



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



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

## **DISEÑO PARAMÉTRICO DE LOS ÁLABES DEL RODETE DE UNA TURBINA FRANCIS**

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

**PRESENTA:  
GIOVANNI DELGADO SÁNCHEZ**

**ASESORES:**

**DR. SERGIO RICARDO GALVÁN GONZÁLEZ**  
Philosophiae Doctor (Ph.D.) en Génie Mécanique (Aerothermique  
numérique)

**DRA. LAURA ALICIA IBARRA BRACAMONTES**  
Doctorado en Ciencias (Física)

**Morelia, Michoacán, Julio de 2014**

## DEDICATORIA

**A DIOS:** El presente trabajo va dedicado primeramente a Dios que me dio la oportunidad de vivir, que me regalo una familia maravillosa y me brindó la oportunidad de llegar hasta esta etapa de mi vida.

**A MIS PADRES Sra. Anabel Sánchez Campos, Sr. J. Lourdes Delgado Bahena:** No hay palabras que describan el profundo sentimiento mis padres, quienes durante todos estos años confiaron en mí, comprendieron mis ideales, me levantaron del suelo en cada caída, apoyaron con sus hombros mis esperanzas y compartieron mis sueños.

**A MIS HERMANOS** Luis Alberto, Monserrat y Ma. Isabel. Delgado Sánchez: Por la confianza recibida, el apoyo incondicional que siempre me han brindado por las alegrías que me brindan cada día y por tantas cosas que hemos pasado juntos. Sé que cuento siempre con ellos y a todos los miembros de mi familia que siempre están apoyándome.

**A MIS AMIGOS:** De la facultad por el apoyo y lealtad, por compartir los ratos felices y las angustias, los tiempos libre y los tiempos difíciles.

**A MIS ASESORES:** Dr. Sergio Ricardo Galván González, Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes por tener la paciencia, el tiempo y la disposición de trabajar en este proyecto.

**A LA F.I.M.:** Facultad de ingeniería mecánica y a sus profesores por la dedicación, el trabajo y el tiempo que me brindaron.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.2 ANTECEDENTES .....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	9
1.4 HIPÓTESIS .....	11
1.5 OBJETIVOS .....	12
1.5.1 OBJETIVO GENERAL .....	12
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
<b>EL ÁLABE DEL RODETE FRANCIS</b> .....	<b>14</b>
2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS .....	15
2.3 TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS .....	16
2.3.1 TURBINA PELTON.....	16
2.3.2 TURBINA KAPLAN.....	17
2.3.3 TURBINA FRANCIS .....	18
2.4 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA FRANCIS.....	21
2.4.1 ÁLABES DEL RODETE .....	22
2.4.2 INTERCAMBIO DE ENERGÍA EN EL RODETE .....	24
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>27</b>
<b>METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL ÁLABE</b> .....	<b>27</b>
3.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA .....	28
3.2. COORDENADAS DEL ÁLABE REAL.....	29
3.3 FUNCIÓN PARAMÉTRICA DEL PERFIL .....	33
3.3.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PERFILES AERODINÁMICOS .....	34
3.3.2 CLASIFICACIÓN DE PERFILES AERODINÁMICOS .....	35
3.3.3 SERIE NACA DE 4 DÍGITOS.....	36
3.3.4 SERIE NACA DE 5 DÍGITOS.....	38
3.3.5 SERIE NACA DE 4 Y 5 DÍGITOS MODIFICADA .....	39
3.4. PROGRAMACIÓN EN MATLAB .....	41
3.5 COMPARACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE I-SIGHT® .....	41
3.6. CONSTRUCCIÓN DEL ÁLABE EN GAMBIT .....	43
3.7 CONSTRUCCIÓN AUTOMÁTICA DEL DOMINIO COMPUTACIONAL.....	44

<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>49</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS $m, p, t$ .....	49
4.2 RESULTADOS DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS .....	54
4.2.1 MODELACIÓN DEL PERFIL EMPLEANDO SERIES NACA DE 4 Y 5 DÍGITOS ..	54
4.2.2 MODELACIÓN DEL PERFIL MEDIANTE UN PARÁMETRO CONSTANTE DEL ESPESOR RESPECTO A LA LÍNEA DEL CAMBER.....	56
4.2.3 MODELACIÓN DEL PERFIL MEDIANTE UNA DISTRIBUCIÓN DE ESPESORES .....	59
4.2.4 MODELACIÓN PROPUESTA DEL PERFIL UTILIZANDO EL PROGRAMA I- SIGHT PARA LA ESTIMACIÓN DE VALORES $m, p, t$ .....	61
4.3 INTEGRACIÓN DE LA CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ÁLABE .....	64
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>70</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Eficiencia alcanzada hasta ahora medida para los tres tipos de turbinas más comunes.....	9
<b>Tabla 3.1</b> Valores de $m$ y $k_1$ [28,29].....	39
Tabla 3.2 Valores de <b><math>an</math> y <math>dn</math></b> .....	40
Tabla 4.1 Parámetros obtenidos de los perfiles reales.....	54
Tabla 4.2 Valores finales alcanzados en la optimización.....	64
Tabla 4.3 Valores de los coeficientes de ajuste obtenidos para las curvas de distribución de $m$ , $p$ y $t$ , mediante un ajuste polinomial de 4 <sup>to</sup> grado.....	66
Tabla 4.4 Valores de los coeficientes de ajuste para las curvas de distribución de $m$ , $p$ y $t$ .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Representación esquemática de una Central Hidroeléctrica. ....	1
<b>Figura 1.2</b> (a) Distribución de las pérdidas de energía en una turbina Francis en base a su operación, (b) componentes de una turbina del tipo Francis [3] .....	2
<b>Figura 1.3</b> Uso de NURBS para la parametrización del álabes .....	6
<b>Figura 1.4</b> Ejemplos de los álabes del rodete de una turbina Francis [13].....	6
<b>Figura 1.5</b> La imagen del lado izquierdo muestra los parámetros de control del álabes del rodete, la imagen del lado derecho muestra la forma modificada propuesta [14].....	7
<b>Figura 1.6</b> Ejemplo de la superficie de distribución del espesor y álabes [14].....	7
<b>Figura 1.7</b> Parametrizado del álabes utilizando NURBS [15]. ....	8
<b>Figura 1.8</b> Geometría de un álabes de una veleta parametrizada [15]. ....	8
<b>Figura 2.1</b> Componentes de una central hidroeléctrica [17].....	15
<b>Figura 2.2</b> Turbina Pelton [18]. ....	17
<b>Figura 2.3</b> Turbina Kaplan [19].....	18
<b>Figura 2.4</b> Turbina Francis [20] .....	20
<b>Figura 2.5</b> Cámara espiral de una turbina Francis [20]. ....	20
<b>Figura 2.6</b> Rodete de una Turbina Francis [20].....	21
<b>Figura 2.7</b> Sección transversal de una turbina típica Francis. ....	22
<b>Figura 2.8</b> Modelo de un rodete de una turbina Francis.....	23
<b>Figura 2.9</b> Corte de una turbina Francis. ....	24
<b>Figura 2.10</b> Triángulos de velocidades de una turbina Francis. ....	25
<b>Figura 2.11</b> Flujo meridional en un rodete Francis de alta velocidad específica. ....	26
Figura 3.1 Etapas propuestas para la parametrización de los álabes del .....	28
Figura 3.2 Dominio computacional completo de dónde se obtuvieron.....	30
Figura 3.3 Álabes con su dominio computacional. ....	30
Figura 3.4 Álabes real en forma sólida y de alambre.....	31
Figura 3.5 Cortes del álabes real a través de planos. ....	32
Figura 3.6 Álabes real completo del rodete construido por los cinco perfiles en GAMBIT®. ....	33
Figura 3.7 Esquema de un perfil aerodinámico con sus componentes.....	34
Figura 3.8 Esquema indicando las ecuaciones básicas para formar un perfil. ....	36
<b>Figura 3.9</b> Algoritmo de construcción de los perfiles del álabes en bloques el cual fue programado en MATLAB. ....	41
Figura 3.10 Diagrama de flujo para el ajuste por la diferencia de mínimos.....	42
<b>Figura 3.11</b> Secciones que conforman el nuevo álabes con un sistema de.....	44
Figura 3.12 Definición de los perfiles del álabes.....	45
Figura 3.13 Construcción del dominio computacional.....	45
Figura 3.14 Esquema de fijación de los bloques para cada pasaje del flujo.....	46
Figura 3.15 Mallado de las caras del dominio computacional incluida .....	47
<b>Figura 3.16</b> Dominio computacional completo del álabes de una turbina Francis. ....	48
Figura 4.1 Álabes real no normalizado .....	49

Figura 4.2	Álabe real normalizado en $x, y$ .	50
Figura 4.3	Perfil 1 real representado en el programa EXCEL.	50
<b>Figura 4.4</b>	Primeros perfiles seleccionados del álabe real indicando su lado extradós, intradós y la línea media o <i>camber</i> .	51
Figura 4.5	Comparación de los primeros perfiles del álabe real. Perfil 1 indicado de color rojo y el perfil 2 de color azul.	52
Figura 4.6	Últimos perfiles seleccionados del álabe real indicando su lado extradós, intradós y la línea media o <i>camber</i> .	52
Figura 4.7	Comparación de los últimos perfiles del álabe real. Perfil 4 indicado de color rojo y el perfil 5 de color azul.	53
Figura 4.8	El perfil 3 o perfil central del álabe presentó una región con	53
Figura 4.9	Perfil aerodinámico de una serie NACA de 4 dígitos.	54
Figura 4.10	Perfil aerodinámico de una serie NACA de 5 dígitos.	55
Figura 4.11	Comparación de un perfil real (Perfil 2) representado en color rojo y un perfil analítico de una serie NACA de 4 dígitos representado en color verde. La línea de combadura media o <i>camber</i> está indicado en color azul.	55
Figura 4.12	Comparación de un perfil real (Perfil 4) representado con una línea punteada en color azul y el perfil analítico correspondiente a una serie NACA de 5 dígitos representado con una línea continua de color azul. La línea de combadura media de color verde corresponde al <i>camber</i> del perfil analítico.	56
Figura 4.13	Representación del perfil del álabe propuesto por Banaszek & Tesch [30].	57
Figura 4.14	Generación de dos perfiles diferentes cuando se mantiene constante el parámetro $\delta$ y se varían los valores de $m, p$ . Para una $\delta = 0.3$ .	58
Figura 4.15	Ejemplo de diferente distribución de espesores variando $\delta$ y dejando los parámetros $m$ y $p$ fijos.	58
Figura 4.16	Curva de distribución de espesores $yt/c$ utilizando una serie NACA de 4 dígitos, variando el espesor máximo en cada perfil. Para $t = 0.1$ indicada con la línea de color negro, $t = 0.3$ indicada con rojo y $t = 0.5$ indicada con color verde.	59
Figura 4.17	Perfiles construidos a partir de una serie NACA de 4 dígitos con los	60
Figura 4.18	Perfiles construidos a partir de una serie NACA de 4 dígitos utilizando el valor $t$ del Perfil 1, con:	60
Figura 4.19	Comparación del Perfil 2 real en color rojo, el perfil analítico.	62
Figura 4.20	Perfil real para la sección 4 representado con una línea punteada de color azul, el perfil analítico con una línea continua de color rojo y la línea del <i>camber</i> de color verde punteada.	63
Figura 4.21	Comparación del Perfil 3 real en color rojo, el perfil analítico.	63
Figura 4.22	Gráfica de los valores de $m$ para las cinco secciones del álabe seleccionadas utilizando un ajuste polinomial de 4 <sup>to</sup> grado.	65
Figura 4.23	Gráfica de los valores de $p$ para las cinco secciones del álabe seleccionadas utilizando un ajuste polinomial de 4 <sup>to</sup> grado.	65
Figura 4.24	Gráfica de los valores de $t$ para las cinco secciones del álabe seleccionadas utilizando un ajuste polinomial de 4 <sup>to</sup> grado.	66
Figura 4.25	Gráfica de los valores de $m$ aumentando a 10 el número de secciones estudiadas en el álabe real y aplicando un ajuste polinomial de 3 <sup>er</sup> grado.	67
Figura 4.26	Gráfica de los valores de $p$ para cinco secciones del álabe utilizando un ajuste polinomial de 3 <sup>er</sup> grado.	68

Figura 4. 27 Gráfica de los valores de  $t$  para cinco secciones del álabe utilizando un ajuste polinomial de 3<sup>er</sup> grado. .... 68

## RESUMEN

En el diseño de turbomáquinas los mayores esfuerzos del diseño paramétrico se concentran en el diseño de los álabes del rodete, los cuales pueden ser considerados geoméricamente de forma libre de considerable complejidad. Por lo tanto, la búsqueda de la forma óptima del paso de flujo por el canal mediante un enfoque paramétrico flexible de los álabes, continúa siendo un estudio fundamental por parte del diseñador y es todavía hoy en día un campo actual de investigación. Los investigadores clasifican la parametrización de los álabes en dos grupos principales: los que emplean un enfoque de sección transversal y aquellos que usan zonas de superficie. En lo que respecta a su potencial en la optimización del diseño, el enfoque de sección proporciona diferentes variables para un gran número de perfiles de álabes. Sin embargo todas éstas presentan la misma desventaja, cuando se incrementan el número de secciones requeridas para definir la forma del perfil, se incrementa también el número de variables o parámetros involucrados en el proceso de diseño. El objetivo del presente proyecto, es presentar una nueva técnica paramétrica con el enfoque de sección, para la distribución de secciones a lo largo del perfil, con un número importante de secciones sin incrementar el número de parámetros de diseño del álabe. La geometría de los álabes se toma de acuerdo con las relaciones dadas por el código numérico de perfiles aerodinámicos NACA (con cuatro y cinco dígitos). Mediante la variación de las curvas del perfil, que representan la distribución de los parámetros del álabe en cada sección a lo largo de la altura del mismo, se encontraron los datos iniciales para la construcción gráfica de un álabe real de gran longitud y con torcedura en 3D. Debido a las características geométricas complejas del álabe del rodete de una turbina Francis, se requirieron de diferentes tipos de clasificaciones NACA en diferentes secciones del álabe. Con esta metodología de diseño paramétrico, puede facilitarse el uso de las técnicas de optimización de diseño, acoplado con evaluaciones del desempeño del diseño basadas en el costo. Consecuentemente, la manipulación de los parámetros del álabe mediante un enorme campo de diseño propuesto por un algoritmo genético, debería brindar una variedad enorme de perfiles de álabes que son necesarios para encontrar el desempeño optimizado de la geometría del rodete.

Palabras claves.

Camber.- Línea media del perfil

Extradós: Lado succión del perfil.

Intradós: Lado presión del perfil.

## ABSTRACT

In turbomachinery the major efforts are concentrated on the parametric design of the runner blades, which can be seen geometrically as free-forms of considerable complexity. Therefore, the search for the optimal shape of the flow passage through the channel by means a flexible parametric runner blades approach remains as a fundamental effort of the designer and it is up today a matter of the research field. Researchers classify the blades parameterization in two main groups: those that use a sectional approach and those that use surface zones. In regard to their potential for design optimization purposes, the sectional approaches provide different variables for a large number of blade profiles; however, all of them present the same disadvantage: any increase in the number of required sections to define the blade shape, it becomes with an increase in the number of variables or parameters involved with the design process. The goal of the present project it is to introduce a new technique with the sectional approach for any section distribution along the blade direction without increasing the blade design parameters. The airfoils geometry was taken according to the relations given by for the airfoil numerical NACA code (with four and five digits). By varying the shapes of the curves, which represent the blade parameters distribution on each section along the spanwise direction, the initial data for the graphical construction of a real long and twisted 3D blade was found. Due to the complex geometric features of the runner blades in a Francis turbine, different NACA classifications were required in different sections along the blade. With this parametrical design methodology, it might be facilitated the use of design optimization techniques coupled with design performance evaluations based on cost. Consequently, the manipulation of the parameters blade using a genetic algorithm as a design technique, this should provide an enormous variety of blade shapes, which are necessary to find an optimized performance of the runner geometry.

Camber : Midline Profile.

Extradados: suction side profile.

Intradados: Side pressure profile.

# CAPÍTULO 1

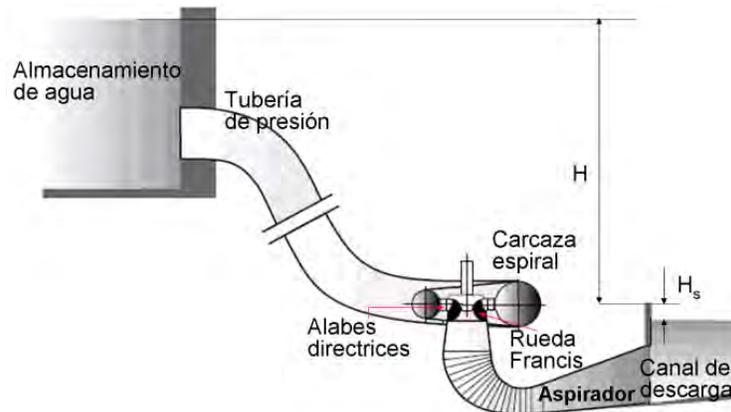
## INTRODUCCIÓN

La energía hidráulica es una fuente limpia y renovable puesto que utiliza únicamente agua. Las turbomáquinas que aprovechan esta fuente de energía son las turbinas hidráulicas. Este tipo de turbinas se construyen desde hace mucho tiempo y la tecnología empleada en ese proceso ya ha alcanzado una gran madurez, con una eficiencia máxima mayor al 95%. No obstante, lograr esta eficiencia requiere de un gran esfuerzo ingenieril, ya que las turbinas hidráulicas usualmente son productos individuales y deben diseñarse para unas condiciones locales determinadas, tales como la altura de salto (*head*) y el caudal o descarga. Requiere por lo tanto, un diseño específico para los diferentes componentes de la turbina. El proceso tradicional de diseño contempla experimentos, medidas y pruebas de modelos que implican una gran inversión en tiempo y dinero.

En el sector hidroeléctrico, pequeñas mejoras en la geometría de los elementos rotantes de una turbina hidráulica pueden tener un gran efecto positivo, desde un punto de vista de costos de mantenimiento y de operación. En ese sentido, para que dichas mejoras puedan identificarse en los primeros momentos del proceso de diseño, es necesario considerar todos y cada uno de los componentes y las respectivas interacciones entre ellos.

Esto se ve reflejado en la eficiencia hidráulica de la turbina, ya que juega un papel preponderante sobre el rendimiento de las Centrales Hidroeléctricas (CH), visto como un indicador de la **conversión** de la **energía hidráulica disponible** a **energía mecánica**, la cual a su vez será convertida a **energía eléctrica** en el generador. De hecho, el nivel absoluto de rendimiento de una CH, se caracteriza por las pérdidas en los componentes de la turbina mientras éstas varían con la modificación de la **carga** o el **caudal**.

En la Figura 1.1, se muestra el esquema de una Central Hidroeléctrica así como los principales componentes que la conforman, como son: un tanque de almacenamiento, un rodete acoplado a un generador por medio de una flecha y el tubo de aspiración [1].

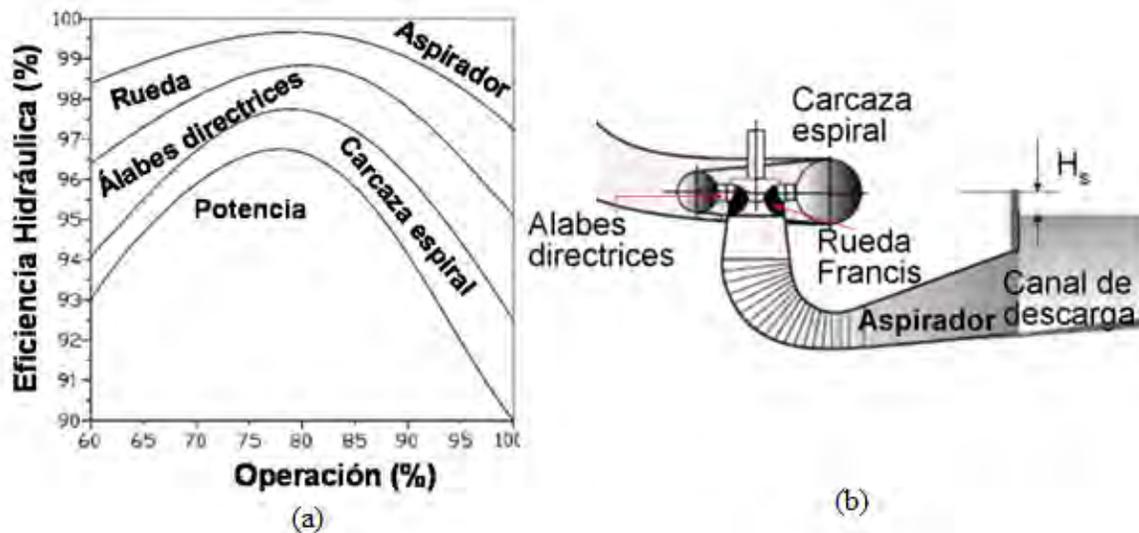


**Figura 1.1** Representación esquemática de una Central Hidroeléctrica.

Estos dos últimos elementos dan una primera impresión de la variedad de posibles configuraciones de diseño, para una turbina hidráulica. Esta diversidad de formas hace que sea imposible definir un diseño general que abarque todos los casos. Como consecuencia de ello, nos centramos en el estudio y aplicación de los aspectos de diseño específicamente para Turbinas hidráulicas de tipo Francis. Aunque las conclusiones se relacionan con Turbinas Francis, pueden aplicarse a otras configuraciones de diseño.

El éxito del diseño de las turbinas Francis es doble, debido a su amplio rango de aplicación ( $10 < H < 350$ ) y sus altos niveles de eficiencia ( $\geq 90\%$ ) alcanzada. Esto se ve reflejado en el número de máquinas instaladas actualmente, que es significativamente mayor que cualquier otro tipo de turbina.

En la Figura 1.2 (a), se muestra la distribución de las pérdidas de energía en una Turbina Francis, estas pérdidas dependen en gran medida de las condiciones de operación, así como también, una gran parte de las pérdidas, se dan en el tubo de aspiración, las cuales a su vez se deben al perfil de velocidades de entrada, generado por el rodete de la turbina. En la Figura 1.2 (b), se muestran los componentes de una turbina del tipo Francis [2-4]



**Figura 1.2** (a) Distribución de las pérdidas de energía en una turbina Francis en base a su operación, (b) componentes de una turbina del tipo Francis [3]

Eficiencias más altas para rangos de operación mayores son comúnmente esperadas para turbinas hidráulicas. Por esta razón, la necesidad de una central hidroeléctrica para operar con frecuentes cambios de potencia y carga variable, impone un requisito serio en la turbina hidráulica: con todos los valores de la potencia y carga relacionados, ésta debe proporcionar la mayor eficiencia posible. Esta eficiencia está determinada, sobre todo, por la forma geométrica del álabe del rodete. Bajo tales condiciones, las mejoras provienen de pequeños detalles y el problema se encuentra en la diferencia sutil que puede existir entre dos propuestas de diseño diferentes.

Como resultado de esa situación, los ingenieros han incorporado progresivamente nuevas tecnologías y desarrollos para mejorar el ciclo de diseño. Esto ha permitido que las nuevas soluciones se obtengan en períodos de tiempo más cortos. Tradicionalmente las mejoras se llevaban a cabo por especialistas, que habían adquirido cierta sensibilidad para reconocer la fuente del progreso. Hoy en día, la integración de las herramientas asistidas por computadora (CAD, CFD, FEM, etc.) permiten lograr estos avances de formas más eficientes, aumentando la accesibilidad y la comprensión para los profesionales con menor especialización.

## 1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En diferentes países, incluyendo México, la rehabilitación de las turbinas Francis se ha incrementado debido al bajo rendimiento, la pobre confiabilidad, el largo intervalo entre mantenimientos y el incremento en el costo del mantenimiento de las Centrales Hidroeléctricas puestas en servicio desde los años sesentas y setentas. Estas CH no han sido bien adaptadas a los requerimientos actuales de demanda de energía. Como resultado, la operación de las turbinas: presentan un bajo desempeño, baja eficiencia, severa cavitación y gran inestabilidad. Así, en las condiciones actuales del mercado eléctrico, la rehabilitación de las centrales hidroeléctricas es necesaria para mejorar su rendimiento.

En las plantas hidroeléctricas, el rodete que acciona el generador es, sin duda, un elemento clave del proceso de conversión de energía, debido a que la cantidad de energía producida por una turbina es, básicamente, igual al cambio del momento angular a través de dicho componente. En realidad, los resultados de las restauraciones modernas muestran que los nuevos diseños de los rodetes instalados dentro de las estructuras existentes de la turbina (caja espiral, álabes directrices, tubo de aspiración) pueden mejorar la potencia de la planta en un 10 a 30% [5,6]. Teóricamente, el flujo que sale del rodete no debería tener remolinos, sin embargo, esto no es posible en la práctica y la potencia ganada gracias al diseño de los álabes del rodete puede ser distorsionada por el flujo entregado al tubo de aspiración. Es decir, la energía generada por una turbina hidráulica de penderá en gran medida de la conversión de la energía del rodete que está determinada principalmente por la forma geométrica del álabe en el rodete.

La búsqueda de la forma óptima del paso de flujo por el canal mediante un enfoque paramétricamente flexible de los álabes, continúa siendo fundamental para el diseñador y actualmente permanece como un campo de investigación. En lo que respecta a su potencial para la optimización de diseño, la aproximación por secciones proporciona diferentes variantes para describir los perfiles de álabes, sin embargo, todas éstas presentan la misma desventaja cuando se incrementa el número de secciones requeridas para definir la forma del perfil, esto es, se incrementa también el número de variables (parámetros) que serán involucrados en el proceso de intercambio de energía.

En conclusión, los enfoques paramétricos tridimensionales tradicionales requieren un número significativo de parámetros para definir correctamente su forma, la cual es de interés tratar de disminuir el número de parámetros para llevar a cabo la optimización del diseño del rodete que se hará posteriormente a este trabajo.

## 1.2 ANTECEDENTES

Para responder a las demandas actuales de competencia en los diseños, ya sea en calidad y tiempo, en los últimos 15 o 20 años, se han presentado nuevas herramientas basadas en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés), como un elemento más para el diseño y análisis de turbinas y que permiten evaluar el comportamiento de los flujos industriales, acortando significativamente la inversión de tiempo con el consecuente ahorro de dinero. Parte de estas investigaciones han sido enfocadas sobre la parametrización de los componentes de la turbomáquinaria, tales como el perfil de los álabes de compresores [7-10] y el diseño del perfil del álabe del rodete [11,12].

Mientras que el proceso tradicional de parametrización combina la experiencia del diseñador para guiar el proceso de diseño con información de ensayos experimentales, esta alternativa utiliza el manejo de los parámetros de diseño mediante un algoritmo basado en la información proporcionada por la simulación en CFD. Con estas herramientas numéricas, se pueden evaluar los tres principales objetivos sobre los que se basa el diseño del rodete:

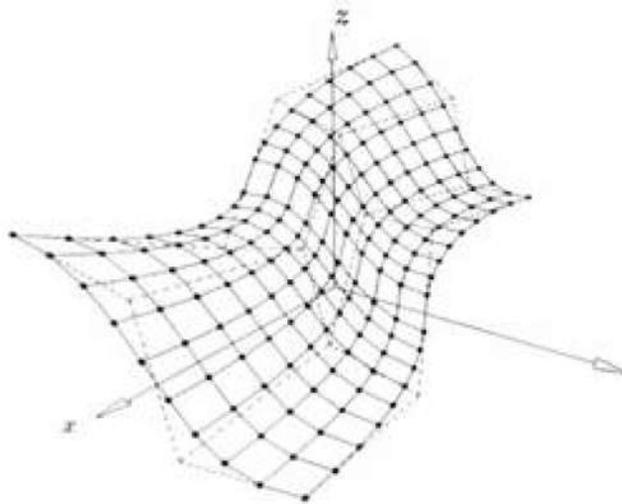
- Cambio de presión entre la entrada y salida del fluido.
- Mínima presión alcanzada en el lado de succión.
- Flujo entregado al aspirador.

Las técnicas anteriores definen el álabe como un conjunto de perfiles. La reconstrucción de un álabe consiste en la generación de una superficie a partir de ese conjunto de perfiles. La calidad de la reconstrucción depende en primer lugar del número y las características de las secciones, así como de las técnicas utilizadas para ensamblar los perfiles.

Para lograr el equilibrio en estas condiciones, el diseño del nuevo álabe del rodete requerirá de una parametrización que mejore su diseño, lo que provocará una influencia sobre el flujo de fluidos.

A continuación se muestran algunos resultados de trabajos encontrados en la literatura.

En la Figura 1.3, se muestra un ejemplo de algunos de los dominios usando NURBS (Non Uniform Rational B- Splines) [13].



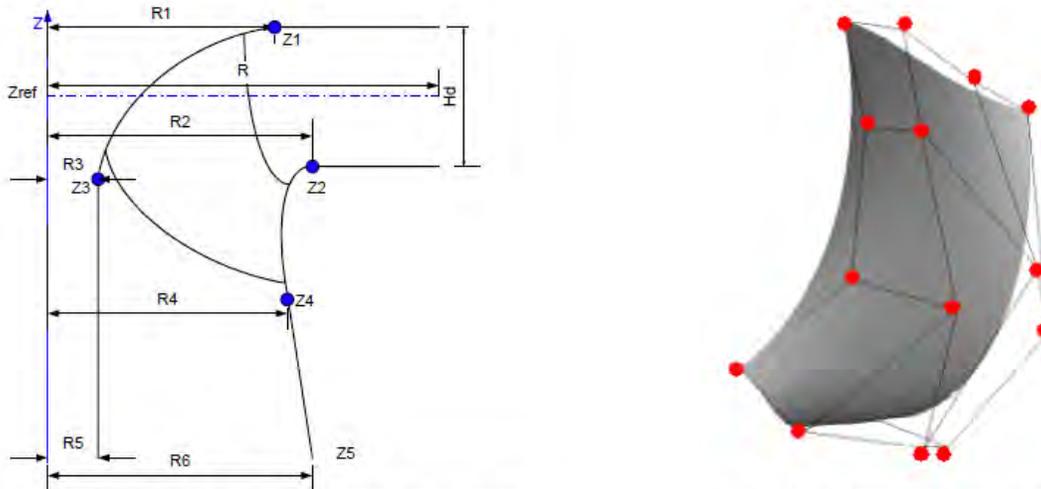
**Figura 1.3** Uso de NURBS para la parametrización del álabe del rodete de una turbina Francis [13].

En la Figura 1.4, se muestra un ejemplo de una parametrización del álabe del rodete de una turbina Francis mediante el uso de NURBS [13].



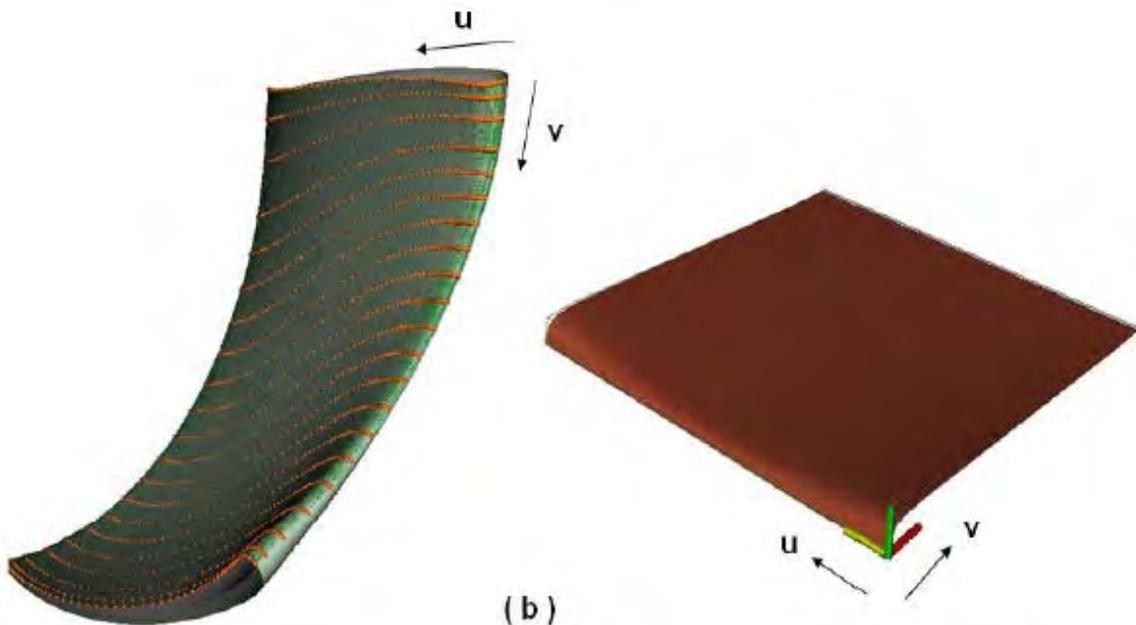
**Figura 1.4** Ejemplos de los álabes del rodete de una turbina Francis [13].

En la Figura 1.5, se muestra otra propuesta de una parametrización utilizando NURBS del álabe del rodete de una turbina Francis [14].



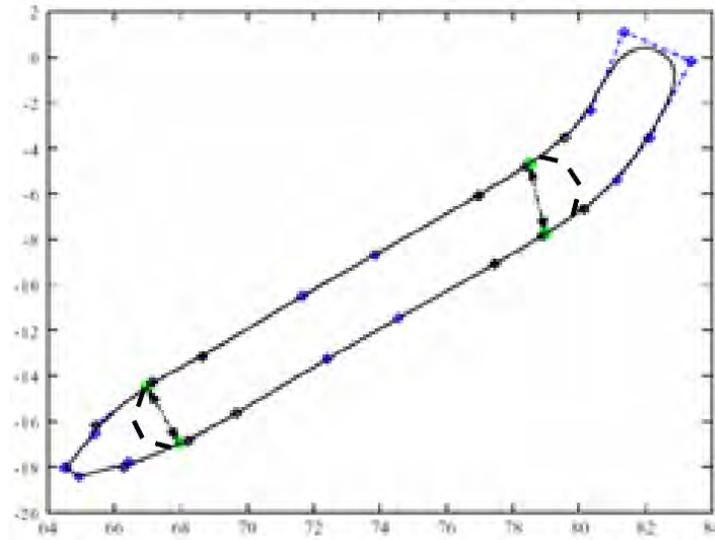
**Figura 1.5** La imagen del lado izquierdo muestra los parámetros de control del álabe del rodete, la imagen del lado derecho muestra la forma modificada propuesta [14].

En la Figura 1.6, se muestran dos superficies de distribución de espesor, definidas por NURBS (40 letra x 2 parámetros) en la superficie de la combadura, dos superficies nuevas NURBS son generadas constituyen la presión, la succión y le ponen lados a las superficies [14].



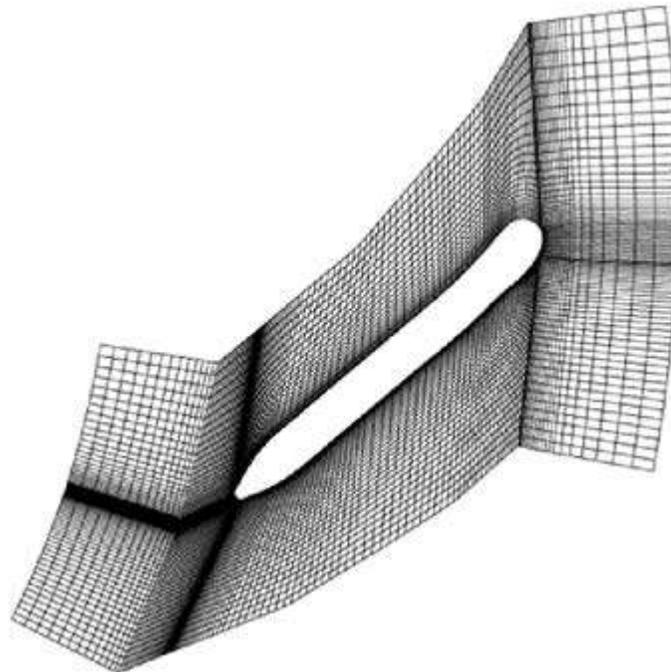
**Figura 1.6** Ejemplo de la superficie de distribución del espesor y álabe [14].

En la Figura 1.7, se muestra una parametrización de un perfil de un álabes en dos dimensiones definidas por NURBS [15].



**Figura 1.7** Parametrizado del álabes utilizando NURBS [15].

En la Figura 1.8, se muestra el álabes de una veleta ya parametrizado, listo para enviarlo a CFD para su simulación [15].



**Figura 1.8** Geometría de un álabes de una veleta parametrizada [15].

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

Las pequeñas plantas hidroeléctricas se han constituido en un elemento clave de la denominada producción verde de energía eléctrica, la cual utiliza al agua como una fuente de energía renovable.

Por otro lado, la eficiencia en el proceso de diseño y operación en turbinas hidráulicas, es uno de los principales desafíos en el campo de las turbomáquinas. Las mejoras pueden ser en términos de reducción en el tiempo de ingeniería, en un mejor rendimiento de la unidad o en un incremento en la complejidad del diseño mismo.

La eficiencia hidráulica de la turbina juega un papel preponderante sobre las Centrales Hidroeléctricas, visto como un indicador de la conversión de la energía hidráulica disponible a energía mecánica, la cual a su vez será convertida a energía eléctrica en el generador. De hecho, el nivel absoluto de rendimiento de una CH, se caracteriza por las pérdidas en los componentes de la turbina mientras éstas varían con las modificaciones, ya sea de la carga o el caudal. Se ha notado que esos dos parámetros se han vuelto cada vez más inestables a lo largo de los años, como consecuencia de la demanda, haciendo necesario maximizar la explotación de la vida útil. De acuerdo a las diferentes combinaciones de los valores de carga y caudal disponibles para la misma potencia de la turbina, existen arreglos diferentes que son bien conocidos.

En la Tabla 1.1, se reportan los límites para los tres tipos de turbinas más comunes, en donde se indica la máxima eficiencia alcanzada hasta ahora medida [16].

**Tabla 1.1** Eficiencia alcanzada hasta ahora medida para los tres tipos de turbinas más comunes.

Reaction Rate	Turbine Type	Specific speed $n_s$	Turbine Power P	Turbine Head H	Turbine Discharge Q	Max. Turbine Efficiency (Function of $n_s$ and power)
Ratio between non converted net head into kinetic energy before the runner and turbine net head	Most frequent type	$n_s \times \frac{\sqrt{Q}}{H^{0.75}}$	[MW]	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	Ratio between mechanical power at the coupling and available hydraulic power $\eta = P / (g \times H) \times (\rho \times Q) = \eta_h \times \eta_m$
> 0	Pelton	$5 < n_s < 20$	1 + 420	200+1800	0.15+50	≤ 92,5 .....
0.25 + 0,70	Francis	$25 < n_s < 100$	1 + 850	20+600	1+825	< 95,5 ....
< 1	Kaplan	> 80	1 + 160	2+90	10+800	≤ 96 .....

En base a lo anterior, se ha observado que las Centrales Hidroeléctricas en México presentan una baja eficiencia debido a la obsolencia del diseño hidráulico del rodete, lo que imposibilita que la unidad alcance la eficiencia esperada de las turbinas como la presentada en la Tabla 1.1.

El diseño de Turbomáquinaria sigue siendo una tarea compleja, que combina campos de la ingeniería multidisciplinaria, como la dinámica de fluidos, la ingeniería mecánica y la economía. Después de toda la experiencia acumulada a lo largo de casi un siglo, no existe una técnica única para diseñar la forma geométrica deseada. La mayoría de los procedimientos utilizados por la industria para aplicaciones de diseño se conocen parcialmente. La confidencialidad de los **“know-how”** (información y conocimientos fundamentales) adquiridos determinan las metodologías de diseño **“in-house”** (que son de la empresa exclusivamente). Sin embargo, hay principios de diseño y conceptos que pueden considerarse como conocimiento común de diseño.

Esto nos da la oportunidad mediante herramientas computacionales, de buscar la construcción del diseño del perfil del álabe del rodete que tenga una gran variedad de formas y así poder buscar el mayor intercambio de energía fluido-rodete.

## 1.4 HIPÓTESIS

Ya que la parametrización de la sección del álabe es un punto crucial en el proceso de optimización del diseño del rodete, se tiene que garantizar una representación confiable con el mínimo de parámetros posibles. Así, inspirados por el trabajo desarrollado en una optimización del diseño, basado en la parametrización de variables físicas reales de un álabe de turbina [5], se supone que la modificación de la forma de las curvas que representen la distribución de sólo tres parámetros de los perfiles NACA, en un número importante de secciones a lo largo de la envergadura del mismo, pueda construir la forma automática en 3D, un álabe real, largo y contorsionado de una turbina hidráulica. Esto nos permitirá tener una amplia gama de formas en el diseño del álabe, manejando sólo las constantes de las funciones de ajuste.

Mediante un proceso de optimización paramétrica de la sección del álabe se pueden obtener superficies curvas, partiendo de tres parámetros del perfil NACA y de un considerable número de secciones a lo largo de la envergadura del mismo, permitiendo así obtener un nuevo perfil que permita mejorar el diseño y eficiencia del álabe

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Construir un álabe de rodete Francis de una turbina hidráulica a través de herramientas numéricas, sólo con la manipulación de los parámetros que definen los perfiles NACA a través de una curva de distribución.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar las diferentes metodologías de parametrización geométrica para optimización de rodetes.
- Acoplar software multidisciplinarios para la construcción del perfil del álabe.
- Determinar la función de la curva de distribución de los parámetros de los álabes del rodete que mejor se ajuste a los perfiles en diferentes secciones del álabe real.
- Construcción automáticamente de los perfiles geométricos generados para los álabes del rodete.
- Manipular manualmente los parámetros principales de la geometría de los álabes del rodete.
- Construir (Optimizar) de forma automática el canal del flujo, estableciendo la topología del dominio computacional.

Finalmente se puede comentar que durante la rehabilitación de una Turbina Francis, los componentes principales que se reemplazan son los rodetes, mientras que el resto de los componentes generalmente permanecen sin modificaciones. Esta rehabilitación se basa principalmente, en mejorar su intercambio de energía con el fluido de trabajo.

Actualmente, un proceso de optimización, basado en una simulación numérica, consiste en un paquete de software de simulación avanzada acoplado con un entorno CAD, lo cual puede desempeñar un papel crítico en los diseños preliminares para detectar posibles problemas y para encontrar el camino más rápido para la optimización de la máquina.

Así, este proyecto pretende hacer una parametrización de los álabes del rodete de una turbina Francis, tomando en cuenta tres variables reales de diseño de los perfiles NACA ( $m$ ,  $p$  y  $t$ ), utilizando una curva de distribución para modificar automáticamente estos parámetros mediante herramientas numéricas. Esto ayudaría a tener un amplio espacio de formas y diseños de álabes con un mínimo de variables posibles, para a reducir el costo computacional en la búsqueda del perfil óptimo.

# CAPÍTULO 2

## EL ÁLABE DEL RODETE FRANCIS

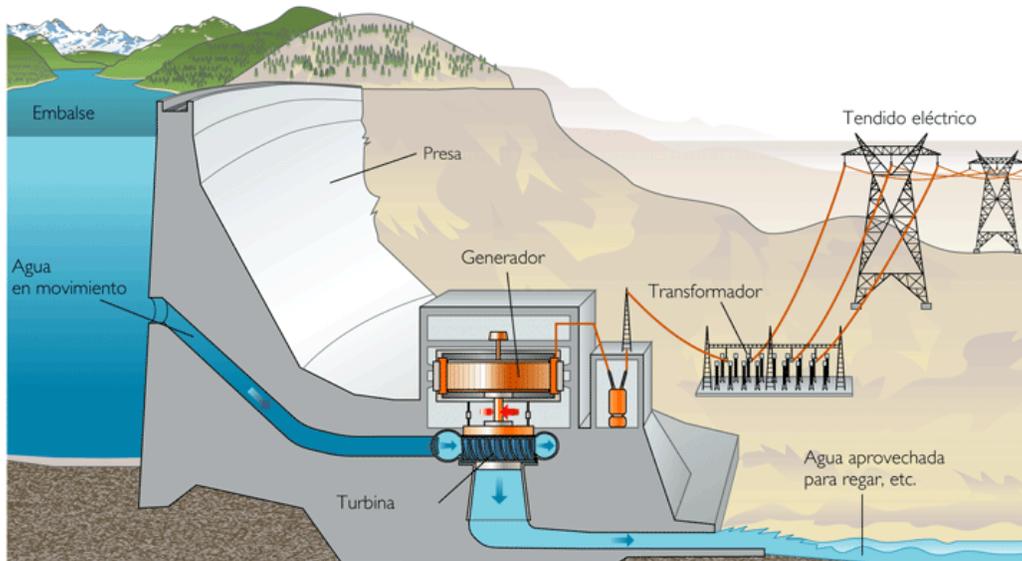
### 2.1 ENERGÍA HIDRÁULICA

Se denomina energía hidráulica o energía hídrica a aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas. Es un tipo de energía verde cuando su impacto ambiental es mínimo y usa la fuerza hídrica sin represarla, en caso contrario es considerada sólo una forma de energía renovable.

Se puede transformar a muy diferentes escalas, existen desde hace siglos pequeñas explotaciones en las que la corriente de un río mueve un rotor de palas y genera un movimiento aplicado, por ejemplo, en molinos rurales. Sin embargo, la utilización más significativa la constituyen las Centrales Hidroeléctricas de represas, aunque estas últimas no son consideradas formas de energía verde por el alto impacto ambiental que producen.

Cuando el Sol calienta la Tierra, además de generar corrientes de aire, hace que el agua de los mares, principalmente, se evapore y ascienda por el aire y se mueva hacia las regiones montañosas, para luego caer en forma de lluvia. Esta agua se puede coleccionar y retener mediante presas. Parte del agua almacenada se deja salir para que se muevan los álabes de una turbina engranada con un generador de energía eléctrica [17].

Esto se puede realizar mediante una central hidroeléctrica (CH), como el esquema que se muestra en la Figura 2.1, y se componen esencialmente de un tanque de almacenamiento y un rodete acoplado a un generador por medio de una flecha, que utilizan la energía potencial del agua almacenada en un lago, presa, etc. a una elevación más alta, y la convierten primero en energía mecánica y luego en energía eléctrica.



**Figura 2.1** Componentes de una central hidroeléctrica [17].

Este proceso toma en consideración varios factores, entre los cuales, uno de los más importantes es, la caída de agua. Este factor es decisivo al momento de escoger el tipo de turbina hidráulica que se instalara en la Central Hidroeléctrica.

Ya que una turbina hidráulica es la encargada de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, es de vital importancia saber elegir la turbina adecuada para cada Central Hidroeléctrica.

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS

Las turbinas se pueden clasificar de varias maneras, éstas son:

1. Según la dirección en que entra el agua:
  - a. Turbinas axiales: El agua entra en el rodete en la dirección del eje.
  - b. Turbinas radiales: el agua entra en sentido radial, no obstante el agua puede salir en cualquier dirección.
2. De acuerdo al modo de obrar del agua.
  - a. Turbinas de chorro o de acción simple o directa.
  - b. Turbinas de sobrepresión o de reacción.

3. Según la dirección del eje:
  - a. Horizontales.
  - b. Verticales.

Hay otras clasificaciones, según las condiciones de construcción, no obstante la clasificación más importante es la que las distingue de acuerdo al modo de obrar el agua, estas son de reacción o de chorro [17].

## 2.3 TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS

Aunque hay muchas turbinas que entran en estas clasificaciones, las más importantes son las siguientes:

- Turbinas Pelton.
- Turbinas Kaplan.
- Turbinas Francis

### 2.3.1 TURBINA PELTON

Lester Allan Pelton o llamado por sus amigos el carpintero, montador de ejes y poleas, inventó una de las turbinas más importantes del mundo, la turbina Pelton en 1879, mientras trabajaba en California y obtuvo su primera patente en 1880.

Una historia muy poco creíble dice que Pelton inventó su rueda cuando se fijó en cómo el agua salpicaba fuera de las fosas nasales de una vaca, mientras ésta bebía de un chorro de agua y directamente empezó a imaginarse la turbina en su cabeza y lo que eso suponía, es decir, ese invento podía cambiar el mundo de la energía.

Las turbinas Pelton, se conocen como turbinas de alta presión, la válvula de aguja que se usa para controlar el flujo de agua deja pasar un chorro de agua que choca con los álabes de la turbina transfiriéndole su energía y haciendo girar la turbina. Ésta, a su vez, hace girar un generador que está acoplado al eje de la turbina para producir energía eléctrica, como medida de seguridad se usa una válvula esférica.

Su utilización es idónea en saltos de gran altura (alrededor de 200 m y mayores) y caudales relativamente pequeños (hasta  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente) [18].

Por razones hidroneumáticas, y por sencillez de construcción, son de buen rendimiento para amplios márgenes de caudal (entre 30 % y 100 % del caudal máximo). Por ello se colocan pocas unidades en cada central que requiere turbinas de estas características.

Pueden ser instaladas con el eje en posición vertical u horizontal, siendo esta última disposición la más adecuada, la cual servirá de referencia para hacer las descripciones necesarias.

En la Figura 2.2, se muestra un esquema de una turbina Pelton.

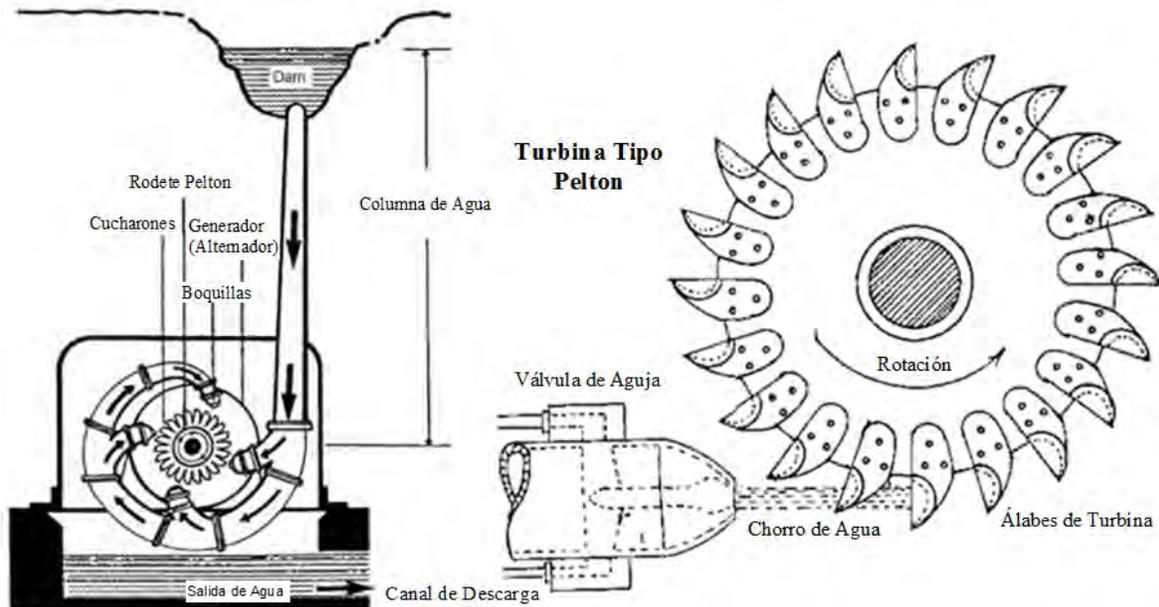


Figura 2.2 Turbina Pelton [18].

### 2.3.2 TURBINA KAPLAN

Las turbinas tipo Kaplan fueron diseñadas por el ingeniero austriaco Víctor Kaplan (1876-1934) a principios del siglo 20. A diferencia de los otros tipos de turbinas, se pueden ajustar ambos álabes (los del rotor y los álabes de guía) para adaptar la turbina a diferentes niveles del caudal. Los ejes son de orientación horizontal o vertical. Se usa este tipo de turbina en plantas de presión baja y mediana.

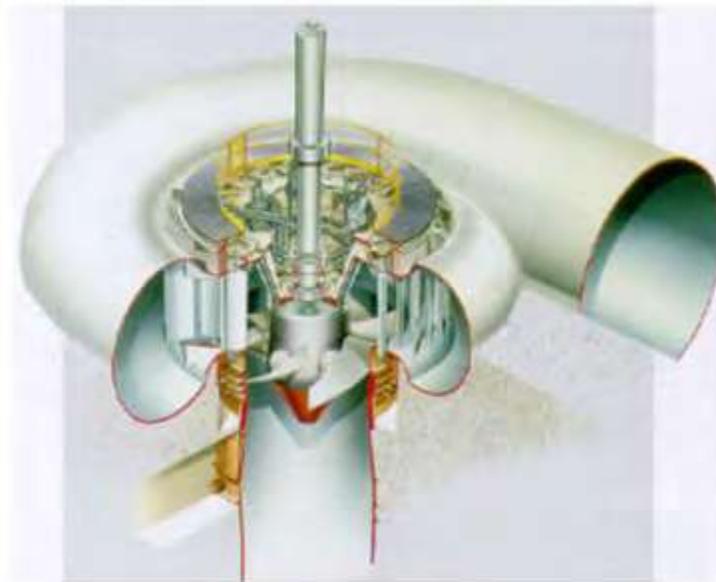
Las turbinas tipo Kaplan son turbinas de admisión total y clasificadas como turbinas de reacción. Se emplean en saltos de pequeña altura (alrededor de 50 m y menores alturas), con caudales medios y grandes (aproximadamente de 15 m<sup>3</sup>/s en adelante). Debido a su singular diseño, permiten desarrollar elevadas velocidades específicas, obteniéndose buenos rendimientos, incluso dentro de extensos límites de variación de caudal. A igualdad de potencia, las turbinas Kaplan son menos voluminosas que las turbinas Francis.

Normalmente se instalan con el eje en posición vertical, si bien se prestan para ser colocadas de forma horizontal o inclinada [19].

Esta se caracteriza por lo siguiente:

1. Se utilizan para caídas bajas.
2. El rodete recuerda la forma de una hélice de barco.
3. El ángulo de inclinación de las palas del rodete es regulable.
4. Se utilizan para gastos muy grandes.
5. La regulación se efectúa por medio de un distribuidor, como en las Francis y además con el ángulo de inclinación de las palas en el rodete.

En la Figura 2.3, se muestra un esquema de una turbina Kaplan.



**Figura 2.3** Turbina Kaplan [19].

### 2.3.3 TURBINA FRANCIS

La turbina Francis fue desarrollada en 1849 por el norteamericano James B. Francis. Se trata de una turbomáquina motora a reacción y de flujo mixto. Las turbinas Francis 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 varios cientos de metros.

Francis aplicó principios y métodos de prueba científicos para producir la turbina más eficiente elaborada hasta la fecha. Entre los aspectos más importantes son sus métodos matemáticos y gráficos de cálculo que mejoraron el estado del arte en lo referente al diseño e ingeniería de turbinas, sus métodos analíticos permitieron diseños seguros de turbinas de alta eficiencia y ha hecho que este tipo de turbina sea la más ampliamente usada en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas [20].

Las turbinas Francis son conocidas como turbinas de sobrepresión, por ser variable la presión en las zonas del rodete, o de admisión total, ya que éste se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia. También se conocen como turbinas radiales-axiales y turbinas de reacción.

Las turbinas Francis, son de rendimiento óptimo, pero solamente entre unos determinados márgenes (para 60 % y 100 % del caudal máximo), siendo una de las razones por la que se disponen varias unidades en cada central, con el objeto de que ninguna trabaje, individualmente, por debajo de valores del 60 % de la carga total.

Al igual que las turbinas Pelton, las turbinas Francis pueden ser instaladas con el eje en posición horizontal, o vertical, siendo esta última disposición la más generalizada por estar ampliamente experimentada, especialmente en el caso de unidades de gran potencia. Para describirlas, nos basaremos en turbinas de eje vertical.

Además estas turbinas se caracterizan por lo siguiente:

1. Están formadas por una espiral que va a alimentar al rodete.
2. Se utilizan para caídas medianas.
3. Tienen un distribuidor que orienta el agua hacia el rodete.
4. A semejanza de una bomba centrífuga.
5. El agua no está a la presión atmosférica.
6. Descargan a contra presión.
7. Generalmente están provistas de una válvula mariposa como medida de prevención.

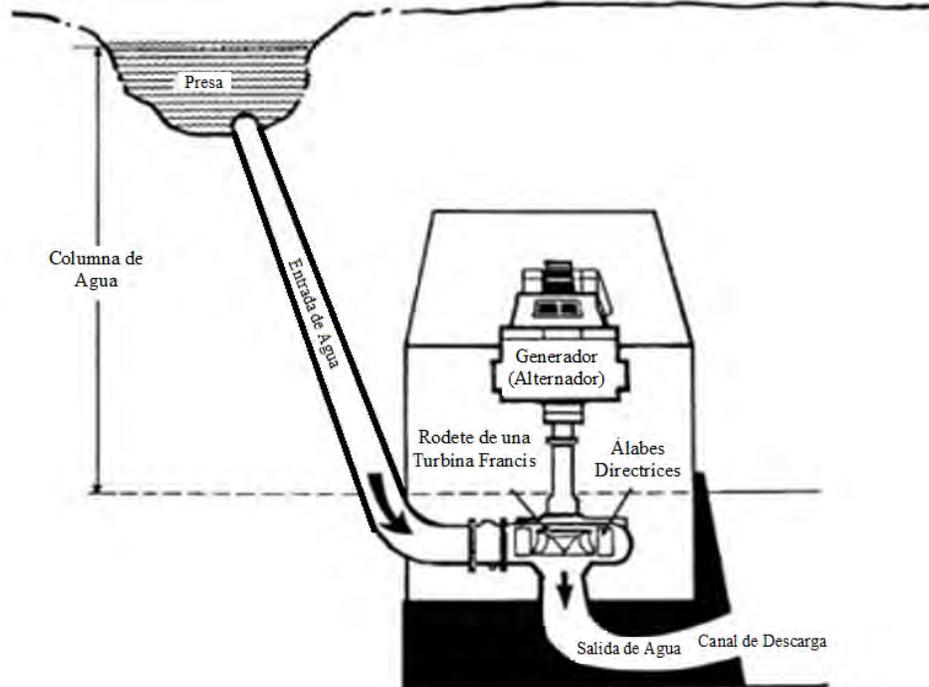
Se clasifican, en función de la velocidad específica del rotor y de las características del salto.

Turbina Francis lenta: Para saltos de gran altura, alrededor de 200 m o más.

Turbina Francis normal: Indicada en saltos de altura media, entre 200 y 20 m.

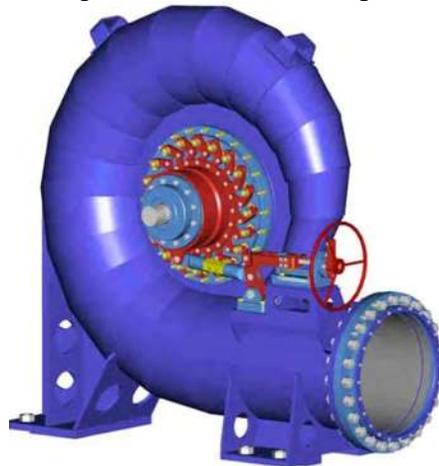
Turbinas Francis rápidas y extra rápidas: Apropriadas para saltos de pequeña altura, inferiores a 20 m.

En la Figura 2.4, se muestra un esquema de una turbina Francis.



**Figura 2.4** Turbina Francis [20]

En la Figura 2.5, se muestra un esquema de la cámara espiral de una turbina Francis [20].



**Figura 2.5** Cámara espiral de una turbina Francis [20].

En la Figura 2.6, se muestra el rodete de una turbina Francis [20].



**Figura 2.6** Rodete de una Turbina Francis [20]

Esta clasificación da una primera impresión de la variedad de posibles configuraciones de diseño para una turbina hidráulica. Esta diversidad de formas hace que sea imposible definir un diseño general que abarque todos los casos. Como consecuencia de ello nos centramos en el estudio y la aplicación de los aspectos de diseño específicamente para Turbinas hidráulicas. A un que las conclusiones se relacionan con turbinas del tipo Francis, pueden ser incorporadas a las otras configuraciones de diseño.

## **2.4 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA FRANCIS**

La moderna turbina Francis utiliza flujo de entrada puramente radial a través de los álabes directrices estacionarios, pero los rodetes son dispositivos de flujo mezclado con una componente del flujo en la dirección axial. La tendencia de un dispositivo de flujo de entrada puramente radial a través de un dispositivo de flujo mixto es la de comportarse como un dispositivo de flujo aproximadamente axial, y ésta aumenta a medida que se incrementa la velocidad específica.

En la Figura 2.7, se muestra el canal de flujo de una moderna turbina tipo Francis de eje vertical con los principales componentes: una carcasa espiral, los álabes directrices estacionarios, un rodete y el tubo de aspiración por mencionar algunos.

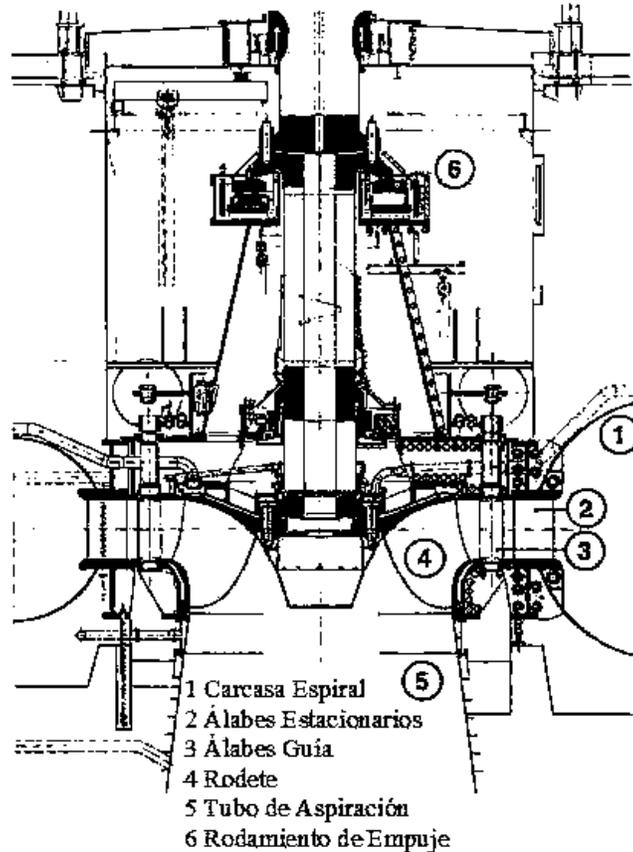


Figura 2.7 Sección transversal de una turbina típica Francis.

La carcasa espiral de una turbina Francis, está diseñada de tal manera, que la distribución de velocidades en la dirección circunferencial en la entrada de los álabes directrices es uniforme y el ángulo de incidencia sobre la altura de los álabes directrices sólo varía poco. La función principal de los álabes directrices, es llevar las cargas de presión en la carcasa espiral y cubierta de la altura de la turbina. Su segundo propósito, es el de dirigir el flujo hacia los álabes directrices con un ángulo óptimo de incidencia. Las álabes directrices son el único dispositivo capaz de controlar el flujo y por lo tanto la salida de potencia de una turbina Francis. Las pérdidas de flujo a través de las aberturas entre las puntas de los álabes directrices y las paredes, provocan pérdidas de eficiencia y puede provocar erosión local.

### 2.4.1 ÁLABES DEL RODETE

En la Figura 2.8, se muestra el rodete de una turbina Francis, y se compone de una corona y la banda de soporte de los álabes maquinados altamente curvados en tres dimensiones.

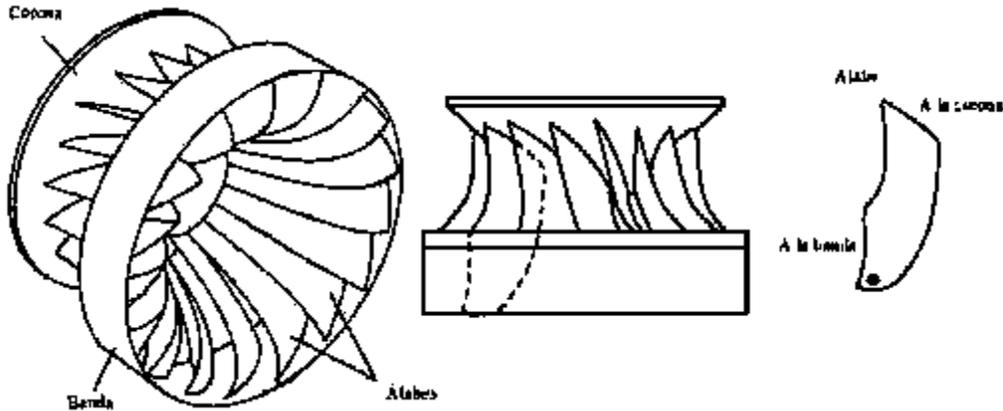


Figura 2.8 Modelo de un rodete de una turbina Francis.

La forma de los álabes de un rodete Francis es compleja. La forma exacta depende de su velocidad específica. Es obvio a partir de la ecuación de la velocidad específica (Ecuación 2.1) que la velocidad específica más alta significa una altura más baja.

$$N_{ST} = \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (2.1)$$

Esto requiere que el rodete debe admitir una cantidad comparativamente mayor de agua para una salida de energía dada y al mismo tiempo la velocidad de descarga a la salida del rodete debe ser pequeña para evitar la cavitación. En un rodete de flujo puramente radial, como el desarrollado por James B. Francis, el flujo es mayor en la dirección radial. Para ser más claro, el flujo es tangencial y radial en la entrada, pero es totalmente radial con una componente tangencial insignificante en la salida. El flujo, bajo dichas circunstancias, tiene que dar un giro de 90° después de pasar a través del rotor para su entrada al tubo de aspiración. Puesto que el área de flujo (área perpendicular a la dirección radial) es pequeña, hay un límite a la capacidad de este tipo de rodete en cuanto a mantener una velocidad baja de salida. Esto conduce al diseño de un rodete de flujo mixto en el que el agua cambia de una dirección radial a una dirección axial en el propio rotor. A la salida de este tipo de rodete, el flujo es principalmente axial con componentes radial y tangencial despreciables. Debido a una gran área de descarga (área perpendicular a la dirección axial), por este tipo de rodete puede pasar una gran cantidad de agua con una baja velocidad a la salida del rodete. Los álabes de una turbina de reacción son siempre tan contorsionados, que la componente tangencial de la velocidad o de giro a la salida se convierte en cero. Esto se hace para mantener la energía cinética a la salida al mínimo.

## 2.4.2 INTERCAMBIO DE ENERGÍA EN EL RODETE

El análisis de la operación de las turbinas hidráulicas con regímenes variables comienza con la ecuación fundamental de las turbomáquinas, escrita para una turbina hidráulica como:

$$\eta(\rho Q)(gH) = \underbrace{\int_{S_1} (\Omega R V_{1\theta}) \rho V_{1r} dS_1}_{M_1} - \underbrace{\int_{S_2} (\Omega R V_{2\theta}) \rho V_{2z} dS_2}_{M_2} \quad (2.2)$$

En el lado izquierdo de la Ecuación 2.2 tenemos la potencia hidráulica escrita como el producto de la tasa de flujo de masa ( $\rho Q$ ) y la energía específica ( $gH$ ), multiplicada por la eficiencia hidráulica  $\eta$ . Y en el lado derecho de la Ecuación 2.2 tenemos la velocidad a la que el fluido trabaja en el rotor, que por la segunda ley de Newton aplicada al momento de fuerzas es igual a la diferencia en el flux de momento de la cantidad de movimiento entre las secciones transversales aguas arriba del rodete,  $S_1$  y aguas abajo del rodete,  $S_2$  respectivamente.

La Figura 2.9, muestra que  $S_1$  es una sección transversal cilíndrica situada a la salida de los álabes directrices, mientras que  $S_2$  es un plano normal al eje de la máquina situado aguas abajo de la salida del rodete. Obviamente, cuando se calcula el flux de momento de la cantidad de movimiento aguas arriba del rodete  $M_1$  usamos la velocidad de descarga  $V_{1r}$  mientras que para  $M_2$  la velocidad de descarga es  $V_{2z}$ . La velocidad circumferencial aguas arriba del rodete es  $V_{1\theta}$  mientras que aguas abajo del rodete tenemos  $V_{2\theta}$ .

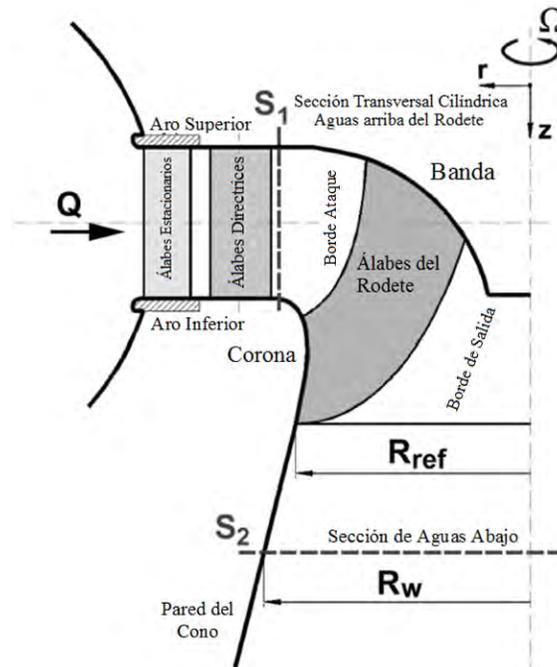
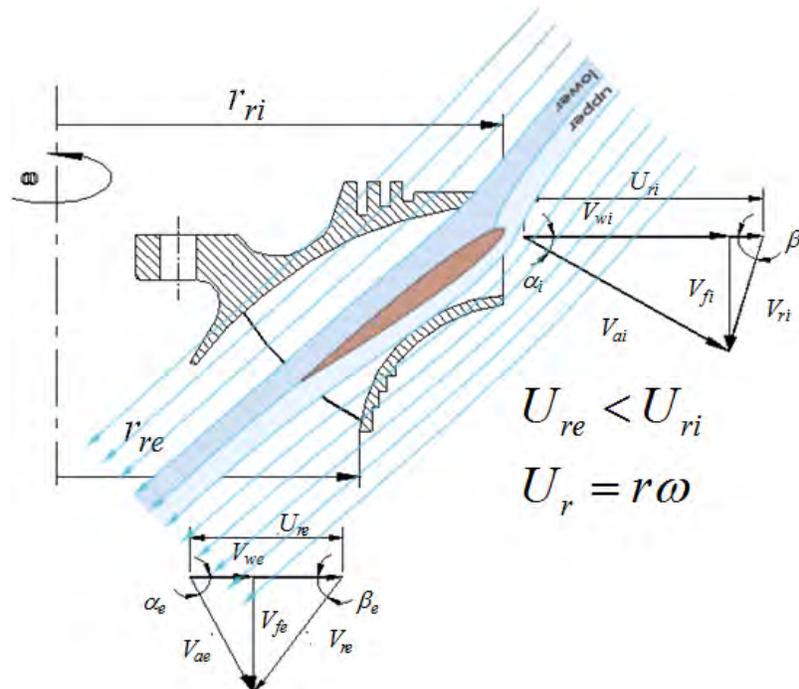


Figura 2.9 Corte de una turbina Francis.

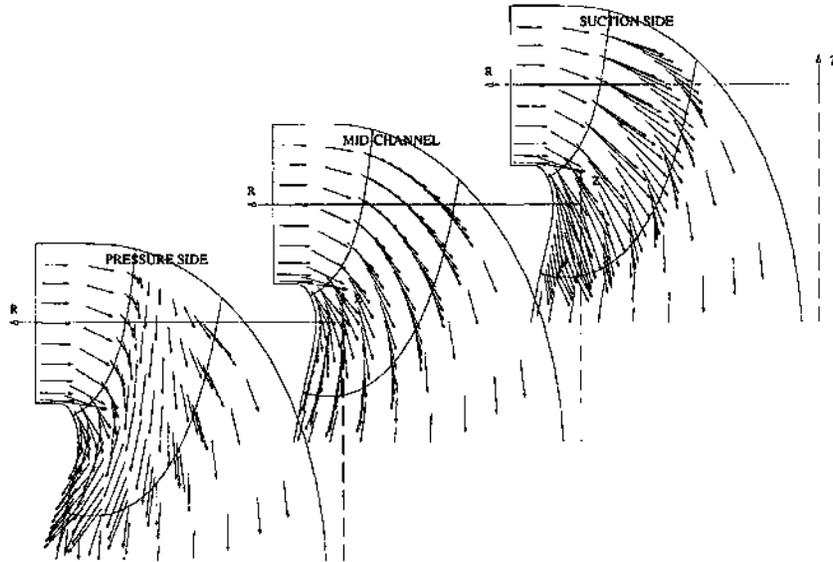
En la Figura 2.10, se muestra un típico triángulo de velocidades para una línea de flujo principal de turbinas con  $N_s$  bajas y altas. Para  $n_s$  muy altas el flujo en el rodete es casi axial, dando  $Ku_1$  y  $Ku_2$ . Cuando la  $N_s$  disminuye, el flujo se vuelve cada vez más radial con diferencias más grandes entre los diámetros de entrada y salida  $D_1$  y  $D_2$  y, por tanto, entre  $Ku_1$  y  $Ku_2$ . El aumento de la diferencia de velocidad entre la entrada y la salida  $U_1$  y  $U_2$  explica el aumento de la altura a medida que disminuye  $N_s$ .



**Figura 2.10** Triángulos de velocidades de una turbina Francis.

El flujo en un rodete Francis es un flujo tridimensional altamente rotacional. La estrecha proximidad de los álabes directrices con el canal de flujo meridional altamente curvado conduce a una velocidad meridional no uniforme a la salida del estator. Esto da lugar a un flujo altamente rotacional a la salida del álabe del estator y patrones muy severos de flujo en tres dimensiones dentro del rodete. Por lo tanto, sólo los métodos totalmente tridimensionales proporcionarán soluciones eficaces para el flujo en un rodete Francis.

Como resultado de los cálculos de flujo Euleriano en 3D, el flujo en el interior del canal del álabe del rodete Francis de alta velocidad específica cercana del lado de succión y cercana del lado de presión se puede obtener, como se muestra en la Figura 2.11.



**Figura 2.11** Flujo meridional en un rodete Francis de alta velocidad específica.

En el diseño de turbomáquinas se pueden considerar geoméricamente como formas libres de considerable complejidad los álabes del rodete de una turbina Francis. Las formas del álabe resultante son superficies curvadas y sus formas corresponden a criterios específicos de la dinámica de fluidos, así como restricciones geométricas y estructurales. Un esfuerzo significativo es necesario para desarrollar una nueva parametrización en 3D de las formas de los álabes, permitiendo una reducción en el número de parámetro de diseño. Esto es importante para reducir el tiempo de trabajo necesario para la optimización del diseño.

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL ÁLABE

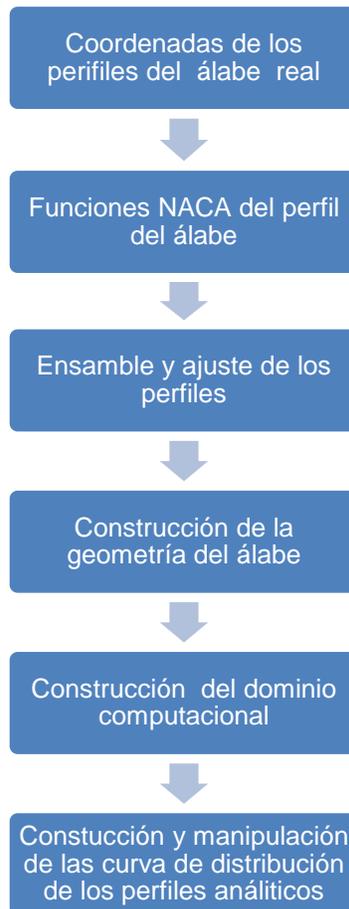
En este capítulo se describe de manera general la metodología para crear la geometría de un álabes de una turbina hidráulica en 3D en términos de perfiles, donde cada uno es definido por la formulación de serie NACA. Esta representación matemática de perfiles se deberá acoplar con un sistema CAD para la generación automática de la geometría del álabes y de su dominio computacional. Los perfiles de los álabes son definidos en función de tres variables de diseño: el espesor máximo  $t$ , la combadura máxima  $m$  y su posición  $p$ . A través de un bucle de optimización numérica se pretende minimizar la diferencia con la geometría de los perfiles reales del álabes. Curvas de distribución de los parámetros de diseño del álabes fueron obtenidas para definir el perfil del álabes en cada sección de su envergadura.

La parametrización aquí utilizada usa analogías de las técnicas de diseño anteriores, pero va más allá, con el fin de separar la forma del álabes de las aproximaciones de secciones. La aplicación está totalmente orientada a las turbinas Francis. Los beneficios de la definición de superficie están motivados principalmente por lo siguiente:

- Número de Parámetros: El número de parámetros para definir una superficie es claramente inferior al necesario para llegar a la misma descripción como un conjunto de curvas.
- Número de secciones: una superficie ya no necesita describir la geometría a través de secciones. Un número infinito de secciones están contenidas implícitamente.
- Envergadura Continua: La evolución de la envergadura de la corona a la banda es continua y no discreta.
- Lisura: Si la definición de la superficie es intrínsecamente lisa, también lo será la geometría resultante. Ninguna técnica de reconstrucción adicional debe ser considerada.
- Definición bidireccional: La definición paramétrica de la superficie es bidireccional  $[U, V]$ , mientras que las curvas seccionales sólo dependen de un parámetro de  $[U]$ . Esto añade un nuevo control dimensional sobre la geometría, que está relacionado con la dirección de la envergadura.
- Características especiales: Algunas propiedades y características son intrínsecas a las superficies (las normales, curvaturas gaussianas, etc.) y no están disponibles para curvas.

### 3.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

En la Figura. 3.1, se muestra el esquema de las distintas etapas a realizar para lograr la construcción del álabe de una turbina Francis de acuerdo a lo descrito anteriormente.



**Figura 3.1** Etapas propuestas para la parametrización de los álabes del rodete de una turbina Francis.

De acuerdo a la Figura 3.1, primero utilizando MATLAB<sup>®</sup> [21], se analizaron las diferentes funciones que representan la curva de distribución de los parámetros del álabe en secciones definidas a lo largo de la envergadura. En este software se programó el proceso para generar un archivo con el formato adecuado (\*.Jou) y lograr así la construcción de los diferentes perfiles en la siguiente etapa. Esta construcción es a través de funciones matemáticas dadas por NACA. Estas funciones matemáticas se ensamblan en un ciclo para poder ajustar las geometrías de los perfiles numéricos a los un álabe real de una turbina. Posteriormente se programa en GAMBIT<sup>®</sup> [22] la construcción del álabe acoplando las diferentes secciones. Finalmente se genera el programa que construye el dominio computacional de los canales de flujo, estableciendo la topología, tipo de fronteras y el mallado estructurado, entre otras características.

El programa GAMBIT® nos entrega un archivo tipo \*.msh, el cual a través del programa FLUENT® [23] se puede obtener el análisis fluido-dinámico de las fuerzas desarrolladas por el flujo y que modifican la cantidad de movimiento en respuesta a las modificaciones hechas a la forma de los álabes del rodete. Este último análisis queda fuera del alcance de este proyecto y será desarrollado en otra etapa del proceso de optimización.

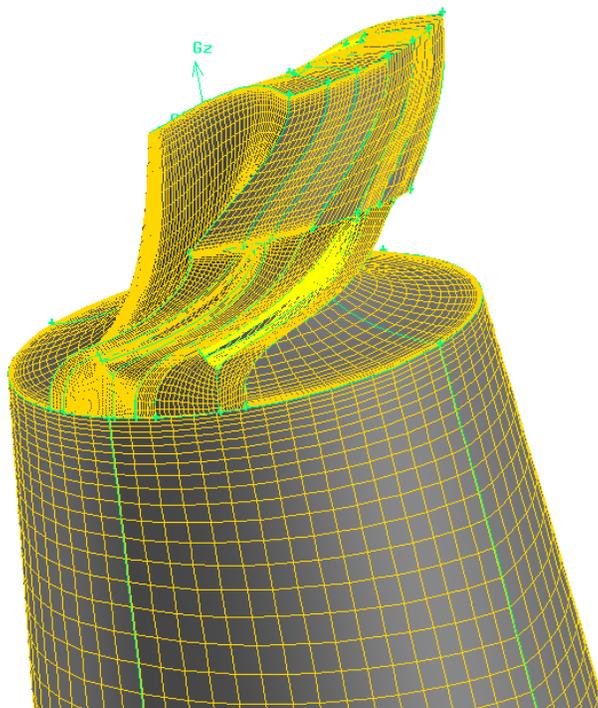
Es importante hacer la aclaración que el trabajo de diseño paramétrico está basado en un álabe real perteneciente a una Central Hidroeléctrica canadiense por lo cual se deberá respetar la confidencialidad del detallado. Además se debe de mencionar que CFE no cuenta con el detalle de construcción de los álabes del rodete de alguna turbina. Sólo cuenta con los planos en 2D de ensamblado, por lo cual este proyecto ha traído consigo muchísimas complicaciones. Éstas no se tenían contempladas ya que se conocía muy poco del diseño de construcción de este tipo de álabes por ser diseñados por compañías extranjeras como ANDRITZ, ALSTOM, VOITH, etc. que mantienen este diseño bajo estricta confidencialidad.

En esta sección se ha descrito la metodología en forma general, a continuación se describirán con mayor detalle la construcción paramétrica del álabe del rodete y del modelo computacional generado.

## **3.2. COORDENADAS DEL ÁLABE REAL**

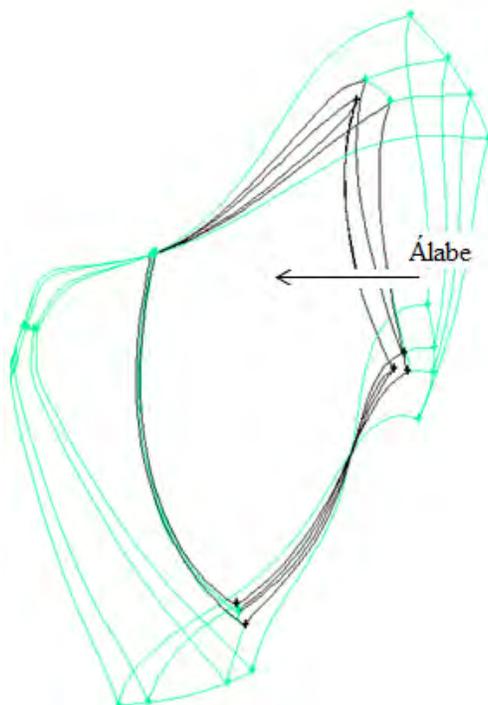
Como ha sido mencionado, el proyecto se basa en construir de forma automática un álabe de una turbina real. El álabe se tuvo originalmente de un archivo \*.cns el cuál fue transformado en un archivo \*.msh para ser manipulado en el programa GAMBIT®.

En la Figura 3.2, se muestra el dominio completo del canal de flujo que comprende: el álabe directriz, el álabe del rodete y el tubo de aspiración. Se debe de mencionar que el tubo de aspiración no entra en este caso de estudio. Sin embargo, la forma del flujo de entrada a este dispositivo es de suma importancia para el rendimiento total de la máquina Sergio R. Galván [24] por lo cual la interface rodete-aspirador es contemplada y es resultado del cambio de forma de los álabes.



**Figura 3.2** Dominio computacional completo de dónde se obtuvieron las coordenadas del álabe.

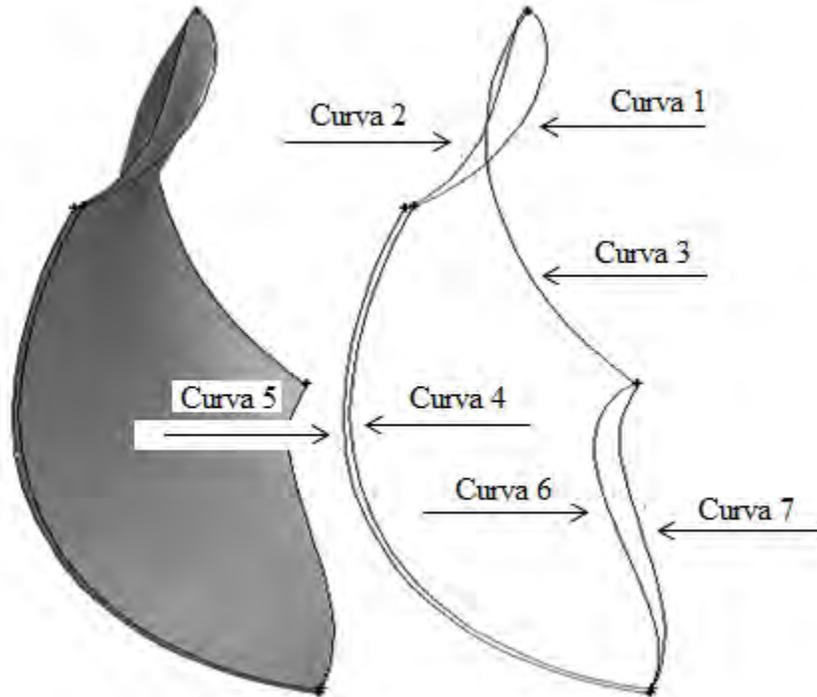
En la Figura 3.3, se muestra a detalle el esquema del álabe con su dominio computacional. El álabe está situado en medio y se puede apreciar de color más oscuro con respecto al dominio computacional que rodea al álabe.



**Figura 3.3** Álabe con su dominio computacional.

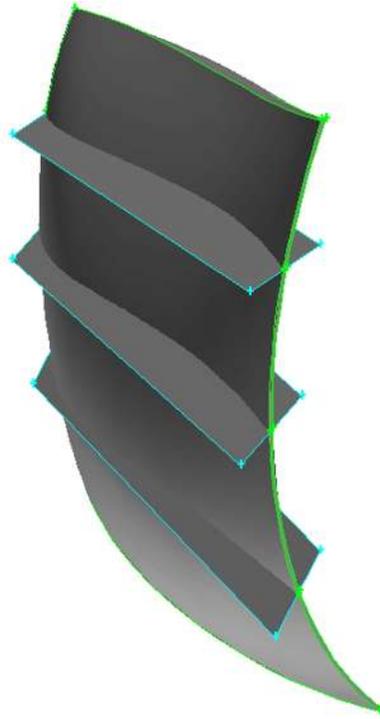
Así, la nube de puntos que se localizan en el álabe original se extrajo de la parte sólida del dominio. Y es esta parte la que se deberá reconstruir a partir de su parametrización y que representa el objetivo de este trabajo de investigación.

En la Figura 3.4, se muestra en el lado izquierdo el álabe en su forma sólida y en el lado derecho el álabe en su forma de alambre, en el cual se indican las curvas principales que lo conforman.



**Figura 3.4** Álabe real en forma sólida y de alambre.

Así basados en el trabajo de Jacek Swiderski [5] se realizaron 5 cortes equidistantes a lo largo de la envergadura del álabe. Estos cortes, hechos a través de planos, son mostrados en la Figura. 3.5, la cual muestra exactamente su localización. La intersección de estos planos con el álabe, dará la forma de los diferentes perfiles que compondrán el álabe.

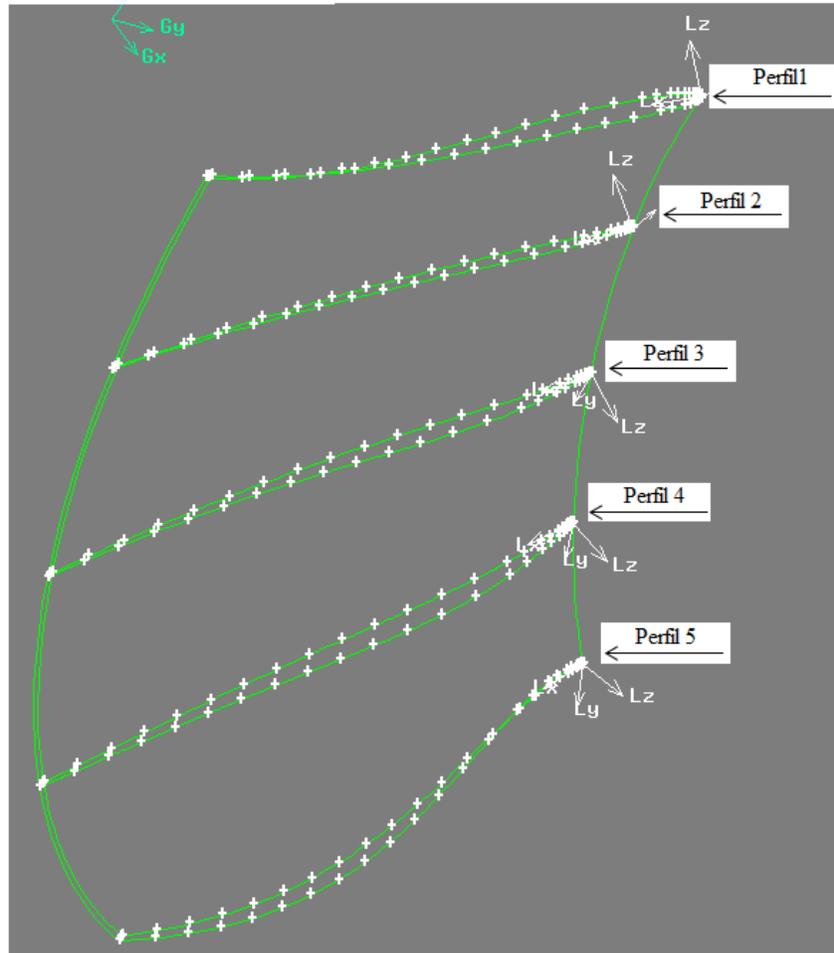


**Figura 3.5** Cortes del álabe real a través de planos.

Una vez hecho los cortes del álabe a través de planos transversales, se obtuvieron las coordenadas de diferentes perfiles para poder reproducir el álabe real. Estas coordenadas son 50 puntos que definen perfectamente la forma compleja de cada perfil del álabe. Como se muestra en la Figura 3.6.

Se supone que el hecho de elegir más secciones para definir de una forma más exacta los perfiles, no influirá en un aumento en el número de parámetros que se utilizarán para diseñar numéricamente el álabe.

También cabe mencionar que este proceso de obtención de coordenadas de un álabe virtual sería muy similar al proceso de obtenerlas en un álabe físico, es decir, en un rodete de una turbina que se encuentra en operación. Este último proceso se desarrollaría a través de un escaneado in situ de la pieza para obtener un archivo \*.cgns, lo cual resulta actualmente muy costoso y queda fuera del alcance de este trabajo. Las coordenadas de cada perfil se determinaron de tal manera que cuentan con su propio sistema de referencia (sistema de referencia local) y son almacenadas en un archivo con su nombre respectivo. En la Figura 3.6, se muestran los ejes coordenados de cada perfil en su sistema de referencia local.



**Figura 3.6** Álabe real completo del rodete construido por los cinco perfiles en GAMBIT®.

### 3.3 FUNCIÓN PARAMÉTRICA DEL PERFIL

Una vez reproducido el álabe se dispuso a la búsqueda de la función matemática con la que sea capaz de construir el perfil del álabe real para posteriormente manipular los parámetros de estas funciones y poder generar diferentes geometrías de perfiles de álabes. La metodología propone utilizar el menor número de variables posibles. Este es el punto importante de este proyecto ya que los resultados obtenidos servirán para reducir costos durante el proceso de optimización automática lo que ayudará de una manera significativa al algoritmo de búsqueda para encontrar el mejor perfil y obtener resultados muchos más confiables así como la reducción de tiempo de cálculo computacional.

La literatura consultada ofrece muy poca información sobre cómo diseñar un perfil de álabe hidráulico. La mayoría de los trabajos se basan en la experiencia de los diseñadores y la gran mayoría guardan muy celosamente esta metodología de construcción. Es por esta razón que el proyecto propone la construcción de perfiles aerodinámicos basado en la

semejanza a un perfil hidráulico presentada por [24]. Con este punto de partida, se presenta la definición y descripción de los perfiles aerodinámicos en la siguiente sección.

### 3.3.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PERFILES AERODINÁMICOS

La definición de un perfil aerodinámico, presentado con sus partes principales en la Figura 3.7, se puede considerar como aquella sección del ala cortada por un plano paralelo a la cuerda de la misma. Los perfiles NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) son comúnmente usados en la actualidad y esta nomenclatura está claramente definida en [25-26].



Figura 3.7 Esquema de un perfil aerodinámico con sus componentes.

Las características geométricas, en relación a la Figura 3.7, que describen a un perfil 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 de presión (intradós). Esta línea fija la combadura del perfil. Si la línea de combadura media pasa arriba de la cuerda (como en la Figura 3.8,) 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.

**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 de succión y el lado de presión, medida perpendicularmente a la cuerda. Es una característica importante, que se expresa en porcentaje de la cuerda. El valor varía 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 de 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.

Esta precisión puede trasladarse a la definición de un perfil en un álabes utilizado en la turbomáquinaria mediante una analogía entre el álabes y el ala. Para establecer esta analogía se debe definir las características de los perfiles. Un perfil simétrico es un perfil sin combadura, es decir, en donde la línea de combadura media y la línea de cuerda coincide. Por otro lado, un perfil asimétrico es aquel en donde, la línea de combadura y la línea de cuerda no coinciden. Claramente en los perfiles simétricos la parte superior del perfil (lado de succión o extradós) es una imagen reflejo de la parte inferior (lado de presión o intradós). Por otra parte, los perfiles asimétricos tienen la ventaja de generar mayor sustentación y mejores prestaciones ante la entrada en pérdida de sustentación o desplome, la cual ocurre a elevados ángulos de ataque.

### 3.3.2 CLASIFICACIÓN DE PERFILES AERODINÁMICOS

Las primeras series de perfiles NACA, la de 4 dígitos, 5 dígitos y las modificadas de 4 y 5 dígitos fueron generadas usando ecuaciones analíticas que describen la combadura de la línea media (línea central geométrica) del perfil, así como la distribución del espesor a lo largo de la longitud del perfil. Series posteriores, incluyendo la serie 6, son formas más complicadas derivadas de métodos teóricos en lugar de los métodos geométricos.

Antes de que el Comité Nacional Asesor para la Aeronáutica (NACA) desarrollara estas series, el diseño de perfiles aerodinámicos era de forma arbitraria, sin alguna guía para el diseñador excepto su previa experiencia con formas conocidas y experimentación con modificaciones de aquellas formas. Esta metodología comenzó a cambiar a principios de

los 30's con la publicación de un reporte de la NACA titulado: *Las características de 78 perfiles relacionados de pruebas en el túnel de viento de densidad variable* [27].

En este reporte histórico, los autores notaron que había muchas similitudes entre los perfiles aerodinámicos que fueron los más exitosos, y las dos primeras variables que afectan estas geometrías que son la pendiente de la línea de combadura media y la distribución de espesores abajo y arriba de esta línea. Entonces ellos presentaron una serie de ecuaciones incorporando estas dos variables que podían ser usadas para generar una familia completa de formas de perfiles relacionados. De esta forma, el diseño de perfiles aerodinámicos se volvió más sofisticado, esta aproximación básica fue modificada incluyendo variables adicionales, a pesar de esto, estos dos valores geométricos permanecieron en el corazón de todas las series NACA, como se muestra en la Figura 3.8, [28-29].

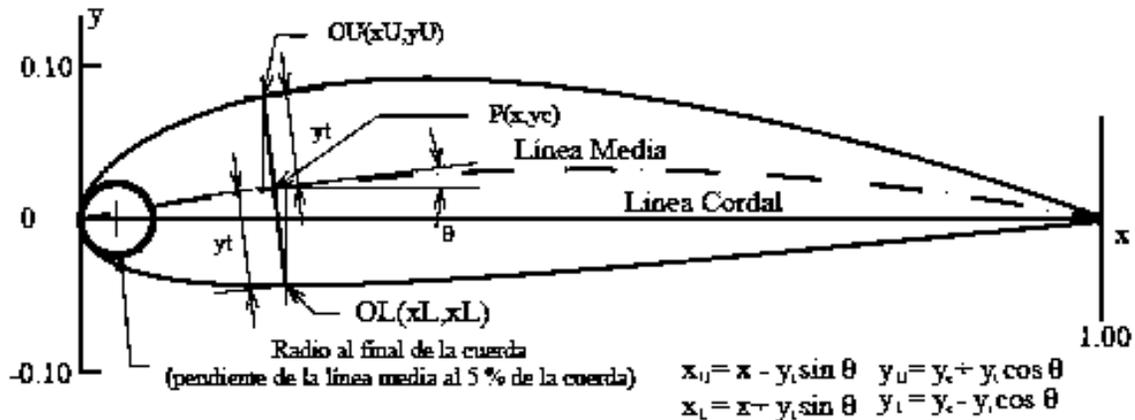


Figura 3.8 Esquema indicando las ecuaciones básicas para formar un perfil.

### 3.3.3 SERIE NACA DE 4 DÍGITOS

La primera familia de perfiles aerodinámicos diseñados usando esta aproximación se conoció como la serie NACA de 4 dígitos. 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. Por ejemplo, el perfil NACA 2415 tiene un espesor máximo del 15% con una combadura máxima del 2% localizada al 40% detrás del borde de ataque del perfil (es decir 0.4c).

Utilizando estos valores de  $m$ ,  $p$  y  $t$ , se puede calcular las coordenadas para un perfil completo usando las siguientes relaciones:

- 1.- Elegir valores de  $x$  desde 0 hasta la cuerda máxima  $c$ .

2. Calcular las coordenadas de la línea de combadura media introduciendo los valores de  $m$  y  $p$  dentro de las siguientes ecuaciones (3.1) y (3.2) para cada una de las coordenadas  $x$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_c}{c} &= \frac{m}{p^2} [2p(x/c) - (x/c)^2] \\ \frac{dy_c}{dx} &= \frac{2m}{p^2} (p - (x/c)) \end{aligned} \right\} \left(\frac{x}{c}\right) < p \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_c}{c} &= \frac{m}{(1-p)^2} [1 - 2p + 2p(x/c) - (x/c)^2] \\ \frac{dy_c}{dx} &= \frac{2m}{(1-p)^2} (p - (x/c)) \end{aligned} \right\} \left(\frac{x}{c}\right) \geq p \quad (3.2)$$

Donde:

$x$  = Coordenadas a lo largo de la longitud del perfil, desde 0 hasta  $c$  (las cuales se posicionan en la cuerda).

$y$  = Coordenadas por encima y debajo de la línea extendiéndose a lo largo de la longitud del perfil, estas son tanto para las coordenadas del espesor  $y_t$  como para las coordenadas de la combadura  $y_c$

$t$  = Espesor máximo del perfil en décimas de la cuerda (i.e. un 15% de espesor del perfil debe de ser 0.15).

$m$  = Combadura máxima del perfil en décimas de la cuerda.

$p$  = Posición de la combadura máxima a lo largo de la cuerda en décimas de la cuerda.

3. Calcular la distribución de espesores por encima (+) y por debajo (-) de la línea media introduciendo el valor de  $t$  dentro de la ecuación 3.3 para cada una de las coordenadas  $x$ .

$$\frac{y_t}{c} = \left(\frac{t}{c}\right) \left[ a_0 \sqrt{x/c} - a_1(x/c) - a_2(x/c)^2 - a_3(x/c)^3 - a_4(x/c)^4 \right] \quad (3.3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1.4845 & a_2 &= 1.7580 & a_4 &= 0.5075 \\ a_1 &= 0.6300 & a_3 &= 1.4215 \end{aligned}$$

Determinar las coordenadas finales de la superficie superior  $(x_U, y_U)$  y de la superficie inferior  $(x_L, y_L)$  usando las siguientes relaciones [28-29]:

$$\left. \begin{aligned} x_U &= x - y_t(x) \sin \theta \\ y_U &= y_c(x) + y_t(x) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

$$\left. \begin{aligned} x_L &= x + y_t(x) \sin \theta \\ y_L &= y_c(x) - y_t(x) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{dy_c}{dx} \right) \quad (3.6)$$

### 3.3.4 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. El primer dígito, cuando se multiplica por 3/2, produce el coeficiente de sustentación del diseño ( $cl$ ) en décimas de la cuerda. Los siguientes dos dígitos, 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. Por ejemplo, el perfil NACA 23012 tiene un espesor máximo del 12%, un coeficiente de sustentación de diseño de 0.3, y una combadura máxima localizada al 15% detrás del borde de ataque. Los pasos necesarios para calcular las coordenadas de tales 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 como se sabe  $p$  determina los valores de  $m$  y  $k_1$  usando la Tabla 3.1.

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_c}{c} &= \frac{K_1}{6} [(x/c)^3 - 3m(x/c)^2 + m^2(3-m)(x/c)] \\ \frac{dy_c}{dx} &= \frac{K_1}{6} [3(x/c)^2 - 6m(x/c) + m^2(3-m)] \end{aligned} \right\} 0 \leq (x/c) \leq m \quad (3.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_c}{c} &= \frac{K_1}{6} m^3 [1 - (x/c)] \\ \frac{dy_c}{dx} &= \frac{K_1}{6} m^3 \end{aligned} \right\} m \leq (x/c) \leq 1 \quad (3.8)$$

$$x_f = m \left( 1 - \sqrt{\frac{m}{3}} \right) \quad (3.9)$$

$$K_1 = \frac{6Cl_i}{Q} \quad (3.10)$$

$$Q = \frac{3m - 7m^2 + 8m^3 - 4m^4}{\sqrt{m(1-m)}} - \frac{3}{2} (1 - 2m) \left[ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}(1 - 2m) \right] \quad (3.11)$$

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

$$\frac{r}{c} = 1.1019 \left(\frac{t}{c}\right)^2 \quad (3.12)$$

3. Calcular la distribución de espesores usando la misma Ecuación 3.3 de la serie NACA de 4 dígitos

4. Determinar las coordenadas finales usando las mismas Ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6 de la serie NACA de 4 dígitos.

**Tabla 3.1** Valores de  $m$  y  $k1$  [28,29].

Designación de la línea media	Posición de la combadura máxima ( $p$ )	$m$	$k1$
210	0.05	0.058	361.4
220	0.10	0.126	51.64
230	0.15	0.2025	15.957
240	0.20	0.29	6.643
250	0.25	0.391	3.23

### 3.3.5 SERIE NACA DE 4 Y 5 DÍGITOS MODIFICADA

Los perfiles aerodinámicos del bombardero B-58 son miembros de la serie de 4 y 5 dígitos, sin embargo los nombres son ligeramente diferentes a esas formas que han sido modificadas. Si consideramos el perfil aerodinámico raíz, el NACA 0003.46-64.069, como un ejemplo. La forma básica es la 0003, un 3% de espesor con 0% de combadura. Esta forma corresponde a un perfil simétrico, es decir es idéntico por encima y por debajo de la línea de combadura media. La primera modificación que se considera es el 0003-64. El primer dígito después del guión se refiere a la redondez de la nariz. El valor de 6 indica que el radio de la nariz es el mismo que el perfil original mientras que un valor de 0 indica un borde de ataque puntiagudo. Al incrementar este valor significa que se incrementa la redondez de la nariz. El segundo dígito determina la posición del espesor máximo en décimas de la cuerda. La posición estándar del espesor máximo de los perfiles de 4 y 5 dígitos es al 30% detrás del borde de ataque. En este ejemplo, la posición del espesor máximo se ha movido al 40% detrás del borde de ataque.

Finalmente, se debe notar que el 0003.46-64.069 tiene dos arreglos de dígitos precedidos por decimales. Estos indican simplemente ligeros ajustes al espesor máximo y la posición. En lugar de que sea 3% de espesor, este perfil tiene 3.46% de espesor. En lugar de que el espesor máximo sea localizado al 40% de la cuerda, la posición sobre este perfil está al 40.69% de la cuerda. Para calcular las coordenadas de la forma de un perfil modificado se deben seguir los siguientes pasos:

1. Elegir valores de  $x$  desde 0 hasta la cuerda máxima  $c$ .
2. Calcular las coordenadas de la línea de combadura media usando las mismas ecuaciones dadas para la serie de 4 ó 5 dígitos respectivamente.
3. Calcular la distribución de espesores por encima (+) y por debajo (-) de la línea media usando sus ecuaciones. Los valores de los coeficientes  $a_n$  y  $d_n$  se determinan de la tabla 3.2 (los coeficientes fueron obtenidos para un espesor de 20% del perfil).

$$\pm y_t = a_0\sqrt{x} + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \text{ delante de } t_{max} \quad (3.13)$$

$$\pm y_t = d_0 + d_1(1 - x) + d_2(1 - x)^2 + d_3(1 - x)^3 \text{ desde } t_{max} \quad (3.14)$$

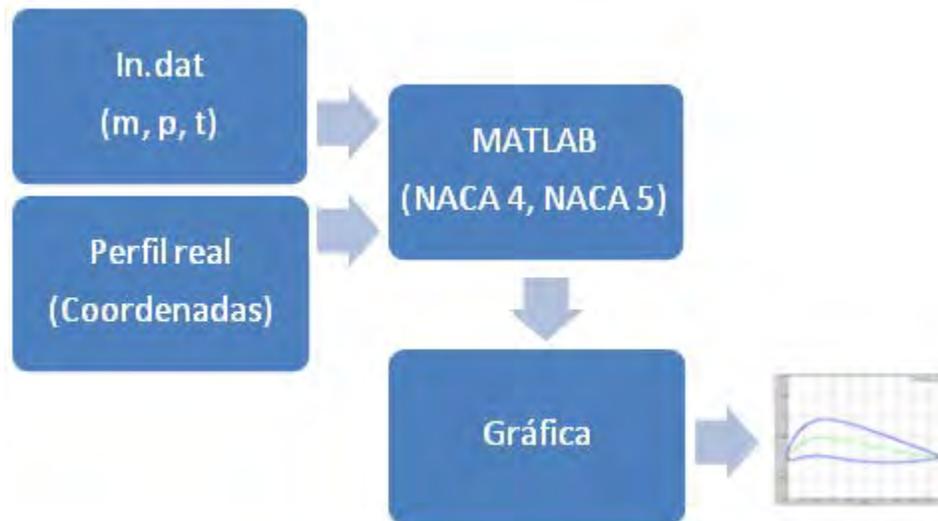
4. Determinar las coordenadas finales usando las mismas ecuaciones de la serie NACA de 4 dígitos.
5. Como se nota, esto producirá un 20% de espesor del perfil. Para obtener el espesor deseado, simplemente se aplica una escala al perfil multiplicando las coordenadas finales  $y_t$  por  $(t/0.2)$

**Tabla 3.2 Valores de  $a_n$  y  $d_n$ .**

Perfil	a0	a1	a2	a3	d0	d1	d2	d3
0020-62	0.2969	0.213337	-2.931954	5.22917	0.002	0.2	-0.040625	-0.070312
0020-63	0.2969	-0.096082	-0.54331	0.559395	0.002	0.234	-0.068571	-0.093878
0020-64	0.2969	-0.246867	0.175384	-0.266917	0.002	0.315	-0.233333	-0.032407
0020-65	0.2969	-0.310275	0.3417	-0.32182	0.002	0.465	-0.684	0.292
0020-66	0.2969	-0.27118	0.1402	-0.082137	0.002	0.7	-1.6625	1.3125
0020-03	0	0.920286	-2.8019	2.81799	0.002	0.234	-0.068571	-0.093878
0020-33	0.14845	0.412103	-1.67261	1.68869	0.002	0.234	-0.068571	-0.093878
0020-93	0.514246	-0.840115	1.1101	-1.09401	0.002	0.234	-0.068571	-0.093878
0020-05	0	0.477	-0.708	0.308	0.002	0.465	-0.684	0.292
0020-35	0.14845	0.083362	-0.18315	-0.00691	0.002	0.465	-0.684	0.292
0020-34	0.14845	0.193233	-0.558166	0.283208	0.002	0.315	-0.233333	-0.032407

### 3.4. PROGRAMACIÓN EN MATLAB

De acuerdo al procedimiento descrito en la sección anterior, se programó en MATLAB el algoritmo con las ecuaciones que generarán un perfil del álabes. El programa deberá producir un archivo, el cual será leído posteriormente por el programa GAMBIT. La programación del código deberá reproducir las características del álabes real así como formar nuevos perfiles de álabes, por cual deberá estar en función de la variación de sus parámetros  $m$ ,  $p$  y  $t$ , mencionados anteriormente. En la Figura 3.9, se muestra el código del programa en bloques y que fue programado en MATLAB.



**Figura 3.9** Algoritmo de construcción de los perfiles del álabes en bloques el cual fue programado en MATLAB.

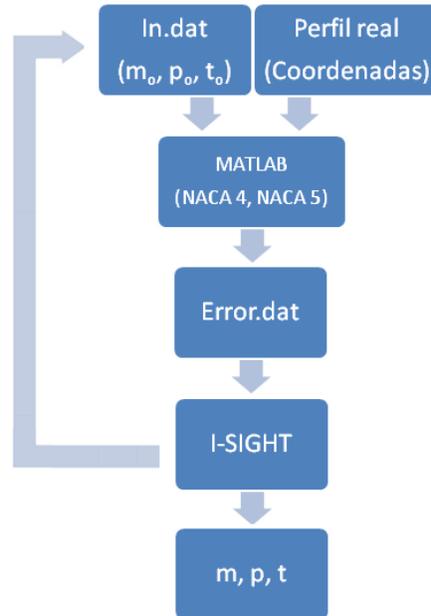
Durante el desarrollo del proyecto, al buscar la ecuación de la serie NACA que se ajustara a los perfiles de los álabes reales, se notó que éste no se componía de la misma forma de perfiles a lo largo de la envergadura. Los perfiles 1 y 2 se adecuaron bien a la serie NACA de 4 dígitos y los perfiles 4 y 5 se adecuaron bien a la serie NACA de 5 dígitos. Esto fue debido a que los álabes reales tienen la característica de invertir su línea de combadura media, a esto se le conoce como un perfil tipo *reflex* o de doble combadura.

### 3.5 COMPARACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE I-SIGHT®

Después de la manipulación de los parámetros  $m$ ,  $p$  y  $t$  del perfil analítico se constató un error importante durante la aproximación de estos perfiles a los reales como se mostrará en el capítulo de resultados. Es decir, se presenta un error de aproximación en la construcción de los álabes analíticos. Esto es a causa de que los parámetros de  $m$ ,  $p$  y  $t$  del perfil analítico no son los adecuados para detallar la forma del álabes real, el cual no presenta la misma

forma en toda la envergadura. Por esta razón nos dimos a la tarea de buscar la forma de cómo encontrar los valores correctos de  $m$ ,  $p$  y  $t$  respectivos para los 5 perfiles de la Figura 3.6.

En la Figura 3.10, se muestra un esquema que representa la metodología general que se siguió al acoplar el software I-SIGHT® con el software MATLAB®, para obtener los valores de los parámetros  $m$ ,  $p$  y  $t$  que minimizan las diferencias con el ajuste.



**Figura 3.10** Diagrama de flujo para el ajuste por la diferencia de mínimos cuadrados de los álabes a través de  $m$ ,  $p$  y  $t$ .

Aquí el archivo *in.dat* contiene los valores de entrada para  $m$ ,  $p$ ,  $t$  propuestos, los cuales son leídos por el programa en MATLAB® que contiene las ecuaciones del modelo y que describen los perfiles de los álabes. El programa compara los valores calculados con los valores reales empleando el Método de Mínimos Cuadrados y genera un archivo con los valores del error. Este archivo es leído en el programa en I-SIGHT® y propone nuevos valores para los parámetros hasta lograr que se minimice el error calculado. El error se obtiene mediante el cálculo de las diferencias entre los valores obtenidos en los modelos y los valores reales de las coordenadas del álabe, empleándose las siguientes expresiones:

$$\Delta y_u = y_{ru} - y_U \quad (3.15)$$

$$\Delta y_l = y_{rl} - y_L \quad (3.16)$$

$$error = [(\Delta y_u)^2 + (\Delta y_l)^2]^{1/2} \quad (3.17)$$

Donde:

$y_{ru}$  : Es la posición vertical en el lado superior del perfil en el álabe real.

$y_{rl}$  : Es la posición vertical en el lado inferior del perfil en el álabe real.

$y_U$  : Es el valor calculado del perfil analítico para la posición vertical del el lado superior del perfil.

$y_L$  : Es el valor calculado del perfil analítico para la posición vertical del el lado inferior del perfil.

$\Delta y_u$ : Es la diferencia del perfil real contra el perfil analítico en el eje  $y$  (para el lado extradós o lado succión).

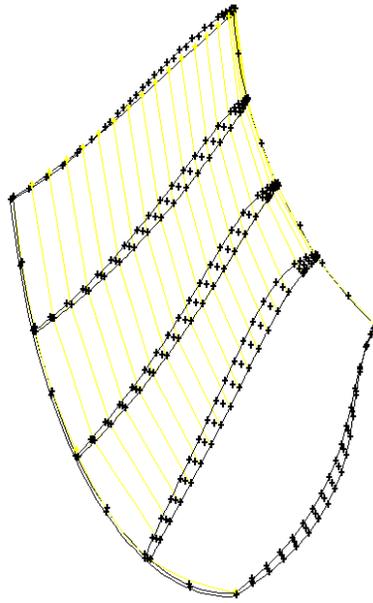
$\Delta y_l$ : Es la diferencia del perfil real contra el perfil analítico en el eje  $y$  (para el lado intradós o lado presión).

Este error se genera en el archivo de salida *error.dat*. El valor alcanzado por el error debe ser minimizado, si no se logra esto, el algoritmo propone nuevos valores de  $m$ ,  $p$  y  $t$  para ser evaluados.

### 3.6. CONSTRUCCIÓN DEL ÁLABE EN GAMBIT

Siguiendo la metodología esquematizada en la Figura 3.1, la construcción del álabe será a través del archivo generado en MATLAB<sup>®</sup> que contendrá las coordenadas de los cinco nuevos perfiles. A su vez GAMBIT<sup>®</sup> leerá este archivo y construirá, de acuerdo a la programación hecha en un archivo \*.jou, el nuevo álabe a través de sus cinco nuevos perfiles.

En la Figura 3.11, se muestra el álabe completo con las 5 secciones que se incorporaron por los archivos de los álabes a través de MATLAB<sup>®</sup>. Los cinco perfiles mantendrán la misma posición, respecto al sistema de coordenadas global en el espacio, de la punta del borde de ataque, Figura. 3.6, en donde se establece el origen de los sistemas de coordenadas locales para cada perfil.



**Figura 3.11** Secciones que conforman el nuevo álabe con un sistema de coordenadas local el cual ha sido construido analíticamente.

Una vez obtenido el primer álabe modificado se pueden generar el resto de los álabes con el perfil previamente modificado y así conformar el rodete completo.

Y por último, una vez creado el archivo \*.JOU completo para formar diferentes formas de perfiles en GAMBIT® en automático, se muestra un ejemplo de cómo debe quedar el perfil con todo y su dominio computacional el cual nos servirá para crear el archivo (\*.msh) que será entregado a FLUENT® para su análisis fluido-dinámico posterior. Debido a la complejidad y simetría su análisis se conformará por dos álabes del rodete con su dominio computacional respectivo.

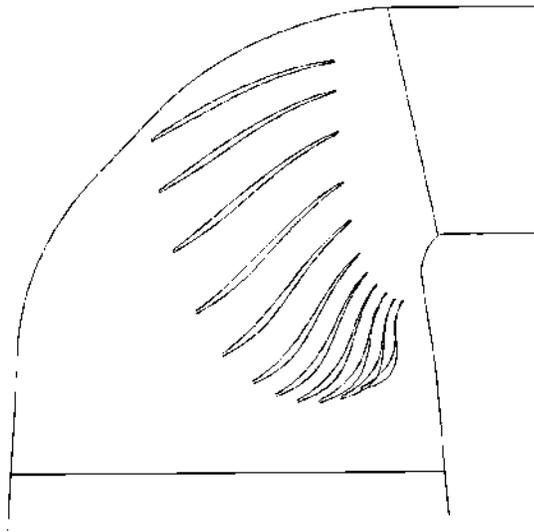
### 3.7 CONSTRUCCIÓN AUTOMÁTICA DEL DOMINIO COMPUTACIONAL

La definición del dominio computacional y el proceso de discretización se ejecutan a través de la programación en GAMBIT® de los siguientes pasos:

1. Definición de la geometría del álabe.

La definición del álabe requiere un número importante de perfiles, especificados a lo largo de las líneas de corriente que a su vez demanda una secuencia de puntos en 3-D. Para esto se debe posicionar el borde de ataque de cada perfil en el origen del sistema de coordenadas locales.

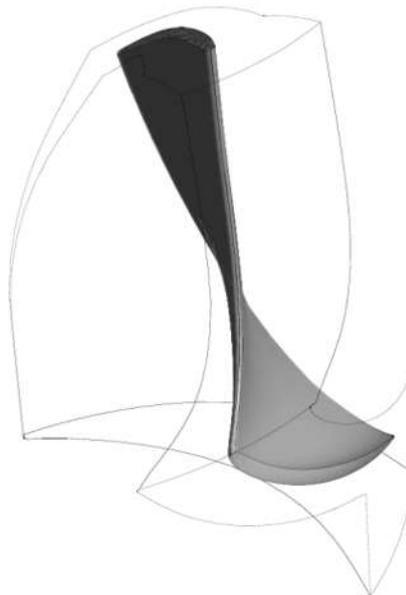
En la Figura 3.12, se muestra cómo se definieron las secciones de los perfiles del álabe.



**Figura 3.12** Definición de los perfiles del álabe.

## 2. Geometría del canal de flujo.

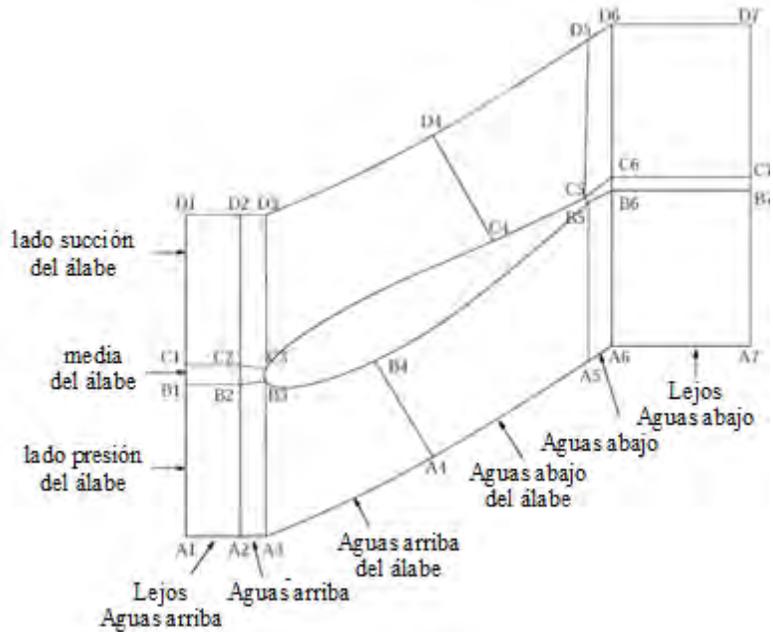
En esta parte se construye el dominio completo limitado por las fronteras (entrada, salida, *shroud*, *hub*, paredes sólidas e interfaces) establecidas como superficies. El dominio resultante incluye el álabe sólido como se ilustra en la Figura 3.13.



**Figura 3.13** Construcción del dominio computacional.

3. Definición de los bloques.

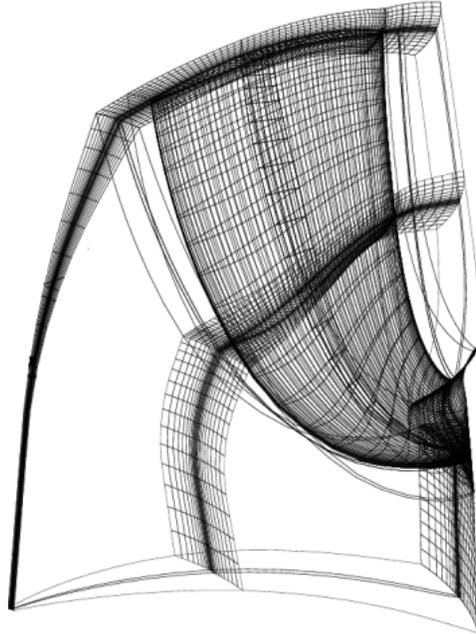
Aquí se insertan las caras internas del pasaje del flujo en el volumen para subdividir el dominio completo en bloques, cada uno topológicamente equivalente a un hexaedro. Así la implementación de esta clase de topología alrededor del álabe asegura una adecuada ortogonalidad y concentración de la malla en el dominio computacional. En este paso también se establecerá la extensión del dominio de la frontera de salida y que se unirá a la entrada del tubo de aspiración como se muestra en la Figura 3.14.



**Figura 3.14** Esquema de fijación de los bloques para cada pasaje del flujo.

4. Generación de la malla.

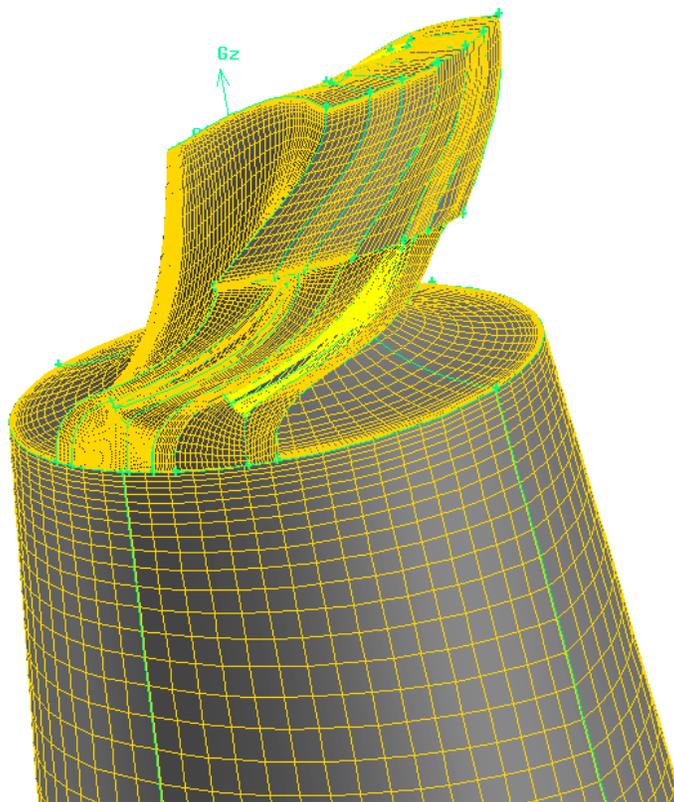
Basado en la descomposición del dominio en bloques, cada una de las caras y de los volúmenes son mapeados para luego generar las mallas utilizando las opciones dadas por GAMBIT® como se muestra en la Figura 3.15.



**Figura 3.15** Mallado de las caras del dominio computacional incluida la extensión a su salida.

Cabe mencionar que detalles de la concentración de la malla en regiones donde se esperan los mayores gradientes en la solución con CFD serán objeto de estudio en otro proyecto. También la validación de la calidad de la malla queda fuera del alcance de este proyecto.

En la Figura 3.16, se muestra el dominio computacional completo del canal de flujo resultado de la programación en GAMBIT<sup>®</sup>.



**Figura 3.16** Dominio computacional completo del álabe de una turbina Francis.

Cabe mencionar que el análisis del flujo a través del canal construido con este procedimiento es uno de los pasos más importantes de una optimización automática del intercambio de energía fluido-álabes de turbinas Francis. Este proyecto tiene como objetivo la construcción del álabe en forma automática a través de parámetros de diseño.

## CAPÍTULO 4

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

La parametrización del álabe es un punto crucial si se busca una optimización automática en el diseño del rodete, por lo que se tiene que garantizar una representación confiable. El objetivo de este trabajo es poder representar cada perfil del álabe mediante tres parámetros aerodinámicos ( $m$ ,  $p$ ,  $t$ ), que permita reconstruir de manera automática, un álabe de una turbina hidráulica en 3D. Esto nos permitirá tener una amplia gama de opciones en el diseño del álabe, a partir de la modificación de las constantes en las funciones de ajuste.

Tomando en cuenta la metodología planteada en el capítulo anterior, se presentan los resultados de los álabes que se diseñaron a partir de la variación de los parámetros, los cuáles nos ayudarán para establecer las bases de una optimización automática.

Los resultados de las nuevas formas de álabes se valorarán en comparación con el álabe real, esto es, en un trabajo futuro se evaluarán los perfiles mediante CFD para comparar las eficiencias respecto al álabe real.

### 4.1 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS $m$ , $p$ , $t$

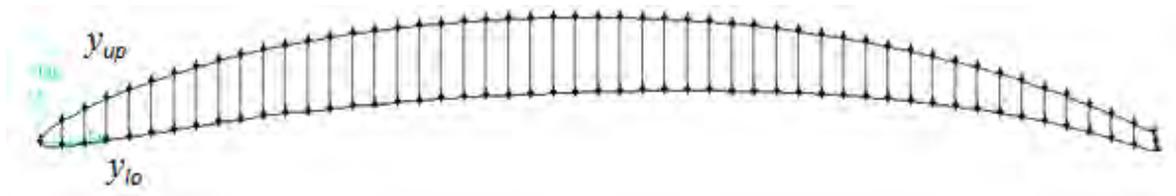
Para la determinación de las coordenadas de cada perfil se estableció una mayor densidad de puntos cerca del borde de ataque del perfil, es decir para la región de 0 a 0.02 se establecieron incrementos de 0.001. En el resto del perfil, esto es de 0.02 hasta 1 que es la longitud total del perfil, se establecieron incrementos de 0.02.

En la Figura 4.1, se muestra uno de los 5 perfiles reales en el cual se puede notar que la coordenada  $x$  no es la misma para el lado extradós (lados succión) que para el lado intradós (lado presión).



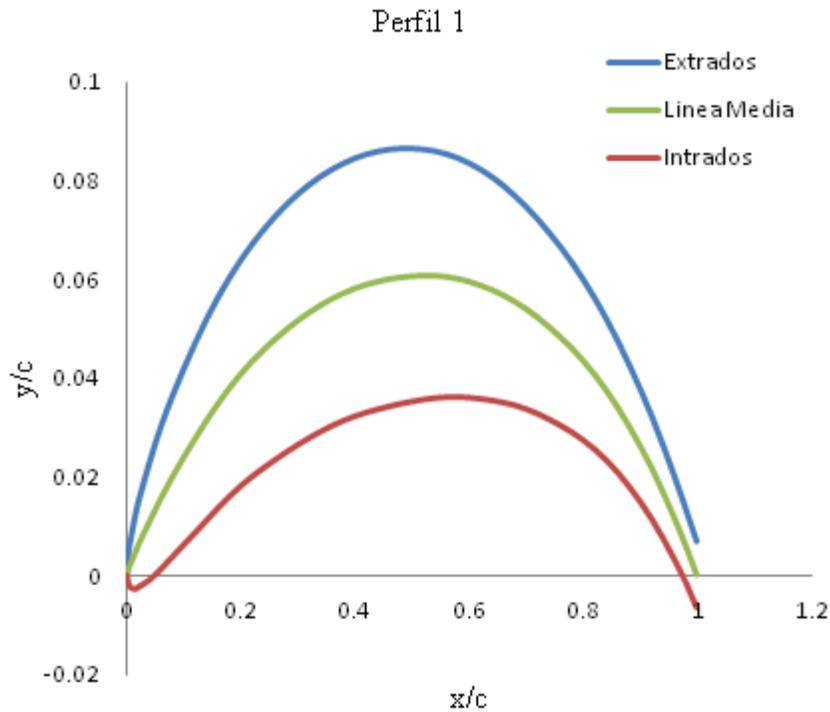
**Figura 4.1** Álabe real no normalizado

En la Figura 4.2, se muestra la normalización de  $(x, y)$  a la longitud de la cuerda  $c$ , esto es  $\frac{x}{c}$ ,  $\frac{y}{c}$  y con esto tener el mismo valor de  $x$  para la parte superior del perfil (extradós) y la parte inferior del perfil (intradós). Obteniéndose así las coordenadas  $(x, y)$  normalizadas.



**Figura 4.2** Álabes reales normalizados en  $x, y$ .

Utilizando el programa EXCEL se representaron los perfiles y se obtuvieron los valores más próximos de los parámetros de diseño ( $m, p, t$ ), que definen cada uno de los perfiles reales y conforman el álabes de una turbina Francis. En la Figura 4.3, se muestra la gráfica del perfil 1 empleando EXCEL. Esto se realizó para cada uno de los 5 perfiles que se seleccionaron del álabes reales.



**Figura 4.3** Perfil 1 real representado en el programa EXCEL.

Mediante las Ecuaciones (4.1) y (4.2) se obtuvo el parámetro  $m$ . Es decir el parámetro  $m$  se obtuvo como la distancia máxima que hay entre la cuerda y la línea media o *camber* (máxima coordenada  $y$  de la línea media).

$$y_c \left( \frac{x}{c} \right) = \frac{(y_l + y_u)}{2} \quad (4.1)$$

$$\max y_c = m \quad (4.2)$$

Una vez identificado el valor de  $m$ , su coordenada en la dirección de  $x$  se le asoció al parámetro  $p$ :

$$y = m \rightarrow x = p \quad (4.3)$$

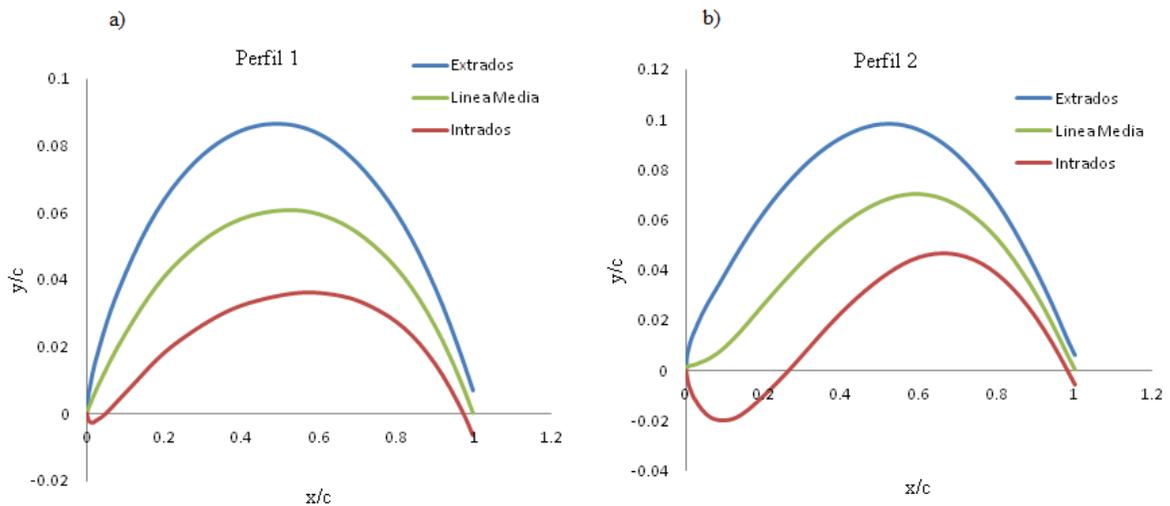
Para obtener el parámetro  $t$  del espesor máximo del perfil se obtuvo la diferencia entre la coordenada  $y$  del lado superior (extradós) del perfil con el lado inferior (intradós) del perfil.

$$\Delta y = y_u - y_l \quad (4.4)$$

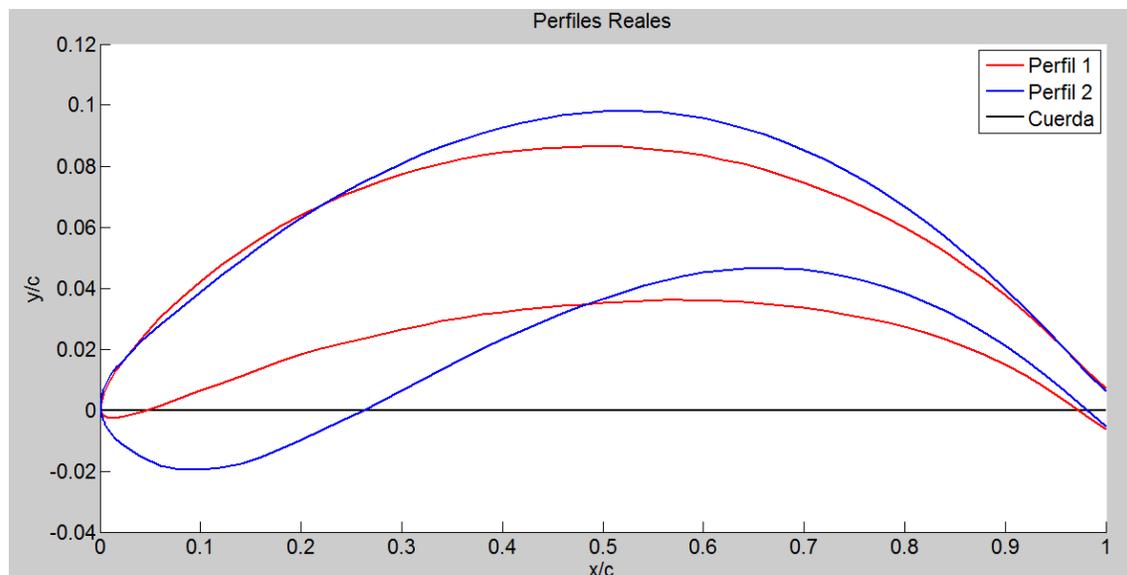
$$\max \Delta y = t \quad (4.5)$$

Durante la obtención de los 5 perfiles a lo largo de la envergadura del álabe, pudimos notar que los perfiles no siguen el mismo modelo de NACA, ya que unos perfiles del álabe se representaban mejor con una serie NACA de 4 dígitos, otros con una serie NACA de 5 dígitos y otros no se pudieron representar con las series NACA convencionales debido a que este tercer tipo de perfil eran del tipo *reflex*, esto es porque la línea del camber presenta doble combadura y sus valores máximos toman valores tanto positivos como negativos en dos regiones distintas.

En las Figuras 4.4, y 4.5, se muestran los dos primeros perfiles del álabe, los cuales son los más cercanos a la corona. Estos perfiles muestran un comportamiento similar y pueden ser representados por una serie NACA de 4 dígitos.

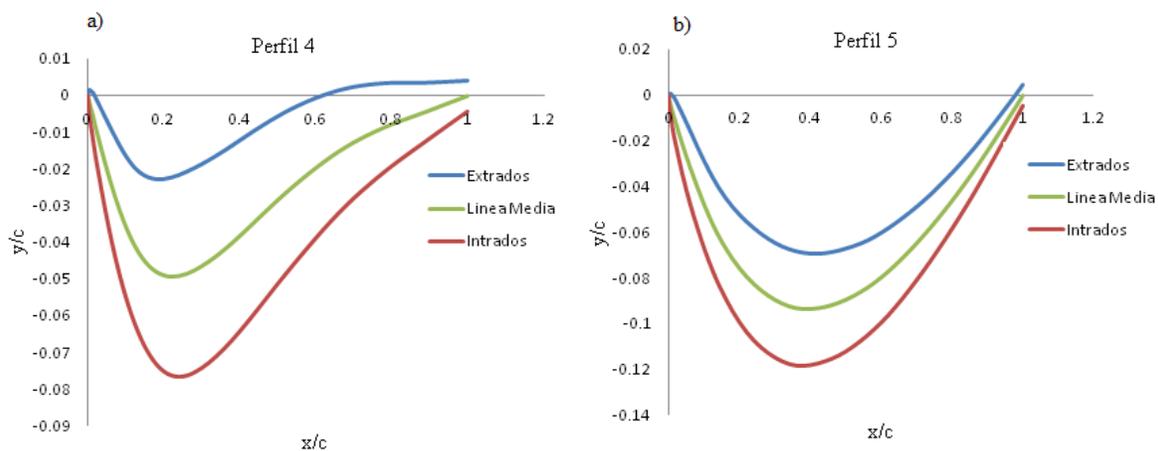


**Figura 4.4** Primeros perfiles seleccionados del álabe real indicando su lado extradós, intradós y la línea media o *camber*.

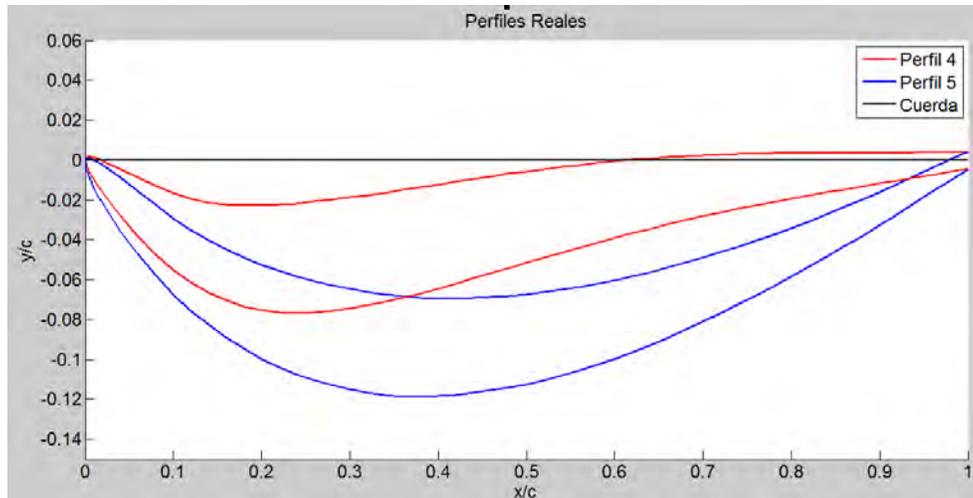


**Figura 4.5** Comparación de los primeros perfiles del álabe real. Perfil 1 indicado de color rojo y el perfil 2 de color azul.

En las Figuras 4.6, y 4.7, se muestran los dos últimos perfiles cercanos a la banda, los cuales se pueden representar mediante una serie NACA de 5 dígitos.



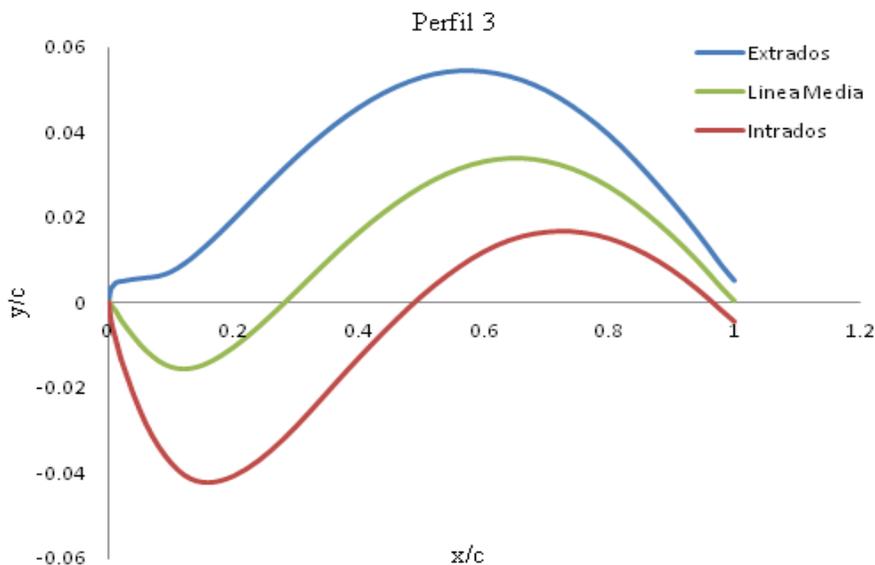
**Figura 4.6** Últimos perfiles seleccionados del álabe real indicando su lado extradós, intradós y la línea media o camber



**Figura 4.7** Comparación de los últimos perfiles del álabe real. Perfil 4 indicado de color rojo y el perfil 5 de color azul.

En la Figura 4.8, se muestra el perfil del centro del álabe, el perfil 3, el cual no se puede representar mediante una serie NACA convencional como las NACA de 4 y la NACA de 5 dígitos ya mencionadas. El tipo de perfil encontrado en el perfil central presenta doble combadura conocido como un perfil tipo *reflex*.

Para su análisis se dividió la línea del *camber* en dos regiones a partir del punto en donde la línea del *camber* pasa de una combadura negativa a una combadura positiva. A la primer sección en donde la combadura es negativa, se le asoció una longitud de la cuerda  $C_1$ , por lo tanto la longitud de la cuerda en donde se presenta la combadura positiva se le asoció una longitud de la cuerda tal que  $C_2 = 1 - C_1$ .



**Figura 4.8** El perfil 3 o perfil central del álabe presentó una región con combadura negativa y otra región con combadura positiva en su línea media.

En la Tabla 4.1, se muestra un resumen de los parámetros obtenidos de cada uno de los perfiles reales seleccionados a lo largo de la envergadura del álabe. Estos parámetros se obtuvieron aplicando las Ecuaciones desde (4.1) hasta (4.5).

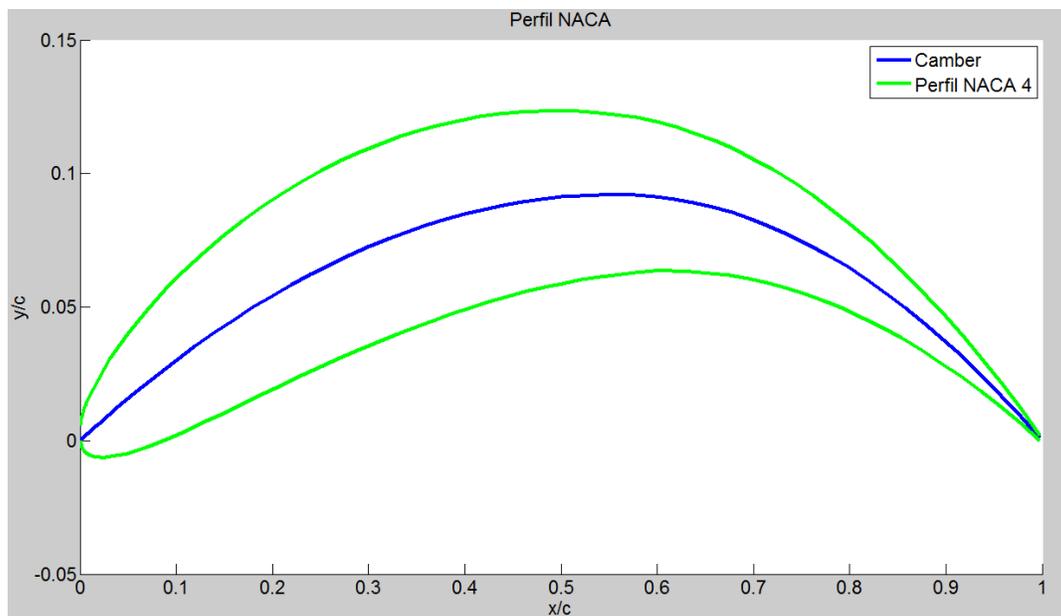
**Tabla 4.1** Parámetros obtenidos de los perfiles reales.

<i>Perfiles</i>	<i>m</i>	<i>p</i>	<i>t</i>
1	0.0608925	0.52	0.052345
2	0.070343	0.60	0.07482
3	-0.015732 0.0339115	0.12 0.66	0.063529
4	-0.049383	0.22	0.055839
5	0.0938155	0.40	0.050406

## 4.2 RESULTADOS DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS

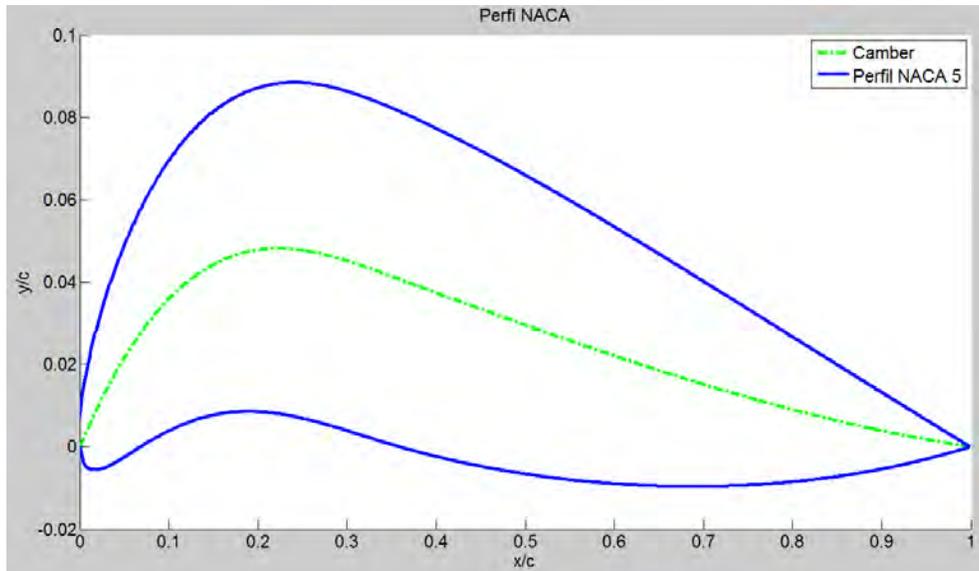
### 4.2.1 MODELACIÓN DEL PERFIL EMPLEANDO SERIES NACA DE 4 Y 5 DÍGITOS

Se realizaron pruebas de construcción de perfiles utilizando las Ecuaciones (3.1) a (3.6). En la Figura 4.9, se muestra un perfil aerodinámico de una serie NACA de 4 dígitos programado en MATLAB®.



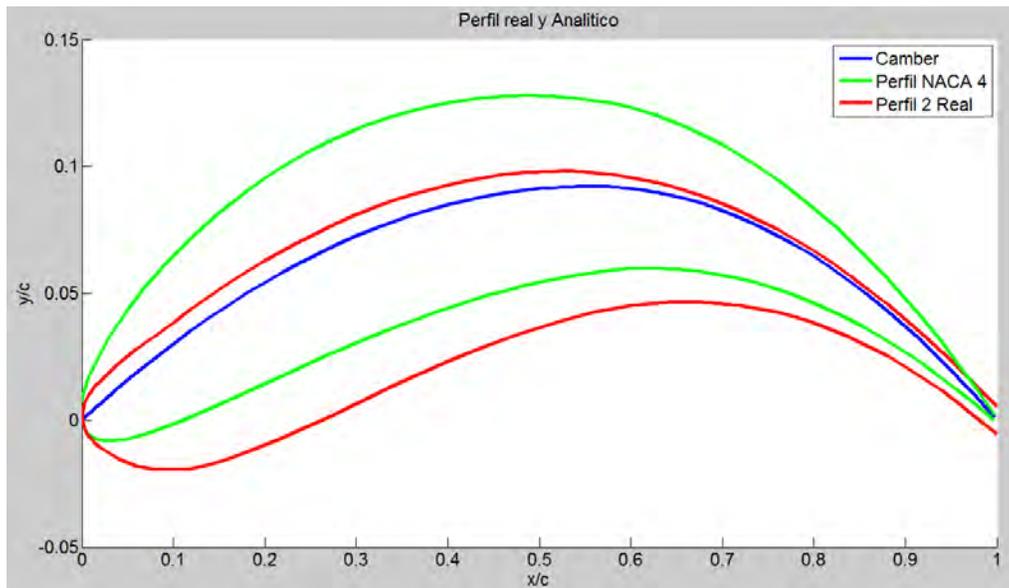
**Figura 4.9** Perfil aerodinámico de una serie NACA de 4 dígitos.

El mismo procedimiento se realizó en MATLAB<sup>®</sup> para construir un perfil aerodinámico de la serie NACA de 5 dígitos utilizando las Ecuaciones (3.7) a la (3.12) como se muestra en la Figura 4.10.



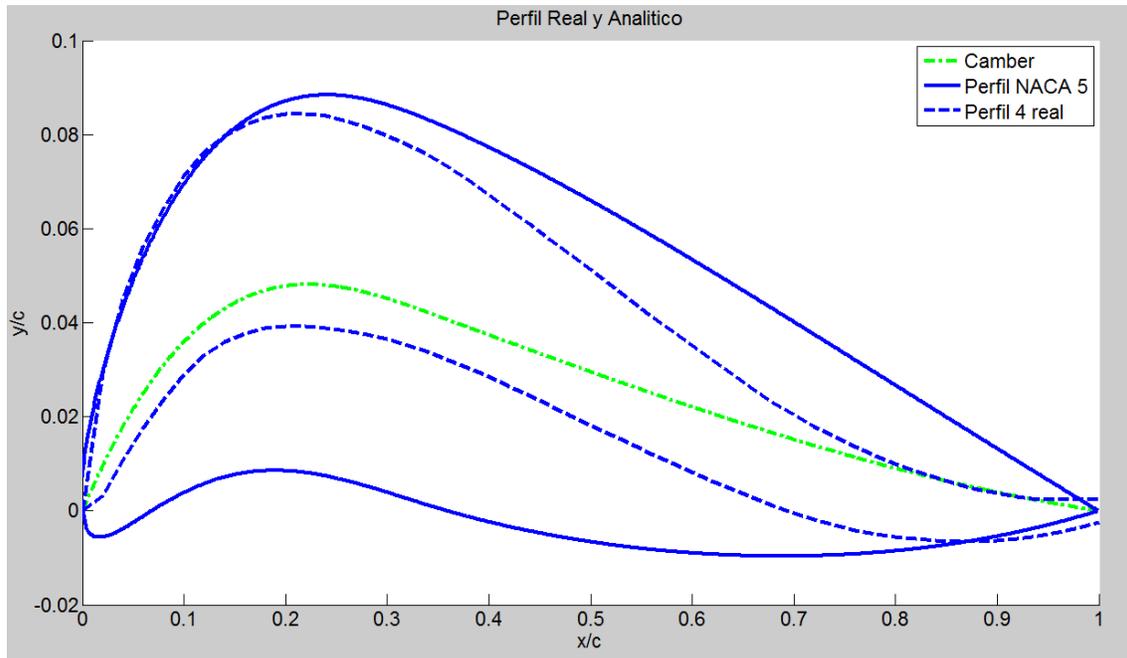
**Figura 4.10** Perfil aerodinámico de una serie NACA de 5 dígitos.

En la Figura 4.11, se compara la forma del perfil del álabes analítico de color verde contra el perfil del álabes real de color rojo construido desde MATLAB<sup>®</sup> al utilizar los mismos parámetros  $m$ ,  $p$  y  $t$  obtenidos del perfil real en el perfil analítico de una serie NACA de 4 dígitos.



**Figura 4.11** Comparación de un perfil real (Perfil 2) representado en color rojo y un perfil analítico de una serie NACA de 4 dígitos representado en color verde. La línea de combadura media o camber está indicado en color azul.

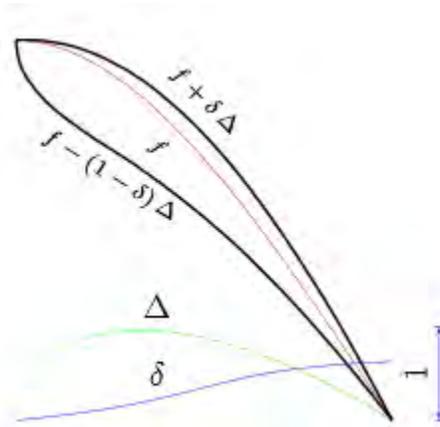
Ahora en la Figura 4.12, se comparan las formas de los perfiles del álabe analítico contra el perfil del álabe real construido desde MATLAB al utilizar los mismos parámetros  $m$ ,  $p$  y  $t$  obtenidos del perfil real en el perfil analítico de una serie NACA de 5 dígitos.



**Figura 4.12** Comparación de un perfil real (Perfil 4) representado con una línea punteada en color azul y el perfil analítico correspondiente a una serie NACA de 5 dígitos representado con una línea continua de color azul. La línea de combadura media de color verde corresponde al *camber* del perfil analítico.

## 4.2.2 MODELACIÓN DEL PERFIL MEDIANTE UN PARÁMETRO CONSTANTE DEL ESPESOR RESPECTO A LA LÍNEA DEL CAMBER

Como se mencionó en la sección anterior que los perfiles a lo largo de la envergadura del álabe no se pueden representar completamente con una sola serie NACA estándar, por lo que se propuso modificar las Ecuaciones (3.1) y (3.2), para generar el lado superior (extradós) del perfil y el lado presión (intradós) del perfil a partir de la línea media (*camber*). En base a lo propuesto por Banaszek & Tesch [30], se utilizó un parámetro  $\delta$  para representar un espesor constante del perfil respecto a la línea del *camber*, tal como se muestra en la Figura 4.13.



**Figura 4.13** Representación del perfil del álabe propuesto por Banaszek & Tesch [30].

En nuestro caso se propuso modelar el perfil en base a la siguiente consideración:

$$\begin{cases} f = y_c \\ \Delta = y_c \end{cases} \quad (4.6)$$

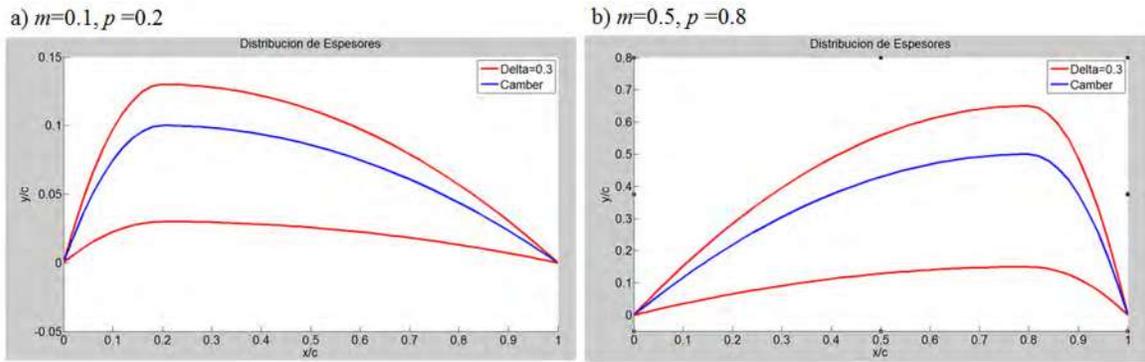
Se probaron las ecuaciones propuestas por Banaszek & Tesch [30] tomando en cuenta la consideración mencionada quedaron expresadas como:

$$y_u = y_c + \delta y_c \quad (4.7)$$

$$y_l = y_c - (1 - \delta) y_c \quad (4.8)$$

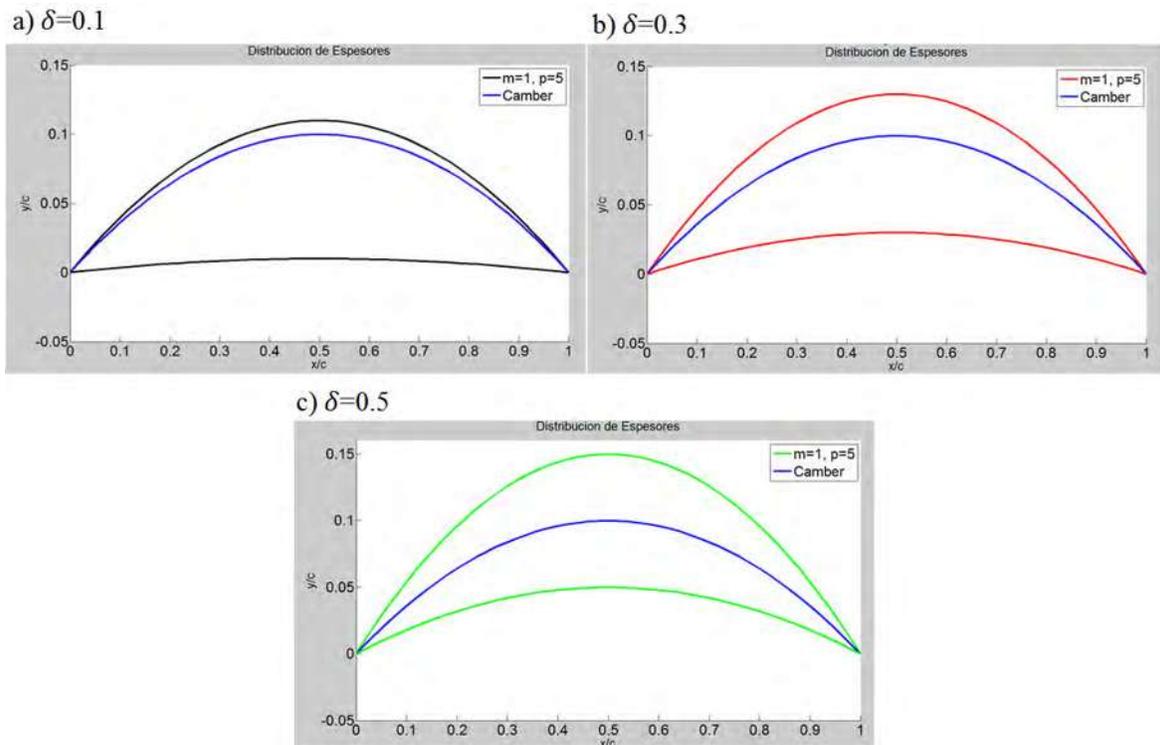
En la Figura 4.14, se muestran 2 ejemplos de cuando se variaron los parámetros  $m$ ,  $p$  y se mantuvo fijo un valor para  $\delta$ . La de lado izquierdo tiene valores de  $m=0.1$ ,  $p=0.2$  y la del lado derecho  $m=0.5$ ,  $p=0.8$ . En este modelo la línea media dada por la función  $f$  no pasa por la distancia media entre el extradós e intradós. Mediante este modelo también se observó que los perfiles pueden tener diferente distribución de espesores a lo largo del perfil.

Este tipo de modelos permite generar perfiles en donde la línea del *camber* no siempre corresponderá con la línea media del perfil, esto es útil para el caso de perfiles asimétricos en donde se puede modular una distribución uniforme en los espesores, como es nuestro caso de estudio.



**Figura 4.14** Generación de dos perfiles diferentes cuando se mantiene constante el parámetro  $\delta$  y se varían los valores de  $m, p$ . Para una  $\delta=0.3$ .

Por otra parte, también se varió el valor para el parámetro  $\delta$  manteniendo constantes los valores para  $m$ , y  $p$ . En la Figura 4.15, se muestran los resultados para  $m = 0.1, p = 0.5$  al variar los valores de  $\delta = 0.1, 0.3, 0.5$ . Se puede observar que en todos los casos se mantuvo invariable la línea del *camber* indicada en color azul.



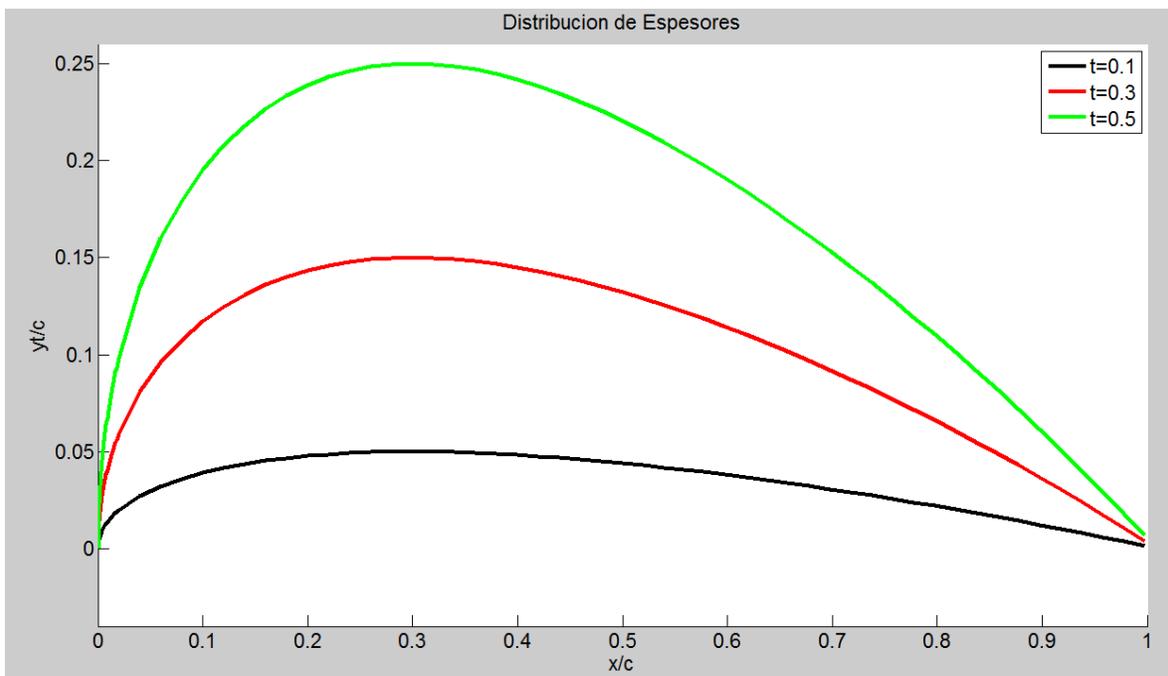
**Figura 4.15** Ejemplo de diferente distribución de espesores variando  $\delta$  y dejando los parámetros  $m$  y  $p$  fijos.

### 4.2.3 MODELACIÓN DEL PERFIL MEDIANTE UNA DISTRIBUCIÓN DE ESPESORES

Utilizando una ecuación para la distribución de espesores, se partió de la Ecuación (3.3) de la serie NACA de 4 dígitos dada como:

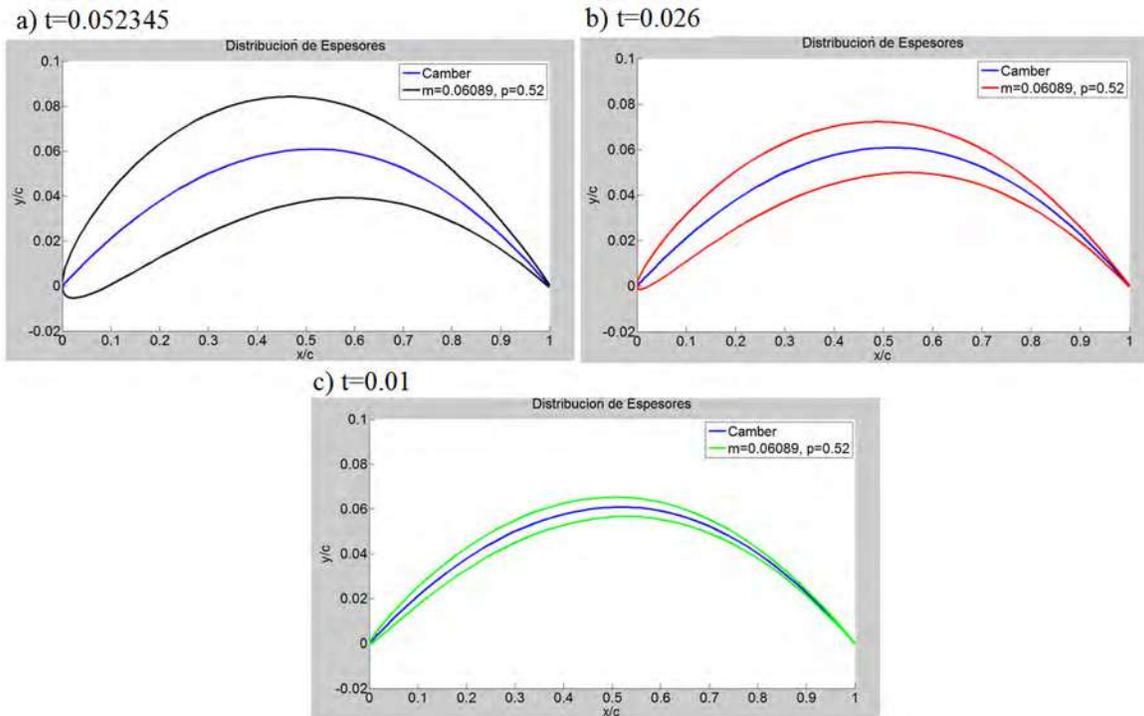
$$\frac{y_t}{c} = \left(\frac{t}{c}\right) \left[ a_0 \sqrt{x/c} - a_1(x/c) - a_2(x/c)^2 - a_3(x/c)^3 - a_4(x/c)^4 \right]$$

En la Figura 4.16, se muestra la distribución de espesores  $y_t$  para una serie NACA de 4 dígitos, la expresión genera una distribución máxima de espesores en la primera mitad del perfil de manera proporcional al valor de  $t$  que corresponde al valor del espesor máximo o dicho de otra manera se muestra el lado extradós del perfil para diferentes valores de  $t$ , el lado intradós de cada perfil sería su reflejo en el lado negativo del eje de las  $y$ .



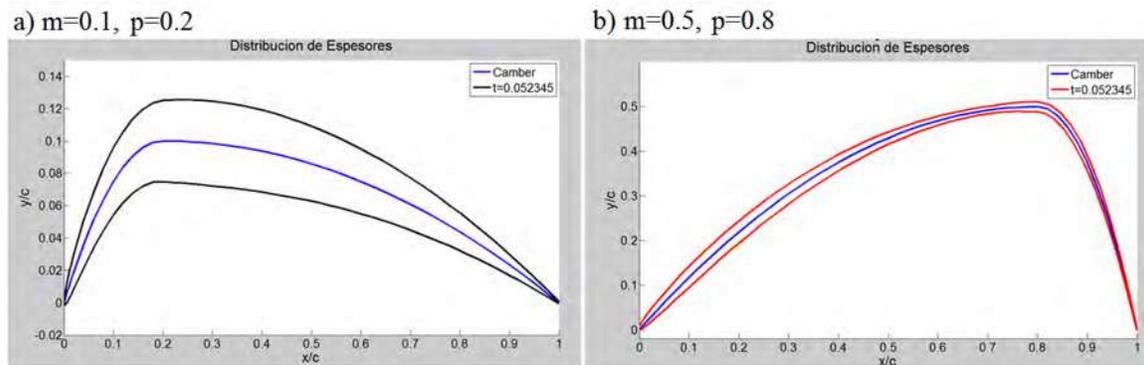
**Figura 4.16** Curva de distribución de espesores  $y_t/c$  utilizando una serie NACA de 4 dígitos, variando el espesor máximo en cada perfil. Para  $t = 0.1$  indicada con la línea de color negro,  $t = 0.3$  indicada con rojo y  $t = 0.5$  indicada con color verde.

Para el cálculo de la curva del lado *extradós* (lado succión) y el lado *intradós* (lado presión) se utilizaron las Ecuaciones (3.1) a la (3.6). La Figura 4.17, muestra diferentes perfiles construidos a partir de una serie NACA de 4 dígitos donde se mantuvieron fijos los parámetros  $m$ , y  $p$  del Perfil 1 y se varió el parámetro  $t$ . Los valores empleados para los perfiles fueron:  $m = 0.06089$ ,  $p = 0.52$ , para los espesores máximos con  $t = 0.052345$ ,  $0.026$  y  $0.1$ .



**Figura 4.17** Perfiles construidos a partir de una serie NACA de 4 dígitos con los valores  $m$  y  $p$  del Perfil 1 y variando el parámetro del espesor máximo.

Utilizando el mismo modelo para la distribución de espesores ahora se variaron los valores para los parámetros  $m$ ,  $p$  y se mantuvo constante  $t$ . En la Figura 4.18, se muestran los resultados obtenidos para  $t = 0.052345$  tomado del Perfil 1.



**Figura 4.18** Perfiles construidos a partir de una serie NACA de 4 dígitos utilizando el valor  $t$  del Perfil 1, con:

## 4.2.4 MODELACIÓN PROPUESTA DEL PERFIL UTILIZANDO EL PROGRAMA I-SIGHT PARA LA ESTIMACIÓN DE VALORES $m, p, t$

Durante el desarrollo de la investigación nos enfrentamos al problema de que los perfiles de los álabes a lo largo de la envergadura no presentan un comportamiento similar y por lo tanto las ecuaciones para una serie NACA de 4 o 5 dígitos no representan bien todas las secciones del álabe.

Al comparar los resultados para los parámetros  $m, p$  y  $t$  obtenidos del perfil real del álabe con los perfiles analíticos de las series NACA se constató un error importante durante la aproximación de estos perfiles como se mostró en las Figuras 4.11, y 4.12. Es decir, se presenta un error de aproximación considerable en la construcción de los álabes analíticos para los mismos valores de los parámetros obtenidos del álabe real. Por esta razón nos dimos a la tarea de establecer una metodología que permitiera describir la forma de los perfiles del álabe real a partir de una función analítica y que tomara en cuenta los parámetros aerodinámicos  $m, p$  y  $t$  respectivos para los 5 perfiles reales. Por lo anterior, sus ecuaciones correspondientes se modificaron pero buscando mantener los mismos tres parámetros de  $m, p$  y  $t$ .

En la propuesta que presentamos, se consideró una expresión para la distribución de espesores con la misma forma funcional que las utilizadas para la línea del *camber*, como se muestra a continuación:

$$\frac{y_t}{c} = \frac{t_{maxu}}{p_{maxu}^2} \left[ 2p_{maxu} \left( \frac{x}{c} \right) - \left( \frac{x}{c} \right)^2 \right]; \left( \frac{x}{c} \right) < p_{maxu} \quad (4.9)$$

$$\frac{y_t}{c} = \frac{t_{maxl}}{(1-p_{maxl})^2} \left[ 1 - 2p_{maxl} + 2p_{maxl} \left( \frac{x}{c} \right) - \left( \frac{x}{c} \right)^2 \right]; \left( \frac{x}{c} \right) \geq p_{maxl} \quad (4.10)$$

$$\left. \begin{aligned} y_U &= y_c(x) + y_t(x) \\ y_L &= y_c(x) - y_t(x) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Tomado como base las ecuaciones de las serie NACA de 4 dígitos para la función de la línea del *camber*  $y_c$ , se programaron junto con las funciones propuestas en las Ecuaciones del (4.9) al (4.11) en MATLAB<sup>®</sup>. Se partió la longitud de la cuerda en 2 regiones para implementar el caso *reflex* y lograr posicionar la región en donde se invierte la línea del *camber*, bajo la siguiente condición:

$C_1$  Es la sección de la cuerda en donde se establece la primer combadura del *camber*,

$$C_2 = 1 - C_1 \quad (4.12)$$

Sin embargo, estas adaptaciones dieron lugar a un aumento en el número de parámetros como se puede observar en las Ecuaciones (4.9), (4.10) y (4.12), en donde fue necesario adicionar parámetros para posicionar el punto de inversión en el *reflex*, así como el par de

coordenadas para posicionar cada espesor máximo, tanto en el lado superior (extradós) como en el lado inferior (intradós) de cada perfil, definidos como:

$t_{maxu}$  Espesor máximo respecto del *camber* en el lado superior del perfil.

$p_{maxu}$  Posición horizontal del espesor máximo en el lado superior del perfil.

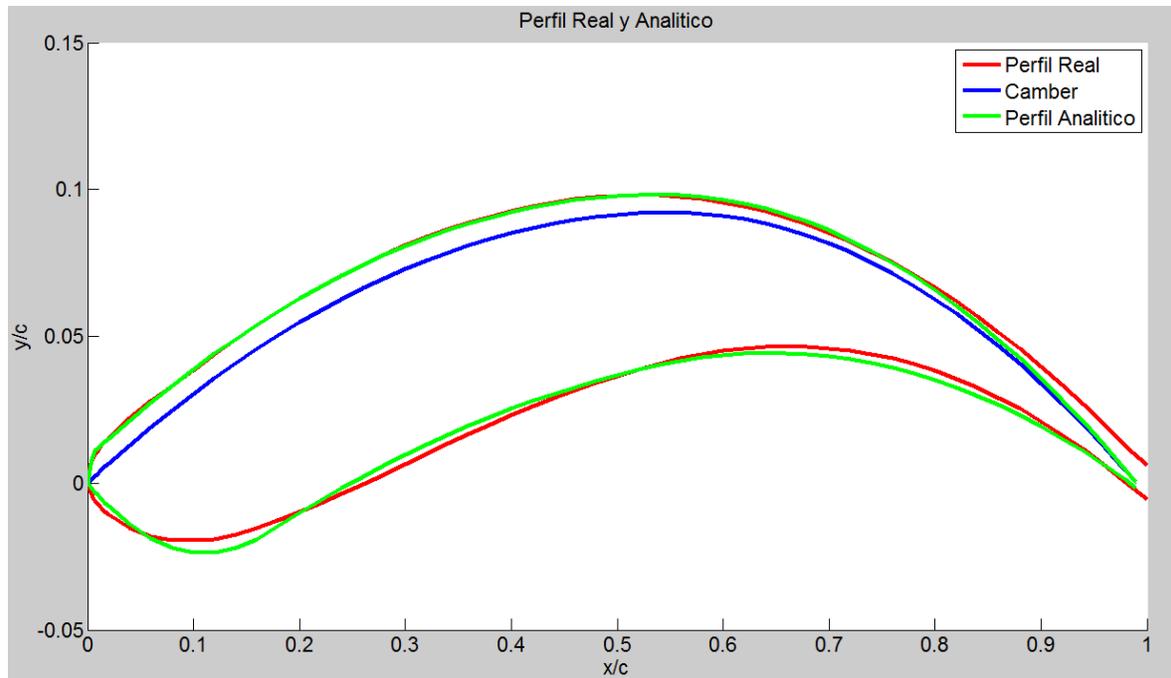
$t_{maxl}$  Espesor máximo respecto del *camber* en el lado inferior del perfil.

$p_{maxl}$  Posición horizontal del espesor máximo en el lado inferior del perfil.

Por lo tanto, parte de la propuesta aquí presentada incluyó la adición de parámetros en la distribución de espesores. Esto permitió tener un mayor control de las asimetrías en los espesores presentadas a lo largo de los perfiles tanto en su lado superior como inferior. La importancia de esta propuesta radica en que se logró modelar perfiles del tipo *reflex* o de *doble combadura*.

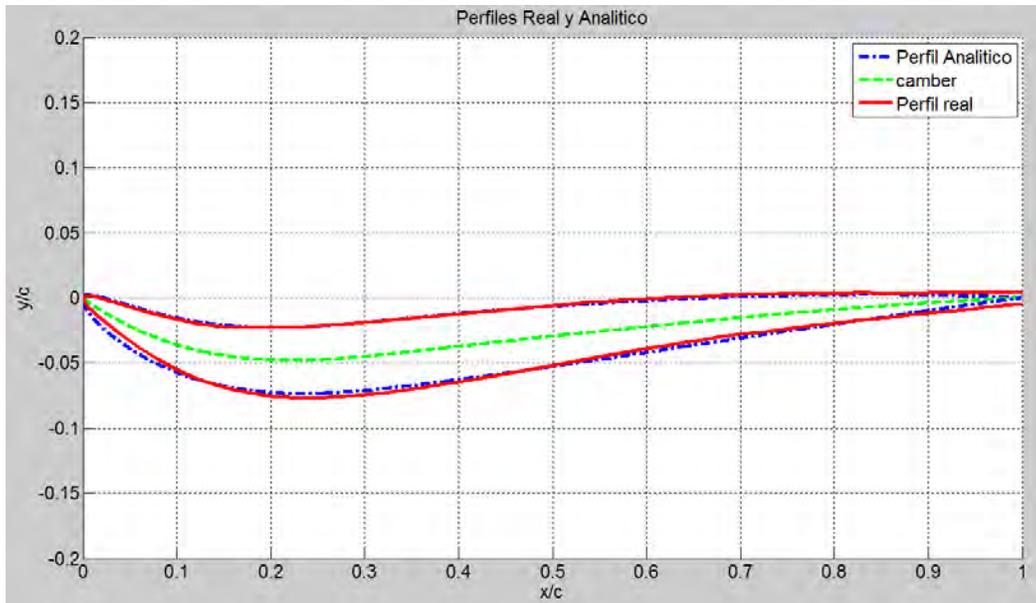
Posteriormente se empleó un algoritmo de búsqueda, mediante el cual su objetivo fue minimizar el error entre las coordenadas del álabe real y las obtenidas en el perfil analítico empleando el modelo aquí propuesto. Como ya se mencionó en la Metodología, lo anterior se logró a través del acoplamiento del software I-SIGHT® con el software MATLAB®, obteniéndose así los valores de  $m$ ,  $p$  y  $t$  que minimizan el ajuste.

En la Figura 4.19, se muestran los resultados obtenidos con el modelo propuesto en comparación con las coordenadas del perfil del álabe real. En este caso se muestran los resultados correspondientes al Perfil 2.



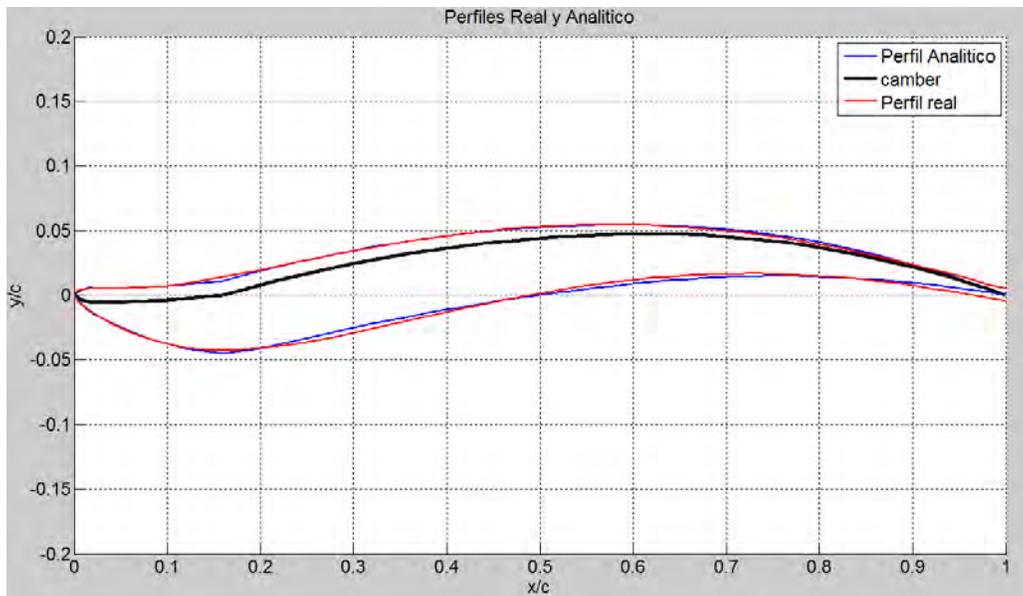
**Figura 4.19** Comparación del Perfil 2 real en color rojo, el perfil analítico de color verde y en azul la línea de combadura media del *camber*.

En la Figura 4.20, se muestran los resultados obtenidos con el modelo propuesto en comparación con las coordenadas del perfil del álabe real. En este caso se muestran los resultados correspondientes al Perfil 4.



**Figura 4.20** Perfil real para la sección 4 representado con una línea punteada de color azul, el perfil analítico con una línea continua de color rojo y la línea del *camber* de color verde punteada.

Finalmente en la Figura 4.21, se muestran los resultados obtenidos con el modelo propuesto en comparación con las coordenadas del perfil del álabe real para el caso del Perfil 3 que corresponde a un perfil tipo *reflex*.



**Figura 4.21** Comparación del Perfil 3 real en color rojo, el perfil analítico de color azul y en negro la línea de combadura media del *camber*.

A continuación en la Tabla 4.2, se presentan los valores obtenidos de los parámetros  $m$ ,  $p$  y  $t$  para los 5 perfiles, considerando dos regiones para la longitud total de la cuerda y así tomar en cuenta la posibilidad de dos combaduras en los perfiles.

**Tabla 4.2** Valores finales alcanzados en la optimización.

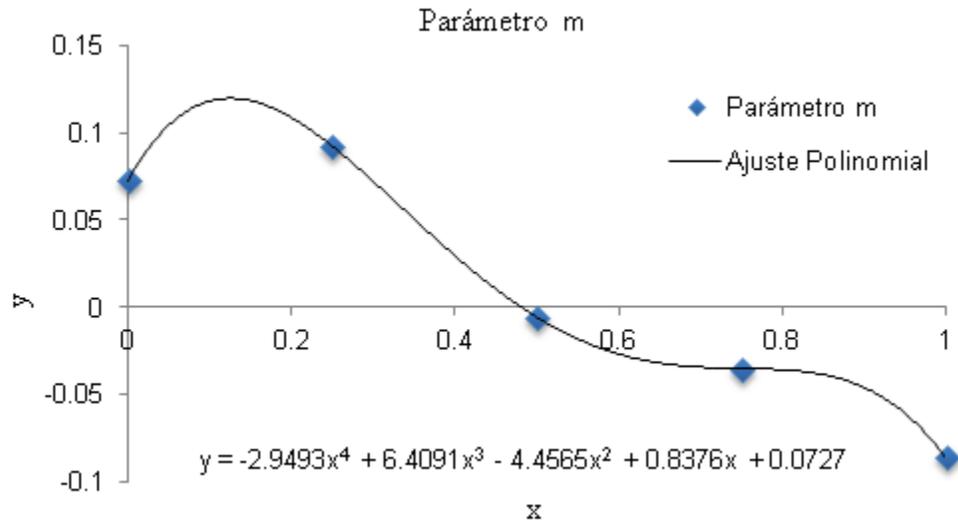
Perfiles	$m_1$	$p_1$	$m_2$	$p_2$	$t_{maxup}$	$p_{maxup}$	$t_{maxlow}$	$p_{maxlow}$	$C_1$	$C_2$	Error de aproximación
Perfil 1	0.0727	0.5601	0	0	0.0200	0.0642	0.0376	0.4913	1	0	0.0291
Perfil 2	0.0922	0.5577	0	0	0.0085	0.0077	0.0649	0.1697	1	0	0.0267
Perfil 3	- 0.0058	0.1439	0.0473	0.5515	0.0112	0.0197	0.0499	0.2312	0.1595	0.8405	0.0194
Perfil 4	- 0.0352	0.2038	0	0	0.0144	0.0449	0.0395	0.2457	1	0	0.0233
Perfil 5	- 0.0864	0.3797	0	0	0.0189	0.3400	0.0334	0.1048	1	0	0.0294

Los valores de los parámetros  $m$ ,  $p$  y  $t$  presentados en la Tabla 4.2 se pueden considerar como los valores de arranque en la búsqueda de nuevos diseños de perfiles de álabes. Es decir que con ellos se podrán construir una curva de distribución para cada uno de los parámetros a largo de la envergadura del álabe y la cual podrá ser modificada para la construcción de nuevos diseños.

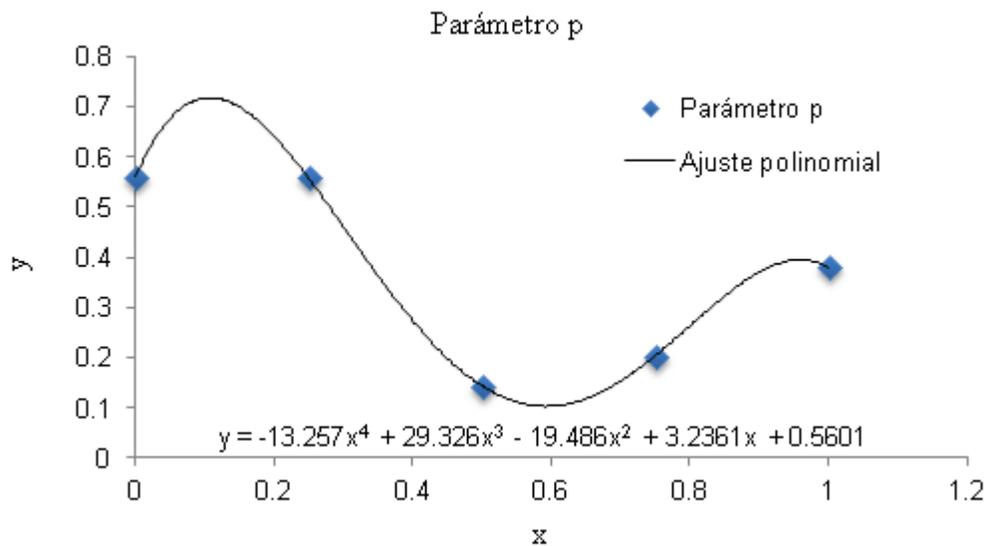
### 4.3 INTEGRACIÓN DE LA CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ÁLABE

Los valores que se han obtenido de  $m$ ,  $p$  y  $t$  permiten definir las curvas que representarán la distribución de los perfiles a lo largo de su envergadura. Inspirados en el trabajo de Jacek A. Swidersk [5], el desafío enfrentado fue establecer una función algebraica, trigonométrica o polinomial, que permitiera reproducir y predecir valores de los parámetros del perfil con el mínimo de parámetros por ajustar. La manipulación de dichas funciones permite poder construir una variedad de perfiles de álabes para su análisis y así buscar la optimización en el intercambio de la cantidad de movimiento en el rodete.

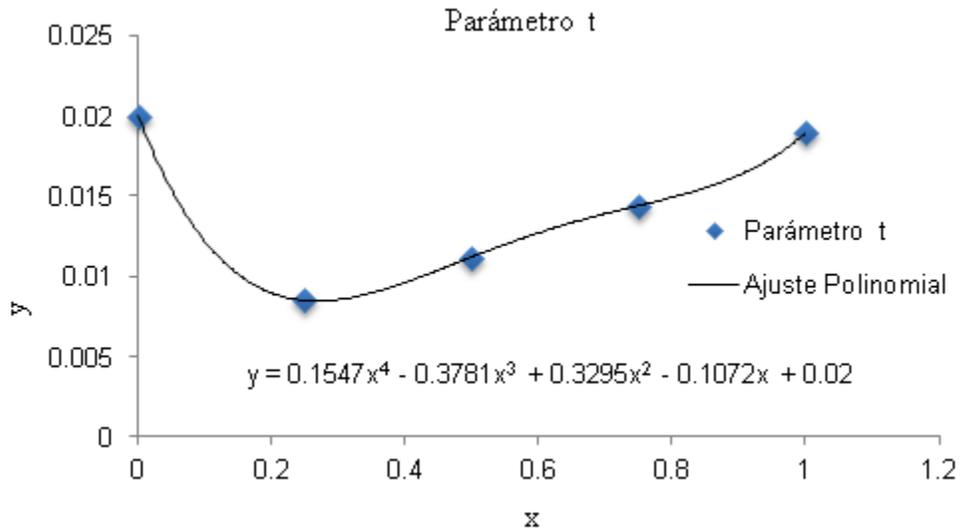
Partiendo de los cinco perfiles tomados del álabe real se procedió a proponer un ajuste que permitiera validar los resultados y reconstruir el álabe original. Usando los cinco perfiles, la primer propuesta consistió en un ajuste polinomial de 4<sup>to</sup> grado como a continuación se presenta en las Figura 4.22, al 4.24.



**Figura 4.22** Gráfica de los valores de  $m$  para las cinco secciones del álabe seleccionadas utilizando un ajuste polinomial de 4<sup>to</sup> grado.



**Figura 4.23** Gráfica de los valores de  $p$  para las cinco secciones del álabe seleccionadas utilizando un ajuste polinomial de 4<sup>to</sup> grado.



**Figura 4.24** Gráfica de los valores de  $t$  para las cinco secciones del álabe seleccionadas utilizando un ajuste polinomial de 4<sup>to</sup> grado.

El primer ajuste propuesto consistió de una función polinomial de 4<sup>to</sup> grado expresando la distribución de los parámetros aerodinámicos de la siguiente forma:

$$m = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad (4.13)$$

$$p = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad (4.14)$$

$$t = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad (4.15)$$

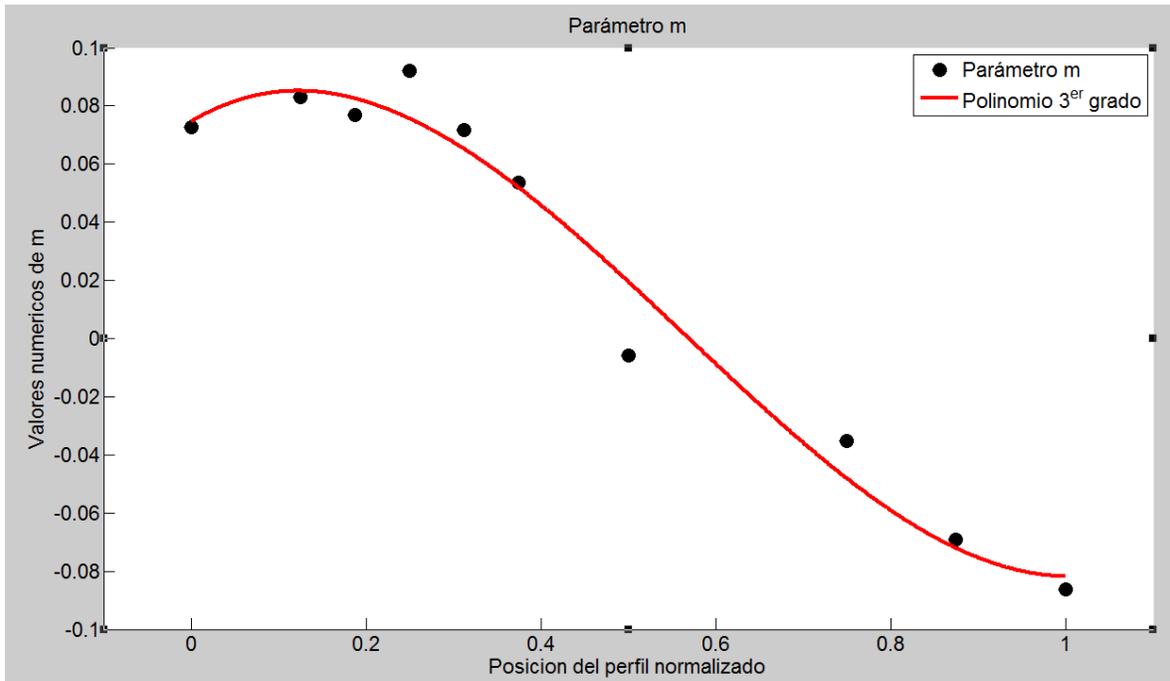
En la Tabla 4.3, se muestra los valores de los coeficientes de las curvas de distribución para  $m$ ,  $p$  y  $t$  respectivamente, utilizando un polinomio de 4<sup>to</sup> grado.

**Tabla 4.3** Valores de los coeficientes de ajuste obtenidos para las curvas de distribución de  $m$ ,  $p$  y  $t$ , mediante un ajuste polinomial de 4<sup>to</sup> grado.

Coefficientes	$m$	$p$	$t$
$a_0$	0.0727	0.5601	0.0200
$a_1$	0.8376	3.2361	-0.1072
$a_2$	-4.4565	-19.486	0.3295
$a_3$	6.4091	29.326	-0.3781
$a_4$	-2.9493	-13.257	0.1547

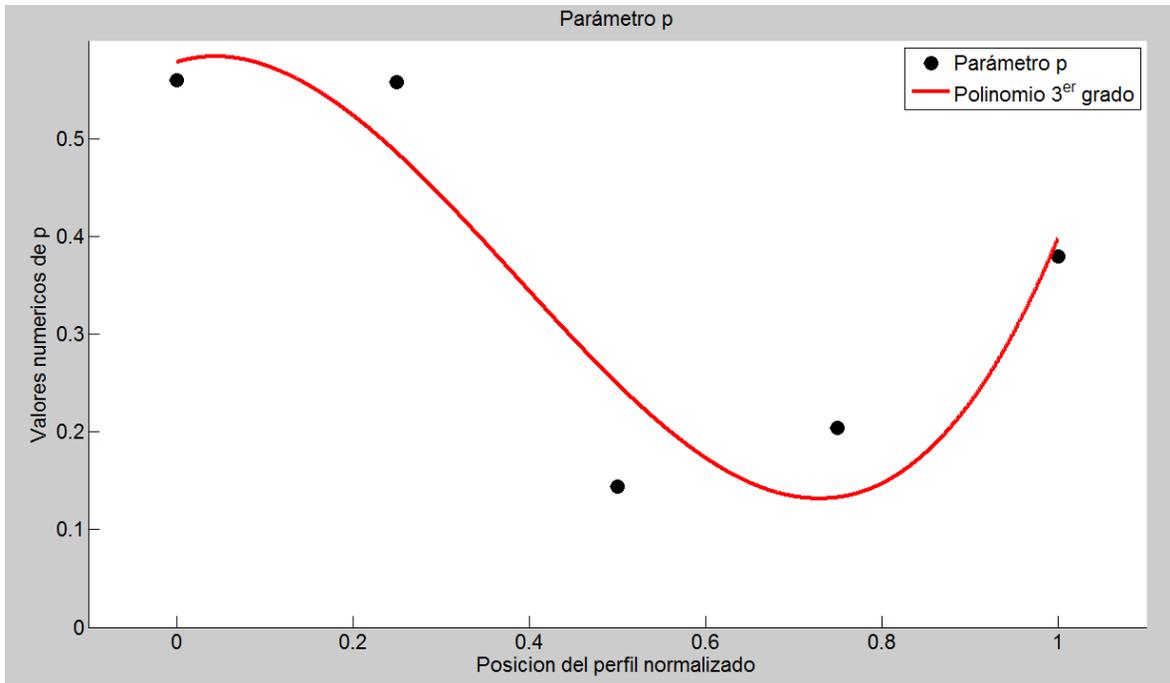
Como se mencionó el ajuste polinomial de 4<sup>to</sup> grado pasa por todos los puntos obtenidos de los parámetros permitiendo así poder reconstruir el álabe original para la validación de la metodología propuesta. Lo anterior fue obtenido una vez que se terminó el acoplamiento de los programas realizados en MATLAB<sup>®</sup> e I-SIGHT<sup>®</sup>, obteniéndose un resultado favorable.

Para obtener un ajuste más confiable con un menor número de coeficientes de ajustes se aumentó el número de cortes o perfiles en el álabe real. En la Figura 4.25, se muestra la curva de distribución para los valores de  $m$ , para cada una de las secciones seleccionadas para su estudio en el álabe. De igual manera, la posición del perfil a lo largo de la envergadura se normalizó con la longitud total del álabe.



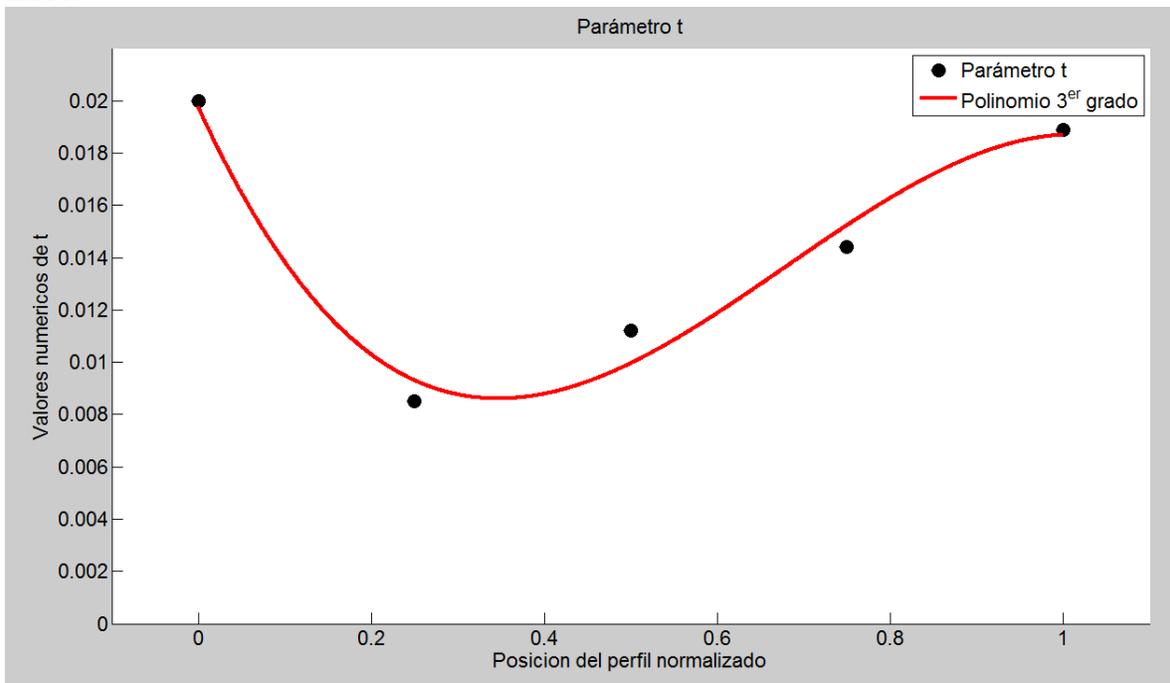
**Figura 4.25** Gráfica de los valores de  $m$  aumentando a 10 el número de secciones estudiadas en el álabe real y aplicando un ajuste polinomial de 3<sup>er</sup> grado.

En la Figura 4.26, se muestra cómo se representa la curva de distribución para los valores de  $p$ , para cada una de las secciones del álabe estudiadas.



**Figura 4.26** Gráfica de los valores de  $p$  para cinco secciones del álabe utilizando un ajuste polinomial de 3<sup>er</sup> grado.

En la Figura 4.27, se muestra cómo se representa la curva de distribución para los valores de  $t$ , para cada una de las secciones del álabe normalizada la posición a la longitud total del álabe.



**Figura 4. 27** Gráfica de los valores de  $t$  para cinco secciones del álabe utilizando un ajuste polinomial de 3<sup>er</sup> grado.

Las ecuaciones que se utilizaron para ajustar la curva de distribución de los parámetros a lo largo de la envergadura del álabe se pueden expresar de la siguiente manera:

$$m = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (4.16)$$

$$p = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (4.17)$$

$$t = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (4.18)$$

En la Tabla 4.4, se muestra los valores de los coeficientes de las curvas de distribución para  $m$ ,  $p$  y  $t$  respectivamente, utilizando un polinomio de 3<sup>er</sup> grado.

**Tabla 4.4** Valores de los coeficientes de ajuste para las curvas de distribución de  $m$ ,  $p$  y  $t$ .

Coefficientes	$m$	$p$	$t$
$a_0$	0.0746	0.5779	0.0198
$a_1$	0.1797	0.2771	-0.0726
$a_2$	-0.8211	-3.2703	0.1403
$a_3$	0.4850	2.8128	-0.0688

Las formas de las curvas de distribución de los parámetros de los perfiles nos dan la oportunidad de estudiarlas y compararlas de acuerdo al intercambio de energía de sus álabes. Con este paso se concluye la propuesta de la construcción paramétrica del álabe permitiendo así generar su dominio computacional de forma totalmente automática mediante el acoplamiento de los programas generados en MATLAB<sup>®</sup> e I-SIGHT<sup>®</sup>. Cabe mencionar que el número de perfiles que se utilicen para la definición de un álabe complejo en su diseño no influirá en el número de parámetros que definan este álabe ya que estos estarán en las curvas de distribución.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

Los rediseños tradicionales presentados hasta ahora han requerido un gran número de parámetros para representar correctamente la forma del álabe, lo cual no es rentable para un proceso de optimización de una turbina. En el presente trabajo se ha propuesto una nueva metodología para el re-diseño o reconstrucción de perfiles de álabes de turbinas hidráulicas mediante la utilización de herramientas numéricas. Para lo anterior se acoplaron varios *softwares* para realizar el proceso de construcción de forma automática. Esta nueva definición paramétrica del álabe está basada en la manipulación de las curvas de distribución del álabe y por lo cual se requieren un mínimo de parámetros para su definición.

Para representar correctamente el álabe, su área fue dividida en diferentes secciones. En el estado del arte se pudo encontrar perfiles aerodinámicos de las series NACA reflexed con funciones establecidas a partir de los parámetros  $(m, p, t)$  para definir en cada sección el perfil del álabe. Debido a la complejidad (twisted and reflexed) del álabe real en cada sección, se hicieron modificaciones a cada función para posteriormente manipularlas con un algoritmo genético y encontrar así los parámetros de ajuste de cada perfil del álabe.

Posteriormente, se definieron las curvas de distribución de los parámetros que dan el perfil del álabe a través de una función matemática. Manipulando estas curvas, ha sido posible construir diferentes formas de álabes de turbinas hidráulicas.

Así en un principio el principal objeto de este trabajo era reducir el número de parámetros que definen los álabes de una turbina hidráulica los cuales son la parte más importante en el diseño de un rodete. Sin embargo, debido a la complejidad de éste tipo de álabes, no se pudo adaptar una función con un reducido número de parámetros lo que requerirá de un estudio posterior. Así, con el uso de una función que manipule las curvas de distribución de las secciones de los álabes, se pretende facilitar el uso de técnicas de optimización en el rediseño de rodetes que están acoplados a costosas evaluaciones con DFC.

## **TRABAJO A FUTURO**

Incluir el ángulo de ataque y de salida en cada sección para ser manipuladas por funciones matemáticas.

Definir cada sección del álabe a lo largo de su línea de corriente para poder representarlo en 3D.

Incluir la construcción del rodete completo, estableciendo la topología y el mallado del dominio computacional.

Analizar la función de las curvas de distribución que requiera el número menor de parámetros posibles.

Realizar un estudio paramétrico para definir el espacio del diseño del álabe.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ismael Suescun Monsalve, Turbinas Hidráulicas  
URL <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%204.pdf>
- [2] Masse, B. Simulation creates potential 5 million revenue gain from hydropower turbines. *Journal Articles by Fluent Software Users*, (JA101), 1–4. 1999.
- [3] Avellan, F. Flow investigation in a Francis draft tube: The FLINDT project. In *Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 20th IAHR Symposium, Charlotte, N. C., USA, DY-03*. 2000.
- [4] Mauri, S., Kueny, J., & Avellan, F. “Werlé-Legendre separation in a hydraulic machine draft tube”. In *ASME 2002 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Montréal, Québec, Canada*. 2002.
- [5] Jacek A. Swiderski, and J. Martin. “High power Francis runner upgrade with a new design runner”. In *Norcan Hydraulic Turbine Inc. Report*. 1999.
- [6] Qinghua, S. “Rehabilitation of a low head Francis turbine by runner replacement”. In *22<sup>nd</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Design Methods Turbines*. Stockholm Sweden. 2004.
- [7] Fan, H - Y. “An inverse design method of diffuser blades by genetic algorithms”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A*. *Journal of Power and Energy*, 112 (4), 261–268, 1998.
- [8] Zangeneh, M., Goto, A., Harada, H. “On the role of three-dimensional inverse design methods in turbomachinery shape optimization”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 213 (1), 27–42, 1999.
- [9] Leonard, O., Rothilde, A., Duysinx, P. “Compressor and turbine blade design by optimization”. In: *Proceedings of the Third World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO3*, Buffalo (NY-USA). No. 43, EOA3-1, 1999.
- [10] Burman, J., Gebart, B., Martensson, H. “Development of a blade geometry definition with implicit design variables. In: *38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.Y. No. 0671, 2000.
- [11] Lipej, A., Poloni, C. “Design of Kaplan runner using multiobjective genetic algorithm optimization.” *Journal of Hydraulic Research*, 38 (1), 73–79, 2000.
- [12] Enomoto, Y., Kurosawa, S., Suzuki, T. “Design optimization of a Francis turbine runner using multi-objective genetic algorithm”. In: *22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Design Methods Turbines*, Stockholm Sweden. No. A01-2, 2004.

- [13] Luis Ferrando, Jean-Louis Kueny, Francois Pedretti, Lauret Tomas. Surface parameterization of a Francis runner turbine for optimum design. In 22<sup>nd</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm Sweden. June 29 - July 2, 2004.
- [14] Emmanuel Flores, Daniele Bazin, Luis Ferrando, Farid Mazzouji. Design optimization of a Francis turbine runner.
- [15] Didier Poueymirou-Bouchet, Christophe Tribes, Jean-Yves Trépanier, This C. Vu. Hydrodynamic optimization in rehabilitation project. In: 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Design methods Turbines Stockholm Sweden. June 29 - July 2, 2004.
- [16] Aldo Cateni, A. Magri, L. Greco, G. Optimization of the hydropower plants performance importance of rehabilitation and maintenance in particular for the runner profiles. In: Session one-Economics of Efficiency Testing and Monitoring, 7th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements. Milan, Italy. Sep. 3-6, 2008.
- [17] Turbinas clasificación.  
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinashidraulicas/turbinahidraulicas.html>
- [18] Turbinas Pelton.  
[http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf)
- [19] Cesar Sanabria, Turbinas Kaplan.  
[http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf)
- [20] Cesar Sanabria, Turbinas Francis.  
[http://www.ing.una.py/DIREC\\_PPAL/ACADEMICO/APOYO/Maquinas\\_Hidraulicas/PDF/MAQ%20HIDRAULICAS%20TURBINAS%20FRANCIS.pdf](http://www.ing.una.py/DIREC_PPAL/ACADEMICO/APOYO/Maquinas_Hidraulicas/PDF/MAQ%20HIDRAULICAS%20TURBINAS%20FRANCIS.pdf)
- [21] MATLAB, 2005. Matlab 7.1.0.183 (R14). The Math Works Inc.
- [22] GAMBIT, 2007. Gambit 2.4 User's Guide Fluent Inc.
- [23] FLUENT INC., 2003. Fluent 6.1 User's Guide Fluent Inc.
- [24] Galván, Sergio; Reggio, Marcelo; Guibault, Francois. Inlet velocity profile optimization of the turbine 99 draft tube. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication), vol. 1A, ASME 2013, Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM 2013). 2013.
- [25] Anderson J. D. Fundamentals of Aerodynamics. Third Edition, Ed. McGraw Hill, 2001.

- [26] Carmona A. I. Aerodinámica y Actuaciones del Avión, Ed. Paraninfo, 11ª Edición, 2001.
- [27] Jacobs, Eastman N.; and Pinkerton, Robert M. Tests in the Variable-Density Wind Tunnel of Related Airfoils Having the Maximum Camber Unusually far Forward. NACA Rep. 537, 1935.
- [28] Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., Theory of Wing Sections. Dover, New York, 1959.
- [29] Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., Stivers L. S. Summary of Airfoil Data, NACA Report 824. 1945.
- [30] Marzena Baszek, Krzyszot Tesch. Blade Shape Optimization for Rotor-Stator Interaction in Kaplan Turbine. In 2<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Optimization. Lisbon, Portugal. September 6 – 9, 2010.