites pre asignados, creando una malla que se adapta perfectamente a la geometría del dominio. Aquí se detallan algunos de los aspectos y ventajas clave de este método:

1. Definición de Fronteras

- **Cuatro Fronteras del Álabe Recto:** Para generar la malla, se definen las cuatro fronteras del álabe recto propuesto. Estas fronteras pueden ser curvas o rectas, dependiendo de la geometría del álabe.
- **Funciones de Interpolación:** Las funciones matemáticas de interpolación se definen para cada una de las fronteras, lo que permite una transición suave y continua dentro del dominio.

2. Generación de la Malla

- **Interpolación en Dos Direcciones:** La TFI se aplica en dos direcciones, generalmente las direcciones longitudinal y transversal del álabe. Esto permite generar una malla estructurada que se ajusta tanto en el perfil del álabe como en su espesor.
- **Control del Agrupamiento y la Ortogonalidad:** Una de las ventajas principales de la TFI es la capacidad de controlar el agrupamiento de los puntos de la malla y mantener la ortogonalidad en los límites pre asignados. Esto es crucial para obtener resultados precisos en simulaciones numéricas.

Para utilizar la Interpolación Transfinita se tomaron las coordenadas (x, y, z) de los datos discretos del álabe recto propuesto del rodete de la turbina Francis 99, que se utilizaron para definir los cuatro límites del álabe.

En la Figura 3.6 se muestra la configuración de la malla del álabe recto generada mediante la TFI en el software Matlab.

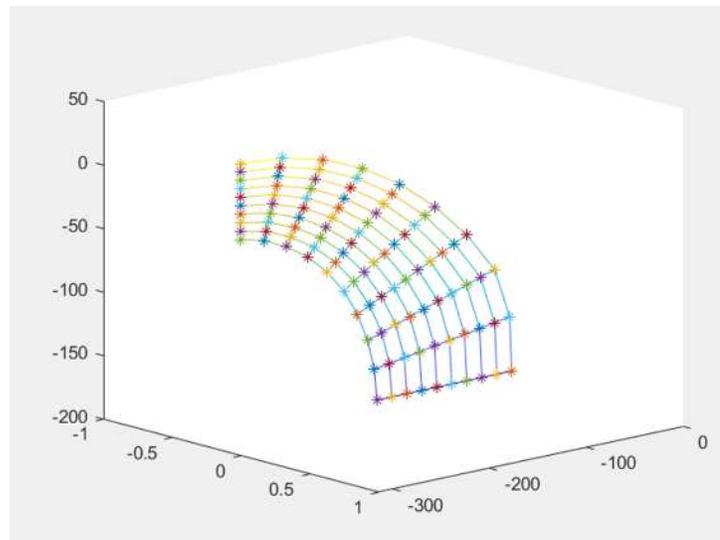


Figura 3.6.- Malla del álabe recto propuesto en Matlab mediante la TFI.

3.3.2 REVOLUCIÓN DEL ÁLABE RECTO PARA GENERAR LA BANDA Y LA CORONA.

La longitud de arco también puede llamarse rectificación de una curva, es la medida de la distancia a lo largo de una curva o dimensión lineal [9].

Suponiendo que se tiene una curva rectificable cualquiera, determinada por una función $f(x)$ y se quiere aproximar la longitud de arco de curva s que va desde el punto a hasta el punto b , con esto es posible diseñar una serie de triángulos rectángulos cuyas hipotenusas cubran el arco de curva elegido [9].



Figura 3.7.- Aproximación por múltiples segmentos lineales [9].

En la Figura 3.8, se muestra un pequeño segmento de curva, el cual Δs se puede aproximar con el teorema de Pitágoras. Para que

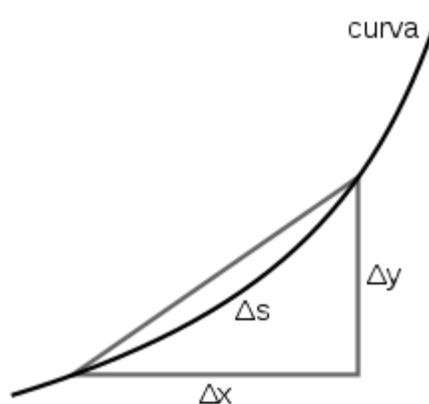


Figura 3.8.- Segmento de curva aproximado con teorema de Pitágoras [9].

Después de realizar el mallado del álabe recto, la siguiente etapa en la reconstrucción geométrica del álabe de la turbina Francis 99 es aplicar una transformación que permita obtener la geometría final del álabe. En este caso, se utiliza una revolución de 360 grados con una matriz de rotación alrededor del eje z. Este proceso crea una geometría tridimensional compleja a partir del perfil 2D del álabe recto.

Proceso de Revolución con Matriz de Rotación

La revolución de una geometría en torno a un eje es un procedimiento común en ingeniería para generar cuerpos tridimensionales simétricos a partir de perfiles bidimensionales. Aquí se describen los pasos para realizar este proceso:

1. Definición de la Matriz de Rotación

La matriz de rotación en el eje z para un ángulo θ (theta) está dada por:

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde θ (theta) varía de 0 a 360 grados (o 0 a 2π radianes).

2. Aplicación de la Rotación a la Malla

Cada punto de la malla del álabe recto (x, y, z) se transforma mediante la matriz de rotación para generar su posición en la nueva geometría tridimensional. El nuevo punto (x', y', z') se calcula como:

$$[x' \ y' \ z'] = R_z(\theta) \cdot [x \ y \ z] \quad (2)$$

3. Generación de la Geometría 3D Completa

Al aplicar la matriz de rotación para ángulos que varían de 0 a 360 grados, se obtienen múltiples copias rotadas del álabe recto, formando así una geometría tridimensional completa del álabe.

En la Figura 3.9, se muestra la revolución del álabe recto para la generación de la banda y la corona del rodete, se muestran todos los puntos dentro ya que fue una revolución de 360 grados.

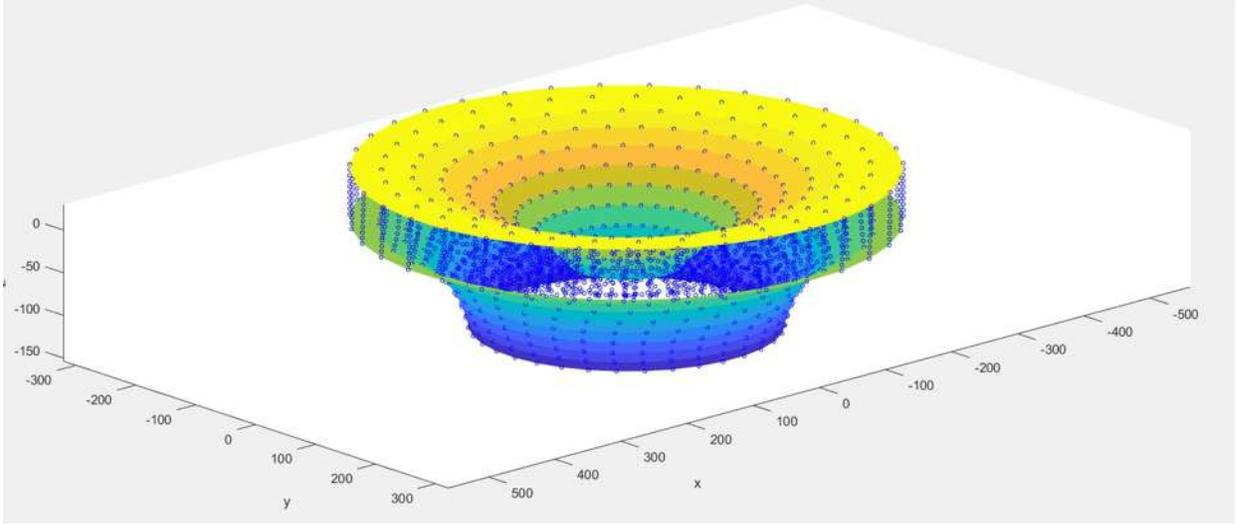


Figura 3.9.- Banda y Corona del rodete de la turbina Francis 99.

Para la revolución de la banda y la corona se tomó en cuenta el ángulo Θ (theta), donde los límites utilizados fueron $[0, 2(\pi), N]$, donde N tiene un valor de 360.

En la Figura 3.10, se muestra más detallada la imagen más detallada de la revolución de la banda del rodete de la turbina Francis 99.

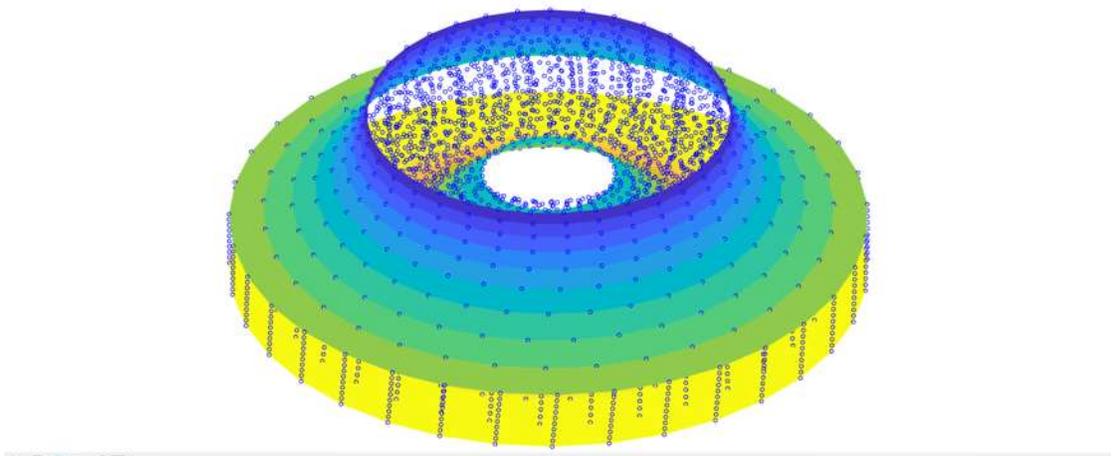


Figura 3.10.- Revolución de la banda por medio del álabe recto.

En la Figura 3.11, se pueden observar la banda y la corona analíticas del rodete de la Turbina Francis 99, se muestran las superficies limpias, sin puntos, para que su visualización sea mejor.

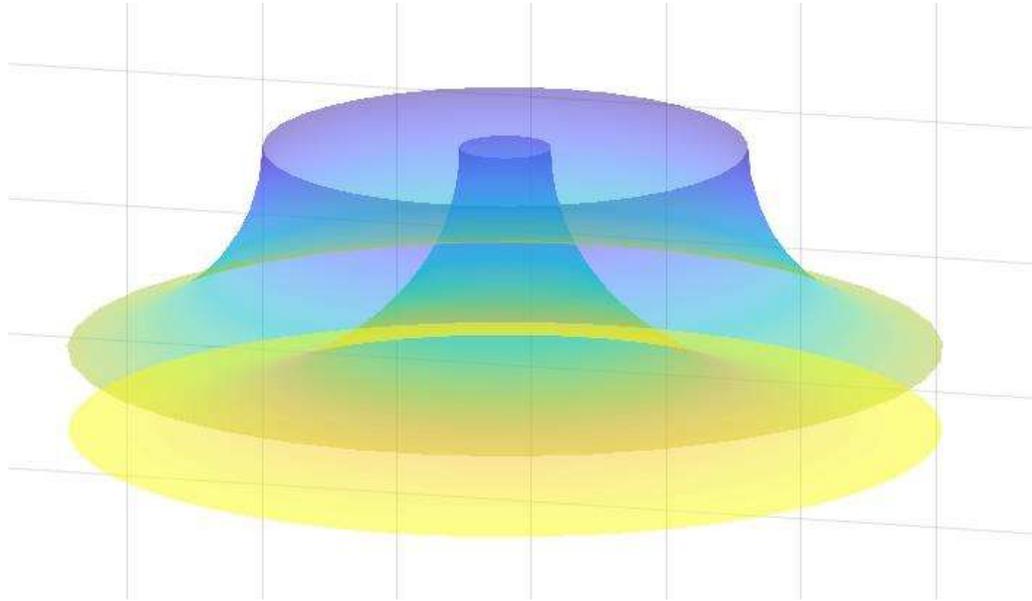


Figura 3.11.- Banda y Corona analíticas del rodete.

3.3.3 CÁLCULO DE LOS ÁNGULOS DEL MARCO DEL ÁLBE RECTO AL MARCO DEL ÁLBE REAL.

Para calcular los ángulos de cada punto de los marcos de los álabes se utilizaron distintas fórmulas;

PRODUCTO ESCALAR

$$\vec{AB} \cdot \vec{BC} = \|\vec{AB}\| \|\vec{BC}\| \cos \theta \quad (3)$$

Donde:

- $\| * \|$ mide la longitud.
- θ Es el ángulo entre los dos vectores.

Si se tienen los puntos A, B Y C entonces se puede trabajar \overrightarrow{AB} y \overrightarrow{BC} . Con eso encontrar el producto punto $\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{BC}$ y las longitudes $\|\overrightarrow{AB}\|$ $\|\overrightarrow{BC}\|$ para después sustituir los valores y encontrar θ , donde:

$$\theta = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{BC}}{\|\overrightarrow{AB}\| \|\overrightarrow{BC}\|} \right) \quad (4)$$

El cálculo de los ángulos se realizó tomando cada punto de la línea de la banda del álabe recto y la línea de la banda del álabe real y como punto origen se tomó la altura solo en la coordenada z.

En la Figura 3.12 se muestran los tres puntos como se fueron obteniendo los ángulos, el punto B es el origen del cual solo se toma la coordenada z, el punto A es el de la línea de la banda del álabe recto y el punto C es de la línea de la banda del álabe real.

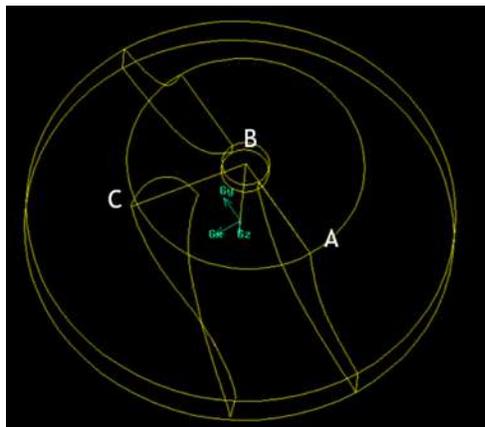


Figura 3.12.- Cálculo de los ángulos

ÀNGULOS OBTENIDOS

TABLA 3.1 Ángulos de la banda.

1	34.3433448067977
2	34.3435684623291
3	34.3438404283900
4	34.3441983445503
5	34.3454270121983
6	34.3474152414175
7	34.3503696626220
8	34.3545278053176
9	34.3601544223699
10	34.3675407119749
11	34.3770027233021
12	34.3888804159310
13	34.4035372040112
14	34.4213489839189
15	34.4427080453959
16	34.4680291561022
17	34.5026388250112
18	34.5424079348240
19	34.5875325403648
20	34.6383235490136
21	34.6951622856024
22	34.7584935325409

23	34.8288253565018
24	34.9066977127455
25	34.9499813726469
26	35.0026692533227
27	35.0637009624776
28	35.1318413007912
29	35.2062659810958
30	35.2864066416064
31	35.3718651907923
32	35.4623644023225
33	35.5577040783289
34	35.6691830786577
35	35.7855112576310
36	35.9811978703065
37	36.1104682963990
38	36.2446543307311
39	36.3565841710697
40	36.4725400525174
41	36.6198979779450
42	36.7720546449217
43	36.9874483001530
44	37.2109293153300
45	37.4419903587644
46	37.6802391754318

47	38.0681730656019
48	38.4815571791802
49	38.9207639957754
50	39.3860803312617
51	39.8779606466860
52	40.3968060243892
53	40.9427892398672
54	41.5160916271366
55	42.1168390038193
56	42.7451424006344
57	43.4011003105099
58	44.0847548615444
59	44.7962383670216
60	45.5355395260692
61	46.3022784632216
62	47.0963732812303
63	47.9184447932688
64	48.7692104544670
65	49.6463813350749
66	50.5455325332251
67	51.4677036039341
68	52.4242407899730
69	53.4260943565178
70	54.4713107147357

71	55.5508992372993
72	56.6572001299855
73	58.9341926102536
74	58.9341926102536
75	60.0996082551062
76	61.2814435339498
77	62.4797520316629
78	63.6945839452484
79	64.9256518829534
80	66.1723347666274
81	67.4340248479074
82	68.7101459395851
83	70.0002012747083
84	71.3037384569201
85	72.6203225059442
86	73.9495072299356
87	75.2908281365023
88	76.6438334083286
89	78.0080511302251
90	79.3829377690503
91	80.7679804637777
92	82.1626381994991
93	83.5664676445518
94	84.9790590173854

95	86.4000171465186
96	87.8289512707659
97	89.2654545857407
98	90.7090575294045
99	92.1592890747299
100	93.6156733261922
101	95.0777521177905
102	96.5451006928878
103	96.5451006928878
104	99.4940124166704
105	100.974818479314
106	102.459372425846
107	103.139563212384

TABLA 3.2 Ángulos de la corona.

1	35.2979392944609
2	35.2981890466641
3	35.2985122406373
4	35.2990038328419
5	35.3004904500941
6	35.3028286911101
7	35.3061961458578
8	35.3108408420541
9	35.3170864571920
10	35.3252324266733
11	35.3357317143893
12	35.3490577728325
13	35.3658189647944
14	35.3867466282048
15	35.4127256990596
16	35.4448266785736
17	35.4935754317677
18	35.5517428079617
19	35.6206614544940
20	35.7020498563558
21	35.7980441007077

22	35.9112348129089
23	36.0447300580817
24	36.2021858579400
25	36.3878190879926
26	36.6249834079662
27	36.9058816628330
28	37.2357735072422
29	37.6206239526565
30	38.0669562506652
31	38.5817416497239
32	38.8856319672410
33	39.2096185965069
34	39.5748560238123
35	39.9604436765278
36	40.3671031780512
37	40.7955224187585
38	41.2463479476323
39	41.6929447301640
40	42.1642412667708
41	42.1642412667708
42	43.2337060628281
43	43.8550009886595

44	44.4987968201486
45	45.1648138176051
46	45.8525004183079
47	46.6500327472964
48	47.4601859086676
49	48.2817178955686
50	49.1144609912762
51	49.9580249219771
52	50.8118575084262
53	51.6752737682856
54	52.5477129636057
55	53.4287246206710
56	54.3178584730978
57	55.2147150629411
58	56.1189254597112
59	57.0301109029958
60	57.9479461447739
61	58.8721127918192
62	59.8022256820855
63	60.7378812983993
64	61.6787238953394
65	62.6244970070868

66	63.5749400561770
67	64.5294203864958
68	65.4871634695211
69	66.4478484457615
70	67.4117577118705
71	68.3792794485507
72	69.3486177791039
73	70.3154086366002
74	71.2767277712821
75	72.2221180864060
76	73.1704406102998
77	74.1328335555825
78	75.1001252612776
79	76.0586494447305
80	76.9987673533328
81	77.9204392047125
82	78.8261934475788
83	79.7175568079322
84	80.5942297532884
85	81.4559875590209
86	82.3030886877774
87	83.1365510643171

88	83.9578256586152
89	84.7686028714858
90	85.5707748630886
91	86.3664835550449
92	87.1581565674257
93	87.9485610455529
94	88.7407697648103
95	89.5380516115863
96	90.3438100221046
97	91.1617142608514
98	91.9956074101759
99	92.8495781964882
100	93.7277094082232
101	94.6258929424606
102	95.5428612689456
103	96.4763623541906
104	97.4238287114680
105	98.3823514736733
106	99.3484600364430
107	100.128629258715

TABLA 3.3 Ángulos de la entrada.

1	35.2979392944609
2	35.1964027895386
3	35.0922886035739
4	34.9868842766440
5	34.8816834403850
6	34.7772150572632
7	34.6727901085650
8	34.5683928249529
9	34.4515993841664
10	34.3433448067977

TABLA 3.4 Ángulos de la salida.

1	116.956754697219
2	118.030982294450
3	119.039840769513
4	119.973869983971
5	120.824144393942
6	121.580782733022
7	122.235143516403
8	122.777594058354
9	123.198408364577
10	123.396351533848
11	123.455082989209
12	123.371861641206
13	123.155527447704
14	122.820603400616
15	122.377972784900
16	121.837367448400
17	121.209304135696
18	120.503854398815
19	119.730806725238
20	118.898558222346
21	118.015835775074

22	117.090469195856
23	116.129064190967
24	115.136845448412
25	114.118556301492
26	113.078394022609
27	112.019690891270
28	110.945207514460
29	109.857174738801
30	108.757158987502
31	107.646331271587
32	106.524788139408
33	105.392419880973
34	104.248839046417
35	103.092793182056
36	101.922524183361
37	100.734949713051

3.4 AJUSTE DE CURVAS

El ajuste de curvas es un proceso matemático mediante el cual se busca encontrar una función que se ajuste lo mejor posible a un conjunto de puntos de datos, cumpliendo ciertas restricciones o condiciones específicas. Esto se utiliza en diversos campos, como estadística, ingeniería, física, entre otros, para modelar y predecir comportamientos o fenómenos. Las condiciones son restricciones que se imponen a los extremos de la curva ajustada, como ángulos, curvaturas o valores específicos de la función. Estas condiciones son importantes para garantizar que la curva se ajuste de manera adecuada a los datos y que cumpla con los requisitos específicos del problema que se está abordando.

En el proceso de ajustar una función a un conjunto de datos, la función puede ser no lineal en los argumentos, pero en los parámetros que se determinan durante el ajuste pueden ser lineales. Esto se logra mediante técnicas como la regresión no lineal, donde los parámetros son ajustados para minimizar la discrepancia entre la función modelada y los datos observados.

Los polinomios de grado bajo tienden a producir curvas más suaves y simples, mientras que los polinomios de grado alto pueden generar curvas más complejas y con más oscilaciones. Esto se debe a que los polinomios de grado alto tienen más flexibilidad para ajustarse a los datos, lo que puede llevar a una mayor variabilidad y complejidad en la forma de la curva.

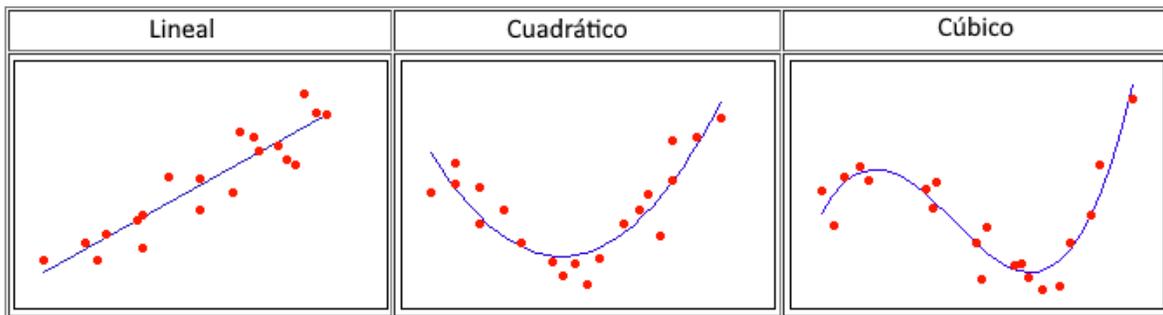


Figura 3.13.- Ajuste de un conjunto de datos de una función [10].

El ajuste se realizó con la curva de los puntos discretos del marco del álabe recto propuesto, intentando que fuera lo más parecido posible a la curva del marco del álabe real.

Se muestran las cuatro gráficas del ajuste realizado, cada una con sus valores del polinomio con el cual se ajustaba mejor la curva.

Las Gráficas a continuación muestran los ajustes en las cuatro líneas del álabe, en donde se está graficando ángulo y altura.

3.4.1 AJUSTE BANDA

Se realizó el ajuste de la banda, en el cual se tomaron los puntos discretos del álabe recto propuesto y los puntos del álabe original del rodete de la turbina Francis 99, resultando un polinomio de tercer grado.

En la Figura 3.14. Se muestra la gráfica de ajuste de la banda en donde están graficados los ángulos de la banda contra las alturas.

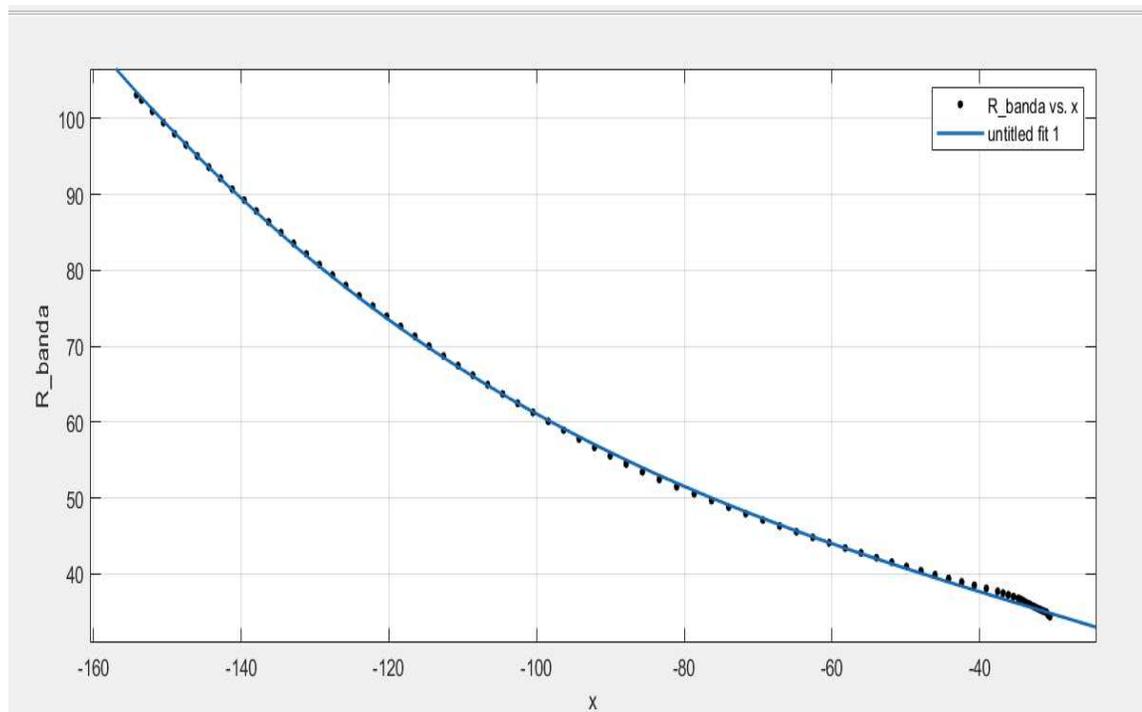


Figura 3.14.-Gráfica de ajuste de banda.

Resultados del polinomio del ajuste de la banda, el cual fue un polinomio de grado 3.

TABLA 3.5 Resultados del polinomio de la banda.

LINEAR MODEL POLY3 $f(x)=p1*x^3+p2 *x^2+p3*x+p4$
Coefficients (with 95% confidence bounds): P1 = -1.692e-05 (-1.879e-05, -1.506e-05) P2 = -0.001538 (-0.002037, -0.00104) P3 = -0.3423 (-0.3819, -0.3028) P4 = 25.32 (24.46, 26.18)
Goodness of fit: SSE: 13.39 R-square: 0.9997 Adjusted R-square: 0.9997 RMSE: 0.3606

3.4.2 AJUSTE CORONA

Se realizó el ajuste de la corona, en el cual se tomaron los puntos discretos del álabe recto propuesto y los puntos del álabe original del rodete de la turbina Francis 99, resultando un polinomio de tercer grado.

En la Figura 3.15. Se muestra la gráfica de ajuste de la corona en donde están graficados los ángulos de la corona contra las alturas.

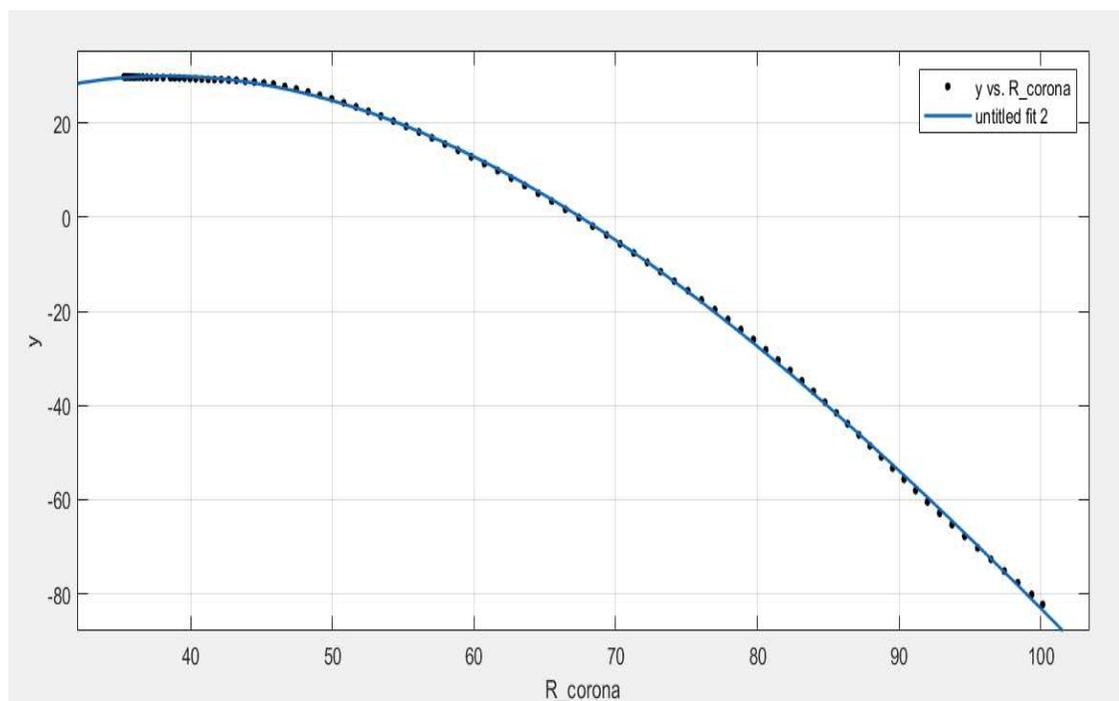


Figura 3.15.- Gráfica de ajuste de Corona.

Resultados del polinomio del ajuste de la corona, el cual fue un polinomio de grado 3.

TABLA 3.6 Resultados del polinomio de la corona.

LINEAR MODEL POLY 3
$f(x) = p1 \cdot x^3 + p2 \cdot x^2 + p3 \cdot x + p4$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 0.0001648 (0.0001504, 0.0001793)
p2 = -0.05876 (-0.06159, -0.05592)
p3 = 3.771 (3.595, 3.947)
p4 = -37.51 (-40.92, -34.1)
Goodness of fit:
SSE: 18.09
R-square: 0.9999
Adjusted R-square: 0.9999
RMSE: 0.4191

3.4.3 AJUSTE ENTRADA

Se realizó el ajuste de la entrada en el cual se puede observar que el polinomio resultante fue de grado 1, aquí a diferencia de la banda y la corona no se tenía una curvatura, la cual permitía que el grado del polinomio no fuera más grande, y no fuera tan complicado realizar el ajuste.

En la Figura 3.16. Se muestra la gráfica de ajuste de la entrada en donde están graficados los ángulos de la entrada contra las alturas.

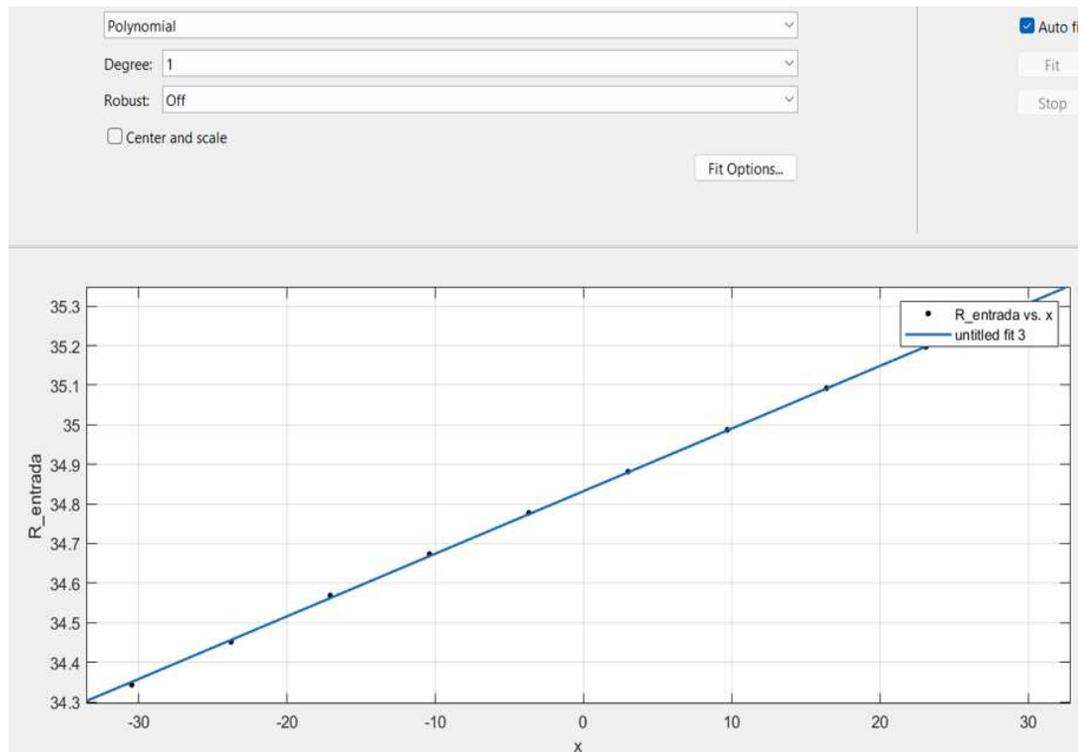


Figura 3.16.-Gráfica de ajuste de la entrada.

Resultados del polinomio del ajuste de la entrada, el cual fue un polinomio de grado

TABLA 3.7 Resultados del polinomio de la entrada.

LINEAR MODEL POLY 1
$f(x) = p1*x + p2$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 0.01581 (0.01563, 0.01599)
p2 = 34.83 (34.83, 34.84)
Goodness of fit:
SSE: 0.0001803
R-square: 0.9998
Adjusted R-square: 0.9998
RMSE: 0.004747

3.4.4 AJUSTE SALIDA

Se realizó el ajuste de la salida, en el cual se tomaron los puntos discretos del álabe recto propuesto y los puntos del álabe original del rodete de la turbina Francis 99, resultando un polinomio de tercer grado.

En la Figura 3.17. Se muestra la gráfica de ajuste de la salida en donde están graficados los ángulos de la salida contra las alturas.

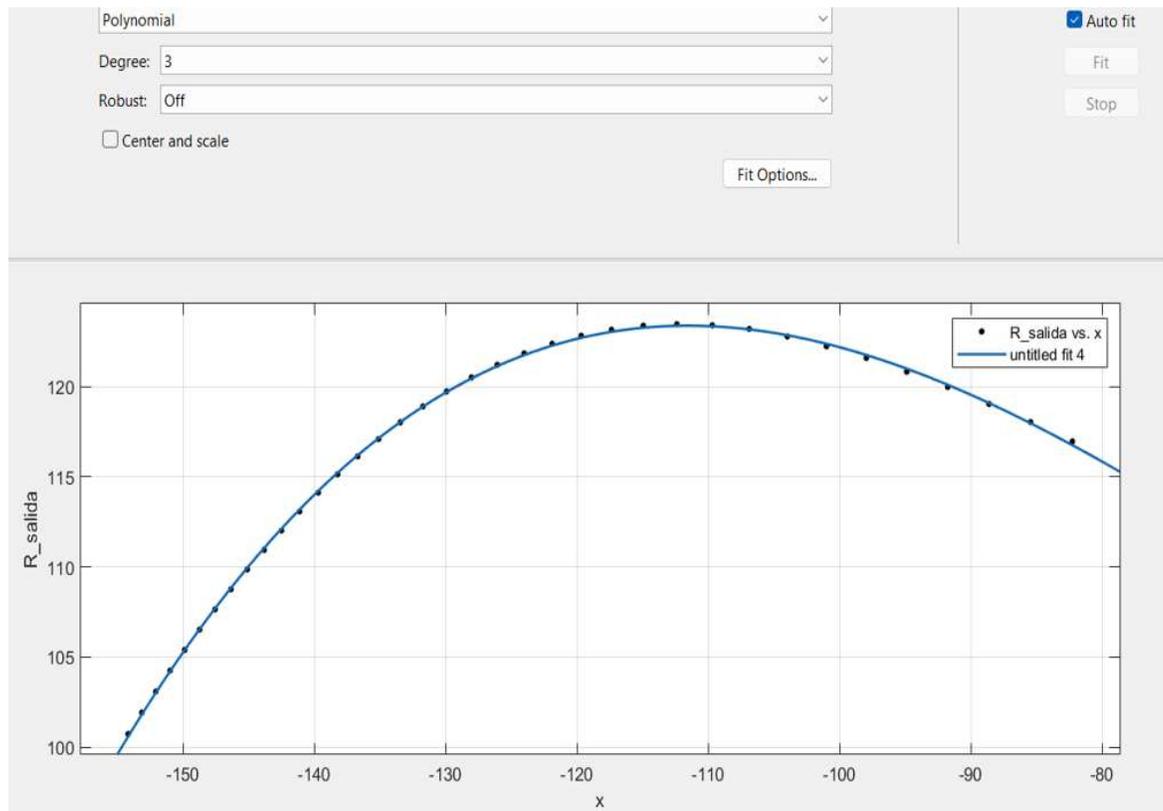


Figura 3.17.- Gráfica de ajuste de la salida.

Resultados del polinomio del ajuste de la salida, el cual fue un polinomio de grado 3.

TABLA 3.8 Resultados del polinomio de la salida.

LINEAR MODEL POLY 3
$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 6.719e-05 (6.269e-05, 7.169e-05)
p2 = 0.0128 (0.01118, 0.01442)
p3 = 0.3475 (0.157, 0.5379)
p4 = 96.11 (88.77, 103.4)
Goodness of fit:
SSE: 0.3375
R-square: 0.9998
Adjusted R-square: 0.9998
RMSE: 0.1011

3.5 PARAMETRIZACIÓN DE LAS CURVAS

Las ecuaciones paramétricas son útiles para representar curvas o superficies en el plano o en el espacio, especialmente cuando estas no pueden ser representadas fácilmente por ecuaciones cartesianas. Al parametrizar una curva, estamos describiendo como los puntos de la curva se mueven en función de un parámetro, lo que nos da una forma de trazar la curva de manera precisa y flexible.

Se realizó la parametrización de las cuatro curvas del álabe de la turbina Francis 99, tomando en cuenta el ajuste hecho anteriormente y escogiendo los valores resultantes del polinomio del ajuste de la banda ya que es la curva con mayor dificultad y este polinomio representa bien a las cuatro fronteras.

En la Figura 3.18.- se muestran las superficies de la banda y la corona, las cuales se generaron anteriormente en Matlab y ya montado en las superficies se muestra el álabe resultante de la parametrización realizada.

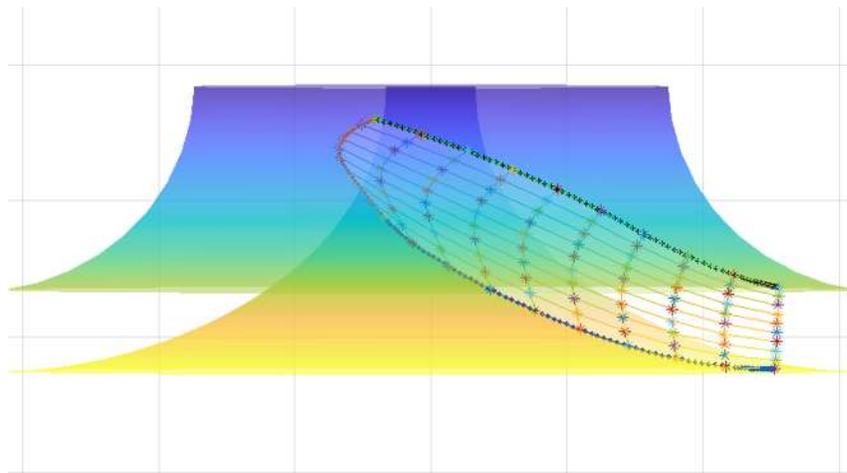


Figura 3.18.- Álabe resultante de la parametrización

Para realizar la parametrización se tomó en cuenta el radio y la envergadura del álabe, en donde sus valores en el polinomio son:

$$\text{Radio} - [(-210(p^3) + 143.5(p^2) + 348.2(p-313.8))];$$

$$\text{Envergadura: } [1.068(p^3) - 204.6(p^2) - 5.929(p+30.16)];$$

En la Figura 3.19. se muestran las superficies de la banda y la corona con el álabe analítico y a su lado derecho se desglosa lo que significan las líneas y asteriscos en el álabe, se aprecia que todas las fronteras del álabe real están marcadas con asterisco y las superficies del álabe aproximado que es el analítico son las líneas.

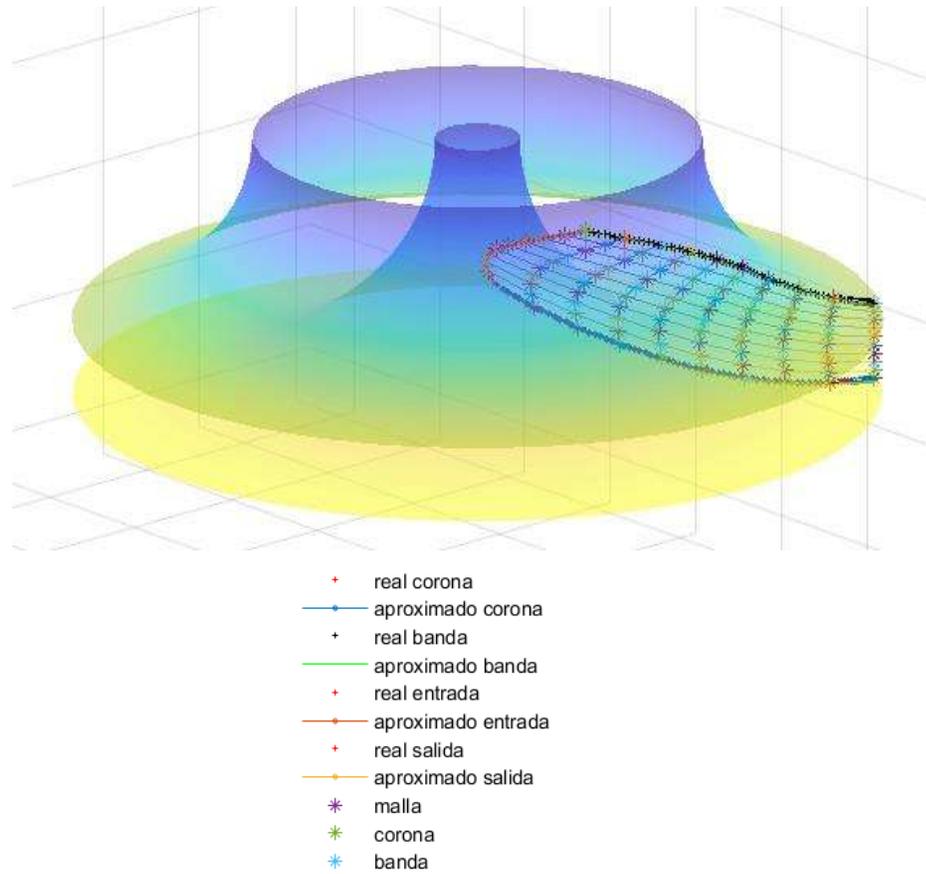


Figura 3.19.- Banda y corona con fronteras del álabe real y álabe analítico.

3.5.1 MALLA DEL ÀLABE ANALÍTICO

En la Figura 3.20, se muestra la malla del àlabe analítico, la cual se realizó en Matlab mediante la TFI (Interpolación Transfinita), las líneas son las fronteras del àlabe aproximado (analítico) y los asteriscos son las fronteras del àlabe real de la turbina Francis 99.

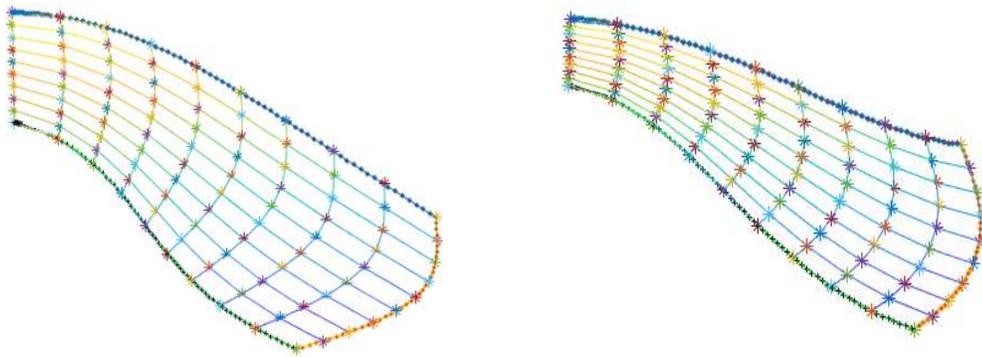


Figura 3.20.- Malla del àlabe analítico.

3.5.2 MONTAJE DEL PERFIL NACA

La definición de un perfil aerodinámico se puede considerar como aquella sección del ala cortada por un plano por un plano paralelo a la cuerda de la misma.

En la Figura 3.26 se muestra el esquema de un perfil aerodinámico con sus componentes. Las características geométricas, en relación a la Figura 3.26, las cuales describen el perfil del àlabe son:

1. **Borde de ataque.** Es la región más delantera del perfil.
2. **Borde de salida.** Es la región más trasera del perfil.

3. **Línea de la cuerda.** Es la línea recta que pasa por el borde de ataque y por el borde de salida.
4. **Cuerda.** Es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida, es una dimensión característica del perfil.
5. **Línea de Combadura Media.** Línea equidistante entre el lado de succión (extradós) y el lado presión (intradós). Esta línea fija la combadura del perfil. Si la línea de combadura media pasa arriba de la cuerda se dice que la combadura es positiva, si queda por debajo, es negativa, y si va por debajo y por arriba es de doble combadura [14].
6. **Ordenada máxima de la línea de combadura media.** Es la máxima distancia entre la línea de combadura media y la cuerda del perfil. El valor suele darse en porcentaje de la cuerda.
7. **Posición de la combadura máxima.** Es la distancia medida a partir del borde de ataque, en porcentaje de la cuerda, donde se encuentra la ordenada máxima de la línea de combadura media.
8. **Espesor máximo.** Es la distancia máxima entre el lado succión y el lado presión, medida perpendicularmente a la cuerda. Es una característica importante, que se expresa en porcentaje de la cuerda. El valor varió desde un 3% en los perfiles delgados hasta un 18% en los más gruesos.
9. **Posición del espesor máximo.** Es la distancia a lo largo de la cuerda, medida desde el borde de ataque hasta la ordenada donde existe el espesor máximo del perfil.
10. **Radio de Combadura del Borde de Ataque.** Define la forma del borde de ataque y es el radio de un círculo tangente al lado succión y el lado de presión, y con su centro situado en la línea tangente a la línea de combadura media y pasa por el borde de ataque [14].

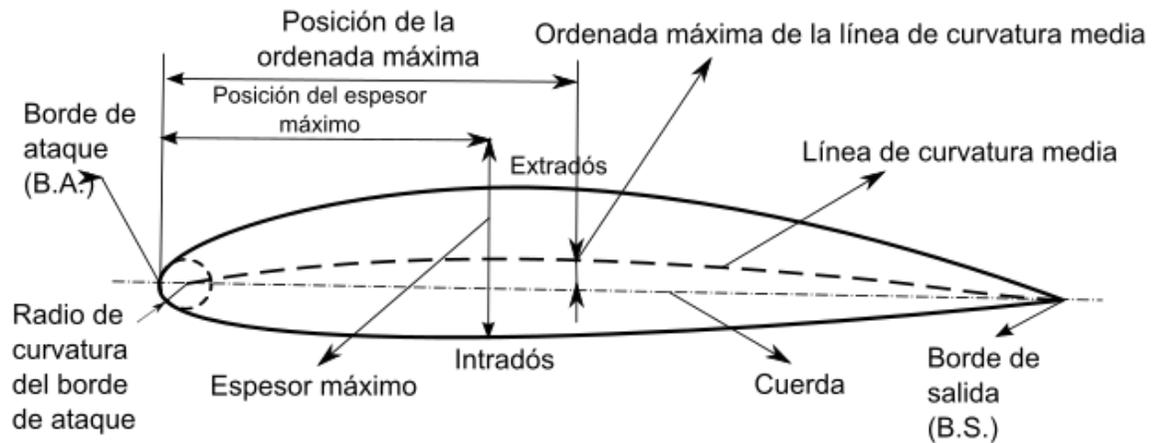


Figura 3.21.- Esquema de un perfil aerodinámico con sus componentes. [14].

Tiempo atrás de que el Comité Nacional Asesor para la Aeronáutica (NACA) llevara a cabo las series de perfiles NACA, los perfiles aerodinámicos eran sin ninguna guía para el diseñador. Esto empezó a cambiar hasta los 30 's con la publicación de un reporte NACA, el cual se llamaba: Las características de 78 perfiles relacionados de pruebas en el túnel de viento de densidad variable.

Los autores de esta publicación se dieron cuenta que había similitudes entre los perfiles aerodinámicos, y las variables que afectan estas geométricas son la pendiente de la línea de combadura media y la distribución de espesores abajo y arriba de esta línea.

El diseño de los perfiles aerodinámicos se volvió sofisticado y esta aproximación se modificó incluyendo variables adicionales, aun así, sus dos valores geométricos permanecieron en el corazón de todas las series NACA.

En la Figura 3.22, se muestra el esquema que indica las ecuaciones básicas para poder formar un perfil.

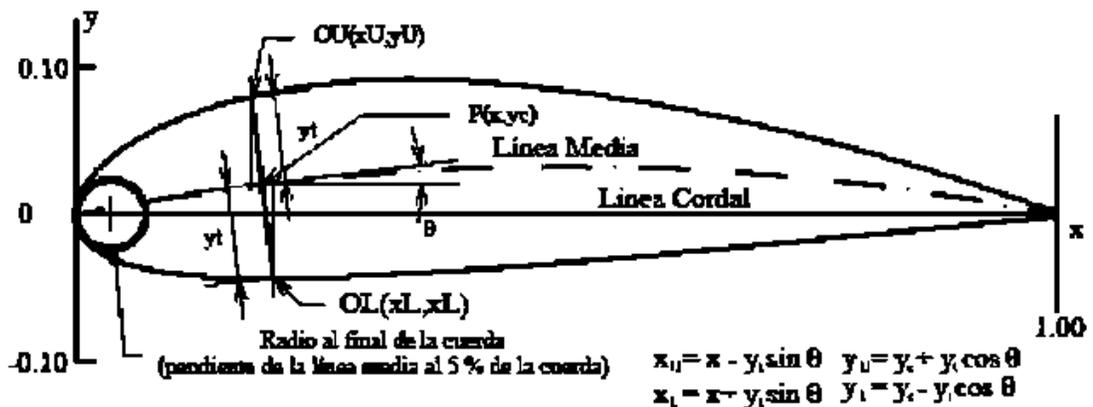


Figura 3.22.- Ecuaciones básicas para formar un perfil [14].

3.5.3- SERIE NACA DE 4 DÍGITOS

La serie NACA de 4 dígitos es conocida como la primera familia de perfiles aerodinámicos, el primer dígito especifica la combadura máxima (m) en porcentaje de la cuerda (longitud del perfil), el segundo indica la posición de la combadura máxima (p) en décimas de cuerda y los dos últimos números indican el espesor máximo (t) del perfil en porcentaje de la cuerda [14].

Utilizando estos valores de m , p y t , se pueden calcular las coordenadas para un perfil completo usando las siguientes relaciones [14].

3.5.4 SERIE NACA DE 5 DÍGITOS

La serie NACA de 5 dígitos usa la misma forma del espesor como la serie de 4 dígitos, pero la línea de combadura media se define de diferente forma y la convención de la nomenclatura es un poco más complicada [14].

El primer dígito, cuando se multiplica por $3/2$, produce el coeficiente de sustentación del diseño (c_l) en décimas de la cuerda, los siguientes dos números, cuando se dividen entre 2, dan por resultado la posición de la combadura máxima (p) en décimas de la cuerda. Los dos últimos dígitos indican una vez más el espesor máximo (t) en porcentaje de la cuerda [14].

Los pasos para calcular las coordenadas de los perfiles son:

1. Elegir valores de x desde 0 hasta la cuerda máxima c .
2. Calcular las coordenadas de la línea de combadura media para cada posición x usando las siguientes ecuaciones, y p determina los valores de m y kl usando la tabla 3.5.

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_c}{c} &= \frac{K_1}{6} [(x/c)^3 - 3m(x/c)^2 + m^2(3-m)(x/c)] \\ \frac{dy_c}{dx} &= \frac{K_1}{6} [3(x/c)^2 - 6m(x/c) + m^2(3-m)] \end{aligned} \right\} 0 \leq (x/c) \leq m \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_c}{c} &= \frac{K_1}{6} m^3 [1 - (x/c)] \\ \frac{dy_c}{dx} &= \frac{K_1}{6} m^3 \end{aligned} \right\} m \leq (x/c) \leq 1 \quad (6)$$

$$x_f = m \left(1 - \sqrt{\frac{m}{3}} \right) \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{6Cl_i}{Q} \quad (8)$$

$$Q = \frac{3m - 7m^2 + 8m^3 - 4m^4}{\sqrt{m(1-m)}} - \frac{3}{2}(1-2m) \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1}(1-2m) \right] \quad (9)$$

El radio R del borde de ataque se aplica para suavizar el frente.

$$\frac{r}{c} = 1.1019 \left(\frac{t}{c} \right)^2 \quad (10)$$

3. Calcular la distribución de espesores usando la ecuación:

$$\frac{y_t}{c} = \left(\frac{t}{c} \right) \left[a_0 \sqrt{x/c} - a_1(x/c) - a_2(x/c)^2 - a_3(x/c)^3 - a_4(x/c)^4 \right] \quad (11)$$

4. Determinar las coordenadas finales.

$$\left. \begin{aligned} x_U &= x - y_t(x) \sin \theta \\ y_U &= y_c(x) + y_t(x) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} x_L &= x + y_t(x) \sin \theta \\ y_L &= y_c(x) - y_t(x) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{dy_c}{dx} \right) \quad (14)$$

TABLA 3.9 Valores de m y kl

Designación de la línea media	Posición de la combadura máxima (p)	r	kl
210	0.05	0.058	361.4
220	0.10	0.126	51.64
230	0.15	0.2025	15.95
240	0.20	0.29	6.643
250	0.25	0.391	3.23

Después de llevar a cabo el ajuste y la parametrización de las curvas del álabe, se realizó el montaje del perfil NACA 5 al álabe analítico resultante.

Los valores del perfil que se tomaron para el álabe fueron:

[0.0330647, 0.54, 1.5, 1, x]

En la Figura 3.23 se muestra el montaje del perfil NACA 5 en el álabe analítico que se obtuvo después de la parametrización, el perfil NACA es el de color negro y lo que se encuentra pintado de diferentes colores es la malla realizada en Matlab anteriormente.

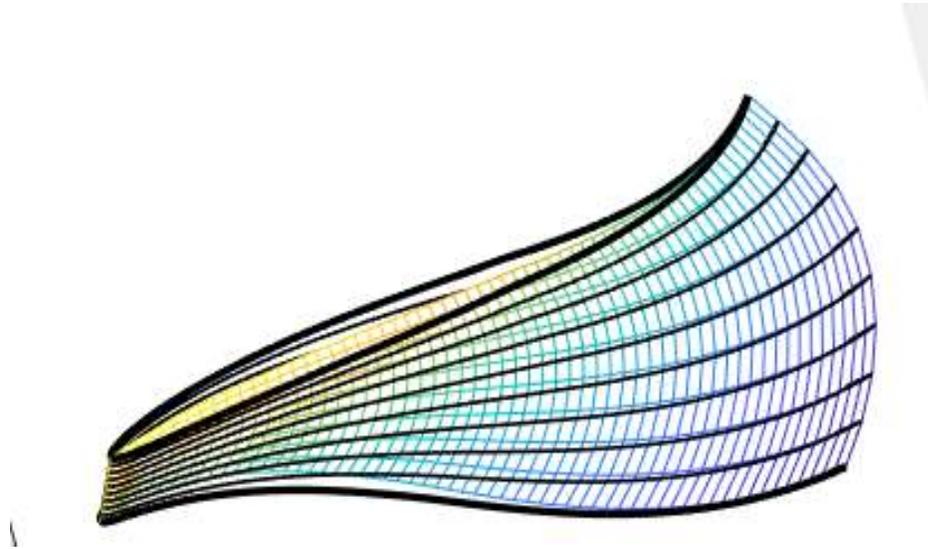


Figura 3.23.- Álabe analítico con el perfil NACA 5.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 GRÁFICAS RESULTANTES DE LA PARAMETRIZACIÓN

La parametrización de las curvas nos dio como resultado gráficas del porcentaje de error de cada curva, respecto a su ángulo theta, al radio y a la envergadura.

CORONA

En la Figura 4.1 se muestra la gráfica del porcentaje de error del ángulo theta el cual da como resultado un valor de $\times 10^{-13}$ de error.

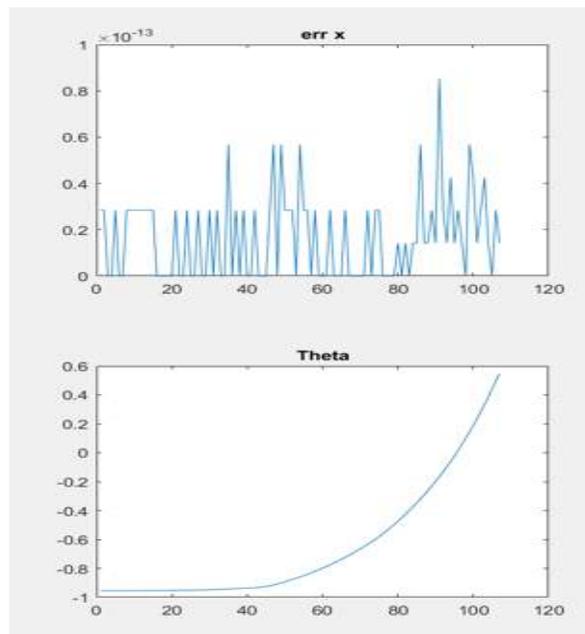


Figura 4.1.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la corona.

En la Figura 4.2.- se muestra la gráfica del porcentaje de error del radio, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$ de error.

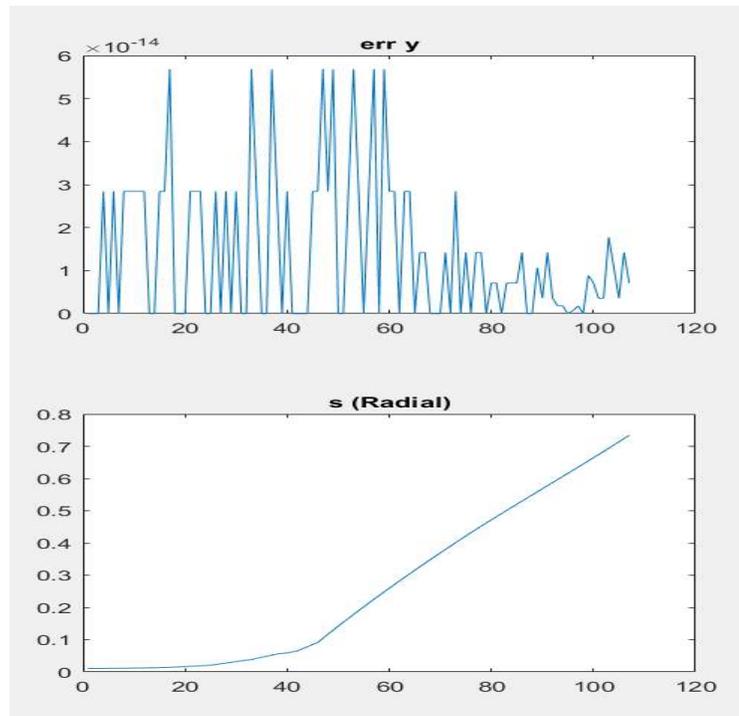


Figura 4.2.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la corona.

En la Figura 4.3.- se muestra el porcentaje de error en la envergadura del álabe, el cual resulta un valor de $\times 10^{-14}$.

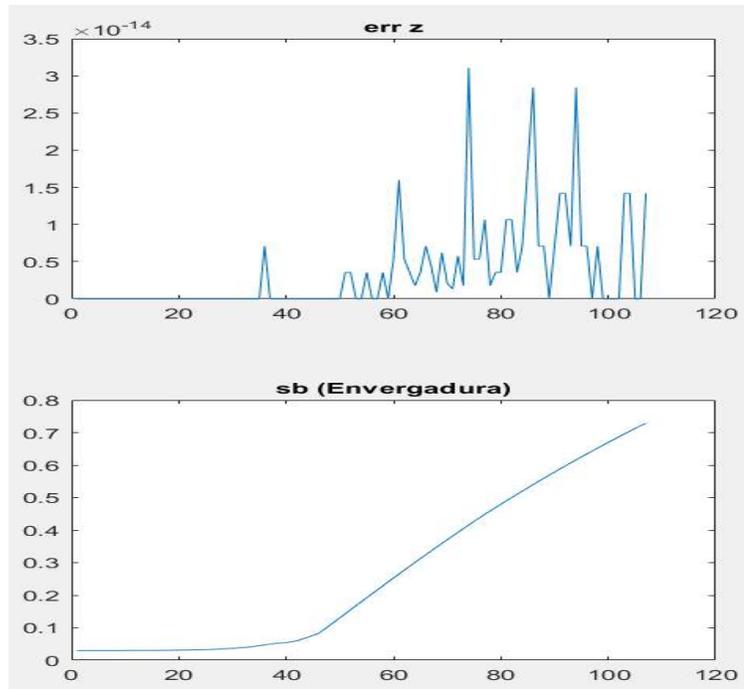


Figura 4.3.- Gráficas del porcentaje de error en la envergadura del álabe en la corona.

BANDA

En la Figura 4.3 se muestra la gráfica del porcentaje de error del ángulo theta el cual da como resultado un valor de $\times 10^{-13}$ de error.

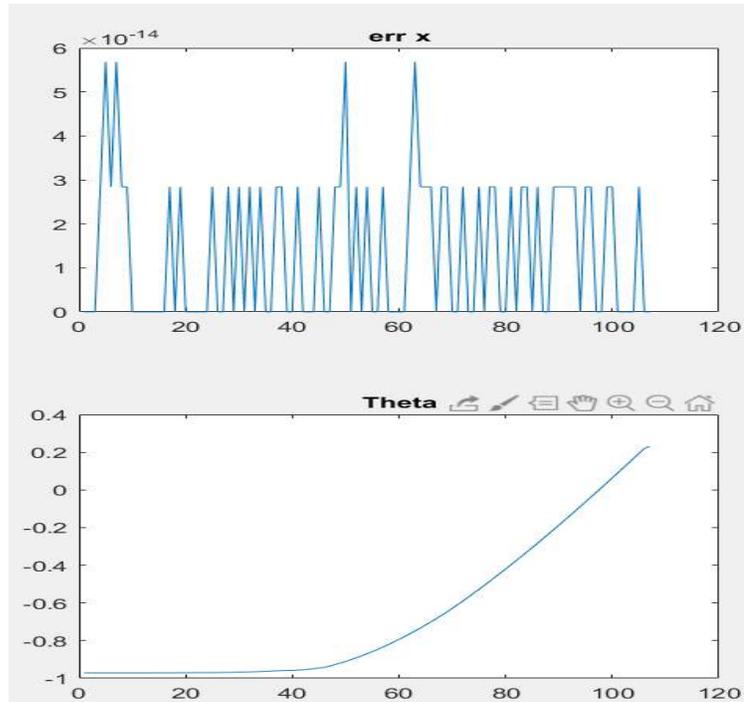


Figura 4.4.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la banda.

En la Figura 4.5.- se muestra la gráfica del porcentaje de error del radio, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$ de error.

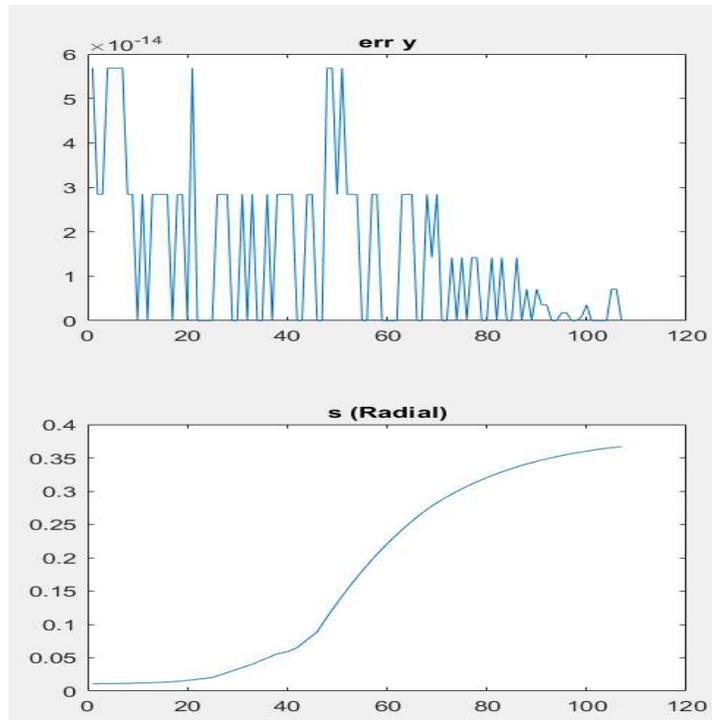


Figura 4.5.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la banda.

En la Figura 4.5.- se muestra la gráfica del porcentaje de error de la envergadura, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$ de error.

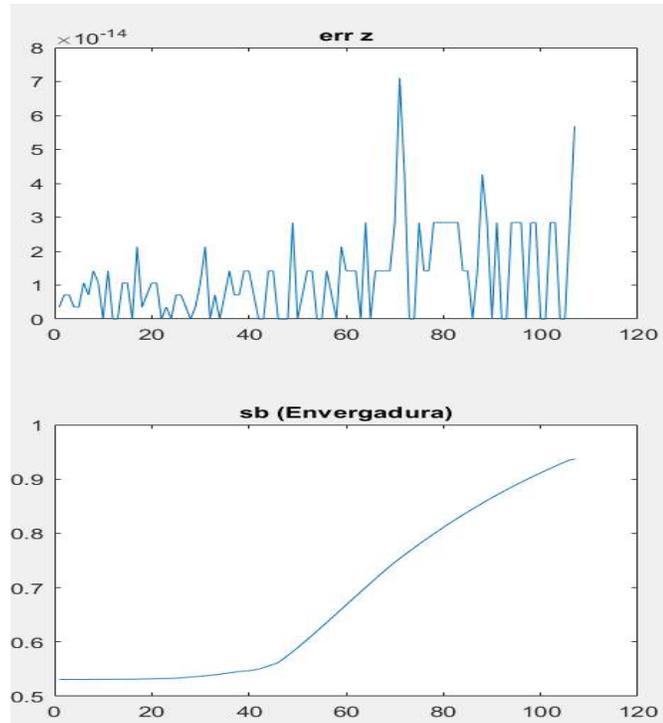


Figura 4.6.- Gráfica del porcentaje de error de la envergadura del álabe en la banda.

ENTRADA

En la Figura 4.7.- se muestra la gráfica del porcentaje de error del ángulo theta, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$ de error.

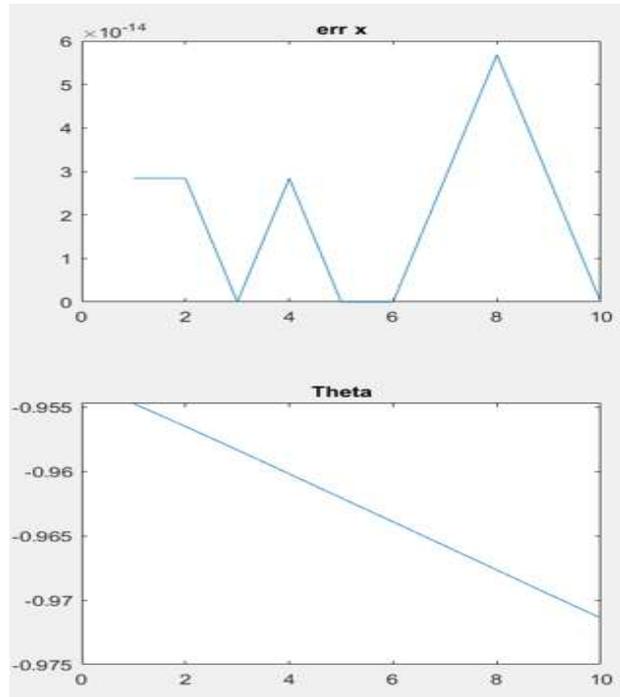


Figura 4.7.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la entrada.

En la Figura 4.8.- se muestra la gráfica del porcentaje de error del radio, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$ de error.

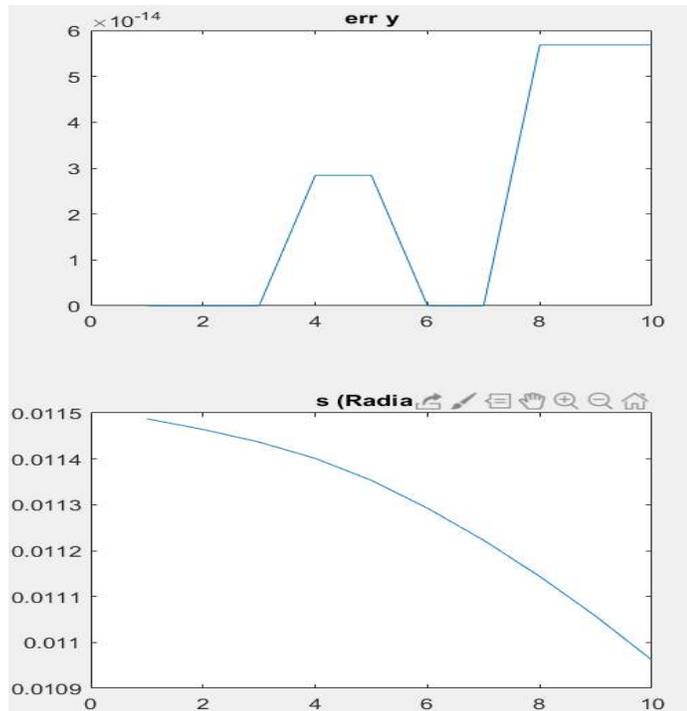


Figura 4.8.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la entrada.

En la Figura 4.9.- se muestra la gráfica del porcentaje de error de la envergadura del álabe, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$.

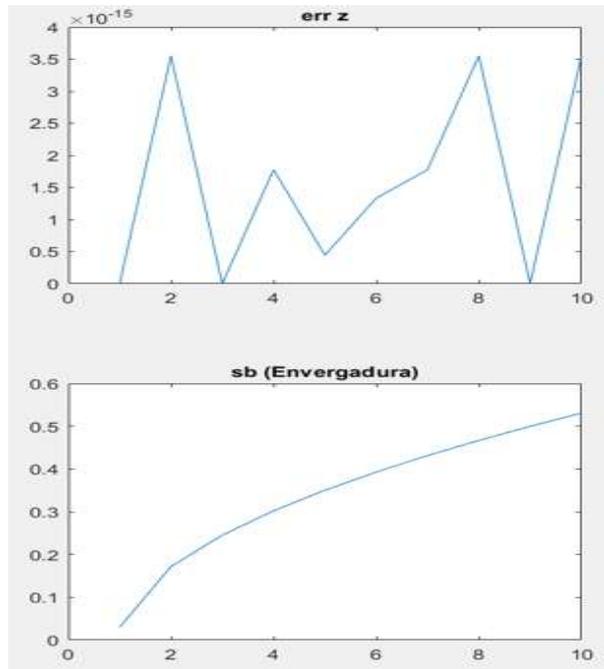


Figura 4.9.- Gráficas del porcentaje de error de la envergadura del álabe en la entrada.

SALIDA

En la Figura 4.10.- se muestra la gráfica del porcentaje de error del ángulo theta, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$.

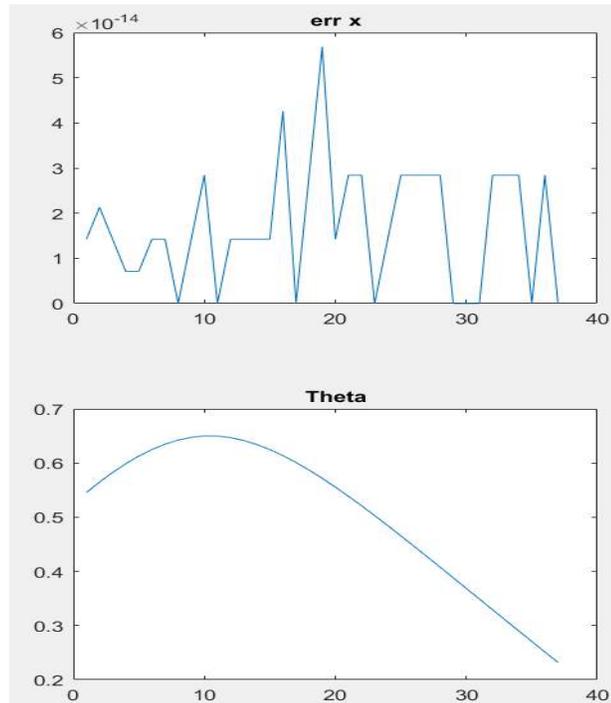


Figura 4.10.- Gráficas del porcentaje de error del ángulo theta en la salida.

En la Figura 4.11.- se muestra la gráfica del porcentaje de error del radio, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$.

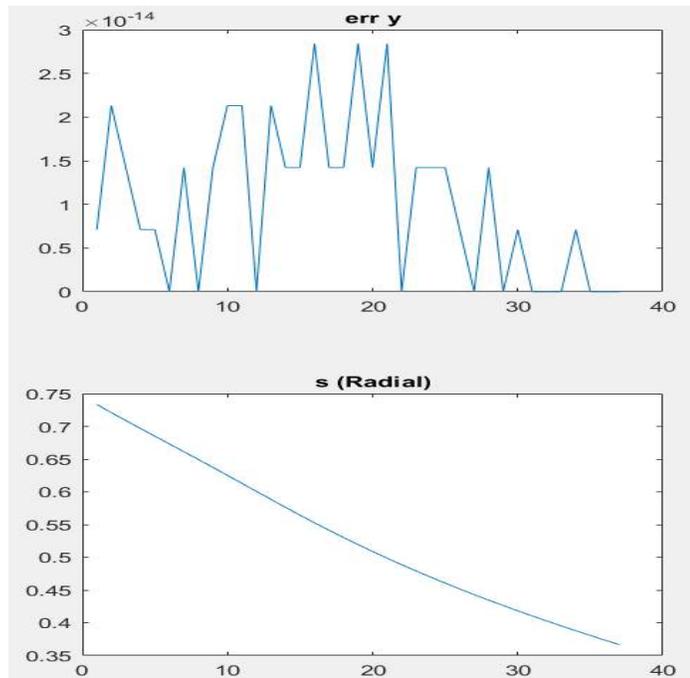


Figura 4.11.- Gráficas del porcentaje de error del radio en la salida.

En la Figura 4.12.- se muestra la gráfica del porcentaje de error de la envergadura del álabe, el cual el valor es de $\times 10^{-14}$.

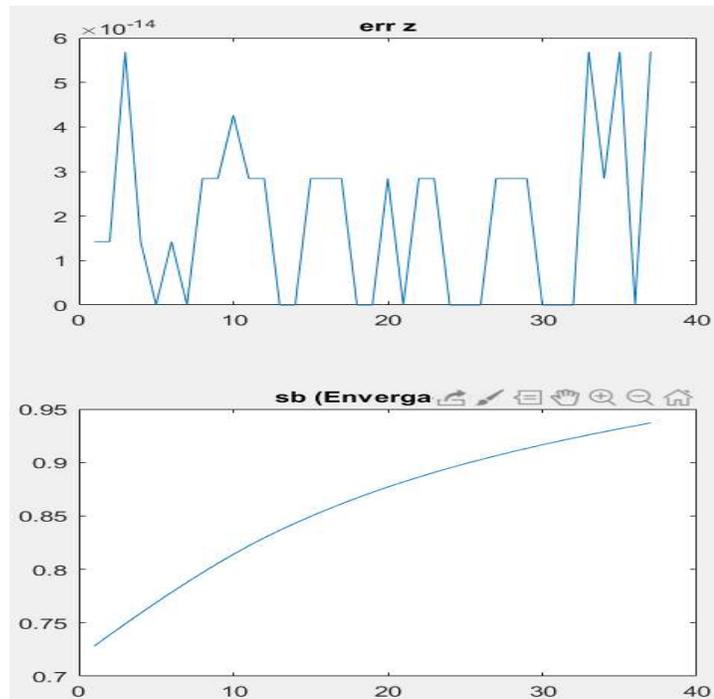


Figura 4.12.- Gráficas del porcentaje de error de la envergadura del álabe en la salida.

4.2 SUPERFICIE

Tras haber aplicado la metodología de la parametrización del álabe de la turbina Francis 99, se hizo la comparación de las superficies entre el álabe original de la turbina y el álabe obtenido mediante la metodología.

En la Figura 4.13 se muestra la imagen donde aparece el error en las superficies del álabe de la turbina Francis 99, el máximo error es de 0.4 aproximadamente.

Esta comparación de superficies se realizó en Matlab, se realizó con el lado succión de la superficie real del álabe y el lado succión de la superficie analítica.

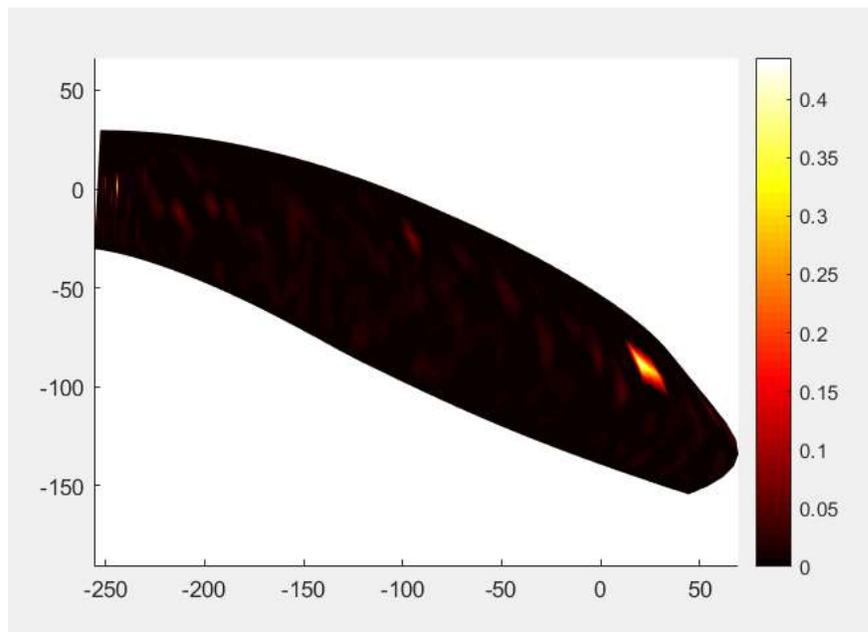


Figura 4.13.-Error en las superficies del álabe de la turbina Francis 99.

4.3 ÁLABE ANALÍTICO

El álabe de la turbina analítico se refiere a un modelo teórico o matemático que describe la forma y el comportamiento de un álabe de turbina utilizando ecuaciones y funciones matemáticas. Los álabes de turbinas analíticos se utilizan en ingeniería para diseñar y optimizar turbinas, ya que permiten explorar diferentes configuraciones y condiciones de operación de manera más rápida y económica que los métodos experimentales.

En Gambit se realizó la geometría del álabe analítico que resultó de la metodología el cual es lo más parecido al álabe original de la Turbina Francis 99.

En la Figura 4.14 se muestra la geometría del álabe analítico en cuatro vistas diferentes.

a) vista en el plano z+, b) vista en el plano y+, c) vista en el plano x+, d) vista isométrica.

Se pueden observar las curvaturas que tiene el álabe analítico iguales a las que tiene el álabe original de la turbina.

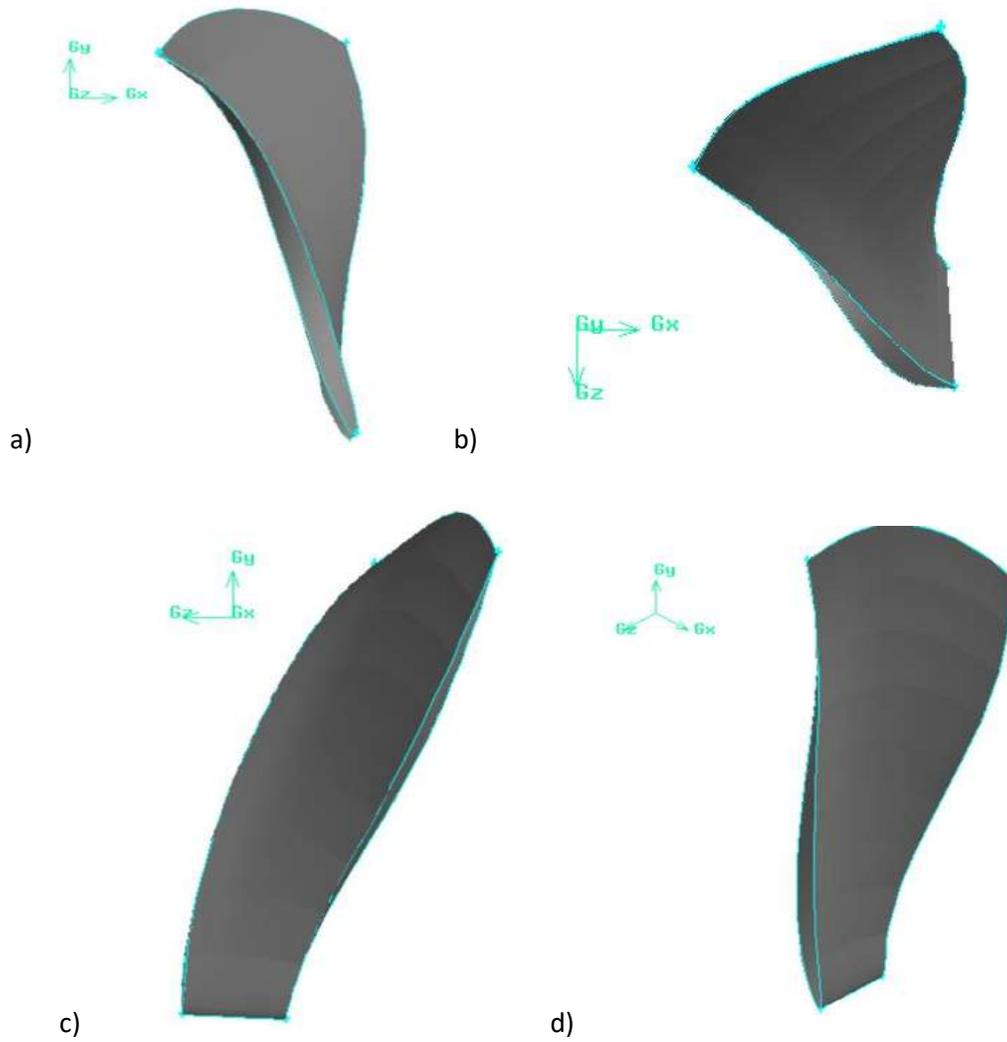


Figura 4.14.- Diferentes vistas del álabe analítico, a) plano z+, b) plano y+, c) plano x+ y d) vista isométrica.

En la Figura 4.15, se muestra la estructura del álabe analítico de la Turbina Francis 99, el cual se realizó en el software Gambit.

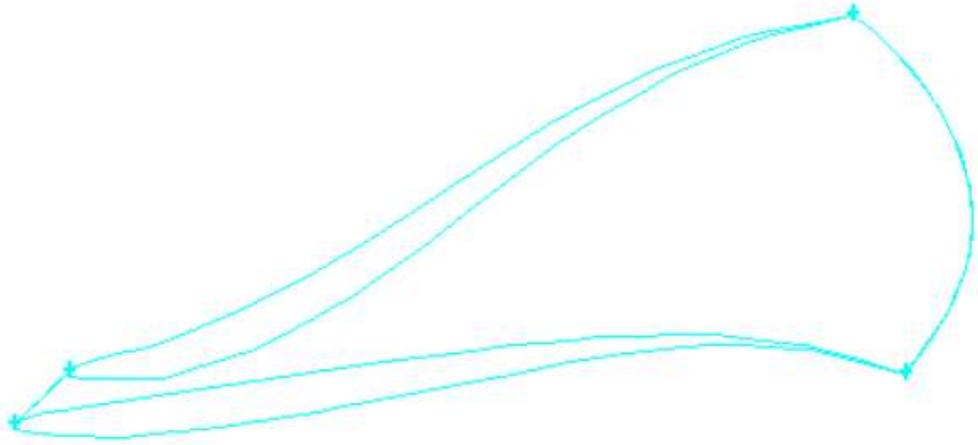


Figura 4.15. Estructura del álabe analítico.

4.4 RODETE ANALÍTICO DE LA TURBINA FRANCIS 99

Se obtuvo una geometría del rodete analítico de la Turbina Francis 99, el cual por medio de un archivo journal se realizó en Gambit.

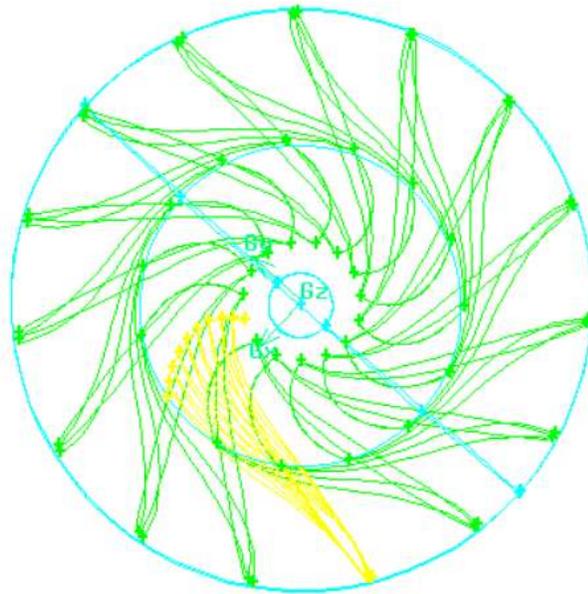


Figura 4.16. Geometría del rodete analítico en Gambit.

En la Figura 4.17 se muestra el rodete de la Turbina Francis 99, donde en el interior se pueden observar los álabes principales del rodete analítico.

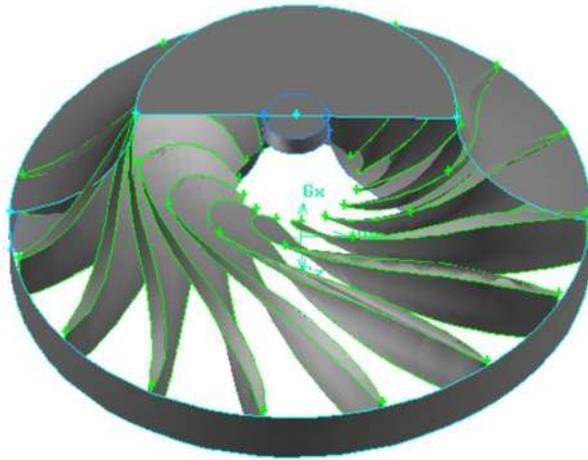


Figura 4.17.- Interior del rodete analítico de la Turbina Francis 99.

En la Figura 4.18 se muestra el interior del rodete de la turbina Francis 99 por la parte de abajo, se pueden observar los 15 álabes principales, el de color amarillo es el álabe analítico obtenido anteriormente, y a partir de él se revolucionaron a la misma distancia cada uno.

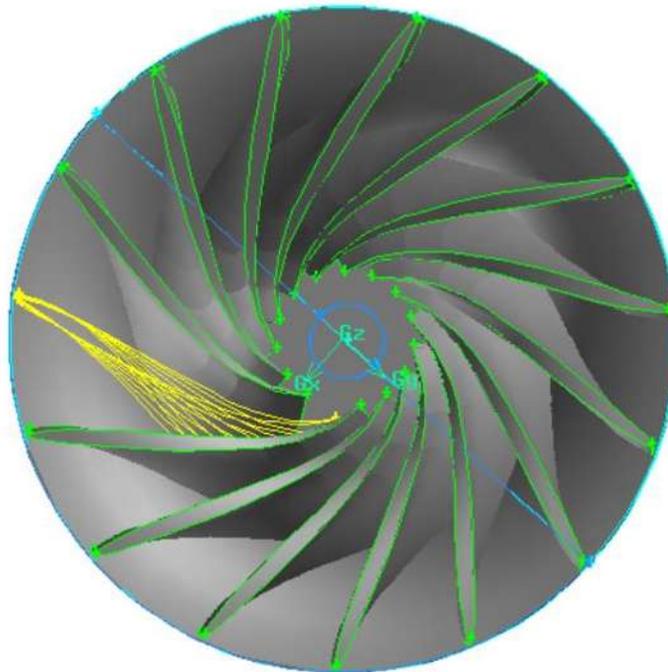


Figura 4.18.- Interior del Rodete de la Turbina Francis 99.

4.5. COMPARACIÓN DE RODETES.

La comparación de rodets en SolidWorks generalmente implica la creación de modelos CAD de los rodets y luego comparar sus características, como geometría, dimensiones, propiedades físicas, etc.

Se realizó un enfoque básico para la comparación de las superficies en SolidWorks del rodete original de la turbina Francis 99 y el rodete que se obtuvo analíticamente, donde solo se ensamblaron los modelos que se crearon para después alinearlos para facilitar la comparación. En la función de comparación de la geometría se pueden identificar diferencias específicas entre los rodets, como superficies adicionales, cambios en la forma de los álabes, etc.

Dependiendo de las necesidades específicas y la complejidad de los rodets, es posible que se necesite utilizar herramientas y técnicas adicionales para realizar una comparación exhaustiva y precisa.

En la Figura 4.19 se muestran las imágenes de la comparación de los rodets, el rodete de color verde es el que se obtuvo analíticamente con la metodología anterior y el gris es el rodete original. Se puede observar que si existe una pequeña diferencia en la superficie del álabe.

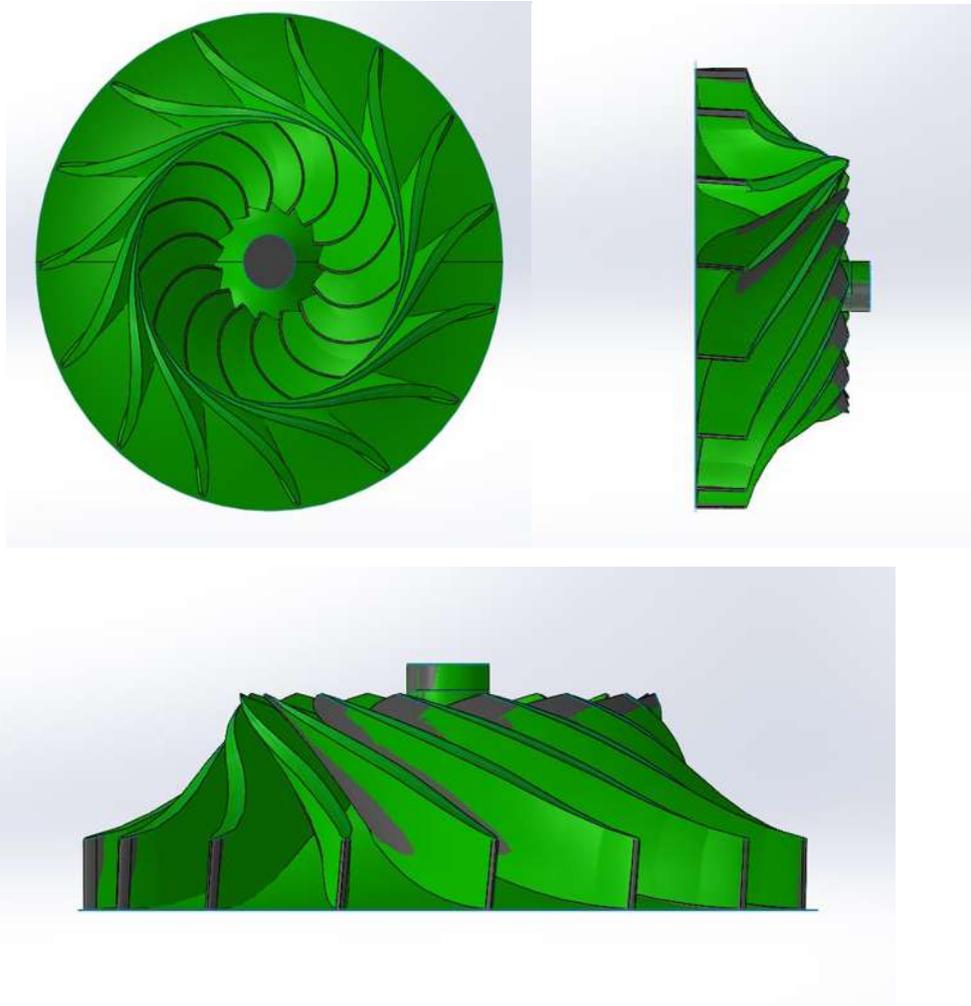


Figura 4.19.- Comparación de rodetes de la Turbina Francis 99.

4.6. IMPRESIÓN 3D A ESCALA DEL RODETE ANALÍTICO DE LA TURBINA FRANCIS 99

Se realizaron las impresiones 3D del rodete analítico y el rodete original de la turbina Francis 99 utilizando una impresora Ender 3 Max Neo Creality. Las impresiones se realizaron con material PLA al 40% del tamaño real de los rodetes, con fines ilustrativos, y donde la calidad de impresión fue buena.

En la Figura 4.20, se muestra la impresión del rodete analítico, el cual se realizó en color blanco, con duración de 48 horas de impresión aproximadamente.

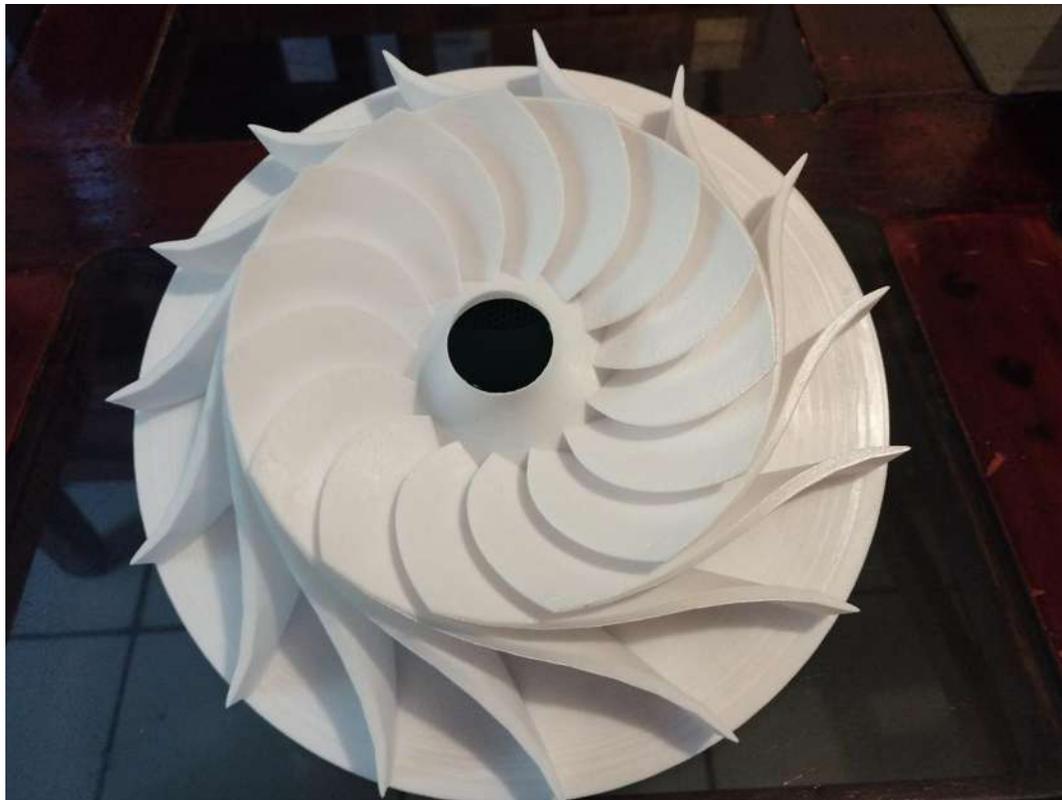


Figura 4.20. Impresión 3D del rodete analítico de la turbina Francis 99.

En la Figura 4.21, se muestra la impresión del rodete real, el cual se realizó en color gris, con una duración de 48 horas de impresión aproximadamente.

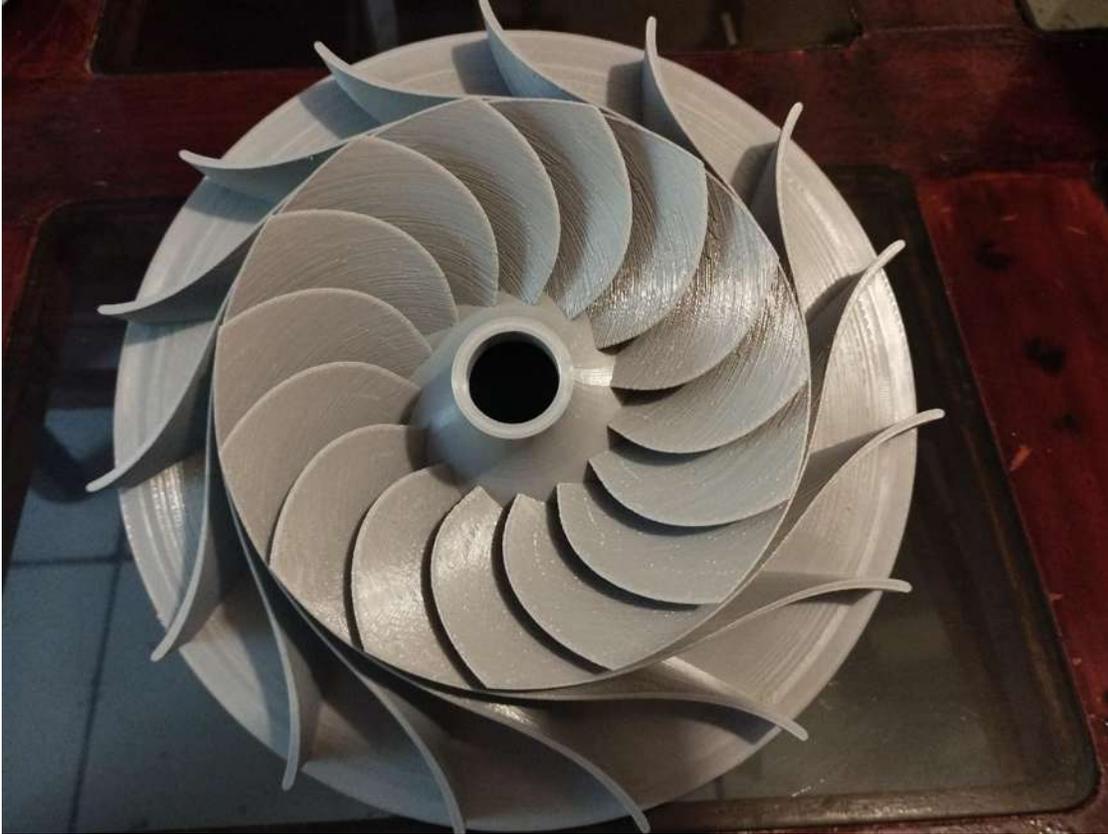


Figura 4.21. Impresión 3D del rodete real de la turbina Francis 99.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA.

5.1. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha propuesto una metodología para la parametrización del álabe de la turbina Francis 99 mediante la utilización de herramientas numéricas, en este proceso se acoplaron dos softwares llamados Gambit y Matlab.

Gambit se utiliza principalmente para la creación de la geometría mientras que Matlab se utiliza para desarrollar algoritmos y realizar análisis numéricos adicionales. Este enfoque integrado permite un análisis más detallado del diseño del álabe.

La parametrización de la geometría del álabe del rodete de la turbina Francis 99 entregó resultados satisfactorios. Con esta información se puede considerar llevar a cabo análisis adicionales como simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar el rendimiento del álabe bajo diferentes condiciones de operación. También se podría explorar la posibilidad de optimizar aún más la geometría del álabe utilizando técnicas de optimización numérica.

Trabajar con el marco del álabe es un enfoque sólido para intentar recrear el perfil del álabe original de la turbina Francis 99, al centrarse en el marco del álabe se pueden capturar aspectos clave de la geometría y características del perfil del álabe, lo que ayuda a aproximarse al diseño original.

Algunas de las ventajas de trabajar con el marco del álabe incluyen la precisión geométrica y el control de parámetros, sin embargo, es importante recordar que recrear el perfil del álabe original puede ser un desafío, especialmente si no se dispone de información detallada sobre el diseño original.

La definición de los parámetros del álabe se basó en la manipulación de las curvas del marco del álabe por lo cual se requieren un mínimo de parámetros.

Este enfoque es común en la parametrización de geometrías complejas, ya que permite simplificar el proceso al centrarse en aspectos clave de la forma del álabe.

Al utilizar un conjunto mínimo de parámetros, simplifica el proceso de parametrización mientras mantienes un control efectivo sobre la forma y las características del álabe. Es importante elegir cuidadosamente estos parámetros para garantizar que capturen adecuadamente las características esenciales del diseño del álabe original de la turbina Francis 99.

El ajuste de curvas nos dio como resultado el polinomio de tercer grado, el cual fue satisfactorio para poder llevar a cabo la parametrización de las cuatro curvas del álabe. Utilizar un polinomio de tercer grado como modelo para representar las curvas del marco del álabe puede ofrecer una buena flexibilidad para ajustar la forma del álabe según sea necesario.

Con este polinomio de tercer grado como modelo, se pueden ajustar los coeficientes del polinomio para controlar la forma y las características de cada una de las cuatro curvas del marco del álabe.

El Máximo error en la comparación de las superficies fue de 0.4 mm, el cual fue un buen resultado mencionando que no estamos evaluando una precisión requerida y tampoco una tolerancia permitida.

Los porcentajes de error en la parametrización de las cuatro curvas nos arrojaron un error de $\times 10^{-14}$, el cual matemáticamente es cero, este error extremadamente bajo demuestra que la parametrización de las curvas es muy precisa y que la aproximación o el modelo utilizado es muy exacto en comparación con los datos reales. Es una indicación de que el método empleado para ajustar curvas es altamente efectivo.

Esta metodología fue utilizada para la reconstrucción del rodete de la turbina Francis de la unidad 4 de la pequeña central hidroeléctrica en Tirio, Michoacán.

Esto nos demuestra que la metodología es útil para la reconstrucción de cualquier tipo de rodete evitando el escaneo total de estos.

5.2 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Colaboradores de Wikipedia. Central Hidroeléctrica. (2024, mayo 8). *Central [online]*, Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Central_hidroel%C3%A9ctrica
- [2] Área tecnología. Turbinas Hidráulicas. Funcionamiento y Tipos: Francis, Kaplan, Pelton. *Central [online]*, Disponible: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>
- [3] G. Delgado, S. R. Galván, F. J. Domínguez. “*Metodología para la reconstrucción de un rodete tipo Francis con la utilización de herramientas numéricas*”. Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica. Tesis Doctoral, UMSNH, Morelia, Mich. Julio 2021.
- [4] Corral, D. Descubre qué es la energía hidráulica y cómo se genera. (2024, abril 15). *Central [online]*, Disponible: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/descubre-que-es-la-energia-hidraulica-y-como-se-genera/>
- [5] En el Green Power. Turbina hidroeléctrica. *Central [online]*, Disponible: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia>
- [6] G. Delgado, S. R. Galván, L. A. Ibarra. “*Diseño paramétrico de los álabes del rodete de una turbina Francis*”. Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica. Tesis de Maestría, UMSNH, Morelia, Mich. Julio 2014.
- [7] J. A. Yáñez, E. Valencia, V. Hidalgo. “*Diseño paramétrico de álabes para turbinas Francis*”. Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Tesis de Licenciatura, EPN, Quito, Ec. marzo 2017.
- [8] Edwin Román Hernández, Víctor Iván Moreno Oliva, Eduardo Campos Mercado, Isaac Montoya De los Santos, Sergio Sánchez Sánchez, Máximo Avendaño Alejo.
- [9] Colaboradores academia colegio de matemáticas. Longitud de Arco de una curva. *Central [online]*, Disponible: Http://prepa8.unam.mx/academia/colegios/matematicas/paginacolmate/applets/mateaticas_VI_12/Applets_Geogebra/longarco.html

- [10] Edgar Romero Rodríguez. *Ajuste de curvas. Febrero 2007.*
- [11] E. Ayli, K. Celebioglu, S. Aradag. "Determination and generalization of the effects of design parameters on Francis turbine runner performance", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, VOL. 10, NO.1.545-564, september 2016.*
- [12] L. F. López. *Surface parameterization and optimum design methodology for hydraulic turbines, Doctoral dissertation, (2006).*
- [13] Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., Theory of Wing Sections. Dover, New York, 1959.
- [14] Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., Stivers L. S. Summary of Airfoil Data, NACA 1945.
- [15] Anderson J. D. Fundamentals of Aerodynamics. Third Edition, Ed. McGraw Hill, 2001. Hidroeléctrica/turbina-hidroeléctrica.
- [16] L. de J. Ramos, M. Montenegro. *Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro.(abril 2012). Central [online], Disponible: Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro (scielo.org.mx)*
- [17] K. Pontuga, D. A. Rojas. *Modelo de apoyo para la visualización del comportamiento de una turbina Francis en función de su eficiencia y ángulos de entrada mediante software ANSYS, Trabajo final de grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá C.C.- Republica de Colombia, agosto 2021.*
- [18] E. M. Sanches, D. J. Albelda . *Evaluación de estrategias de parametrización geométrica y de la medida de control de la velocidad de convergencia en metodologías de optimización de forma basadas en algoritmos evolutivos. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Esp. septiembre, 2011.*

- [19] J. L. Galarza. *Metodología para el diseño de turbinas en pequeñas centrales hidroeléctricas con capacidad menor a 10 MW con ejemplo de aplicación, Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional, Quito, febrero 2015.*
- [20] M. A. García. “Turbomáquinas-Turbinas Hidráulicas”, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional del Callao, Informe Final 1116-2010-R, octubre 2011.
- [21] M. Rebellon, J. E. Urrutia. *Diseño de Turbinas Hidráulicas Francis y Kaplan. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, 1985.*
- [22] Qinghua S., *Rehabilitation of a low head Francis turbine by runner replacement, 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Design Methods Turbines, Stockholm Sweden, (2004).*
- [23] K Daneshkah, M Zangeneh. *Parametric design of a Francis turbine runner by means of a three-dimensional inverse design method, 2010.*
- [24] Kiyohito Tani, Yutaka Hanada. *Effective Utilization of Hydraulic Energy through Improved Turbine Runner Characteristics, 2011.*
- [25] Peter Joachim Godstad. *Hydraulic design of Francis turbine exposed to sediment erosion, 2011.*
- [26] Sailesh Chitrakar, Binaya Baidar, Ravi Koirala. *Spanwise re-stacking techniques in turbomachinery Blades and application in Francis runner, september 2014.*
- [27] Elikalfa A., -sepetci G., Dr. Celebioglu K., Assoc. Prof Aradag S. *Design of a new Francis turbine runner for a rehabilitation Project in Turkey, 2016.*
- [28] Giovanni Noriega Sandoval. *Desarrollo y evaluación de proyecto modernización de turbinas unidades 1 y 2 central hidroeléctrica Plutarco Elías Calles “El Novillo”. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Mor, abril 2019.*

- [29] Krishna Prasad Shrestha, Bhola Thapa, Ole G. Dahlhaug, Hari Prasad Neupane, Nikhel Gurung, Atmaram Kayastha. *Optimized Design of Francis Turbine Runner for Sand Laden Water*, July 2013.
- [30] M. Ristic, D. Brujic and I. Ainsworth. *Measurement-based updating of turbine Blade CAD models: a case study*, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol.17, (No.4), 352-363, (2004).
- [31] M. S.G. Tsuzuki, S. L. Vatanabe, E. G. Castro, E. C. N. Silva, T. C. Martins, D. Taniguchi, H. S. Makiyama, A. K. Sato, G. B. Gallo, M. A. A. Garcia and H. Tiba. *Development of a Complete Methodology to Reconstruct, Optimize, Analyze and Visualize Francis Turbine Runners*, *IFAC-PaperOnline*, Vol.48, (No.3), 1900-1905, (2015).
- [32] J. Liu, J. Zhao, X. Yang, Jiming Liu, X. Qu, X. Wang. *A Reconstruction Algorithm for Blade Surface Based on Less Measured Points*, *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol.2015, (2015).
- [33] T. Milos. *A new method to obtain the Blade Surface intersections with horizontal cutting planes of the Francis turbine runner*, *Hydraulica*, 2-3 (No.19), 26-35,(2006).
- [34] J. F. Dube, F. Guibault, M.G. Vallet and J.Y. Trepanier. *Turbine Blade Reconstruction and Optimization Using Subdivision Surfaces*, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1327,(2006).
- [35] SHE C. H. and C. C. CHANG, *Study of applying reverse engineering to turbine Blade manufacture*, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.21, (No.10), 1580,(2007).
- [36] E. Flores, L. Bornard, L. Tomas, J Liu, M. Couston. *Design of large Francis turbine using optimal methods*, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol.15 (No.2), 022023, (2012).
- [37] Chatgpt. <https://chatgpt>

[38] F. Ayancik, U. Aradag, E. Özkaya, K. Celebioglu, O. Unver and S. Aradag. *Hydro Turbine Runner Design and Manufacturing, Interntional Journal of Materials, Mechanics and Manu-facturing, Vol.1, (No.2), 162-165, (2013).*

[39] A. Nourbakhsh, O. S. Razavi, H. Khodabakhsh and A. Mehrabadi. *New Approach for Hydraulic Design of Francis Runner Base don Empirical Correlations, International Conference on Small Hydropower-Hydro Sri Lanka, Vol.22, (2007).*

NOMBRE DEL TRABAJO

Definición de los parámetros de forma geométrica de los álabes del rodete de la turbina Francis 99

AUTOR

María Goretti Gama Guzmán

RECUENTO DE PALABRAS

15712 Words

RECUENTO DE CARACTERES

78768 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

106 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

6.7MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 3, 2024 7:54 AM CST

FECHA DEL INFORME

Sep 3, 2024 7:55 AM CST

● **32% de similitud general**

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

- 31% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 11% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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



A quien corresponda,

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

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

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica	
Título del trabajo	DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FORMA GEOMÉTRICA DE LOS ÁLABES DEL RODETE DE LA TURBINA FRANCIS 99.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Ing. María Goretti Gama Guzmán	1210524h@umich.mx
Director	Dr. Sergio Ricardo Galván González	sergio.galvan@umich.mx
Codirector	Dr. Giovanni Delgado Sánchez	giovanni.delgado@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Miguel Villagómez Galindo	mae.cs.ingenieria.mecanica@umich.mx

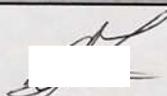
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Chatgpt

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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



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

Datos del solicitante	
Nombre y firma	María Goretti Gama Guzmán 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 28 de agosto del 2024.