



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN

Ingeniería en Energías Renovables

DISEÑO AERODNAMICO DE LAS PALAS DE UN
AEROGENRADOR DE BAJA POTENCIA

Tesis profesional

Que para obtener el Grado de

Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

ANA KAREN LÓPEZ GONZÁLEZ

Director: M.C.E.E Brenda Beatriz Hernández Juárez

Co Director: Dr. José Rafael Dorrego Portela



Chicoloapan de Juárez, Estado de México a 20 de agosto de 2024

Presentación y directorio de los asesores

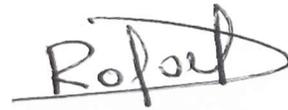
El presente trabajo realizado bajo de la modalidad de Tesis profesional, titulado “Diseño aerodinámico del rotor de un aerogenerador de baja potencia” y que ha sido realizado por la alumna **Ana Karen López González** con matrícula 19020033 ha sido aprobado al igual que aceptado como requisito para obtener el grado de **Licenciatura** en:

Ingeniería en Energías Renovables

Directora:

M.C.E.E. Brenda Beatriz Hernández Juárez

Co director:



Dr. José Rafael Dorrego Portela

Revisor

Mtro. Marco Antonio Lozano Vinalay

Revisor

Dr. Daniel Hernández Rivera

I. Agradecimientos

Gracias a Dios por la vida de mis padres, también porque cada día bendice mi vida con la hermosa oportunidad de estar y disfrutar al lado de las personas que sé que más me aman, y a las que yo sé que más amo en esta vida.

- Gracias a mis padres por ser los principales motores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio en las que su compañía y la llegada de sus cafés era para mí como agua en el desierto; gracias a mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, por cada consejo y por cada una de sus palabras que me corrigieron y abrazaron durante mi vida. La misma vida no me alcanzará para poder compensar todo lo que han hecho y siguen haciendo por mí, pero que tengan por seguro que cada día que pase haré que se sientan orgullosos de la persona en que me he convertido gracias a su amor y dedicación, los amo padres.
- A mis hermanos que fueron grandes compañeros en este camino de aprendizaje, al igual que su apoyo y ayuda incondicional en los momentos difíciles en los que pase durante mi carrera.
- Al Dr. José Rafael Dorrego Portela por ser mi asesor externo y brindarme la oportunidad de trabajar y colaborar junto a él; así como su paciencia para guiarme durante todo el proyecto, sus recomendaciones, el tiempo que se tomó para compartir sus experiencias y conocimientos.
- A mi asesor interno M.E. Brenda Beatriz Hernández Juárez, por su tiempo, los conocimientos compartidos y asesorías.
- Agradezco a el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan por abrirme las puetas de su institución y apoyarme en este arduo camino de mi carrera.

II. Resumen

En este trabajo de investigación se realizó el diseño de una pala para un aerogenerador de baja potencia de eje horizontal a barlovento aplicando la teoría del Momento y Elemento de la Pala (BEM, por sus siglas en Inglés). Donde se hizo un estudio de sitio de recurso eólico previo de la zona de La Ventosa, en el Istmo de Tehuantepec Oaxaca, en la que se pretende opere el aerogenerador.

Se presenta la metodología de diseño de la pala para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW, aplicando las condiciones de diseño requerida por la norma IEC-61400-2. Una vez obtenido los datos del análisis del recurso eólico obtenidos de la estación anemométrica M04 (CERTER), con el registro promediados cada 10 minutos en un período de 1 año (2018), para evaluar el recurso eólico a una altura de instalación del aerogenerador de 12 m. Se continuo con la selección de los perfiles aerodinámicos propuestos para el diseño de la geometría de la pala, en el que se utilizaron y evaluaron ciertas características propias de los perfiles, como el comportamiento de la curva de coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre, evaluación de diferentes números de Reynolds y su eficiencia aerodinámica. Se seleccionaron los perfiles: NACA 4412, NACA 2412, NACA

0012 Y MH-106 y una vez aplicado los criterios de selección de perfiles aerodinámicos, el que mayor puntuación obtuvo fue el perfil NACA 4412, el cual se utilizó en el diseño de la pala.

III. Abstract

In this research work, the design of a blade for a low-power wind turbine with a horizontal axis to windward was carried out by applying the Blade Element and Momentum (BEM) theory. Where a previous wind resource site study was carried out in the La Ventosa area, in the Isthmus of Tehuantepec Oaxaca, where the wind turbine is intended to operate.

The blade design methodology for a 3 kW horizontal axis wind turbine is presented, applying the design conditions required by the IEC-61400-2 standard. Once the wind resource analysis data obtained from the M04 anemometric station (CERTER) has been obtained, with the record averaged every 10 minutes over a period of 1 year (2018), to evaluate the wind resource at a wind turbine installation height of 12m. The selection of the proposed aerodynamic profiles for the design of the blade geometry continued, in which certain characteristics of the profiles were used and evaluated, such as the behavior of the lift coefficient curve, the drag coefficient, evaluation of different Reynolds numbers and their aerodynamic efficiency. The profiles were selected: NACA 4412, NACA 2412, NACA

0012 AND MH-106 and once the aerodynamic profile selection criteria was applied, the one that obtained the highest score was the NACA 4412 profile, which was used in the design of the blade.

IV.

Contenido

I.	Agradecimientos.....	3
II.	Resumen.....	4
III.	Abstract.....	5
1	Introducción	9
2.	Antecedentes	10
2.1	Diseño aerodinámico.....	11
2.2	Software.....	13
3.	Marco teórico	15
3.1	Evaluación del recurso eólico	15
3.1.1	Modelos para el perfil vertical del viento	15
3.1.2	Perfil logarítmico	16
3.1.3	Ley de potencia.....	17
3.1.4	Velocidad media del viento	18
3.1.5	Intensidad de turbulencia	19
3.1.6	Distribución de la velocidad del viento	21
3.1.7	Métodos para estimar los parámetros de Weibull.....	22
3.1.8	Condiciones extremas del viento	24
3.2	Modelo dimensionado de la pala	29
3.2.1	Aerodinámica para aerogeneradores de eje horizontal.....	29
3.2.2	Perfil aerodinámico	29
3.2.3	Número de Reynolds.....	33
3.2.4	Fuerzas aerodinámicas.....	35

3.2.5 Potencia y torque de los aerogeneradores.....	38
3.3. Teoría Aerodinámica.....	41
3.3.1 Momento Axial	41
3.3.2 Teoría del elemento de la pala.....	46
3.3.3 Teoría del elemento de la pala (BEM)	47
4 Planteamiento del problema	54
5 Hipótesis.....	54
6 Objetivos.....	55
7 Metodología	56
7.1 Análisis del recurso eólico.	57
7.1.1 Condiciones normales del viento	58
7.1.2 Condiciones extremas del viento.....	59
7.1.3 Diseño aerodinámico de la pala.....	60
8 Resultados y discusión.....	62
8.1 Análisis del recurso eólico	62
8.2 Análisis del modelo dimensionado de la pala	64
8.2.1 Velocidades de diseño.....	64
8.3 Selección de perfiles aerodinámicos	64
8.3.1 C_l máximo.....	66
8.3.2 Manufactura.....	68
8.3.2 Máxima relación entre coeficiente de sustentación y arrastre entre (C_l y C_d) respecto al ángulo α	70
8.3.3 C_d mínimo a diferentes números de Reynolds.....	72
8.4 Cálculo de geometría y cargas aerodinámicas	73
8.5 Sobre la discusión	78

8.5.1 Estudio 1	78
8.5.2 Estudio 2	81
9 Conclusiones	84
10 Referencias.....	85
Anexo A	88
Anexo B	89
Anexo C	101

1 Introducción

El perfil aerodinámico es un cuerpo con un diseño determinado, el cual aprovecha al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidades y presión cuando este se sitúa dentro de una corriente de aire. Un perfil aerodinámico se define como la sección transversal de una pala en un aerogenerador.

La resistencia y sustentación son las resultantes de las fuerzas de presión y a los esfuerzos cortantes sobre la superficie del cuerpo. Si delimitamos las distribuciones de presiones y de esfuerzos cortantes sobre la superficie, se obtiene la integración de las fuerzas aerodinámicas. Las dos fuerzas fundamentales que actúan sobre un perfil aerodinámico es la sustentación y resistencia.

Un diseño aerodinámico es el estudio, planeación y diseño cuyo objetivo va en relación con la fuerza que presente el viento. Tiene como finalidad reducir la mínima resistencia que oponga el aire de la atmósfera a un cuerpo en movimiento.

El rotor que está compuesto por las palas y el buje, es el elemento del aerogenerador que recibe la energía cinética, normalmente está constituido por tres palas. Los bujes son mayoritariamente fijos, reservando los bujes basculantes para el caso de aerogeneradores monopala o bipala, en los que es necesario para disminuir las cargas dinámicas que se presentan en este tipo de diseños.

Normalmente el rotor se encuentra situado a barlovento. Esta disposición permite reducir las cargas de fatiga, al reducir el efecto de sombra de torre y evitar el ruido aerodinámico producido por las palas cuando el rotor se sitúa a sotavento.

2. Antecedentes

La historia sirve para ilustrar los problemas que aún enfrentan los sistemas de energía eólica en la actualidad y proporciona información sobre por qué las turbinas tienen el aspecto que tienen. La fuerza del viento se utiliza por el ser humano desde hace al menos 3.000 años, mucho antes del carbón y del petróleo. Desde el año 400 a. C, los habitantes del actual territorio de China utilizaban velas en sus embarcaciones (ver Figura 1.2). Aproximadamente cerca del año 3400 a. C., los antiguos egipcios ya navegaban con la ayuda del viento del Río Nilo y posteriormente lo hicieron en las costas del Mar Mediterráneo; para el año 1250 a.C., surcaban ya el Mar Rojo. Las embarcaciones impulsadas por el viento fueron dominantes en el transporte acuático por mucho tiempo hasta la implementación de la Máquina de Vapor en la navegación del en el siglo IX, como se muestra en la Figura 1.3, [1].



Figura 1.2 Uso del viento en la navegación.

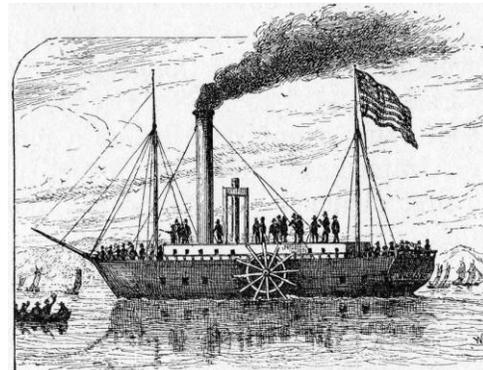


Figura 1.3 Máquina de vapor en la navegación.

Durante el siglo XIX se utilizó la energía eólica para proporcionar energía mecánica para bombear agua o moler grano. Al comienzo de la industrialización moderna, el uso del viento fluctuante como recurso energético fue sustituido por motores alimentados con combustibles fósiles o por la red eléctrica, que proporcionó una fuente de energía más consistente. A principios de los años 1970, con la primera crisis de los precios del petróleo, resurgió el interés por la energía eólica.

2.1.1 Diseño aerodinámico

- En el trabajo de modelo de vórtice helicoidal para simulación Aero elástica de aerogeneradores hecho por Chattot j.j [1] se realizó una mejora al método de vórtice para tener en cuenta la flexibilidad de la pala, que es una fuente potencial de inestabilidad en el flujo que pasa por el rotor del aerogenerador. El código ha sido validado previamente bajo el supuesto de palas rígidas. El método aerodinámico se basa en el modelo Goldstein, que distribuye la vorticidad del flujo en superficies rígidas helicoidales definidas de manera única por los parámetros de flujo (relación de velocidad de punta y potencia promedio extraída por el rotor) y la geometría de la pala (radio máximo y longitud de la raíz). La estructura se trata como una viga con grados de libertad en flexión y torsión. Las altas velocidades de giro de las palas del aerogenerador son responsables de las velocidades inducidas en el plano del rotor, así como fuera del mismo. Se ha demostrado que un análisis modal es el enfoque más preciso y eficiente para un acoplamiento de las ecuaciones estructurales y aerodinámicas.
- En el trabajo [2], se presenta un diseño aerodinámico de un aerogenerador de eje horizontal, usando la teoría del momento del elemento de la pala, por sus siglas en inglés BEM (Blade Element Momentum). Con base a condiciones ideales se optimizó el diseño de la pala, estas condiciones establecieron la geometría de la pala. Los datos utilizados para el diseño son: radio del rotor, velocidad de viento a la altura de buje, velocidad de rotación del rotor, número de palas del aerogenerador y tipo de perfil aerodinámico. Para el caso del diseño, se presentó un sistema de control pasivo con pérdida aerodinámica. El tipo de perfil que se utilizó fue el NACA 4412, aconsejando un buen perfil desde el punto de vista aerodinámico y constructivo.
- [3], propusieron un método de simulación numérica inestable para predecir las cargas aerodinámicas inestables de los aerogeneradores de eje horizontal durante las operaciones en condiciones de guiñada y cabeceo. Este método

incluye un método de línea de sustentación no lineal para calcular las cargas aerodinámicas en las palas y un método de vórtice libre con precisión de tiempo para simular la estela. Para mejorar la propiedad de convergencia en el método de línea de sustentación, desarrolló un algoritmo iterativo basado en el método Newton-Raphson.

- En el trabajo de [4], se estudió la implementación de un modelo de Momentum para analizar el desempeño de un rotor de aerogenerador de eje vertical con el fin de diseñar un rotor para una aplicación de baja potencia. El modelo implementado fue el modelo de múltiples tubos de corriente, el cual se programó en lenguaje tipo C. La potencia eléctrica a producir se fijó en 800 W y se tomó un generador comercial como referencia para conocer la velocidad de giro y el par que el rotor debe desarrollar a una determinada velocidad de viento. Se encontró que la cuerda y el número de álabes limitan la aplicación del modelo, ya que a ciertos valores provocan factores de interferencias de valor crítico.
- En el trabajo [5], realizaron un estudio del rendimiento aerodinámico de dos tipos diferentes de palas de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT). Uno es un típico diseño por la teoría del BEM; el otro es con la longitud de la cuerda constante y sin torsión. El propósito de este estudio es investigar el incremento del rendimiento del primero mediante experimentos y simulaciones numéricas. Se realizaron experimentos de túnel de viento para medir los coeficientes de potencia de ambos modelos. Para la visualización del campo de flujo, también se realizaron simulaciones numéricas bajo las condiciones de operación de varias velocidades del viento. Las simulaciones resultan ser consistentes con los datos experimentales. Tanto la simulación como la medición indicaron que el coeficiente de potencia máxima de la pala con el diseño BEM se incrementó en más del 50 %.
- En el siguiente trabajo se propone un enfoque de laboratorio a mercado para el diseño de palas para pequeños aerogeneradores. La elección de los perfiles se basa en la optimización del comportamiento aerodinámico, compatible con las limitaciones debidas a la necesidad de una estructura mecánica simple. La

cuchilla está hecha de polímero reforzado con fibra de vidrio, realizado a través de moldeo por inyección. El método de elementos finitos se emplea para la simulación numérica de la distribución de las tensiones a lo largo de la hoja. En aspectos generales, el diseño de palas es un sistema que involucra varias etapas, por ejemplo [6], detallan el diseño de un aerogenerador de pequeña potencia para la obtención de la máxima eficiencia, partiendo de la selección de perfiles para la optimización del comportamiento aerodinámico y estructural. Además, presentan de manera esquematizada los pasos para el diseño de un aerogenerador con la aplicación de la teoría BEM. Para mejorar el proceso de fabricación y conseguir bajo costo [7], presentaron un diseño aerodinámico de un aerogenerador mediante la teoría BEM. Ellos aportan un método de linealización de la cuerda con el propósito de facilitar la manufactura. Asimismo, examinaron 5 perfiles aerodinámicos no lineales, determinando sus características aerodinámicas con el software XFOIL.

2.1.2 Software

Principales softwares utilizados para el diseño de aerodinámicos del rotor de un aerogenerador de baja potencia

- QBlade: Es un software de diseño de aerogeneradores (de eje horizontal y vertical), distribuido bajo licencia GPL (Licencia Publica General). La integración de la funcionalidad XFOIL/XFLR5 permite seleccionar y diseñar perfiles aerodinámicos personalizados y calcular sus polares de rendimiento e integrarlos directamente en el diseño y la simulación de un rotor del aerogenerador. El software es especialmente adecuado para la enseñanza, ya que proporciona un diseño práctico y capacidades de simulación para el diseño de rotores y muestra todas las relaciones fundamentales de los conceptos de diseño y el rendimiento de la turbina de una manera fácil e intuitiva. Algunos trabajos utilizando el software se presentan en [8] [9].
- Software Zeus V2.0: Software de diseño y simulación de rotores de turbinas eólicas de baja potencia. En [8] se presente el método iterativo de cálculo, implementado en el software de diseño. La aplicación del método permite

obtener la forma óptima de la pala que satisface los requerimientos energéticos con el rendimiento máximo posible, según el valor establecido de velocidad media de viento. Permite graficar curvas de potencia, rendimiento, torque o fuerza axial en función de la velocidad de rotación, y de sus valores máximos en función del radio del rotor, cuerda y el número de palas [10] [11].

- XFOIL es un programa interactivo para el diseño y análisis de perfiles aerodinámicos aislados subsónicos. Dadas las coordenadas que especifican la forma de un perfil aerodinámico 2D, los números de Reynolds y Mach , XFOIL puede calcular la distribución de presión en el perfil aerodinámico y, por lo tanto, las características de sustentación y resistencia . El programa también permite el diseño inverso: variará la forma de un perfil aerodinámico para lograr los parámetros deseados. Está publicado bajo la GNU GPL .
- Harp Opt (Horizontal Axis Rotor Performance Optimization) [10]: Es una herramienta para la optimización del rotor de aerogeneradores. Utiliza un algoritmo genético multiobjetivo y el modelo de la teoría de momento y elemento de pala para diseñar rotores de aerogeneradores. Utiliza el algoritmo genético de MATLAB para realizar esta optimización, y el código de la teoría BEM para predecir los parámetros de rendimiento del rotor. El objetivo de optimización principal es maximizar la producción anual de energía del aerogenerador [12].

3. Marco teórico

3.1 Evaluación del recurso eólico

La energía eólica es uno de los recursos de energías renovables más utilizados en la actualidad para generar electricidad y a su vez está asociada con la energía cinética del viento, donde la circulación del viento se debe a diferencias de temperaturas [13].

Para saber si es factible la instalación de un aerogenerador, se debe realizar una evaluación de recurso eólico, se selecciona el sitio mediante mediciones de estaciones anemométricas para obtener las características del viento como su velocidad media, densidad de potencia, potencial eólico, etc.

La causa y efecto en la formación de corrientes pueden ser claros, pero existen diferentes factores que alteran dichos movimientos y que le otorgan al viento su carácter imprevisible. Pese a la dificultad se estima cambios en la intensidad de la corriente de aire a largo plazo, la distribución de Weibull es un método estadístico que pretende estimar la probabilidad de que un determinado régimen de viento se de en un lugar específico. El régimen de vientos nos indica la variación estacional del viento dentro de ciertos periodos de tiempo.

3.1.1 Modelos para el perfil vertical del viento

Uno de los fenómenos significativos en la evaluación del recurso eólico y en el diseño de los aerogeneradores es el incremento de la velocidad del viento con la altura, tal como se muestra en la Figura 3.1. Esto se debe a que el viento a baja altura es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos. Esta variación en la velocidad del viento con la altura sobre el suelo se suele llamar perfil vertical del viento. Para modelar el perfil vertical de la velocidad del viento existen dos métodos generales, el método de perfil logarítmico y el método de ley de potencia [14].

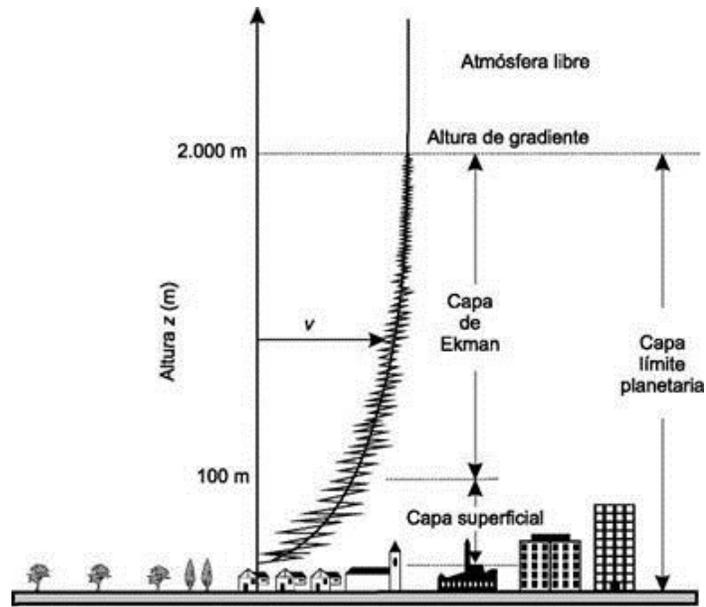


Figura 3.1 Capa límite atmosférica [15].

El estudio de dicha variación es de gran importancia por lo siguiente:

- A mayor altura mayor velocidad de viento y por tanto la potencia de los aerogeneradores también es mayor. El incremento del viento con la altura es una de las razones por las que se tiene a fabricar aerogeneradores de mayor potencia y diámetro.
- Cada pala al girar se encuentra con un tipo de viento variable, por lo que se generan cargas alternativas que producen fatiga en los componentes mecánicos y fluctuaciones en la potencia eléctrica que deterioran la calidad de energía producida.

2.1.2 Perfil logarítmico

La ley logarítmica se ha usado comúnmente para cuantificar el perfil vertical de la velocidad del viento en regiones de terreno plano homogéneo y se define de la siguiente manera:

El modelo de perfil logarítmico se ha usado comúnmente para estimar la velocidad

del viento a una altura deseada (V_h), si se encuentra con una velocidad del viento a una altura dada (V_{h1}) y se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$V_h = V_{h1} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{h1}}{z_0}\right)} \quad (3.1)$$

Donde:

z_0 es la longitud de rugosidad siendo un parámetro que caracteriza a la rugosidad (Tabla 3.1)

Tabla 3.9-1 Clase y longitud de rugosidad según el tipo de terreno.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad, z_0 [m]	Tipo de terreno
0	0.0002	Agua
0.5	0.0024	Terreno muy abierto con superficies muy llanas, como cemento, o césped cortado
1.0	0.03	Cultivos abiertos sin hileras de arbustos entre medio y con edificaciones esporádicas. Colinas suaves.
1.5	0.055	Cultivos con edificaciones e hileras de árboles (8 m de altura) con distancia de 1250 m entre sí.
2.0	0.10	Cultivos con edificaciones e hileras de árboles (8 m de altura) con distancia de 500 m entre sí.
2.5	0.20	Cultivos con muchas granjas, vegetación abundante o hileras de árboles (8 m de altura) cada 250 m.
3.0	0.40	Pueblos, pequeñas ciudades, campos con altas o muchas hileras de árboles, bosque y terreno complejo.
3.5	0.80	Grandes ciudades, terrenos muy complejos.
4.0	1.60	Ciudades muy grandes, terreno de alta montaña.

3.1.3 Ley de potencia

Para la obtención del perfil vertical del viento uno de los métodos utilizado es el Modelo de la Ley de potencia, propuesto por Hellman en 1915. Con este modelo se estima la velocidad del viento a una determinada altura con base en datos medidos a una altura dada.

$$V_h = V_{h1} \left(\frac{h}{h_1}\right)^{\alpha_r} \quad (3.2)$$

Donde:

α_r es el exponente de rugosidad del terreno (Tabla 3.2).

Tabla 3.9-2 Valores de exponente de rugosidad.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad, Z_0 [m]	α_r
0	0.0002	0.1
1	0.03	0.15
2	0.1	0.2
3	0.4	0.3

También se puede obtener el exponente de rugosidad utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_r = \frac{0.37 - 0.088 r}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_r}{10}\right)} \quad (3.3)$$

$$\alpha_r = \frac{\ln\left(\frac{V_{hr}}{V_h}\right)}{1 - 0.088 \frac{h_r}{h}} \quad (3.4)$$

3.1.4 Velocidad media del viento

La tendencia central de la velocidad del viento es muy importante para estos cálculos. Por lo tanto, un punto inicial es la estimación de la velocidad media del viento para el sitio en particular. El más común y la forma más utilizada para calcular la velocidad media del viento [16].

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.5)$$

Donde:

n: Número de datos registrados.

V_i : Velocidad en m/s y/o medidas de intervalo de 10 minutos.

La desviación estándar (σ_V), nos brinda información sobre variabilidad de las velocidades del viento en un conjunto dado de datos de viento (desviación de las velocidades individuales del valor medio). La desviación estándar de la distribución se obtiene por la siguiente ecuación:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{i1} - V_m)^2}{n}} \quad (3.6)$$

A veces los datos del viento se agrupan en forma de distribución de frecuencia para una mejor comprensión de la variabilidad del viento, para esto se utiliza el método de Bin el cual consiste en agrupar en intervalos de datos (Bin) de velocidad de viento y de esta forma se obtienen los valores medios de cada Bin de la variable analizada (frecuencia relativa, intensidad de turbulencia, tiempo, etc.). En la Norma IEC 61400-1, establece el ancho del Bin en 0.5 m/s con centros en enteros y valores medios entre enteros consecutivos.

La norma IEC 61400 – 2 establece que cada clase se presenta en dos categorías A y B, según la intensidad de la turbulencia que puede soportar el aerogenerador. Los aerogeneradores de la categoría A pueden soportar una turbulencia mayor, y en cuanto a la categoría B soporta una menor [17].

2.1.5 Intensidad de turbulencia.

La turbulencia del viento, definida como fluctuaciones rápidas en la velocidad y dirección del viento, tiene un impacto significativo en la potencia disponible del viento, así como en las cargas de fatiga sobre el aerogenerador. La intensidad de la turbulencia (Ecuación 3.7), es la medida más básica de la turbulencia, y se define como la relación entre la desviación estándar (Ecuación 3.9) y la velocidad media del viento (Ecuación 3.8) en intervalos de 10 minutos. La intensidad de la turbulencia cambia con la velocidad media del viento, con la rugosidad superficial, con la estabilidad atmosférica y con las características topográficas del sitio de instalación del aerogenerador [9].

$$IT = \frac{\sigma_{V10}}{V_{m10}} \quad (3.7)$$

$$V_{m1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.8)$$

$$\sigma_{V1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_{m10})^2}{n}} \quad (3.9)$$

Donde:

V_{m10} , σ_{V1} : Son la velocidad media y desviación estándar del viento en intervalos de 10 minutos.

La intensidad representativa es igual al percentil 90 valores de intensidad de turbulencia, para determinar el índice de turbulencia representativo de cada Bin, se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$IT_r = IT_{Bin} + 1.28 * \sigma_{IT_{Bin}} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{IT_{Bin}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (IT_i - IT_{Bin})^2}{n}} \quad (3.11)$$

Donde.

IT_r : es la intensidad de turbulencia representativa.

IT_{Bin} : es la intensidad de turbulencia media del Bin.

$\sigma_{IT_{Bin}}$: es la desviación estándar de la turbulencia del Bin.

IT_i : es la intensidad de turbulencia de 10 minutos.

El modelo normal de turbulencia d por la norma IEC 61400-2 [17], establece la ecuación 3.9, para el cálculo de la intensidad de turbulencia representativa en función de la velocidad del viento Bin y la intensidad de turbulencia de referencias estandarizadas por categorías. De lo escrito se obtiene las curvas normalizadas por la categoría.

$$IT_{P90} = \frac{I_{ref}(0.75 \cdot Bin + 5.6)}{V_{Bin}} \quad (3.12)$$

Donde:

IT_{p9} : es la intensidad de turbulencia representativa.

I_{ref} : es la intensidad de turbulencia de referencia en la norma por categoría.

V_{Bin} : es la velocidad del centro del Bin.

3.1.6 Distribución de la velocidad del viento

Debido a las moderadas velocidades de viento son dispersas y aleatorias en la obtención de la energía eólica, se recurre a la utilización de estadística con el fin de estudiar el emplazamiento adecuado.

Se ha demostrado que la distribución de Weibull (distribución de probabilidad continua) da una buena representación de la variación de la velocidad media horaria del viento a lo largo de un año en muchos sitios de instalación, es la más empelada para la estimación de la energía eólica y está definida por dos parámetros: de forma (adimensional) que define la forma de la distribución (k) y el de la escala (c) que define que tan dispersa se encuentra la distribución (m/s), [19].

La mayoría de los casos de los valores de k están comprendidos entre 1.3 y 4.3, por ello cuando no se dispone de muchos datos se acepta la simplificación de hacer $k=2$, con lo que la distribución resultante es la de Rayleigh, siendo un caos especial de la distribución de Weibull; para la velocidad del viento por debajo de los 4 m/s la misma presenta poca precisión y es mejor no usarla.

En la distribución de Weibull, las variaciones en la velocidad del viento se caracterizan por lo siguiente:

- Función de densidad de probabilidad $f(V)$: Indica la fracción de tiempo (o probabilidad) para la cual el viento se encuentra a una velocidad V . Está dada por la siguiente ecuación:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (3.13)$$

- Función de distribución de la velocidad (V) la cual nos indica probabilidad de que la velocidad del viento es igual o menor que V . Por lo tanto, la distribución acumulativa ($F(V)$) es la integral de la función de densidad de probabilidad:

$$F(V) = p(V \leq V_i) = \int_0^V f(V)dV = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (3.14)$$

Si se desea estimar el tiempo durante el cual el viento se encuentra dentro de un cierto intervalo de velocidades, se determina las diferencias de probabilidades acumulativas correspondientes a esas velocidades:

$$F(V) = p(V_1 \leq V \leq V_2) = \int_{V_1}^{V_2} f(V)dV = e^{-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_2}{c}\right)^k} \quad (3.15)$$

Para conocer las posibilidades de viento extremo es un sitio determinado con el objetivo de diseñar el aerogenerador y que pueda soportar las cargas máximas probables, se utiliza la siguiente ecuación:

$$F(V) = p(V \geq V_1) = \int_{V_1}^{\infty} f(V)dV = e^{-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k} \quad (3.16)$$

2.1.7 Métodos para estimar los parámetros de Weibull

Los valores k y c , brindan información aproximada sobre el sitio de instalación de los aerogeneradores sea adecuado o si debe excluirse por completo, esto significa que la variación de la velocidad media del viento alrededor del valor medio anual es pequeña ya que k es mayor. Por otro lado, c muestra qué tan ventoso es un lugar, es decir, qué tan alta es la velocidad media anual del viento (su valor es cercano a la velocidad media anual).

- Método de Momento (MM)

Es un método empírico en el que la distribución de datos permite una solución de la relación entre la velocidad promedio y los valores de desviación estándar [20].

El método de momento se puede usar como una alternativa al método de máxima energía, en este caso, los parámetros k y c están determinados por las siguientes ecuaciones.

$$k = (0.987\sigma v)^{1.983} \quad (3.17)$$

$$c = (v\Gamma(1 + 1/k)) \quad (3.18)$$

Donde:

v : Velocidad media del viento en m/s.

σ : Desviación estándar de los datos observados de la velocidad del viento m/s.

Γ : Función gamma.

- Método Empírico o de Justus (ME)

Es un método empírico que se considera un caso especial del método del momento, donde los parámetros de Weibull k y c están dados por las siguientes ecuaciones:

$$k = \left(\frac{\sigma v}{v_m}\right)^{-1.086} \quad (3.19)$$

$$c = v\left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right) \quad (3.20)$$

Método del Factor de Patrón de Energía (MFP).

Este método MFPE, utiliza la medida de los cubos de velocidad del viento y el cubo de la velocidad media del viento para calcular el factor de patrón de energía (E_{pf}) y luego los parámetros de Weibull, utilizando la siguiente ecuación:

$$E_{pf} = \frac{v_m^3}{(v_m)^3} \quad (3.21)$$

Una vez aplicados estos métodos y determinados los parámetros de Weibull se debe analizar cuál es el que más se aproxima a los datos reales. Existen varios métodos estadísticos para comprobar el que más se ajusta dentro de los que se encuentran: Raíz del Error Cuadrático Medio ($RMSE$, por sus siglas en inglés, Root

Mean Square Error), ecuación 3.19; Coeficiente de correlación múltiple al cuadrado, (R^2) (análisis de varianza) ecuación 3.20 y Chi-cuadrado (χ^2), ecuación 3.21.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (3.22)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 - \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2} \quad (3.23)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N - n} \quad (3.24)$$

donde x_i es el i ésimo valor de los datos estimados con la distribución de Weibull, y_i es el i ésimo valor de la probabilidad de los datos reales, z_i es el valor promedio de los datos reales, N es el número de observaciones y n es el número de constantes (dos para este caso). La selección del método que presenta la mejor estimación de los parámetros de Weibull, es el que presente menor valor en el caso de χ^2 y $RMSE$ y el mayor valor para R^2 .

3.1.8 Condiciones extremas del viento

Las condiciones extremas del viento pueden caracterizarse por un tiempo de retorno; por ejemplo, una ráfaga de 50 años es una ráfaga tan severa que se puede esperar que ocurra en promedio sólo una vez cada 50 años. Sería comprensible esperar que una turbina sobreviviera a tal ráfaga, siempre y cuando no hubiera ninguna falla en la turbina [19].

Invariablemente es posible que el aerogenerador se apague por una falla cuando se produce una ráfaga. Si la falla perjudica la capacidad del aerogenerador para hacer frente a una ráfaga, un ángulo incorrecto con respecto al viento, entonces la turbina puede tener que soportar cargas aún mayores. Sin embargo, la probabilidad de que se produzca las ráfagas más extremas al mismo tiempo que la falla de una turbina es muy pequeña, por lo que es habitual especificar que una turbina con una falla sólo necesita ser diseñada para soportar, por ejemplo, la ráfaga extrema y no la ráfaga extrema de 50 años [19].

Las condiciones de viento se utilizan para determinar las cargas de viento extremo

con los SWT. Estas condiciones incluyen las velocidades máximas del viento debido a las tormentas y los rápidos cambios en la velocidad y dirección del viento. Estas condiciones extremas incluyen los posibles efectos de la turbulencia eólica, por lo que solo es necesario considerar los efectos determinantes en los cálculos del diseño [19].

3.1.8.1 Velocidad extrema del viento (MVEV)

La velocidad extrema del viento de 50 años (V_{e50}) y la velocidad extrema del viento de un año (V_{e1}) se basará en la velocidad del viento de referencia V_{ref} [17], la ráfaga de 3 rachas (V_{e5}) y (V_{e1}) se calculará utilizando las siguientes ecuaciones:

$$V_{e5}(h) = 1.4V_{ref} \left(\frac{h}{h_{hu}} \right)^{0.11} \quad (3.25)$$

$$V_{e1} = 0.75V_{e50}(h) \quad (3.26)$$

Donde:

Es la altura desde el nivel desde el nivel del suelo hasta el centro del roto y 1.4 de ráfagas a la altura del centro del rotor.

3.1.8.2 Ráfaga extrema de operación (REO)

La magnitud de la ráfaga a la altura del buje (V_{gustN}) para un período de recurrencia de N años es determinada mediante la siguiente ecuación:

$$V_{gustN} = \beta_{mr} \left(\frac{\sigma_1}{1+0.1\left(\frac{D}{\lambda_1}\right)} \right) \quad (3.27)$$

donde σ_1 es la desviación estándar típica, D es el diámetro del rotor, β_{mr} es un parámetro del modelo de ráfaga extrema de operación ($\beta_{mr} = 4.8$, para un periodo de recurrencia de 1 año y $\beta = 6.4$ para un periodo de recurrencia de 50

años) y Λ_1 el parámetro de escala de turbulencia que se tiene un valor de:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7h_{hub} & h_{hu} < 30m \\ 21m & h_{hub} \geq 30m \end{cases} \quad (3.28)$$

La velocidad del viento para un período de recurrencia de N años se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$V(t) = \begin{cases} V(h) - 0.37V_{gustN} \text{sen}(3\pi t/T)(1 - \cos(2\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ V(h) & t > T; t < 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

Donde:

$$T = 10.5 \text{ s para } N=1$$

$$T = 14 \text{ s para } N=50$$

3.1.8.3 Cambio extremo de dirección (CED)

La magnitud del cambio extremo de dirección, (θ_e) el cual se limita en un intervalo de $\pm 180^\circ$ se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\theta_{eN}(t) = \pm \beta_{mr} \arctan \left(\frac{\sigma_1}{V_h \left(1 + 0.1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right) \right)} \right) \quad (3.30)$$

El transitorio del cambio extremo de dirección, viene dado por:

$$\theta_N(t) = \begin{cases} 0^\circ & t < 0 \\ 0.5\theta_{eN}(1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ \theta_{eN} & t > T \end{cases} \quad (3.31)$$

donde $T = 6 \text{ s}$ que es la duración del cambio transitorio de dirección extrema. El signo debe seleccionarse de modo que se produzca la peor carga transitoria. Al final del cambio transitorio de dirección se supone que la dirección permanece invariable.

3.1.8.4 Ráfaga coherente extrema (RCE)

Para diseños de aerogeneradores pequeños de las clases normalizadas, se debe

asumir una ráfaga coherente extrema con una magnitud de $V_{ce} = 15 \frac{m}{s}$. La velocidad del viento se debe definir con las siguientes relaciones:

$$V(h, t) = \begin{cases} V(h) & t \leq 0 \\ V(h) + 0.5V_{cg} (1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ V(h) + V_{cg} & t \geq T \end{cases} \quad (3.32)$$

donde $T = 10$ s el cuál es el tiempo que tarda la ráfaga en alcanzar su máxima velocidad.

3.2.8.5 Ráfaga coherente extrema con cambio de dirección (RCECD)

En este caso, se debe asumir que el aumento de la velocidad del viento ocurre simultáneamente con el cambio de dirección, θ_{cg} , se define con la siguiente ecuación:

$$\theta_{ce}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ & V_{hub} < 4 \frac{m}{s} \\ \frac{720^\circ}{V_{hub}} & 4 \frac{m}{s} \leq V_{hub} \leq V_{ref} \end{cases} \quad (3.33)$$

El cambio simultáneo de la dirección viene entonces dado por:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \pm 0.5\theta_{ce} (1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ \pm\theta_{cg} & t \geq T \end{cases} \quad 3.34$$

3.1.8.6 Potencia media generada por un aerogenerador.

La generación de energía de un aerogenerador en un sitio determinado depende de las características de la velocidad del viento y de la curva de potencia del mismo (Figura 2.2). La curva de potencia de un aerogenerador está definida por tres velocidades: Velocidad de inicio de generación (V_i), la velocidad nominal (V_n) donde el aerogenerador alcanza su potencia eléctrica nominal y la velocidad de salida (V_s) donde el aerogenerador por seguridad y protección es obligado a dejar de entregar energía.

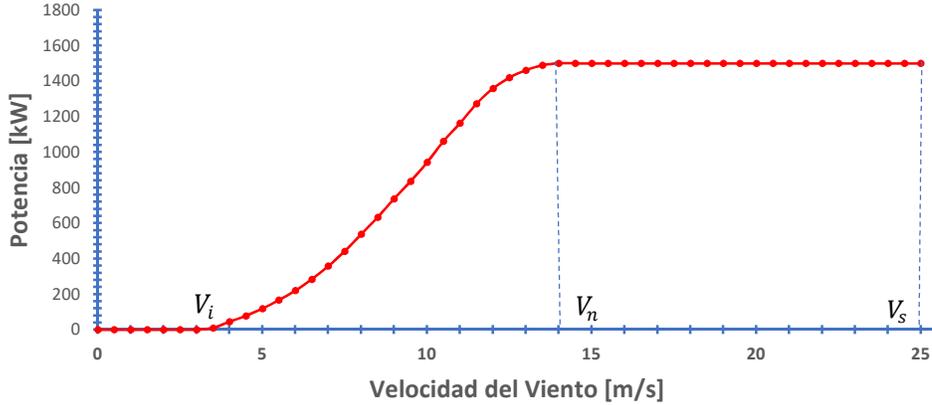


Figura 2.1 Curva de potencia de un aerogenerador [19].

La potencia media producida por el aerogenerador se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \int_{V_i}^{V_s} P(V) f(V) dV \quad (3.35)$$

donde, $f(V)$, representa la función de probabilidad de Weibull y $P(V)$ la curva de potencia del aerogenerador.

La función $P(V)$ se puede escribir como:

$$P(V) = \begin{cases} 0 & V < V_i \\ \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \eta_m \eta_e & V_i \leq V < V_n \\ \frac{1}{2} \rho A V_n^3 C_p \eta_m \eta_e & V_n \leq V < V_s \\ 0 & V > V_s \end{cases} \quad (3.36)$$

donde, ρ es la densidad del aire (kg/m^3), η_m es la eficiencia mecánica, η_e es la eficiencia eléctrica, A es el area del rotor y C_p es el coeficiente de potencia.

Entonces, la ecuación de la potencia media se puede escribir:

$$\bar{P} = \int_{V_i}^{V_n} \frac{1}{2} \rho A C_p V_n^3 \eta_m \eta_e f(V) dV + P_n \int_{V_n}^{V_s} \frac{1}{2} \rho A C_p V_n^3 \eta_m \eta_e f(V) dV \quad (3.37)$$

3.2 Modelo dimensionado de la pala

3.2.1 Aerodinámica para aerogeneradores de eje horizontal.

La aerodinámica se ocupa del movimiento del aire u otros fluidos gaseosos y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos que se mueven a través de ellos [21].

El proceso de diseño de los alabes comienza con un compromiso entre la eficiencia aerodinámica y estructural. La elección de los materiales y el proceso de fabricación también influirán en el espesor del álabe. La forma del perfil aerodinámico elegido da lugar a cargas que se introducen en el diseño estructural. Los problemas identificados en esta etapa pueden utilizarse para modificar la forma si es necesario y recalcular el rendimiento.

3.2.2 Perfil aerodinámico

En aerodinámica se denomina perfil aerodinámico a la forma transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación. Según el propósito que se persiga en el diseño, los perfiles pueden ser más finos o gruesos, curvos o poligonales, simétricos o no, e incluso puede ir variando a lo largo de la sección longitudinal [20].

Los perfiles aerodinámicos conocidos en inglés como “airfoils” son diseñados para generar fuerzas de sustentación en condiciones de bajo arrastre. Estos perfiles tienen distintas curvaturas en su superficie interior e inferior tal que el flujo induce una diferencia de presión que genera altas fuerzas de sustentación y bajas fuerzas de arrastre. En la figura 3.3 se muestran los parámetros de un perfil aerodinámico.

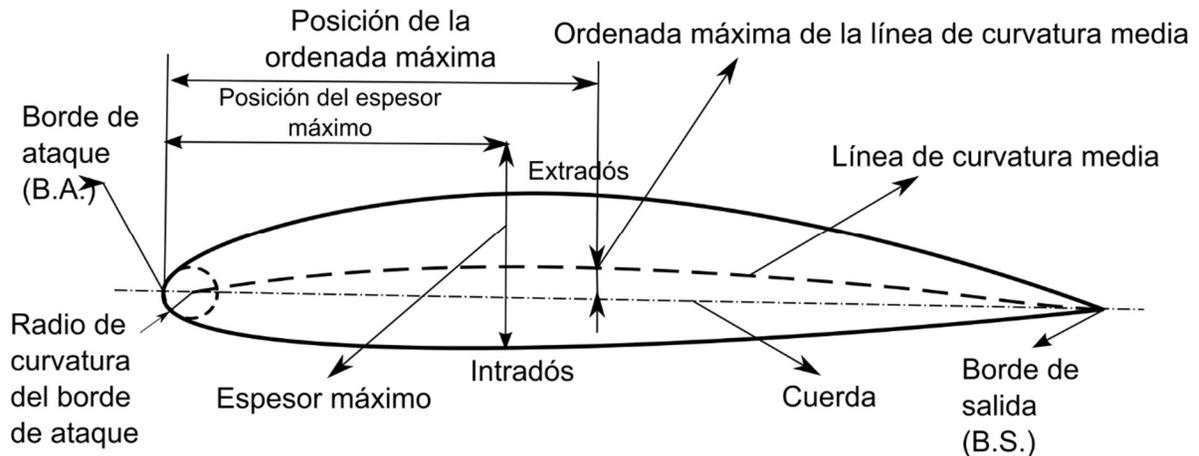


Figura 3.3 Parámetros geométricos de un perfil aerodinámico [19].

- **Cuerda:** Es la línea recta que une del borde de ataque con el borde de salida. Es una dimensión característica del perfil.
- **Línea de curvatura media:** Es una línea equidistante entre el extradós e intradós.

La forma de esta línea es muy importante en las características aerodinámicas del perfil; en definitiva, establece la curvatura del perfil.

- **El espesor y la distribución de espesor:** Son dos características importantes. El valor del espesor máximo y su posición se expresa en % de la cuerda. El valor del espesor varía desde un 3 % en los muy delgados hasta un 24% en los muy gruesos.
- **Radios de curvatura del borde de ataque:** Define la forma del borde de ataque y es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós, y con su centro situado en la línea tangente en el origen a la línea de curvatura media.
- **Angulo de ataque:** Existe entre la cuerda y la dirección del vector velocidad de la corriente libre de aire.

Tipos de perfiles aerodinámicos.

Todo perfil aerodinámico posee estas partes componentes que al ser variadas ya sean de forma individual o total, definen las características aerodinámicas, estas son:

- **Plano-Convexo:** En el cual la superficie inferior o intradós es recta y la superficie superior o extradós es curva. En este tipo de perfil la cuerda es la distancia entre el borde de ataque y el borde de fuga a lo largo del intradós.
- **Cóncavo-Convexo:** En el cual el intradós es curvado hacia adentro del perfil. La cuerda de este tipo de perfil es la distancia en línea recta entre el extremo del borde de ataque y el borde de fuga pasando por fuera de parte del contorno del perfil. Este tipo de perfil es utilizado en aeronaves de baja velocidad y en algunos planeadores.
- **Biconvexo Asimétrico:** Este tipo de perfil aerodinámico es el más comúnmente usado en la mayoría de las aeronaves de media velocidad. La curvatura del extradós es mayor que la del intradós. En este tipo de perfil, la cuerda es la distancia que va del centro del borde de ataque al extremo del borde de fuga.
- **Biconvexo Simétrico:** En este perfil las curvaturas del extradós y del intradós son iguales. Es un perfil básico utilizado para altas velocidades. La cuerda es medida de la misma manera que el perfil anterior.
- **Laminar o de Flujo Laminar:** Es un perfil biconvexo, simétrico o asimétrico, de poco espesor, diseñado para mantener la capa límite (zona turbulenta cerca de la superficie) lo más reducida posible, minimizando así el arrastre.
- **Supercrítico:** Es un perfil aerodinámico para vuelos cerca de la velocidad del sonido. Su superficie casi plana en la mayor parte del extradós, reduce la aceleración del aire en esa región; al mismo tiempo, manteniendo el espesor máximo cerca del 50% de la cuerda, retarda la curvatura del intradós, haciendo que las ondas de choque que se forman en las proximidades de la velocidad del sonido, formen cerca del borde de fuga, reduciendo así el arrastre por compresibilidad.

El “Laboratorio Nacional de Energía Renovable (“NREL”). Mediante el uso de los perfiles aerodinámicos “NREL”, que están diseñados específicamente para los aerogeneradores de eje horizontal, la pérdida anual de producción de energía debido a los efectos de la rugosidad de los aerogeneradores puede reducirse a la mitad en relación con los perfiles aerodinámicos de aeronaves. La optimización de las características de rendimiento de un perfil aerodinámico para el número de Reynolds y el espesor adecuado proporciona una mejora adicional del rendimiento en el rango del 3% al 5%. Los perfiles aerodinámicos a menudo se escalan a un mayor espesor, lo que a menudo conduce a características de rendimiento no deseadas. Las características de rendimiento de la serie de perfiles NACA 23XXX, por ejemplo, se deterioran bastante rápidamente con el aumento del espesor de los perfiles. Este problema se agrava aún más en la zona de la raíz del alabe al combinar un bajo número de Reynolds con un alto espesor [22].

Las dos familias de perfiles aerodinámicos etiquetados como “delgados” (11% a 15%) son más adecuados para las turbinas de paso variable o de rpm variable que utilizan un ´ paso de palas de ancho completo. Se desea un mayor grosor para que los perfiles de la raíz del alabe se adapten a las consideraciones estructurales y dinámicas.

Hay algunas consideraciones especiales en el diseño, selección y modelado de las características de las secciones de los perfiles para los diferentes tipos de aerogeneradores de eje horizontal. Muchos de los perfiles aerodinámicos diseñados para turbinas de tamaño comercial tienen su origen en los perfiles aerodinámicos estándar de la NACA, como la serie de 4 dígitos de la NACA, que han demostrado dar buenos niveles de rendimiento aerodinámico con un bajo arrastre.

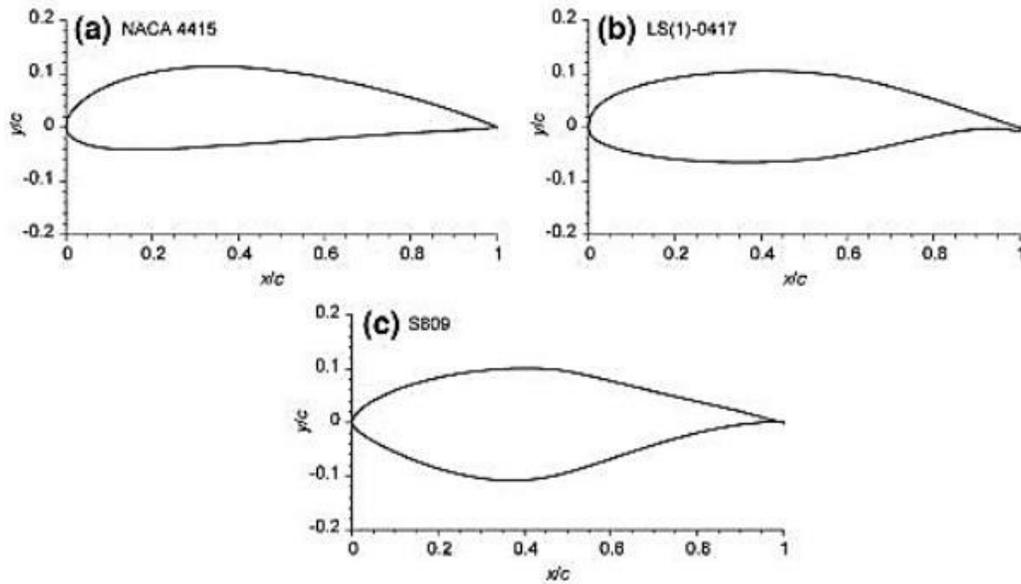


Figura 3.4 Ejemplo de perfiles aerodinámicos que han sido usados para aerogeneradores de eje horizontal ("HAWTs"): a) NACA 4415, b) LS(1)-0417, c) NREL S809 [20].

3.2.3 Número de Reynolds

Representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Escala la difusividad turbulenta y la laminar. En la práctica, sirve para determinar el régimen del flujo. Para Reynolds (Re) con valores bajos el flujo será laminar y para valores altos será turbulento. Sin embargo, la transición de laminar a turbulento depende del problema. Se expresa mediante la siguiente ecuación entre la relación de las fuerzas de inercia y las fuerzas debido a la viscosidad [20].

$$Re = \frac{F_{inercia}}{F_{viscosidad}} = \frac{V_{rel}\rho c}{\mu} \quad (3.38)$$

Donde:

V_{rel} : es la velocidad relativa. ρ :

es la densidad del aire.

c : es la cuerda del perfil.

μ : es la viscosidad cinemática.

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar. La transición de laminar a turbulento ocurre normalmente para valores de número de Reynolds entre medio millón y 10 millones y se producirá después dependiendo en gran medida de la rugosidad de la superficie, de la turbulencia de la corriente libre de aire y de la distribución de presiones. Mediante la balanza aerodinámica se puede observar el comportamiento del modelo de estudio para distintos números de Reynolds, es decir, para distintos tipos de flujo, laminar o turbulento [20].

La importancia de la implicación del número de Reynolds influye directamente en la dinámica del fluido estudiado, por lo que es necesario conocer los límites que producen esta distinción del comportamiento del fluido externo alrededor de perfiles aerodinámicos. En la figura 3.5 se puede observar para diversas aeronaves la relación entre la velocidad de vuelo y el número de Reynolds en el que operan.

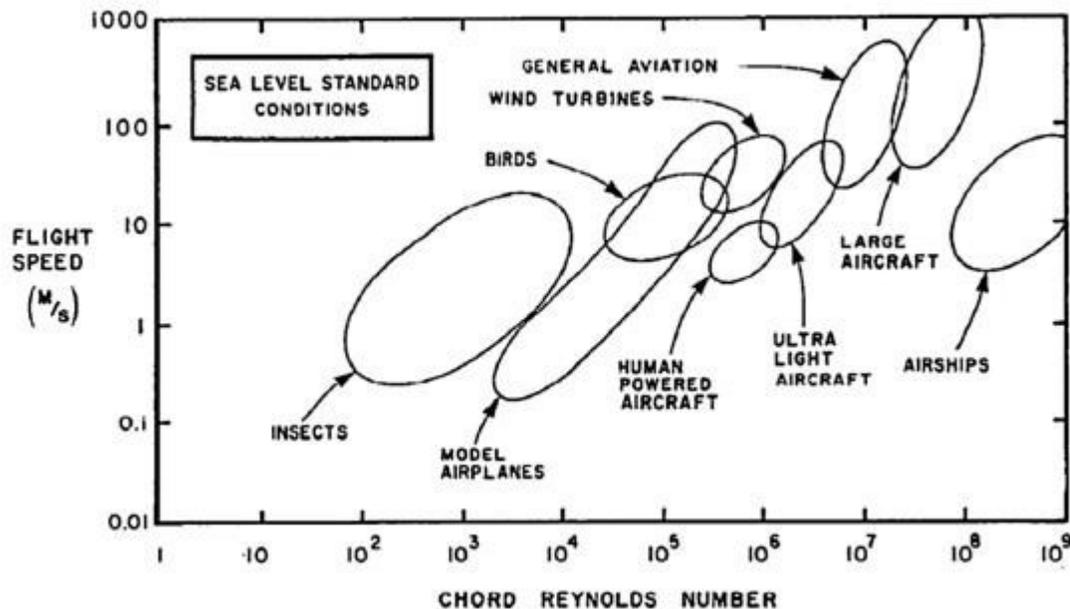


Figura 3.5 Aeronaves según su velocidad de vuelo y número de Reynolds.

3.2.4 Fuerzas aerodinámicas

Cuando un cuerpo interactúa con un fluido, el cuerpo experimenta una fuerza denominada fuerza aerodinámica (A) y el momento aerodinámico (MA). Esta fuerza se puede descomponer en dos fuerzas: la fuerza de sustentación (L), una fuerza normal a la velocidad relativa entre el objeto y el fluido alejado del cuerpo (v); y una componente paralela a v denominada fuerza de arrastre. Estas fuerzas son el resultado de la distribución de presiones y de esfuerzos (Ψ) que surgen en la superficie del objeto al interactuar con el fluido, de forma tal que el problema se reduce a encontrar estas distribuciones de presión y esfuerzo cortante en la pared e integrar estas variables sobre la superficie del objeto, y así, obtener las fuerzas y momentos resultantes [23].

La distribución de presión sobre la superficie del perfil varía con respecto al ángulo de ataque, generando así las fuerzas aerodinámicas. La fuerza de sustentación se encuentra con la distribución de presión en dirección vertical expresado en la ecuación 3.39, mientras que la fuerza de arrastre se encuentra con la distribución de presión en dirección horizontal expresado en la ecuación 3.40. Las fuerzas descompuestas se pueden observar en la figura 3.6 y se define a continuación.

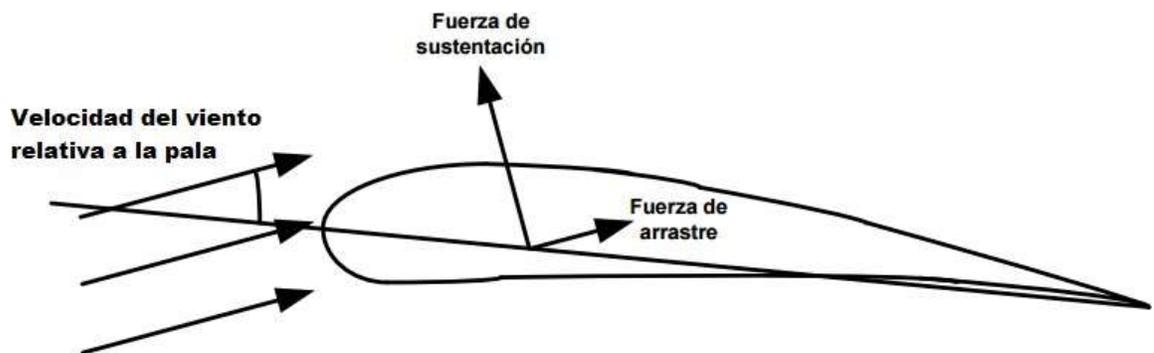


Figura 3.6 Fuerza de sustentación y arrastre.

3.2.4.1 Fuerza de sustentación

Es la fuerza desarrollada por un cuerpo sumergido en una corriente de flujo (en nuestro caso una corriente de aire), cuya dirección es perpendicular al flujo incidente, y se representa con la letra L por su traducción en inglés "lift".

La fuerza de sustentación se puede ver afectada por varios factores:

- La forma del perfil: A mayor curvatura del perfil, hasta cierto punto, mayor diferencia de velocidad entre las superficie superior e inferior del ala y por tanto mayor diferencia de presión. Para el caso de ángulo de ataque nulo, para un perfil simétrico (misma curvatura tanto por extradós como por intradós) no aparecerá fuerza de sustentación, mientras que para un perfil con curvatura el perfil sustentará.
- La superficie del álabe: Cuanto mayor superficie alar se disponga mayor será la superficie sobre la que se ejerce la fuerza de sustentación. Debe de existir un compromiso con el peso y la resistencia ya que al aumentar mucho la envergadura también se incrementan estas fuerzas.
- La densidad del fluido: A mayor densidad del flujo, mayor es el número de partículas por unidad de volumen que cambian velocidad por presión y producen sustentación.
- Velocidad del fluido relativo: A mayor velocidad de flujo incidente sobre el perfil, mayor sustentación. Afecta cuadráticamente a la sustentación y por tanto es el valor más determinante.

La fuerza de sustentación se expresa con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_l \quad (3.39)$$

Donde:

L: es la fuerza de sustentación en N.

ρ : es la densidad del flujo en $\frac{kg}{m^3}$

v : es la velocidad relativa en m/s.

A : es el área de referencia del cuerpo en m^2 .

C_l : es el coeficiente de sustentación (adimensional).

La sustentación, y en consecuencia su coeficiente, depende directamente del ángulo de ataque, aumentando según aumenta éste hasta llegar a un punto máximo o a un ángulo de ataque crítico, después del cual el flujo de aire que pasa sobre el extradós no logra correr en su totalidad y mantenerse adherido al perfil aerodinámico, dando lugar a la entrada en pérdida (“stall”) en inglés [24].

3.2.4.2 Fuerza de arrastre

La resistencia es la fuerza que se opone al avance del perfil. La resistencia actúa de forma paralela y la misma dirección que el flujo de fluido relativo incidente. Se presenta con la letra D por su traducción al inglés “Drag”.

Para ciertas geometrías, el coeficiente de resistencia, C_d , depende solamente del número de Reynolds, número de Mach y de la dirección del flujo. Para número de mach bajos, el coeficiente de resistencia es independiente. Por otro lado, la variación con el número de Reynolds es por lo general pequeño, dentro de los rangos de interés.

Para que un perfil aerodinámico alcance un coeficiente de arrastre bajo, la capa límite alrededor del cuerpo debe permanecer unida a su superficie tanto tiempo como sea posible. De esta manera, la estela producida se vuelve estrecha. Un coeficiente de arrastre de forma elevada da como resultado una estela ancha. La capa límite pasara de ser laminar a turbulenta como se muestra en la figura 3.7, siempre y cuando el número de Reynolds del flujo alrededor del cuerpo sea lo suficientemente alto.



Figura 3.7 Flujo separándose de un perfil aerodinámico a un alto ángulo de ataque.

La fuerza de arrastre se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d \quad (3.40)$$

Donde:

D: es la fuerza de arrastre N.

C_d : es el coeficiente de arrastre (adimensional).

ρ : Densidad del aire $\frac{kg}{m^3}$.

La eficiencia aerodinámica (ϵ) es la relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre ´ dada por la siguiente ecuación.

$$\epsilon = \frac{C_l}{C_d} \quad (3.41)$$

3.2.5 Potencia y torque de los aerogeneradores

La potencia teórica disponible en una corriente de viento viene dada por la siguiente ecuación.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.42)$$

Cuando la corriente del viento pasa por la turbina, una parte de su energía cinética se transfiere al rotor y el aire que sale de la turbina se lleva el resto. Por lo tanto, la potencia real producida por el rotor se lleva a cabo por la capacidad de la energía del viento al rotor, esta eficiencia se denomina coeficiente de potencia (C_p). Por lo tanto, el coeficiente de potencia del rotor se define como la relación entre la potencia real por el rotor entre la potencia teórica disponible el viento [14].

$$C_p = \frac{2 P_T}{\rho A_T V^3} \quad (3.43)$$

Donde:

P_T : potencia desarrollada por el aerogenerador.

El coeficiente de una turbina depende de muchos factores como: el perfil de las palas de rotor, la disposición del de las palas y forma. Un diseñador intentaría fijar los factores mencionados para poder alcanzar el $C_{p, \text{máx}}$ de las diferentes velocidades del viento.

La fuerza del empuje por el rotor (F) se expresa como:

$$F = \frac{1}{2} \rho A_T V^2 \quad (3.44)$$

Por lo tanto, podemos representar el torque del rotor (T) como:

$$T = F \cdot R = \frac{1}{2} \rho A_T V^2 R \quad (3.45)$$

Donde:

R: radio del rotor (m)

La relación entre el torque real desarrollado y el torque teórico se denomina coeficiente del torque (C_T), Por lo tanto, el coeficiente de torque está dado por:

$$C_T = \frac{2 T_T}{\rho A_T V^2 R} \quad (3.46)$$

Donde:

T_T : Torque real desarrollado por el rotor.

La potencia desarrollada por un rotor a una determinada velocidad del viento depende en gran medida de la velocidad específica (λ) la cual es la relación entre la velocidad del viento incidente y la velocidad en la punta de la pala (Ecuación 3.47).

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{2\pi NR}{V} \quad (3.47)$$

Donde:

Ω : Velocidad angular

N: Velocidad de rotación del rotor

El coeficiente de potencia y el coeficiente del torque del rotor varían con la relación a la velocidad específica. Existe un valor de λ óptimo para un rotor dado en el que la transferencia de energía es más eficiente y por lo tanto el coeficiente de potencia es el máximo ($C_p, \text{máx}$) [14].

Se considera la relación entre el coeficiente de potencia y la relación de velocidad de la punta.

$$C_p = \frac{2 P_T}{\rho A_T V^3} = \frac{2 T_T \Omega}{\rho A_T V^3} \quad (3.48)$$

Así mismo la relación de velocidad de la punta viene dada por la relación entre el coeficiente de potencia y el coeficiente de torque del rotor.

$$\frac{C_p}{C_T} = \frac{R\Omega}{V} = \lambda \quad (3.49)$$

3.3. Teoría Aerodinámica

Se han propuesto diferentes teorías para el análisis aerodinámico de los aerogeneradores. Estas teorías nos indican el comportamiento del rotor bajo diferentes condiciones operativas.

3.3.1 Momento Axial

El análisis convencional de aerogeneradores de eje horizontal por sus siglas en inglés "HAWT" se origina en el concepto de impulso axial introducido por Rankine, que fue mejorado por Froudes para las hélices marinas. Para este análisis se consideran las condiciones de flujo ideales. Se supone que el flujo es incompresible y homogéneo. Se considera que el rotor este compuesto por un número infinito de palas. Las presiones estáticas muy por delante y por detrás del rotor se consideran iguales a la presión atmosférica. El arrastre por fricción sobre las palas y la estela detrás del rotor son despreciados [25].

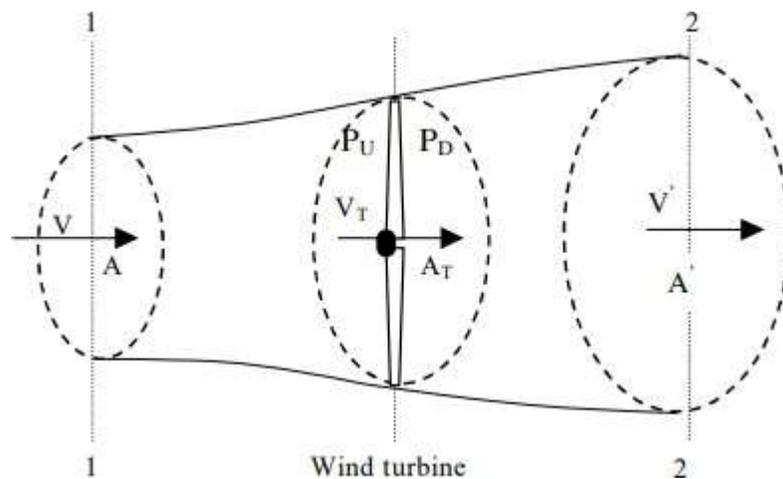


Figura 3.8 Tubo de corriente axial [14].

Considere un aerogenerador con rotor de área A_T , colocado en una corriente de viento como se muestra en la figura 3.8. A y A' son las áreas de las secciones 1-1, y 2-2, V y V' son las velocidades del viento en estas secciones.

V_T es la velocidad en la sección de la turbina. Según la ley de conservación de la masa, la masa de aire que fluye a través de estas secciones es igual. Por lo tanto:

$$\rho AV = \rho A_T V_T = \rho A' V' \quad (3.50)$$

La fuerza de empuje realizada por el rotor se debe a la diferencia de momento del viento entrante y saliente, que viene dada por:

$$F = \rho AV^2 - \rho A' V'^2 \quad (3.51)$$

Por lo tanto, si $AV = A'V' = A_T V_T$ de la ecuación (3.50), el empuje se expresa como:

$$F = \rho A_T V_T (V - V') \quad (3.52)$$

El empuje también puede representarse como la diferencia de presión de la dirección aguas arriba y aguas abajo del rotor. p_U y p_D son las presiones en el lado de aguas arriba y aguas abajo del rotor [25]. Por lo tanto:

$$F = (p_U - p_D) A_T \quad (3.53)$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli en las secciones y considerando que las presiones estáticas en las secciones 1-1 y 2-2 de la figura 3.8 son iguales a la presión atmosférica p , obtenemos:

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = P_U + \frac{\rho V_T^2}{2} \quad (3.54)$$

$$P + \frac{\rho V'^2}{2} = P_D + \frac{\rho V_T^2}{2} \quad (3.55)$$

Simplificando las ecuaciones 3.54 y 3.55

$$P_U - P_D = \frac{\rho(V^2 - V'^2)}{2} \quad (3.56)$$

Sustituyendo la expresión anterior por $(P_U - P_D)$ en la ecuación 3.53

$$F = \frac{\rho A_T (V^2 - V'^2)}{2} \quad (3.57)$$

Comparando las ecuaciones 3.52 y 3.57

$$V_T = \frac{(V + V')}{2} \quad (3.58)$$

Por lo tanto, la velocidad de la corriente de viento en la sección del rotor es el promedio de las velocidades en sus lados aguas arriba y aguas abajo [25].

En la siguiente etapa, se introduce el análisis del parámetro, denominado factor de inducción axial. El factor de inducción axial a indica el grado con el que la velocidad del viento en la parte superior del rotor es frenada por la turbina.

$$a = \frac{V - V_T}{V} \quad (3.59)$$

De las ecuaciones 3.58 y 3.59

$$V_T = V(1 - a) \quad (3.60)$$

$$V' = V(1 - 2a) \quad (3.61)$$

Como ya se menciona, la potencia distribuida en la turbina eólica se debe a la transferencia de energía cinética al rotor. El flujo de masa a través del rotor durante una unidad de tiempo es:

$$m = \rho A_T V_T \quad (3.62)$$

Por lo tanto, la potencia desarrollada por la turbina debido a esta transferencia de energía cinética es:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_T V_T (V^2 - V'^2) \quad (3.63)$$

Sustituyendo la ecuación anterior de V_T y V' de las ecuaciones 3.60 y 3.61, se obtiene

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_T V^3 4a(1 - a)^2 \quad (3.64)$$

Haciendo comparación de la ecuación 3.64 con la expresión para el coeficiente de potencia en la ecuación 3.43, se observa que

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.65)$$

Para que el C_p sea máximo

$$\frac{dC_p}{da} = 0 \quad (3.66)$$

Así, diferenciando la ecuación 3.62, igualándola a cero, obtenemos que $a = 1/3$ y Sustituyendo a en la ecuación 3.62, el máximo coeficiente de potencia teórica de una turbina eólica de eje horizontal es $\frac{16}{27}$ y la potencia máxima producida es:

$$P_{TMax} = \frac{1}{2} \rho A_T V^3 \frac{16}{27} \quad (3.67)$$

Este límite de coeficiente de potencia se conoce como límite de Betz. Cuando el fluido aplica un torque al rotor, como reacción, se genera una estela rotacional detrás del rotor como se muestra en la figura 3.9. Esto causaría una pérdida de energía y reducirá el coeficiente de potencia máxima [25].

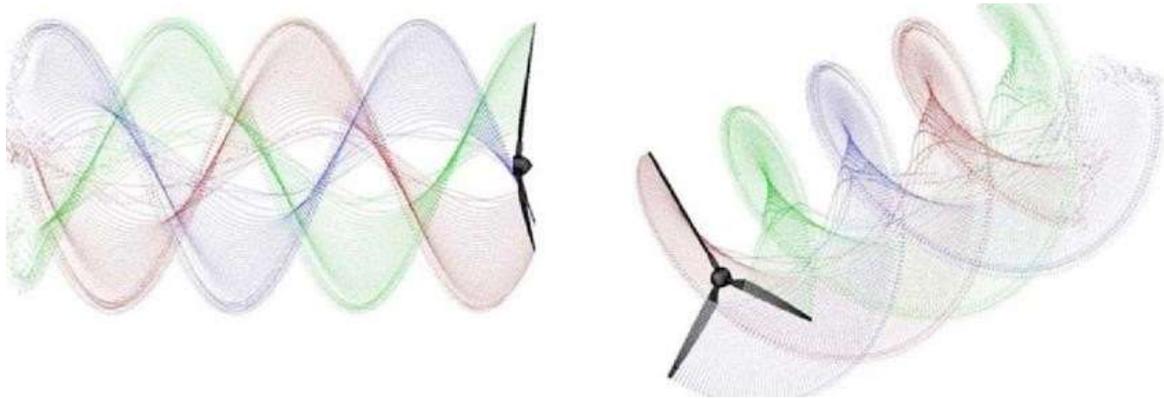


Figura 3.9 Estela rotativa detrás del rotor.

Considerando el flujo tangencial detrás del rotor, se introduce otro factor denominado factor de inducción tangencial α' en el análisis, de tal manera que:

$$\alpha' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3.68)$$

Donde:

ω : es la velocidad angular tangencial inducida del flujo.

Ω : es la velocidad angular del rotor.

Considerando un tubo de flujo anular de espesor dr a una distancia r de la raíz de la pala como en la figura 3.9. El área de este elemento anular es:

$$A = 2\pi r dr \quad (3.69)$$

Por lo tanto, la fuerza de empuje experimentada por el elemento anular puede expresarse como:

$$dF = 4\alpha(1 - \alpha) \frac{1}{2} \rho_a V^2 2\pi r dr \quad (3.70)$$

De cierta manera, el torque en el elemento anular puede ser dado por:

$$dF = 4a'(1 - \alpha) \frac{1}{2} \rho_a V 2\pi r dr \Omega r \quad (3.71)$$

La potencia desarrollada por el rotor es el producto de este torque anular y de la velocidad angular, integrada por encima de la pala. Por lo tanto, la potencia está dado por:

$$P = \int_0^R \Omega 4a'(1 - \alpha) \frac{1}{2} \rho_a V 2\pi r dr \Omega r \quad (3.72)$$

Y el coeficiente de potencia viene dada por:

$$C_p = \frac{2}{\rho_a A_T V^3} \int_0^R \Omega 4a'(1 - \alpha) \frac{1}{2} \rho_a V 2\pi r dr \Omega r \quad (3.73)$$

3.3.2 Teoría del elemento de la pala.

Las fuerzas sobre un elemento de la pala pueden calcularse mediante características aerodinámicas bidimensionales utilizando un ángulo de ataque determinado a partir de la velocidad resultante del incidente en el plano transversal del elemento [19].

Se considera que las palas están formadas por una serie de diferentes perfiles y tienen un espesor infinitesimal como se muestra en la figura 3.10; al igual que las velocidades y fuerzas que actúan sobre ella. Estas secciones de los perfiles son aerodinámicamente independientes y no tienen ninguna interferencia entre ellos. Bajo este análisis, se estiman las fuerzas de sustentación y arrastre que actúan sobre la pala y en cada uno de los perfiles que la componen.

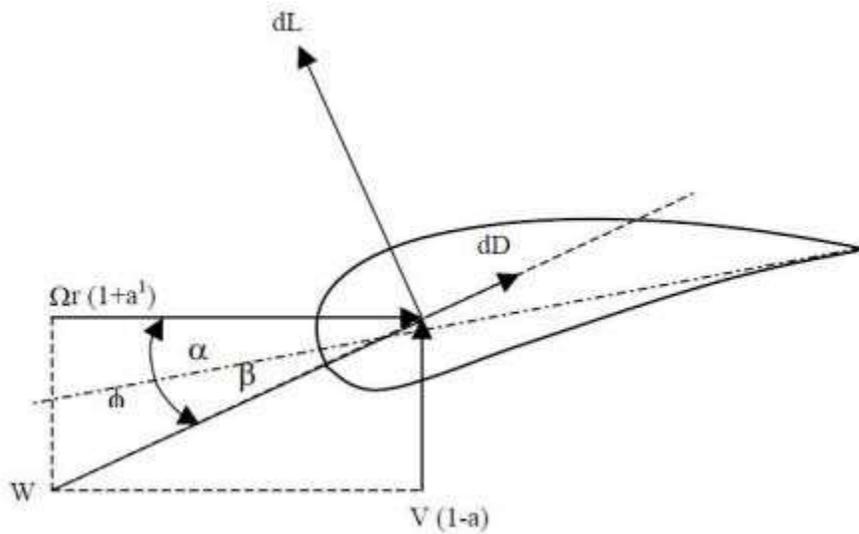


Figura 3.10 Elemento infinitesimal de la pala del rotor [25].

La teoría del elemento pala nos permite comprender mejor la relación entre las propiedades del perfil aerodinámico, el empuje realizado por el rotor y la potencia producida por él.

3.3.3 Teoría del elemento de la pala (BEM)

Existen principalmente tres métodos aerodinámicos para el diseño del rotor de aerogeneradores: Momento del Elemento de la Pala (BEM, por sus siglas en inglés, Blade Element Momentum), Estela de Vórtices y la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics).

Estos métodos basan sus análisis según la zona de estudio del aerogenerador, las cuales se dividen en: zona local (abarca el flujo de aire más próximo a las superficies de la pala, la góndola y la torre) y zona global (engloba el viento incidente desde varios diámetros de distancia, aguas arriba del rotor, hasta la estela, aguas abajo).

BEM: Es un método simple, rápido (1seg-1minutos), apto para el diseño. Para poder obtener buenos resultados es necesario aplicar dos correcciones al algoritmo. El primero se llama factor de pérdida de punta de Prandtl, que corrige la suposición de un número infinito de palas y la segunda corrección se llama corrección de Glauert.

Un análisis de la figura 3.11 permite deducir con mayor facilidad la relación entre la velocidad relativa (V_r), el ángulo de flujo (φ), la velocidad del viento normal al plano del rotor $V(1 - a)$ y la velocidad inducida angular de la pala $\Omega r(1 - a')$ las cuales se expresan en las ecuaciones 3.74, 3.75 y 3.76.

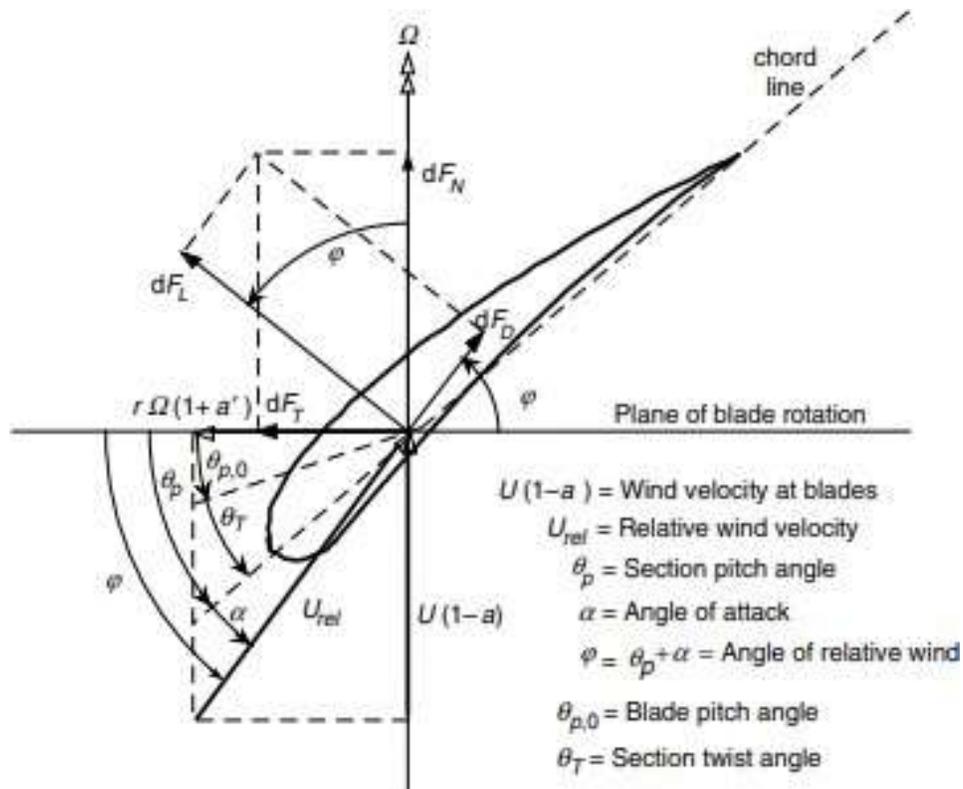


Figura 3.11 Geometría de la pala para el análisis de un aerogenerador de eje horizontal [25]

$$\text{sen}(\varphi) = \frac{V(1-a)}{V_r} \quad (3.74)$$

$$\text{cos}(\varphi) = \frac{\Omega r (1+a)}{V_r} \quad (3.75)$$

$$\text{tan}(\varphi) = \frac{V(1-a)}{\Omega r (1+a)} = \frac{1-a}{\lambda r (1+a)} \quad (3.76)$$

Donde: λr representa la velocidad específica local que se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\lambda r = \lambda d \frac{r}{R} = \left(\frac{\Omega r}{V}\right) \frac{r}{R} \quad (3.77)$$

Donde: λd es la velocidad específica de diseño al despejar la V_r , en la ecuación 3.74 y se eleva al cuadrado se obtiene la ecuación 3.79.

$$V_r^2 = \frac{V(1-a)\Omega r(1+a)}{\text{sen}(\varphi)\text{cos}(\varphi)} \quad (3.78)$$

$$V_r^2 = \frac{V^2(1-a)^2}{\text{sen}^2(\varphi)} \quad (3.79)$$

En la figura 3.11, se puede deducir que el ángulo de flujo se puede obtener mediante la suma de los ángulos de ataque (α) y de torsión (θ), expresado en la siguiente ecuación:

$$\varphi = \alpha + \theta \quad (3.80)$$

Las fuerzas generadas sobre el perfil son la fuerza de arrastre (dF_D) y la fuerza sustentación (dF_L), son paralela y perpendicular a la dirección de la V_r , y se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho C_l V_r^2 C dr \quad (3.81)$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho C_d V_r^2 C dr \quad (3.82)$$

La suma de las proyecciones de ambas fuerzas sobre el eje de plano del rotor forma la fuerza tangencial (dF_T), mientras que la suma de sus proyecciones sobre el eje perpendicular al plano del rotor forma la fuerza normal (dF_N).

$$dF_N = dF_L \cos\varphi + dF_D \sin\varphi \quad (3.83)$$

$$dF_T = dF_L \sin\varphi - dF_D \cos\varphi \quad (3.84)$$

El análisis de los vectores, se puede relacionar el coeficiente normal y tangencial como función de C_l y C_d .

$$C_n = C_l \cos\varphi + C_d \sin\varphi \quad (3.85)$$

$$C_t = C_l \sin\varphi - C_d \cos\varphi \quad (3.86)$$

Según la teoría del elemento de la pala, la fuerza normal total sobre la sección a una distancia (r) del centro del buje, considerando que el rotor cuenta con un número de palas (B), se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$dT = BF_N dr = B \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_n c dr \quad (3.87)$$

El torque debido a la fuerza tangencial que opera a una distancia, r , del centro del buje es dado por:

$$dQ = BF_T r = B \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_t c r dr \quad (3.88)$$

La potencia que opera a una distancia, r , del centro del buje es por:

$$dP = \Omega dQ = \Omega B \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_t c r dr \quad (3.89)$$

Al sustituir las ecuaciones 3.78 y 3.79 en la ecuación 3.87 y 3.88, se obtienen las ecuaciones 3.68 y 3.69.

$$dT = B \frac{1}{2} \rho \frac{V^2(1-a)^2}{\text{sen}^2 \varphi} C_n c dr \quad (3.90)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho \frac{V(1-a)\Omega r(1+\hat{a})}{\text{Sen}(\varphi)\text{Cos}(\varphi)} C_t c r dr \quad (3.91)$$

De acuerdo con la teoría del momento, el empuje, torque aerodinámico y potencia están definidos por las ecuaciones 3.92 y 3.93.

$$dT = 4\pi\rho r V^2 a (1 - a) dr \quad (3.92)$$

$$dQ = 4\pi\rho r^3 \Omega V \hat{a} (1 - a) dr \quad (3.93)$$

Para la obtención de las ecuaciones básicas del BEM se combinan las ecuaciones de la fuerza de empuje y torque, obtenidas de las teorías del Momento y Elemento de la pala: Para el factor de inducción axial (a), se combinan las ecuaciones 3.90 y 3.92 y para el caso del factor de inducción tangencial (\hat{a}), se igualan las ecuaciones 3.91 y 3.93, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{1}{1 + \left[\frac{4\text{sen}^2 \varphi}{\sigma C_N} \right]} \quad (3.94)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{1 + \left[\frac{4\text{sen}\varphi\text{cos}\varphi}{\sigma C_T} \right]} \quad (3.95)$$

Donde: σ , es la solidez del rotor, definida por la siguiente ecuación:

$$\sigma(r) = \frac{C(r)B}{2\pi r} \quad (3.96)$$

Este es en principio el método BEM, debido a las suposiciones que se toman en cuenta en el método y con el objetivo de obtener buenos resultados se aplican dos correcciones al algoritmo. El primero es el factor de pérdida de punta de Prandtl, que corrige la suposición de un número infinito de palas.

Al considerar en la teoría del momento que el viento incidente es uniforme en cualquier superficie perpendicular a los volúmenes anulares de control, se desprecia el efecto de la presencia de espacios entre las palas del rotor, es decir considera un número infinito de palas. Debido a este efecto se presenta en el rotor una disminución del torque y de la potencia que el rotor puede captar de la corriente de viento. Para que sea más exacto lo ideal nuestro modelo es necesario agregar un factor, denominado factor de corrección de Prandtl (F), definido en la siguiente ecuación 3.97, esta ecuación es añadida a las siguientes dos ecuaciones 3.98 y 3.99, obteniéndose las ecuaciones de los coeficientes de inducción axial (ecuación 3.98) y tangencial (ecuación 3.99):

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2r} \frac{R-r}{\sin\phi}} \right) \quad (3.97)$$

$$a = \frac{1}{1 + \left[\frac{4F \sin^2\phi}{\sigma C_N} \right]} \quad (3.98)$$

$$\dot{a} = \frac{1}{1 + \left[\frac{4F \sin\phi \cos\phi}{\sigma C_T} \right]} \quad (3.99)$$

La segunda corrección utilizada es la de Glauert y es una relación empírica entre el coeficiente de empuje (CT) y el factor de inducción axial (a).

Cuando a ocupa valores mayores a 0.2-0.4, el coeficiente de empuje desarrollado anteriormente deja de ser válido debido a que la velocidad del viento en la estela tiende a cero, por lo que se emplea la ecuación 3.100. También se puede utilizar la ecuación 3.101, si consideramos el valor de $ac = 0.2$.

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq \frac{1}{3} \\ 4a1 - \frac{1}{4}(5-3a)aF & a > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (3.100)$$

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq a_c \\ 4(a_c^2 + (1-2a)a)F & a > a_c \end{cases} \quad (3.101)$$

Si $a \leq a_c$, entonces el coeficiente de inducción axial se determina por la ecuación 3.98 y si $a > a_c$, entonces se determina por la ecuación 3.81 [26].

$$a = \frac{1}{2} [2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c - 1)}] \quad (3.102)$$

Donde: $K = \frac{4F \text{sen}^2 \varphi}{\sigma C_N}$

En [26] se realiza un análisis para obtener la forma optimizada de la pala de un aerogenerador, en el mismo se utiliza un análisis para un rotor con rotación de la estela. Se considera la optimización utilizando la ecuación del coeficiente de potencia (asumiendo que $C_d = 0$ y $F = 1$), ecuación 3.5. Tomando la derivada parcial de la parte de la integral de la ecuación e igualando a cero, se obtiene la ecuación de la cuerda (3.6).

$$C_p = 8/\lambda^2 \int_{\lambda h}^{\lambda} \text{sen}^2 \varphi (\cos \varphi - \frac{\lambda}{r} \text{sen} \varphi) (\text{sen} \varphi + \lambda \cos \varphi) d\lambda_r \quad (3.103)$$

$$C = \frac{8\pi r}{BC_l} (1 - \cos \varphi) \quad (3.104)$$

4 Planteamiento del problema

Los aerogeneradores de baja potencia de eje horizontal necesitan de una correcta selección de los perfiles aerodinámicos a utilizar en el diseño de los álabes, que les permita asegurar su funcionamiento y generación de energía durante su tiempo de vida útil, la capacidad de generación dependerá según el nivel de sustentación del perfil aerodinámico.

El perfil aerodinámico utilizado en la sección aerodinámica de la pala debe ser de bajo espesor relativo para aumentar la fuerza de sustentación, y en la sección estructural alto espesor relativo con el objetivo de soportar las cargas y momentos que actúan sobre ella.

Existen factores que alteran el comportamiento aerodinámico del rotor de un aerogenerador. Por ello tenemos que considerar los parámetros para analizar y evaluar el diseño, y obtener resultados factibles en su desarrollo como son: el recurso eólico, diseño y dimensionamiento del rotor, el rendimiento aerodinámico y su análisis estructural.

5 Hipótesis

Utilizar el método BEM en el diseño de las palas de un aerogenerador de baja potencia con un perfil aerodinámico evaluado, reduce los factores de riesgo como la inestabilidad y resistencia aerodinámica, evaluando el dimensionamiento para mejorar la eficiencia del aerogenerador.

Al realizar el diseño aerodinámico de las palas de un aerogenerador de baja potencia aplicando el BEM y considerando una correcta selección del perfil aerodinámico a utilizar en su diseño se reduciría y mejoraría los factores de seguridad sobredimensionados, peso, problemas de inestabilidad, sin que se llegue a comprometer la resistencia física de la pala de un aerogenerador de 3 kW.

6 Objetivos

General.

Desarrollar una metodología de diseño mediante el análisis de recurso eólico y aerodinámico, para asegurar el rendimiento y resistencia de las palas de un aerogenerador de 3 kW.

Específicos.

- Caracterizar el recurso eólico en el sitio de instalación.
- Seleccionar el perfil aerodinámico a utilizar en el diseño.
- Desarrollar el modelo de dimensionamiento de los álabes mediante el análisis aerodinámico utilizando el BEM.
- Análisis estructural mediante el Método Simplificado de Carga.

7 Metodología

En la Figura 7.1 se muestra el esquema de la metodología general que se desarrolló en este trabajo, donde se inicia con un estudio del recurso eólico y a continuación el análisis del diseño aerodinámico de la pala para el aerogenerador de 3 kW de potencia nominal.

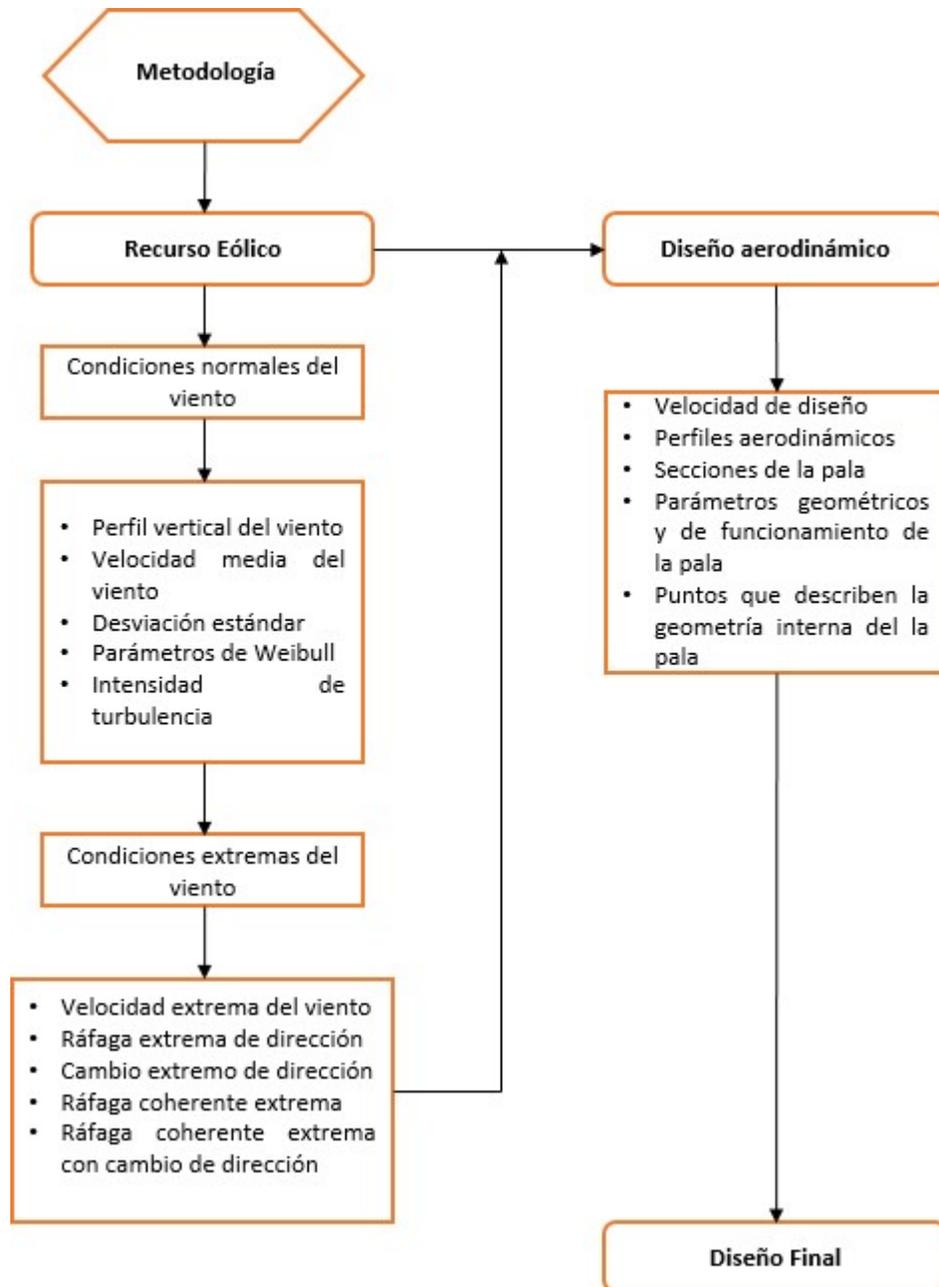


Figura 7.1 Estructura de la metodología general para el diseño de la pala.

7.1 Análisis del recurso eólico.

El diseño de aerogeneradores está sujeto a las condiciones ambientales que pueden afectar a su carga, durabilidad y funcionamiento tal como lo indica la norma IEC 61400-2, por lo tanto, es necesario realizar un estudio de dichas condiciones ambientales, el perfil a diseñar se pretende que opere en diferentes tipos de régimen de viento característicos del Istmo de Tehuantepec.

Para el análisis de recurso eólico se ha tomado una base de datos del año 2018 proporcionada por la estación meteorológica del Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE), ubicado en La Ventosa, Municipio de Juchitán de Zaragoza, Oaxaca. La base de datos está formada por datos medidos en intervalos de diez minutos durante un año a cuatro alturas diferentes: 20m, 40 m, 60 m y 80 m.

7.1.1 Condiciones normales del viento

En la Figura 7.2 se muestra en el diagrama de la metodología del análisis de las condiciones normales del viento.

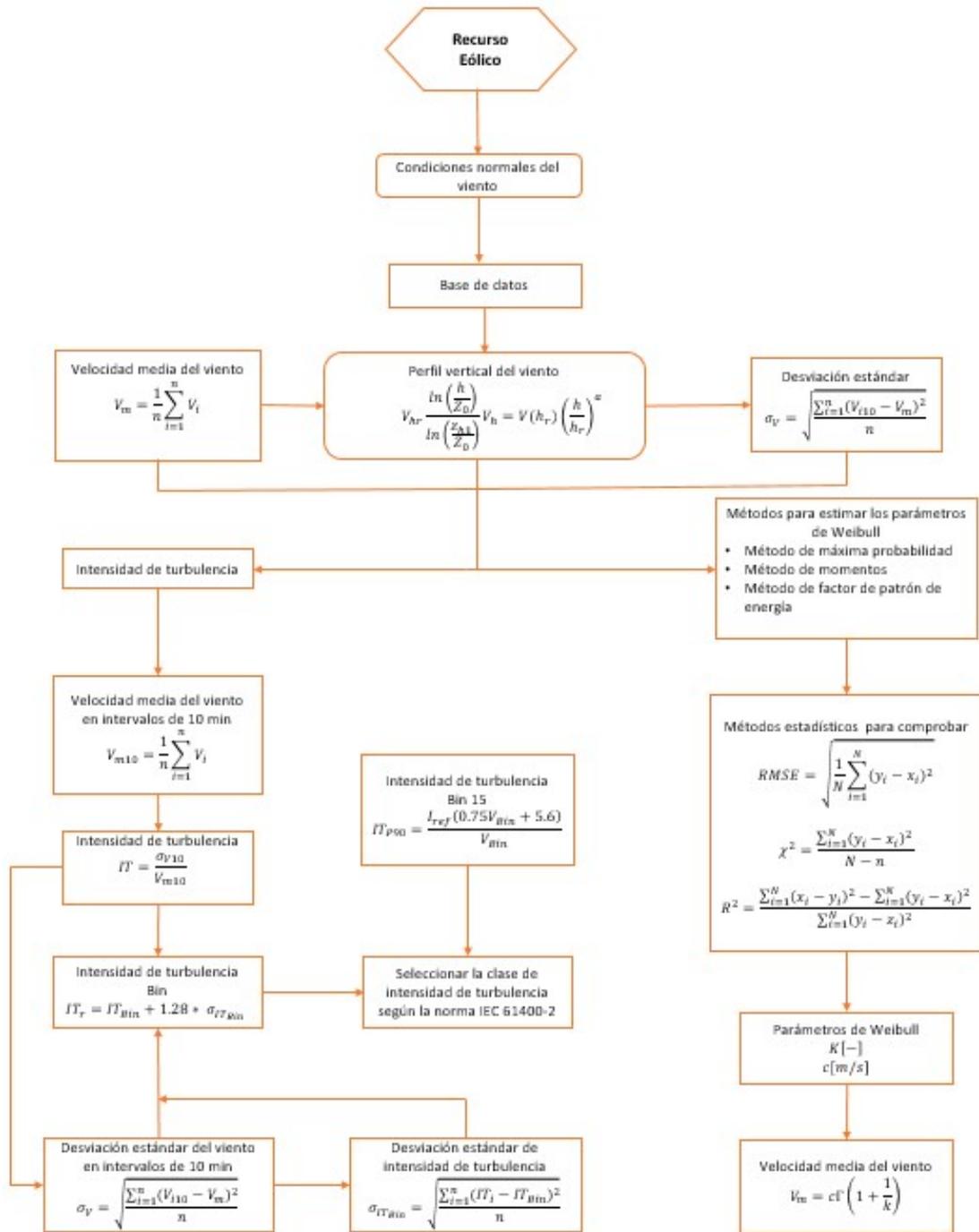


Figura 7.2 Método para el análisis de condiciones normales del viento.

7.1.2 Condiciones extremas del viento

La Figura 7.3 se muestra en el diagrama de la metodología para el análisis de las condiciones extremas del viento descritas en la Norma IEC 61400-2.

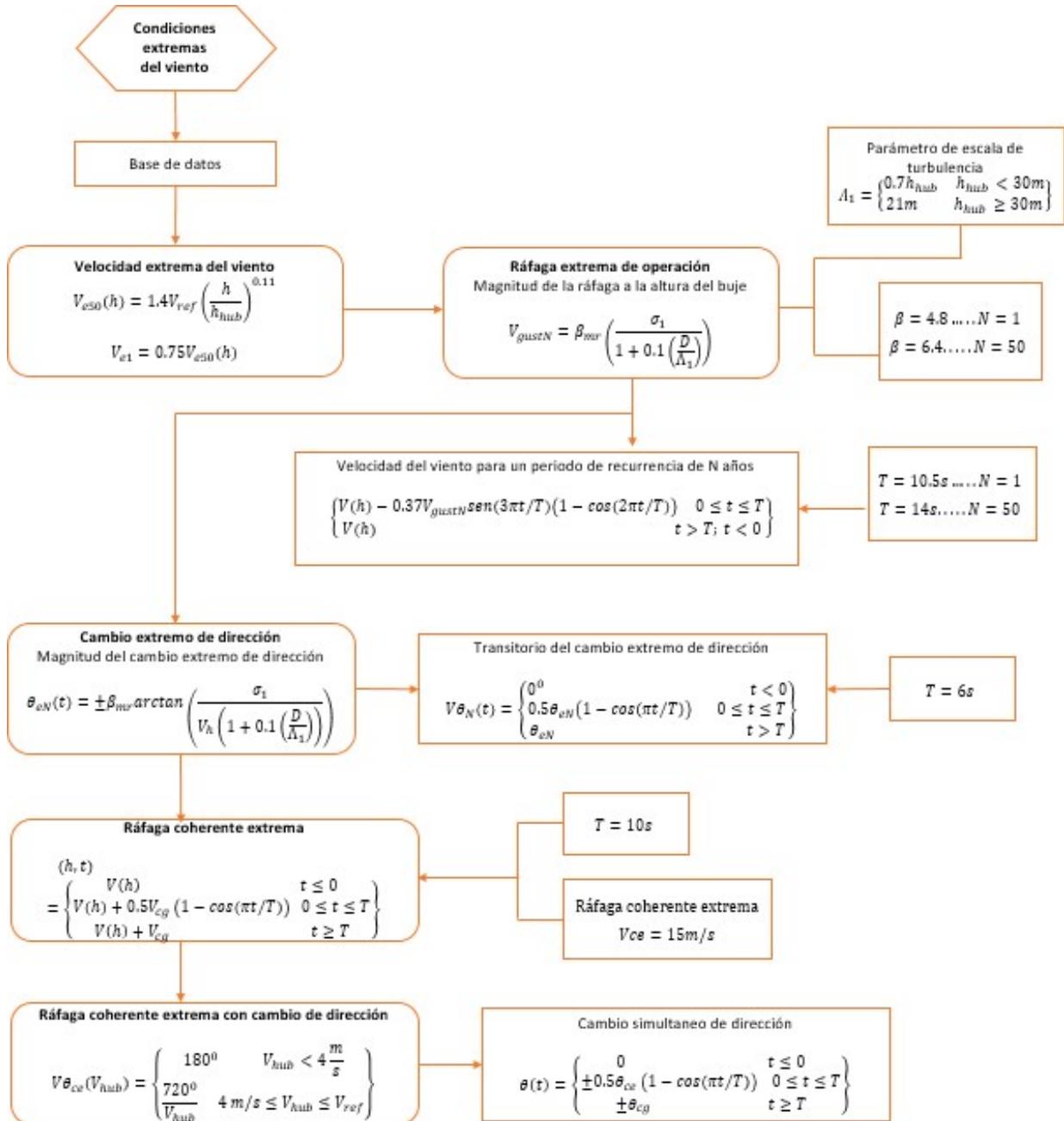


Figura 7.3 Método para el análisis de las velocidades en condiciones extremas

7.1.3 Diseño aerodinámico de la pala.

En la Figura 7.4 se muestra el diagrama para el dimensionado de la pala en el cual se desarrollan los siguientes puntos:

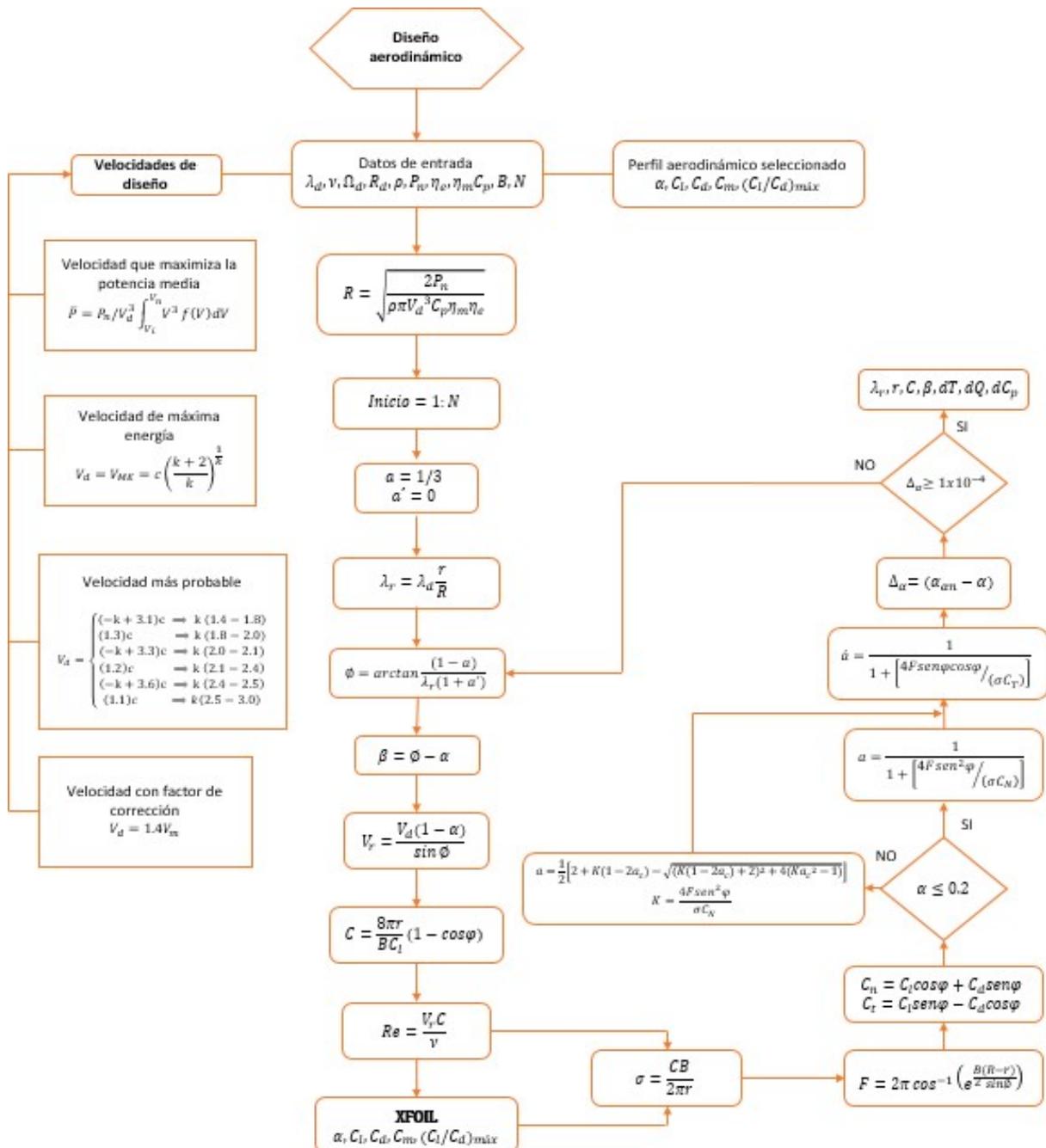


Figura 7.4 Método para el dimensionado de la pala usando el BEM.

- Selección de los datos de entrada necesarios para el dimensionado.
- Selección de la velocidad de diseño utilizando tres métodos recomendados para este fin.
- Iniciar el proceso iterativo asumiendo los siguientes valores de los coeficientes de inducción axial y tangencial: $a = 1/3$ y $\dot{a} = 0$.
- Determinar el ángulo de flujo (φ) utilizando la ecuación 3.76.
- Obtener el ángulo de torsión (β), utilizando la ecuación 3.80.
- Calcular la velocidad relativa del viento (V_r) utilizando las ecuaciones 3.74 o 3.75.
- Determinar la solidez del rotor mediante la ecuación 3.96.
- Calcular la cuerda (C) del perfil a través de la ecuación 3.104
- Calcular el número de Reynolds (Re), utilizando la ecuación 3.38 y los valores de la V_r y C .
- Determinar los nuevos valores de a , C_l , C_d , donde la relación C_l/C_d es máxima (el código presenta una opción de vincularse al Xfoil, utilizando el número de Reynolds y el perfil seleccionado).
- Calcular el factor de corrección de Prandtl (F) utilizando la ecuación 3.97.
- Determinar los valores de los coeficientes C_n (ecuación 3.85) y C_t (3.86).
- Determina el coeficiente de inducción axial (a) utilizando la ecuación 3.98 (si los valores de $a \leq 0.2$). Si $a > 0.2$, entonces se determina utilizando la ecuación 3.102. El coeficiente de inducción tangencial (\dot{a}), se determina mediante la ecuación 3.99.

8. Resultados y discusión.

8.1 Análisis del recurso eólico

En el capítulo anterior se describió el método a seguir en el estudio del recurso eólico donde se determinan las velocidades en condiciones normales y extremas del viento. La base de datos del viento en el sitio de instalación del aerogenerador fue los de la torre anemométrica del Atlas Eólico Mexicano M04 CERTE (Tabla 8.1), instalada en El Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE) ubicado en La Ventosa, Juchitán.

Tabla 8.1 Características de la estación M04 CERTE.

DATOS	VALORES
Nombre	M04 CERTER
Longitud	94° 57' 20.830"
Latitud	16° 32' 49.270''
Elevación sobre el nivel de mar	31 m
Altura de medición	12,20,40,60,80
Fecha de inicio	31/12/2018
Intervalo de tiempo	10 minutos
Densidad del aire a 12m	1.183 kg/m ³
Clase de rugosidad	2.47

El análisis del recurso eólico de las velocidades en condiciones normales se obtienen los siguientes datos de las velocidades mensuales y anuales (Tabla 8.2), para las diferentes alturas de medición y la de referencia (12 m).

Tabla 8.2 Velocidades medias mensuales y anuales en el sitio de instalación.

Alturas (m)	12	20	40	60	80
Meses	Velocidades medidas (m/s)				
Enero	11.10	12.40	14.25	15.17	16.03
Febrero	6.99	7.78	8.91	9.48	10.03
Marzo	6.42	7.15	8.21	8.75	9.21
Abril	6.21	6.91	7.92	8.43	8.82
Mayo	4.97	5.50	6.28	6.67	7.02
Junio	3.67	4.02	4.57	4.78	4.96
Julio	7.05	7.94	9.20	9.83	10.40
Agosto	6.08	6.85	7.96	8.51	9.02
Septiembre	4.87	5.49	6.36	6.81	7.21
Octubre	5.16	5.87	6.84	7.35	7.79
Noviembre	7.43	8.33	9.66	10.30	10.88
Diciembre	7.89	8.83	10.23	10.91	11.49
Anual	6.49	7.26	8.36	8.91	9.40

En la Tabla 8.3, se observa los valores de los parámetros de Weibull, la velocidad media, desviación estándar y la intensidad de turbulencia, obtenidas de la metodología para el cálculo en las condiciones normales del viento.

Tabla 8.3 Condiciones normales del viento.

Alturas [m]		12	20	40	60	80	Unidades
Parámetros de Weibull	K	1.78	1.79	1.79	1.80	1.80	[-]
	c	7.30	8.16	9.41	10.03	10.58	[m/s]
Velocidad media (V_m)		6.49	7.25	8.37	8.92	9.41	[m/s]
Desviación estándar de la velocidad (σ_{V15})	Bin 15	0.543	0.906	1.483	1.829	2.087	[m/s]
Intensidad de turbulencia media (IT_{15})		0.324	0.203	0.172	0.161	0.156	[%]
Intensidad de turbulencia representativa (IT_{r15})		0.372	0.233	0.207	0.196	0.193	[m/s]
Categorías de la turbulencia		S				A	[-]

8.2 Análisis del modelo dimensionado de la pala

Para el acoplamiento entre el clima del viento y el rotor eólico descrito en la metodología de dimensionado de la pala, como primer paso se determina la velocidad nominal de diseño a la altura del buje del aerogenerador.

8.2.1 Velocidades de diseño

Realizando el procedimiento de la Metodología para el dimensionado de la pala utilizando el BEM (Figura 8.4), se determinan las velocidades de diseño. En la tabla 8.4, se presentan las velocidades de diseño obtenidas por los diferentes métodos a la altura de referencia (12 m).

Tabla 8.4 Velocidades de diseño.

Descripción		Cantidad	Unidad
Parámetros de Weibull	k	1.78	[-]
	c	7.30	[m/s]
Velocidad media del viento (V_m)		6.49	[m/s]
Velocidades de diseño	$V_d = (3.1 - k)c$	9.63	[m/s]
	$V_d = V_{ME} = c \left(\frac{k + 2}{k} \right)^{\frac{1}{k}}$	11.14	[m/s]
	$V_d = 1.4(V_m)$	9.08	[m/s]

8.3 Selección de perfiles aerodinámicos

En la sección del capítulo 3.2.2 se explica la importancia y tipos de perfiles aerodinámicos que existen para el diseño de álabes de aerogeneradores. No existe un proceso específico para la selección de un perfil aerodinámico ideal, sin embargo, los perfiles aerodinámicos cuentan con características propias que pueden ser de ayuda para elegir el que más se adecua a los requerimientos del diseñador.

En un principio se debe definir todos los perfiles aerodinámicos empelados en el ángulo de diseño de la geometría de la pala. Se evaluó y selecciono el perfil aerodinámico que se realizó durante el proceso de selección de los perfiles en base a criterios establecidos por el diseñador.

El Módulo análisis directo simula el flujo alrededor de los perfiles aerodinámicos y genera gráficas polares del comportamiento de los coeficientes de sustentación y arrastre en referencia de un rango de ángulo de ataque α .

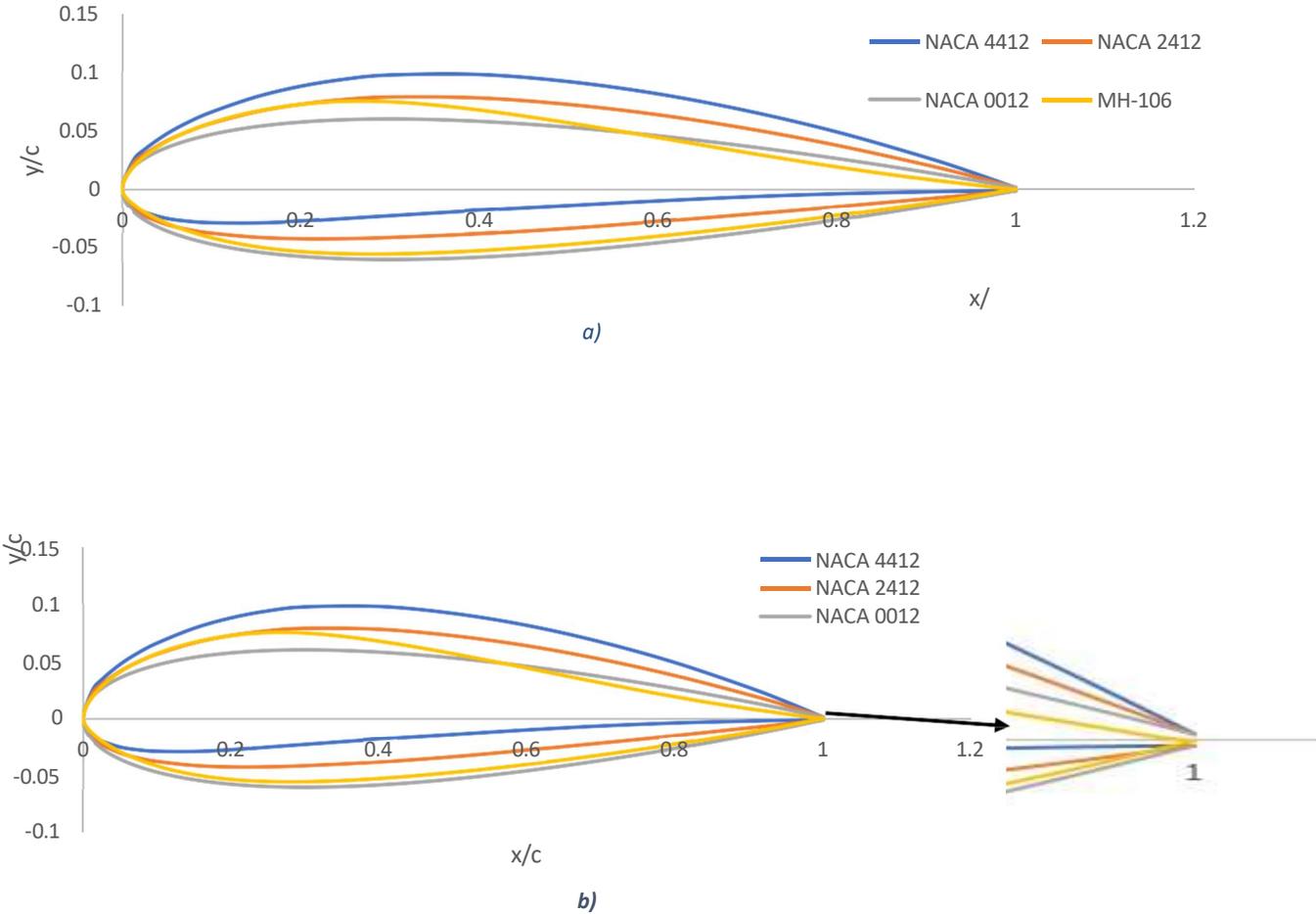


Figura 8.1 Geometría de los perfiles: a) Perfiles originales, b) Perfil modificado en borde de salida.

8.3.1 C_l máximo

Para determinar el perfil óptimo se evalúan perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de baja potencia, se empleó el número de Reynolds comprendido entre 200 000 – 600 000.

En la figura 8.2, 8.3, 8.4 Y 8.5 se observan los comportamientos del coeficiente de sustentación (C_l) de los 4 perfiles en función al ángulo de ataque. Para el perfil NACA-4412 se tiene un C_{lmax} de los 4 perfiles en función al ángulo de ataque. Como se muestra en la figura 8.5.

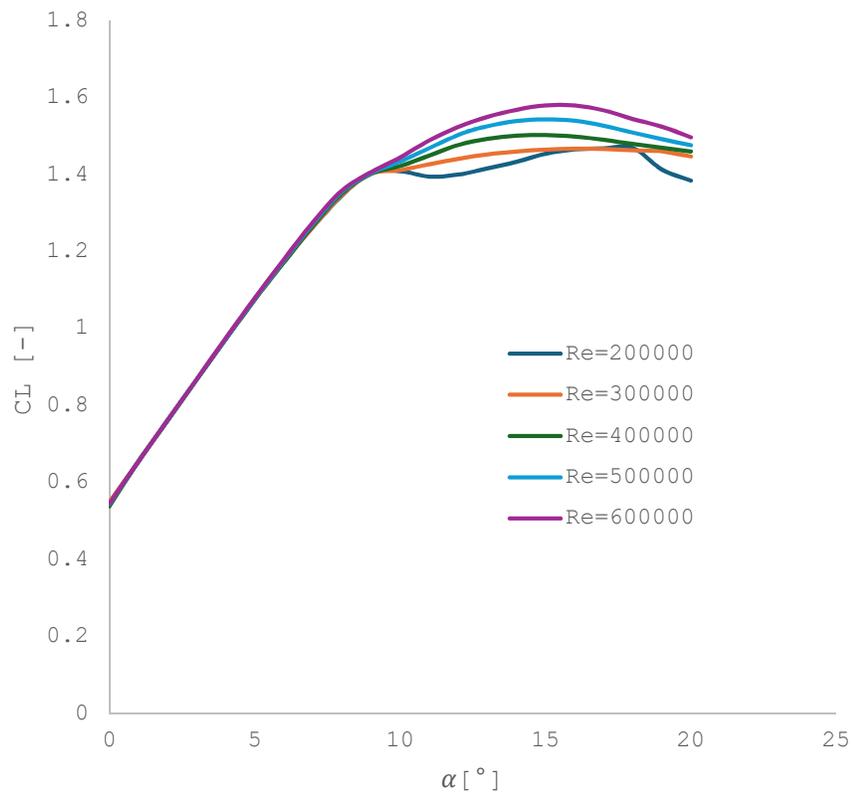


Figura 8.2 Evaluación del perfil aerodinámico NACA 4412 (α vs C_l).

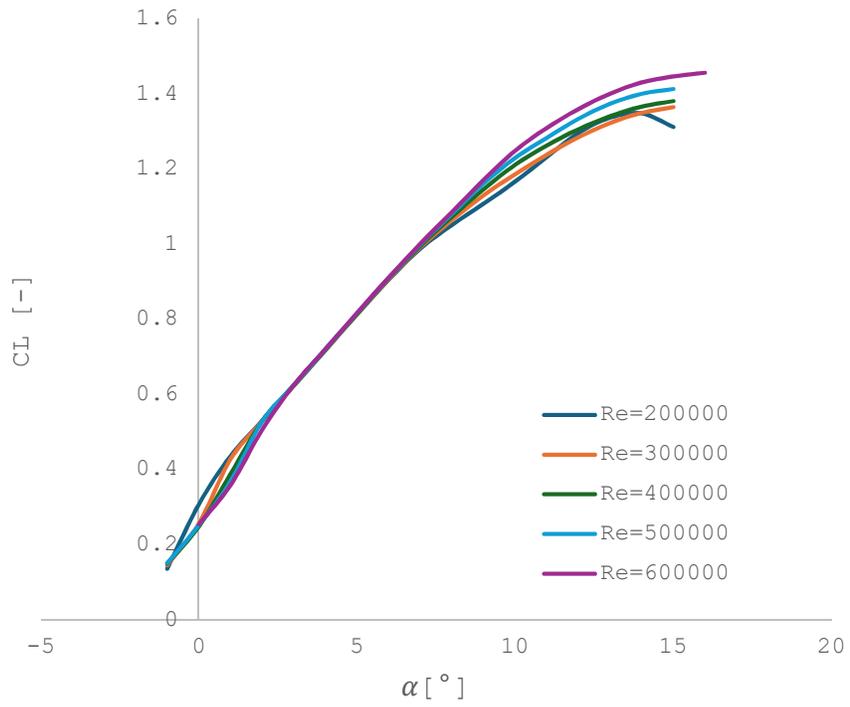


Figura 8.3 Evaluación del perfil aerodinámico NACA 2412 (α vs C_L).

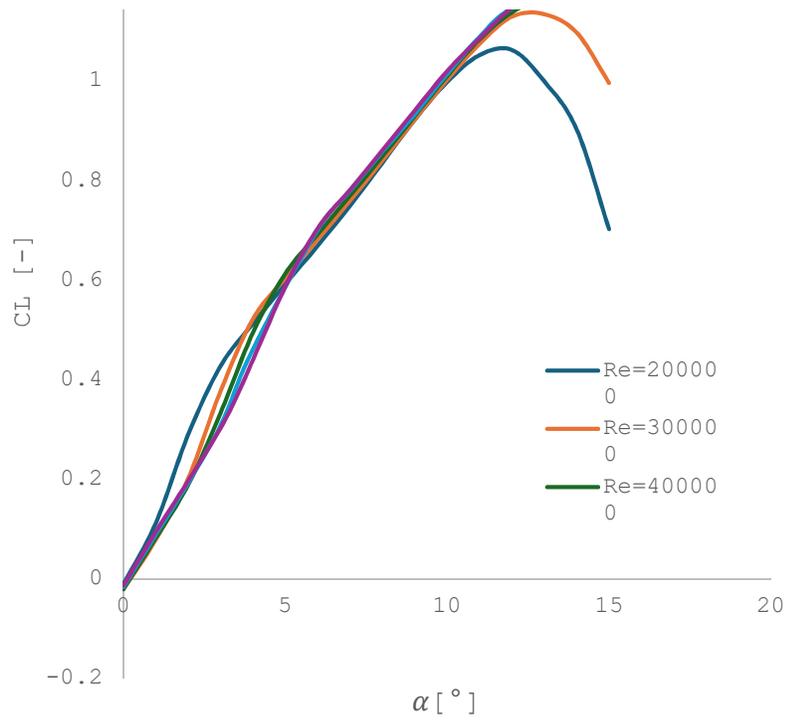


Figura 8.4 Evaluación del perfil aerodinámico NACA 0012 (α vs C_L).

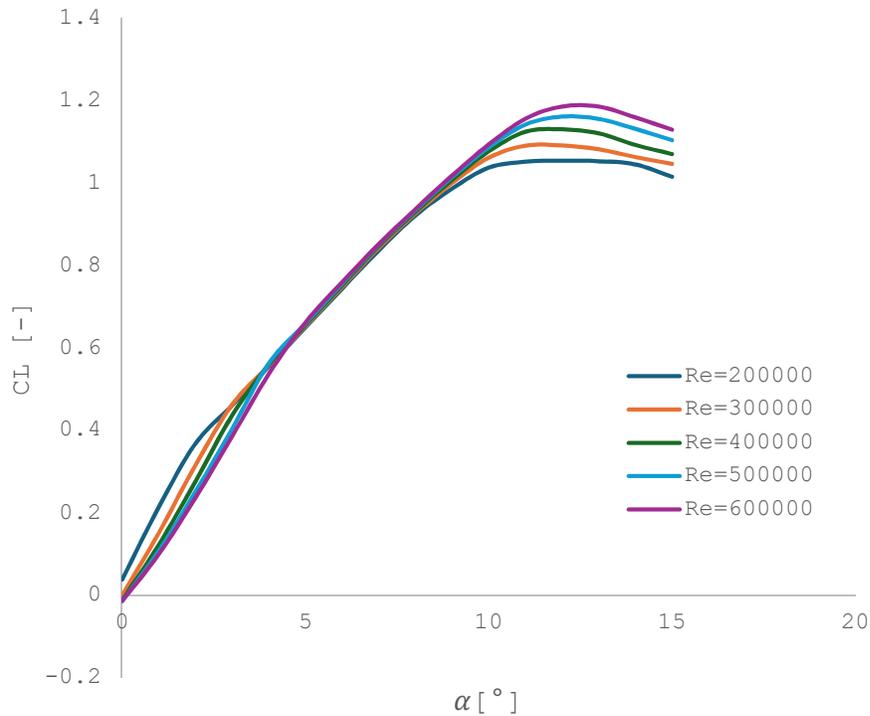


Figura 8.5 Evaluación del perfil aerodinámico MH-106 (α vs C_l).

La evaluación para el criterio de evaluación de C_l máxima es la siguiente.

Tabla 8.5 Criterios de selección: C_l máximo.

Criterios de evaluación del perfil				
Perfil	NACA 4412	NACA 2412	NACA 0012	MH-106
Cl Max	1.50906	1.3842	1.16406	1.12454
Puntuación	4	3	2	1

8.3.2 Manufactura.

El análisis de esta sección es evitar las formas complejas de realizar a partir del perfil base buscando así aquellas formas que no requieran un cambio muy radical.

La característica que más complica la manufactura del perfil es un borde de salida muy delgado, es por ello que se buscan perfiles que no terminen con una geometría en punta o muy delgada en dicho borde de salida

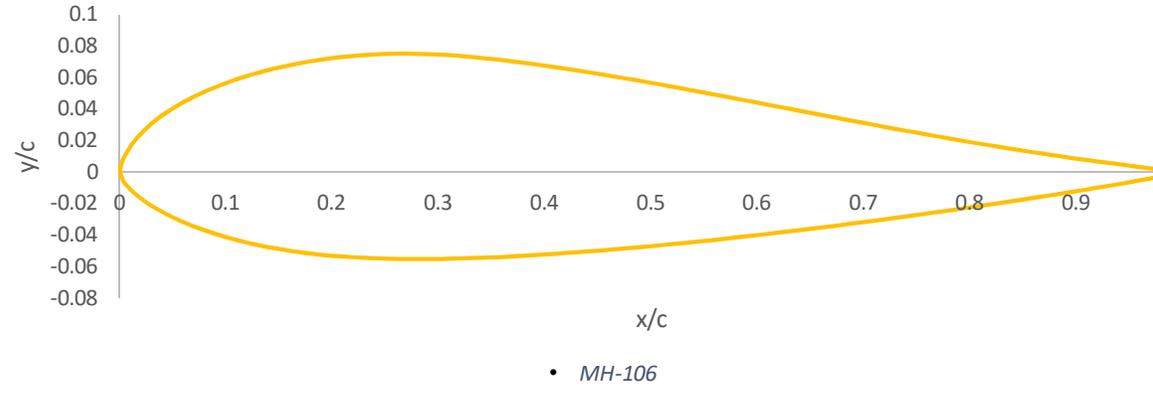
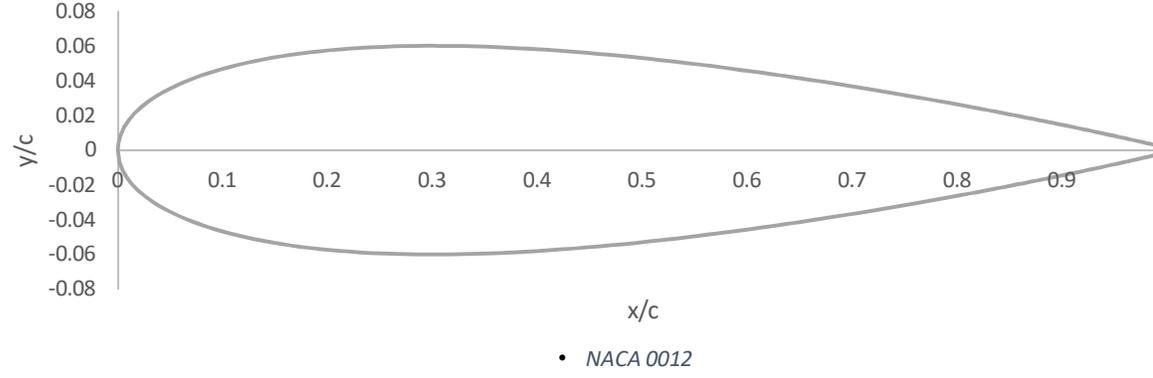
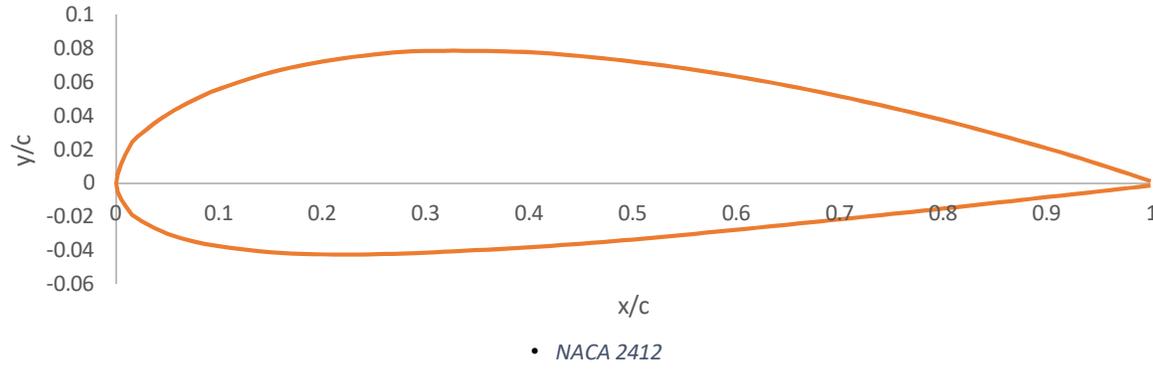
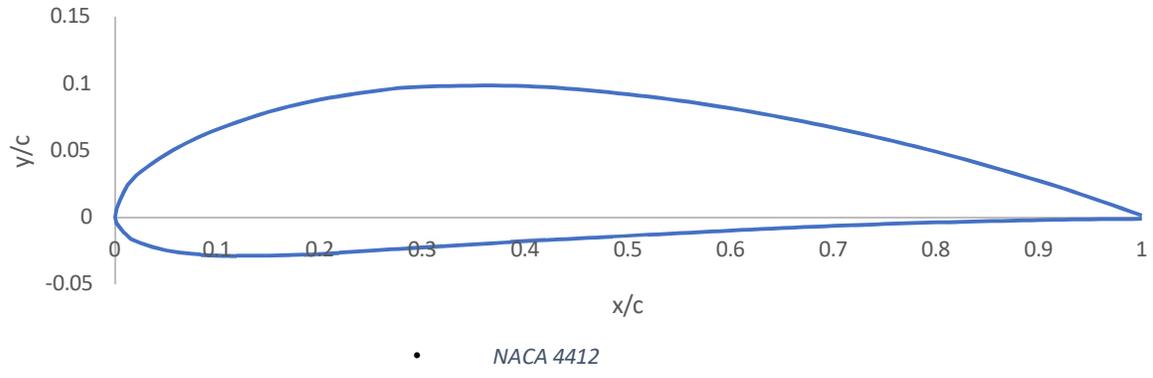


Figura 8.6 Perfiles aerodinámicos evaluados.

Como se muestra en la Figura 8.6 (d) el perfil MH-106 presenta un borde de salida muy delgado, esto significa que la manufactura de este perfil sería más complicada en comparación con los perfiles NACA 0012, NACA 2412 Y NACA 4412 que cuentan con un borde de salida más amplio.

A continuación, en la Tabla 8.6, se muestra la evaluación de los perfiles aerodinámicos asignando una puntuación del 1 hasta el 4, donde 1 indica el menor puntaje y por otro lado el valor 4 representa el puntaje mayor. Para el criterio de manufacturabilidad se tomó en cuenta el proceso de fabricación de la pala con material compuesto.

Tabla 8.6 Criterios de selección: Manufactura.

Criterios de evaluación del perfil				
Perfil	NACA 4412	NACA 2412	NACA 0012	MH-106
Puntuación	4	3	2	1

8.3.2 Máxima relación entre coeficiente de sustentación y arrastre entre (C_l y C_d) respecto al ángulo α .

De acuerdo con la ecuación 3.41 la relación existe entre el coeficiente de sustentación y arrastre (C_l/C_d), describe el rendimiento del perfil aerodinámico. Por lo que una mayor relación entre dichos coeficientes se ve reflejado en el coeficiente de potencia que tendrá el aerogenerador.

En este punto se obtuvieron los promedios de la relación (C_l/C_d) de los diferentes perfiles aerodinámicos seleccionados, como se muestra en la Figura 8.7.

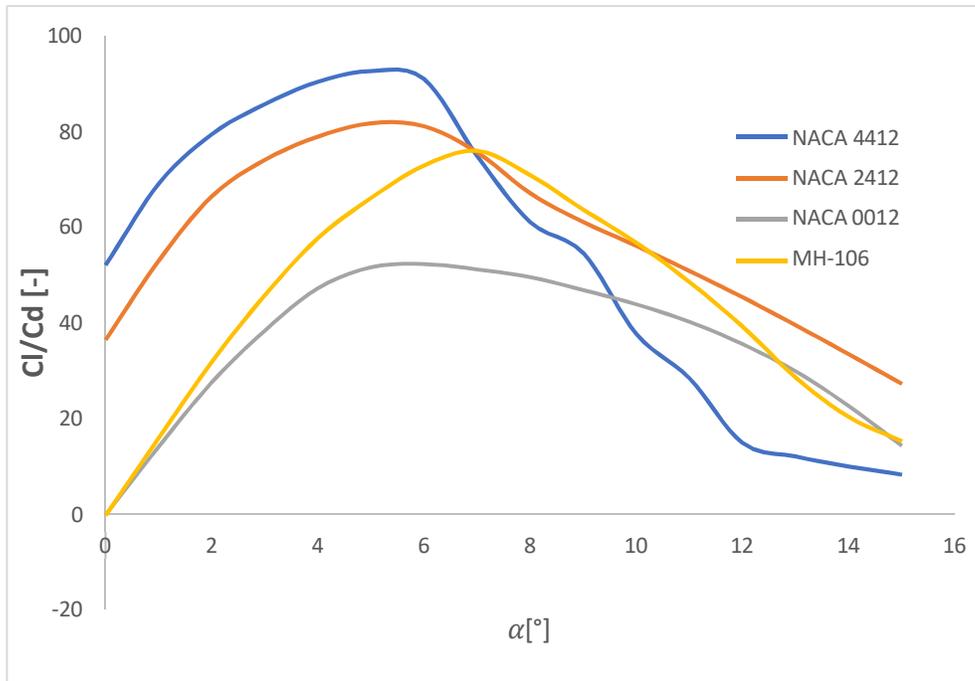


Figura 8.7 Evaluación de la máxima relación entre C_l/C_d .

De acuerdo con la figura anterior se puede observar el comportamiento de la relación C_l/C_d para el caso del perfil NACA 0012 presenta un comportamiento irregular en comparación con el perfil NACA 2412 Y MH-106 que por su parte cuenta con una mejoría en la relación entre ambos coeficientes, sin en cambió el perfil NACA 4412 cuanta con una mejor y mayor relación entre ambos coeficientes.

Por lo tanto, la evaluación para el criterio de la máxima relación C_l/C_d es la siguiente.

Tabla 8.7 Criterios de selección: Máxima relación (C_l/C_d).

Criterios de evaluación del perfil				
Perfil	NACA 4412	NACA 2412	NACA 0012	MH-106
Max (C_l/C_d)	100.51	81.61	52.17	7590
Puntuación	4	3	2	1

8.3.3 C_d mínimo a diferentes números de Reynolds.

Como se menciona en la sección 7.2 la fuerza de arrastre es la fuerza que se opone al avance del perfil. Para que un perfil aerodinámico alcance un C_d bajo, la capa límite alrededor del cuerpo debe permanecer unida a la superficie tanto tiempo como sea posible.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento del C_d en los diferentes perfiles preseleccionados.

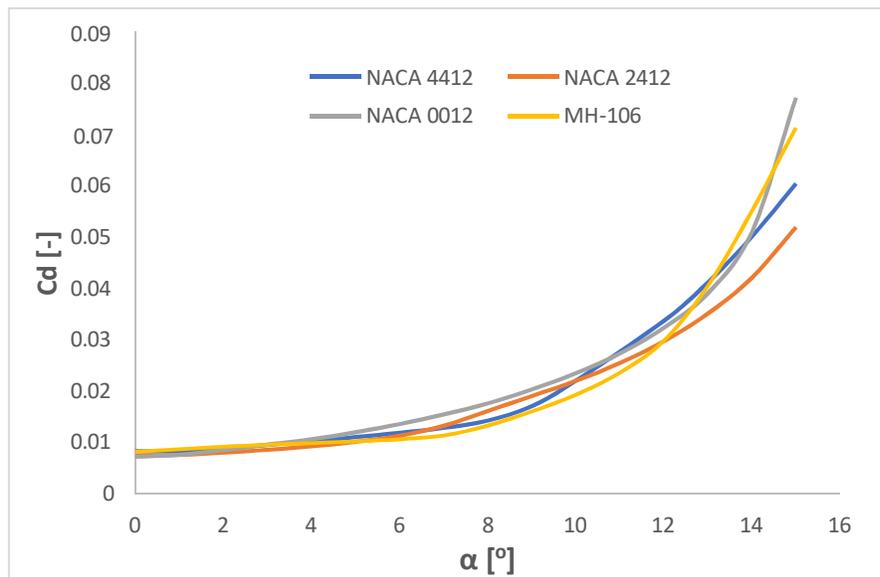


Figura 8.8 Evaluación del C_d mínimo a diferentes números de Reynolds.

La condición para este criterio es que se presente un C_d mínimo en un ángulo de ataque (α) alto, ya que a partir de ese ángulo comienza el desprendimiento de la capa límite, por lo tanto, el C_d aumenta y el C_l disminuye. La evaluación de este criterio se muestra a continuación:

Tabla 8.8 Criterios de selección: Mínimo C_d .

Criterios de evaluación del perfil				
Perfil	NACA 4412	NACA 2412	NACA 0012	MH-106
C_d mínimo	0.008	0.006	0.007	0.006
Puntuación	1	4	2	3

Después de la evaluación de cada uno de los criterios, se utilizó el promedio del método de puntuación asignado en cada una de las propiedades evaluadas. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 8.9 Resumen de los resultados de evaluación.

Criterios de evaluación del perfil				
Rango 1-4	NACA 4412	NACA 2412	NACA 0012	MH-106
(C_l / C_d) máx.	4	3	1	2
C_d mínimo	1	4	2	3
C_l máx	4	3	2	1
Manufactura	3	1	4	2
Selección de perfil	12	11	9	8

Por lo tanto, se concluye que el perfil seleccionado para la selección aerodinámica del diseño de la pala es NACA 4412.

8.4 Cálculo de geometría y cargas aerodinámicas

En la metodología en el punto 7.2 selección de perfiles, mediante la evaluación que se realizó se ha tenido en cuenta que el perfil NACA 4412, satisface las características aerodinámicas para la pala.

Para el cálculo de geometría y cargas se definirán los parámetros de entrada para el cual será utilizado el rotor, es decir, se establecen los parámetros de funcionamiento del aerogenerador y se aplica la teoría del BEM. El alcance bajo las anteriores directrices es la obtención de la geometría final de la pala. Una vez establecidos los datos geométricos de la pala en SolidWorks para verificar una geometría correcta de la pala en base a los resultados. Se tiene en cuenta los requerimientos de diseño son destinados para los parámetros de funcionamiento de un aerogenerador de 3 kW, tales como: el coeficiente de potencia (C_p), las eficiencias de cada uno de los componentes principales que se encuentran involucrados en la conversión de energía mecánica (n_m) a eléctrica (n_e) y la velocidad angular del generador eléctrico (Ω). A continuación, en

la tabla 8.3 se muestran las especificaciones establecidas para un aerogenerador de 3 kW.

Tabla 8.10 Especificaciones de diseño para el aerogenerador.

Descripción	Valor	Unidad
ρ	3000	W
C_p	0.454	[-]
η_m	1	[-]
η_e	0.9	[-]
Ω	314.14	rpm

Después de haber realizado la selección de los perfiles aerodinámicos se debe de tener en cuenta la ubicación de los perfiles a lo largo de la pala para garantizar el buen desempeño.

Para evaluar las directrices que determinarán el diseño de la geometría de la pala implementando el BEM se toma en consideración que el aerogenerador de 3 kW será instalado a una altura de 12 m, en la tabla 8.4 se muestran los valores de entrada para la aplicación de la teoría del BEM.

Tabla 8.12 Datos de entrada para aplicar la teoría del BEM.

Descripción	Valor	Unidad
Número de palas	3	[-]
Velocidad del viento promedio	6.49	m/s
Velocidad nominal del viento	9.34	m/s
Clase de aerogenerador	III	[-]
Potencia requerida	3000	W
Velocidad angular	314.14	rpm
C_p	0.454	[-]
n_m	1	[-]
n_e	0.9	[-]
Densidad del aire	1.225	kg/m ³
Número de secciones	15	[-]

Posteriormente, se utiliza un software Spider para realizar los cálculos de la teoría BEM para determinar los parámetros de diseño de la pala. Como se muestra en el Anexo C para los resultados obtenidos se toman en cuenta los trece elementos para cada perfil de la pala, los cuales corresponden desde el primer elemento después de la ubicación de la raíz, hasta el penúltimo elemento (antes del perfil correspondiente a la punta) en la segunda columna se toma en cuenta los valores de los radios locales para cada elemento, los ángulos de torsión (θ_T), se muestran los valores para el análisis aerodinámico como son: los coeficientes de sustentación (C_l) y arrastre para cada sección (C_d) y el número de Re.

Dados los resultados mostrados de acuerdo a la metodología BEM para el dimensionamiento de la pala en Tabla 8.13, se tiene en cuenta que las cuerdas, así como la torsión de la pala (θ_T) en cada una de las catorce secciones varían de forma no lineal a lo largo de la pala.

Tabla 8.12 Datos geométricos de la pala (2.35 m de longitud).

Radio [m]	Cuerda [m]	Angulo de Torsión [°]	Perfiles
0.070	0.1052	0	Rectangular
0.186	0.1052	0	
0.348	0.1777	21.8	NACA4412
0.512	0.1668	14.2	
0.677	0.1559	10	
0.841	0.145	7.3	
1.005	0.1342	5.6	
1.170	0.1233	4.2	
1.334	0.1124	3.1	
1.498	0.1015	2.3	
1.662	0.0906	1.7	
1.827	0.0798	1.1	
1.991	0.0689	0.6	
2.155	0.058	0.2	
2.320	0.0471	0	
2.350	0.005	0	

Así mismo se observó el comportamiento de la distribución de la cuerda, el color azul nos indica la distribución de los ángulos de la cuerda teórica y el color verde nos indica el estatus del cálculo linealizado, tanto de la cuerda como el ángulo de torsión tomando en cuenta las secciones correspondientes al 40 % y al 90 % de la pala y calculando la línea recta que pasa por ambos puntos.

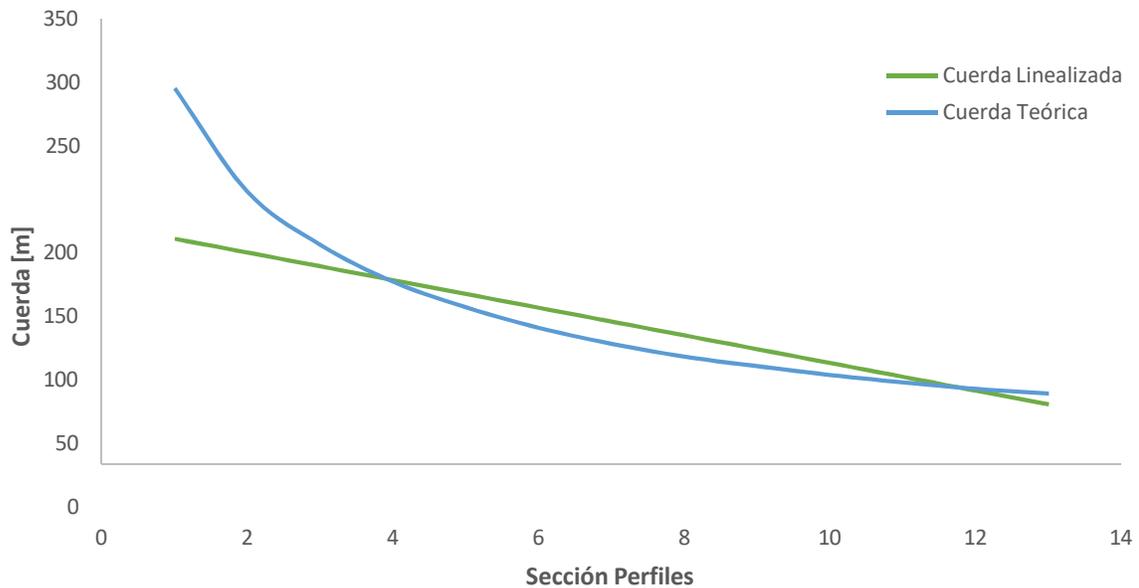


Figura 8.9 Cuerda Teórica y cuerda linealizada.

En la figura 8.10 se observa la pala dibujada en Excel, una vez que se obtuvieron los datos teóricos por el programa Spider para las coordenadas del perfil, dichos datos se linealizaron en Excel para así poder obtener un perfil linealizado, con las coordenadas ya correctas y así poder exportar las coordenadas a SolidWorks y poder dibujar el perfil de la pala correctamente como se muestra en la figura 8.11 el dibujo del perfil con los datos correctos.

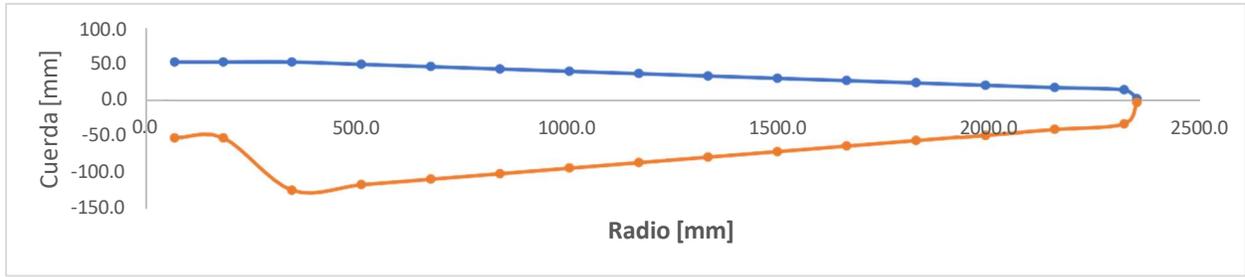


Figura 8.10 Perfil linealizado en Excel.

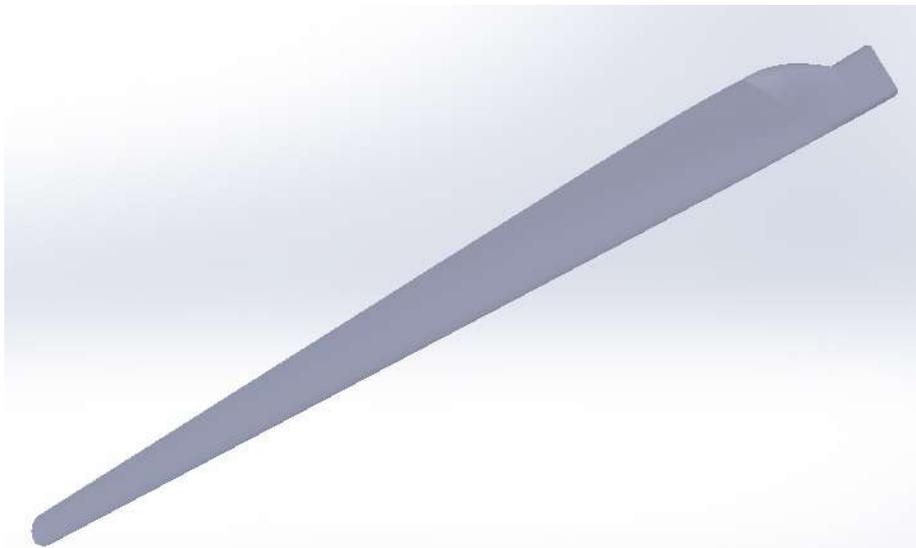
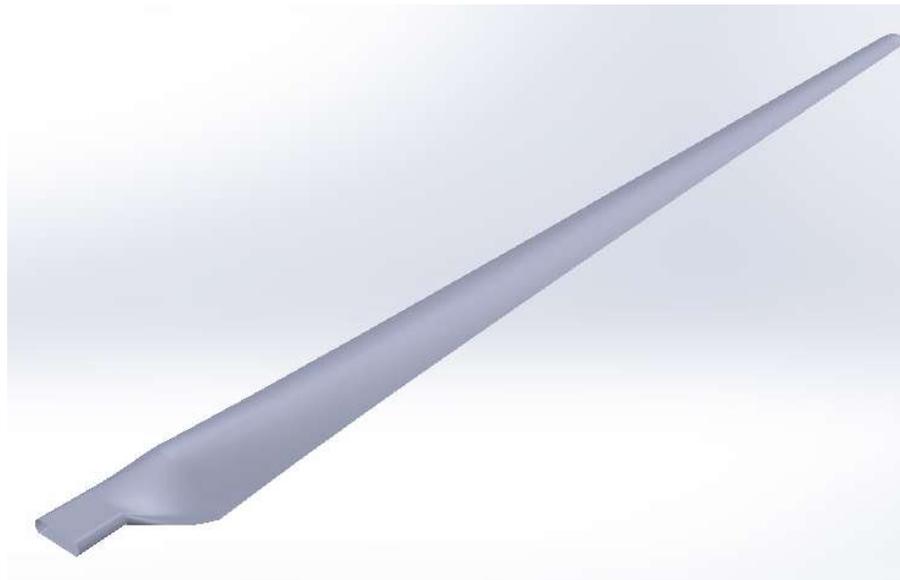


Figura 8.11 Diseño de perfil de alabe.

A continuación, en la Tabla 8.14 se muestran los resultados obtenidos para los cálculos de fuerzas de empuje para el perfil del rotor y de cada pala, así como los resultados referentes a momentos y torque.

Tabla 8.13 Cargas y momentos que actúan sobre la pala.

	Fuerza Axial [N]	Fuerza Tangencial [N]	Torque Axial [Nm]	Torque Tangencial [Nm]	Potencia [W]	Coefficiente de Potencia [-]
	21.16	8.24	7.36	2.87	93.02	0.012
	28.44	8.26	14.57	4.23	137.26	0.018
	35.93	8.22	24.31	5.56	180.27	0.023
	43.42	8.14	36.51	6.84	221.96	0.029
	50.99	8.07	51.26	8.11	262.99	0.034
	58.56	7.99	68.49	9.34	302.94	0.039
	66.13	7.90	88.21	10.54	341.86	0.044
	73.70	7.82	110.41	11.71	379.76	0.049
	81.31	7.73	135.17	12.85	416.74	0.054
	86.90	7.47	158.75	13.65	442.66	0.057
	86.05	6.74	171.33	13.42	435.26	0.056
	62.52	4.51	134.75	9.71	314.92	0.041
Rotor	695.12	91.08	1001.11	108.83	3529.66	0.45
1 pala	231.71	30.36	333.70	36.28	1176.55	0.15

8.5 Sobre la discusión

Existen diferentes familias de perfiles aerodinámicos en todo el mundo. El diseñador considera diferentes parámetros al seleccionar un perfil considerando por ejemplo el de lugar donde se trabajará, tipo de aerogenerador a realizar (monopala, bipala o tripala), potencia del aerogenerador, etc. cómo se menciona en los siguientes artículos.

8.5.1 Estudio 1

En este artículo de investigación llamado “Verificación del Diseño Aerodinámico de la Hélice de un Aerogenerador de 3kW Mediante Software CFD”. Se realizó la verificación del diseño aerodinámico de la hélice de un aerogenerador tripala de eje

horizontal barlovento (HAWT) de 3 kW mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). La empresa Waira Energía S.A.C proporcionó el diseño al Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE para su análisis. Este estudio se realizó para determinar algunos parámetros aerodinámicos de la hélice en forma cuantitativa, tales como la fuerza de empuje axial, el torque y el coeficiente de potencia, y así compararlos con los parámetros de diseño. Además, el estudio permitió obtener otros parámetros aerodinámicos importantes para un análisis cualitativo, como son el patrón de flujo externo, el campo de presiones y el campo de velocidades [27].

- Consideraciones de diseño

El aerogenerador WAIRA 5 se encuentra localizado en Changuillo, región Nasca-Perú, posee una altura de 12m con una hélice de 5m de diámetro. Las condiciones de funcionamiento varían durante el año. Por tal motivo se estudia 9 casos con velocidades del viento de 10 m/s, 12.5 m/s y 15 m/s, y velocidades de rotación de la hélice de 300 r.p.m., 400 r.p.m. y 500 r.p.m. El estudio de la hélice se realiza con los datos proporcionados por la empresa Waira Energía S.A.C. Los perfiles aerodinámicos son llamados de diferentes formas de acuerdo con la geometría que presenta el intradós y el extradós del perfil. En la mayoría de casos, los perfiles más usados para máquinas eólicas pertenecen a la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics). Para el aerogenerador WAIRA 5 se utiliza el perfil NACA 4412, debido a sus buenas características aerodinámicas en términos de sustentación y arrastre (Abbott, 1945). La figura 8.12 muestra el perfil aerodinámico 4412 [27].

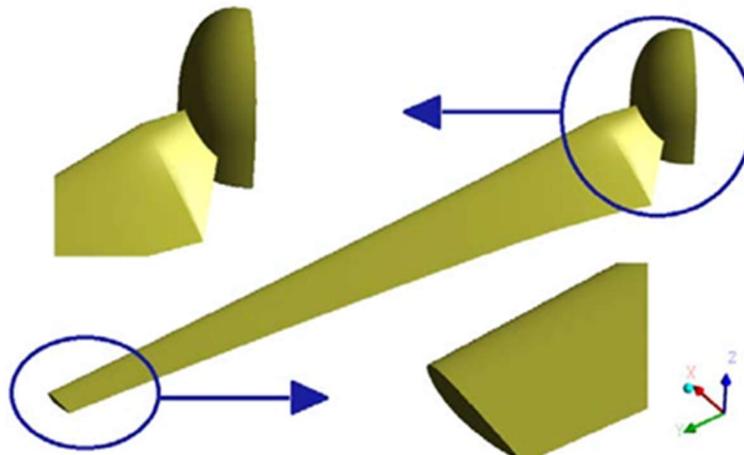


Figura 8.12 Modelo simplificado de la hélice [27].

Como se puede observar en este diseño de perfil NACA 4412 su borde de salida y borde de ataque son diferentes al diseño de la pala a que realice en este trabajo como se muestra en la siguiente figura 8.13.

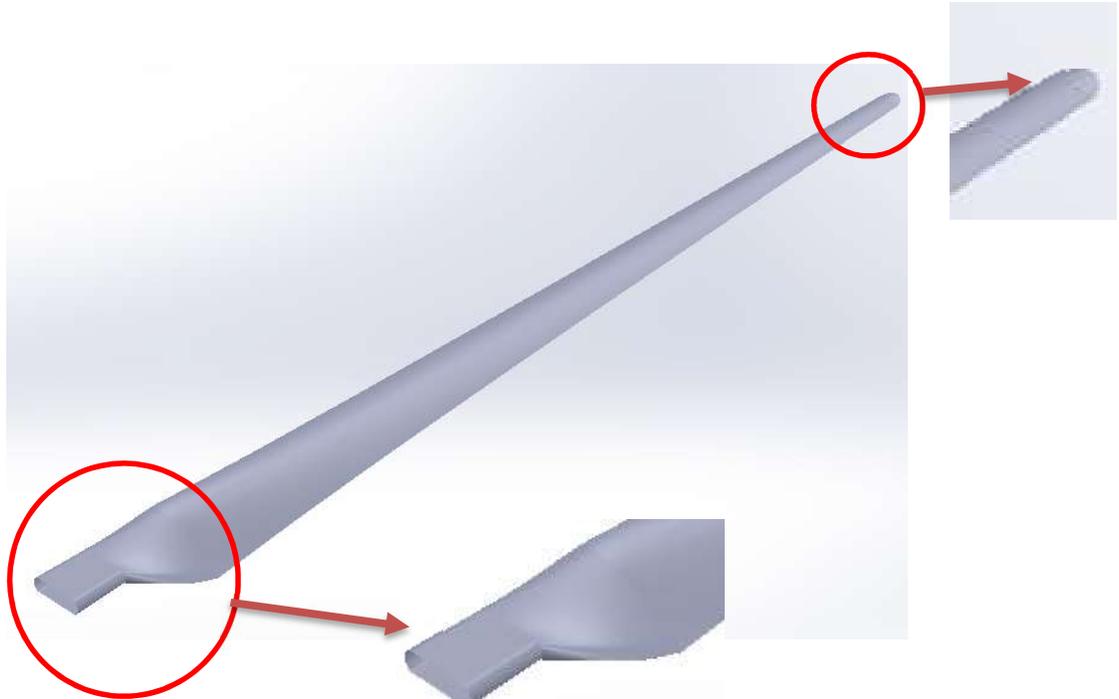


Figura 8.13 Comparación de perfil en el borde de ataque y de salida.

Tuvieron diferencia en los parámetros a evaluar, al igual que coincidieron en ciertos datos para el diseño del perfil NACA 4412 como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8.14 Cuadro comparativo de evaluación de diseño de perfil.

Parámetros a evaluar para el Diseño de los perfiles NACA 4412	
+ Coincidencias	- Diferencias
<ul style="list-style-type: none"> • Altura a evaluar 12 m. • Potencias 3 kW. • Tipo de aerogenerador (Tripala). • Velocidad de rotación de la hélice de 300 rpm 	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación del lugar a evaluar. • Velocidad media 6.49 m/s. • Tipos de perfiles a evaluar y número de Re. • Borde de salida. • Velocidad de la rotación 3.14 rpm. • Pala linealizada.

En la siguiente tesis llamada “Diseño paramétrico de las álabes-aleta de una turbina de viento de 3 kW mediante simulación numérica para zonas no electrificadas de la región Lambayeque”

8.5.2 Estudio 2

En la siguiente tesis llamada “Diseño paramétrico de las álabes-aleta de una turbina de viento de 3 kW mediante simulación numérica para zonas no electrificadas de la región Lambayeque” pretende aplicar teorías y conocimientos ya existentes mediante la optimización de un álabe de una turbina eólica para comunidades o zonas que cuenten con características de viento promedio y que no cuenten con una red pública de distribución de energía eléctrica. Para ello, se tiene como objetivo general determinar la máxima potencia que alcanza el diseño paramétrico de un álabe optimizada mediante simulación numérica para zonas rurales no electrificadas de la región Lambayeque [28].

Para el proyecto se tuvo en cuenta parámetros como resistencia a la exposición al medio ambiente, esto debido a que las condiciones del lugar influyen en el tiempo de vida de los álabes y la turbina en general. A partir de ello, la investigación precisó las metas del diseño con características mensurables que debe contar a partir del cuestionario planteado, donde hubo preferencia por una potencia nominal de 3 kW, con una longitud máxima del álabe de 2.5 m. y una altura de la torre de máximo 15 m como se muestra en la tabla 8.15 [28].

Tabla 8.15 Especificaciones.

Características de la turbina de viento		
Nombre	Parámetro	Unidad de medida
Potencia nominal	3	kW
Altura de la torre	9	m
Diámetro del rotor	5	m
Longitud del álabe	2.5	m
Perfil aerodinámico	NACA 4417	Adm
Tipo de torre	Tubular	-

Se realizó el análisis numérico de un álabe para una turbina de 3 kW de eje horizontal; cuenta con el código NACA 4417 airfoil, cabe destacar que el autor conto con datos técnicos proporcionados por la empresa WAIRA. Además, tras los resultados de las encuestas, se recomendó considerar como materiales propuestos la fibra de vidrio y la resina epoxy. La tabla 8.16, describe que el álabe estará dividido en 12 secciones denominadas “estaciones”, en donde, para cada una de ellas le corresponde una longitud de cuerda (c), la distancia que se encuentra posicionada una sección respecto al eje del rotor (r) [28].

Tabla 8.16 Especificaciones geométricas de la pala NACA 4417

Estación	R (mm)	C (mm)
1	300	330
2	500	310
3	700	185
4	900	165
5	1100	245
6	1300	225
7	1500	205
8	1700	185
9	1900	167
10	2100	150
11	2300	130
12	2500	113

En este estudio de tesis que fue hecho para la empresa peruana WAIRA, nos menciona en forma muy general los parámetros que tomaron para diseñar el perfil NACA 4417 y el objetivo de este trabajo, a diferencia de mi tesis como primer punto el perfil de la pala fue diferente, la zona, la potencia que desean obtener, etc. A continuación, se observa las diferencias de los datos en la tabla 8.17 y 8.18 los datos obtuvimos para el diseño de mi perfil NACA 4412.

Tabla 8.17 Especificaciones.

Características de la turbina de viento		
Nombre	Parámetro	Unidad de medida
Potencia nominal	3	kW
Altura de la torre	12	m
Diámetro del rotor	4.7	m
Longitud del álabe	2.35	m
Perfil aerodinámico	NACA 4412	Adm
Tipo de torre	-	-

Tabla 8.16 Especificaciones geométricas de la pala NACA 4417

Radio [m]	Cuerda [m]	Angulo de Torsión [°]	Perfiles
0.070	0.1052	0	Rectangular
0.186	0.1052	0	
0.348	0.1777	21.8	NACA4412
0.512	0.1668	14.2	
0.677	0.1559	10	
0.841	0.145	7.3	
1.005	0.1342	5.6	
1.170	0.1233	4.2	
1.334	0.1124	3.1	
1.498	0.1015	2.3	
1.662	0.0906	1.7	
1.827	0.0798	1.1	
1.991	0.0689	0.6	
2.155	0.058	0.2	
2.320	0.0471	0	
2.350	0.005	0	

9 Conclusión

En este trabajo de investigación de tesis profesional se llevó a cabo el desarrollo metodológico de un diseño aerodinámico del rotor de un aerogenerador de baja potencia. De acuerdo al estudio realizado a la teoría aerodinámica del momento y los elementos de la pala llamado BEM, el criterio de selección de perfiles aerodinámicos y su análisis estructural.

Durante este trabajo de tesis profesional la metodología que se presentó durante el desarrollo, que parte del análisis sobre las condiciones del sitio propuesto, donde se busca la implementación de un aerogenerador de 3 kW, para que de esta manera podamos obtener los parámetros de entrada que se utilizan para la generación de la geometría del pala, además de la implementación del método aeroelástico de la teoría del BEM con el que se obtienen las cargas que afectan en cada elemento de la pala y por ultimo las aplicaciones de sus cargas que puedan llegar a afectar en cada elemento de la pala que en esta parte está muy superficial, ya que más adelante se espera que se desarrolle con más detalle como: realizar más simulaciones, cargas en el programa Ansys, manufactura, pruebas de fatiga, etc.

De acuerdo con los objetivos planeados en este trabajo, se consiguió un modelo de pala más esbelto, bajo los distintos parámetros que se evaluaron y las cargas aeroelásticas de la teoría del BEM se obtuvieron los resultados factibles que mantuvieron dentro de los requisitos de diseño establecidos de acuerdo con las investigaciones revisadas.

10 Referencias

- [1] Leal, I. C. (Julio 2015, Julio). Diseño aerodinámico del rotor de u aerogenerador de baja potencia. Morelos, México.
- [2] Chattot, J.-J. (2007). Modelo de vórtice helicoidal para simulación aeroelástica de aerogeneradores. *Computadoras y estructuras*, 1072-1079. Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power System*. England: Copyright.
- [3] Fernandez, C. C. (2012, Julio). Diseño aerodinámico optimizado de un aerogenerador de eje horizontal. From <http://hdl.handle.net/10651/4101>
- [4] Yong-Xing Qiu, X.-D. W. (2014). Predicciones aerodinámicas HAWT inestable en guiñada y cabeceo utilizando el método de vórtice libre. *Energía Renovable*, 93-106.
- [5] Fulgencio, C. D. (2015). Diseño aerodinámico del rotor de un aerogenerador de baja potencia. Temixco, Morelos: UNAM.
- [6] Meng-Hsien Lee, Y. S. (2016). Experimentos y simulaciones numéricas del rendimiento de la pala del rotor para una turbina eólica de eje horizontal a pequeña escala. *Ingeniería Eólica y Aerodinámica Industrial.*, 17-29.
- [7] Scappatici, L. (2016). Optimización del diseño de aerogeneradores pequeños de eje horizontal: del laboratorio del mercado. *Revista de ingeniería Eólica y Aerodinámica Industrial*, Páginas 58-68.
- [8] Tahani, M. (2017). Diseño aerodinámico de aerogenerador de eje horizontal con lineación local innovadora de distribuciones de cuerdas y torsión. *Energía*, 78-91.
- [9] Martínez, I. A. (2019, noviembre). Diseño de Álabes, Rotor y Transmisión de un Generador Eólico de Eje. Hidalgo, México.
- [10] A.suresh. (2020). Diseño de aerogeneradores de eje horizontal pequeño para aplicaciones rurales de baja velocidad del viento. *Materialstoday:PROCEEDINGS*, 16-22.
- [11] Alejandro J. Vitale, A. P. (2008, noviembre). Método Iterativo de Cálculo para Diseño y Simulación de Hélices de Turbinas Eólicas de Pequeña Escala. Su Implementación Mediante el Desarrollo del Software Zeus V2.0. *Asociación Argentina de Mécanica Computacional*, 2457-2467
- [12] Phillip W. Richards, D. G. (2017). Aeroelastic design of large wind turbine blades considering damage tolerance. *Wind Energy*, 159-170.
- [13] Hernández, J. (2005). Diseño de un aerogenerador de baja potencia.
- [14] Hau, E. (2006). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer.
- [15] McGowan, J. M. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley and Sons.
- [16] Saeed, M. K. (2019). "Comparison of six different methods of Weibull distribution for wind power assessment: A case study for a site in the Northern region of Pakistan". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.
- [17] Internacional., I.-C. E. (2013). "IEC 61400-2".
- [18] Guorui Ren, J. L. (2018). Characterising turbulence intensity based on wind speed data in onshore wind farms. *Renewable Energy*, 756-766.

- [19] Tony Burton, N. J. (2011). Wind Energy Handbook. Copyright.
- [20] Sánchez López, J. (2017). "Diseño de una balanza para túnel de vientos subsónico (Doctoral dissertation)".
- [21] Toledo, A. S. (2021). Diseño estructural del álabe de un aerogenerador de baja potencia. Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca.
- [22] Miley, S. J. (1982). "Catalog of low-Reynolds-number airfoils data for wind-turbine application.". No. RFP-3387. Rockwell International Corp., Golden, CO (USA). Texas: College Station (USA). Dept. of Aerospace Engineering. From No. RFP-3387. Rockwell International Corp., Golden, CO (USA).
- [23] Olaya Cortés, D. E. (2015). "Estudio de la viabilidad de un perfil aerodinámico para la excitación del régimen caótico en láminas biestables".
- [24] Pramod Jain, P. D. (2016). Wind Energy Engineering, 2nd Edition. McGraw-Hill Education.
- [25] Mathew, S. (2006). Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics (Vol.1). Berlín: Springer.
- [26] Hansen, M. (2015). Aerodynamics of Wind Turbines, 3rd Edition. London: Routledge.
- [27] Renatto M. Yupa1, R. F. (septiembre de 2017). Verificación del Diseño Aerodinámico de la Hélice de un Aerogenerador de 3kW Mediante Software CFD. Recuperado el 07 de febrero de 2019, extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.researchgate.net/
- [28] Chavesta Rivera, P. A. (2021). Diseño paramétrico de las álabes-aleta de una turbina de viento de 3 kW mediante simulación numérica para zonas no electrificadas de la región Lambayeque. extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.ucv.edu.pe/bits
- [29] A.C Hansen, C. B. (2003). Aerodynamics of Horizontal-Axial Wind Turbines. Annual Review of Fluid Mechanics 25(1), 115-149.
- [30] Hernandez Geovanni, L. O. (2010). An Anakytical Procedure for Optimal Sizing of Wind Turbines in Different Wind Regimes. Journal of Materials Science and Engineering, Volume 4, No.2.
- [31] Loan Thi Kim Au, H. V. (2017). Comparison of Aerodynamic Forces and Moments Calculated by Three-dimensional Unsteady Blade Element Theory and Computational Fluid Dynamics. Journal of Bionic Engineering 14(4), 746-758.
- [32] Nijssen, P. B. (2013). Advances in wind turbine blade design and materials,6. Fatigue as a design driver for composite wind turbine blades. Elsevier Inc. Chapters.
- [33] Nijssen, P. B. (2013). Advances in wind turbine blade design and materials,6. Fatigue as a design driver for composite wind turbine blades. Elsevier Inc. Chapters.
- [34] Leishman, J. G. (2011). Aerodynamics of Horizontal Axis Wind Turbines. Advances in Wind Energy Conversion Technology, 1-69.
- [35] Mahmuddin, F. (2017). Rotor blade performance analysis with blade element momentum theory. Energy Procedia, Volumen 105, 1123-1129.
- [36] Grasso, F. (December 2014). Desing of a family of new advanced airfoils for low wind class turbines. Journal of physics conference serie (Vol.555, No. 1, p.012044).
- [37] Ackermann, T. (2005). Wind Power in Power System. England: Copyright.

- [38] Jangamshetti, S. (2001). Normalized power curves as a tool for identification of optimum wind turbine generator parameters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 283-288.
- [39] Ingram, G. (octubre 2018). *Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method Version 1.1*. Copyright.
- [40] S. Hauptmann, M. B. (Deember 2014). Comparison of the lifting-line free vortex wake method and the blade-element-momentum theory regarding the simulated loads of multi-MW wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 555, No. 1, p.012050), IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/555/1/012050.
- [41] Singh, R. K.-H. (2012). "Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines". *Renewable Energy* Vol. 42, 66-76.
- [42] Jamieson, P. (2018). *Innovation in wind turbine desing*. In J. W. Ltd. Wiley, Second Edition.
- [43] Hitchens, F. E. (2015). *Propeller Aerodynamics: The history, aerodynamics & operation of aircraft propellers*. Copyright.
- [44] R. Bontempo, M. M. (2020). On the potencial of the ideal diffuser augmented wind turbine: an investigation by means of a momentum theory approach and of a free-wake ring-vortex actuator disk model. *Energy Conversion and Management*, Volume 2013, 112794.
- [45] Hansen, M. O. (2017). Chapter 9-Aerodynamics and Design of Horizontal-Axis Wind Turbines. *Wind Energy Engineering*, 161-184.

Anexos

Anexo A.

Estudio de recurso eólico en el lugar de sitio por la estación anemométrica Windographer, (CERTE M04).

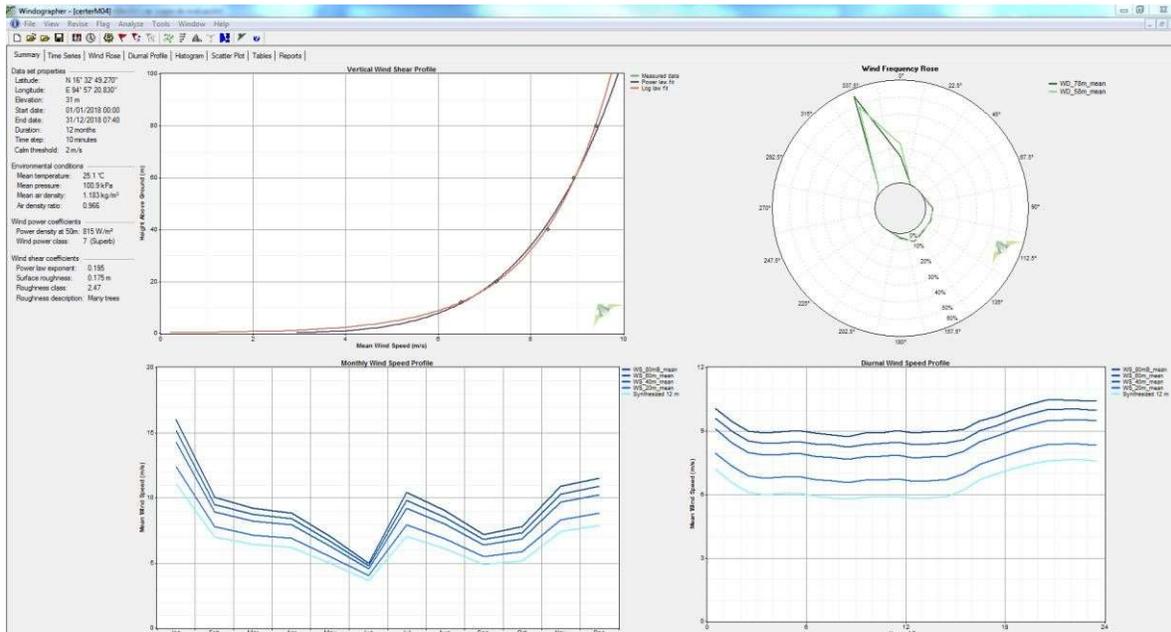


Figura A.1 Estación anemométrica CERTE M04.

Anexo B.

Coordenadas obtenidas de Airfoil Tools de los cuatro perfiles propuestos a trabajar, y posteriormente extruirlos a Excel, para graficarlos y trabajar con ellos en Qblade.

Tabla B.1 Coordenadas de perfil NACA 4412.

1	0.0013
0.95	0.0147
0.9	0.0271
0.8	0.0489
0.7	0.0669
0.6	0.0814
0.5	0.0919
0.4	0.098
0.3	0.0976
0.25	0.0941
0.2	0.088
0.15	0.0789
0.1	0.0659
0.075	0.0576
0.05	0.0473
0.025	0.0339
0.0125	0.0244
0	0
0.0125	-0.0143
0.025	-0.0195
0.05	-0.0249
0.075	-0.0274
0.1	-0.0286
0.15	-0.0288
0.2	-0.0274
0.25	-0.025
0.3	-0.0226
0.4	-0.018
0.5	-0.014
0.6	-0.01
0.7	-0.0065
0.8	-0.0039
0.9	-0.0022
0.95	-0.0016
1	-0.0013

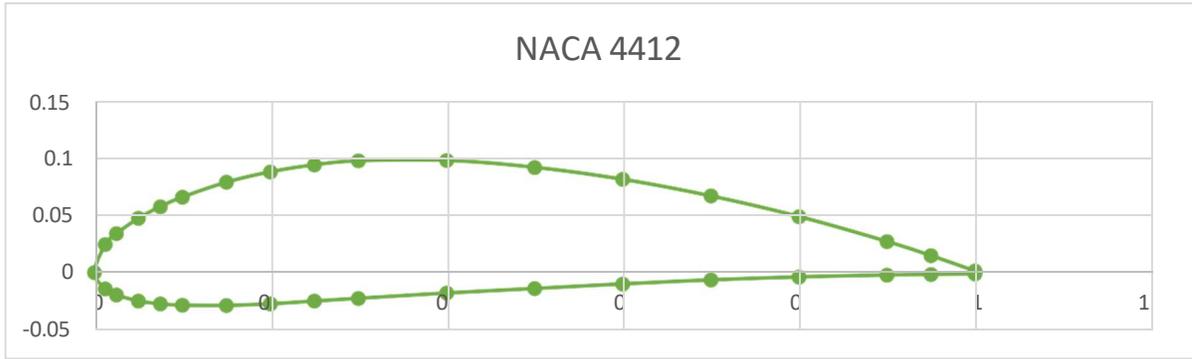


Figura B.1 Perfil con NACA 4412.

Tabla B.2 Coordenadas de perfil NACA 2412.

1	0.0013
0.95	0.0114
0.9	0.0208
0.8	0.0375
0.7	0.0518
0.6	0.0636
0.5	0.0724
0.4	0.078
0.3	0.0788
0.25	0.0767
0.2	0.0726
0.15	0.0661
0.1	0.0563
0.075	0.0496
0.05	0.0413
0.025	0.0299
0.0125	0.0215
0	0
0.0125	-0.0165
0.025	-0.0227
0.05	-0.0301
0.075	-0.0346
0.1	-0.0375
0.15	-0.041
0.2	-0.0423
0.25	-0.0422
0.3	-0.0412
0.4	-0.038
0.5	-0.0334
0.6	-0.0276
0.7	-0.0214
0.8	-0.015
0.9	-0.0082
0.95	-0.0048
1	-0.0013



Figura B.2 Perfil NACA 2412.

Tabla B.3 Coordenadas perfil NACA 0012

0.000584	-0.00426
0.002334	-0.008429
0.005247	-0.012501
0.009315	-0.016471
0.014529	-0.02033
0.020877	-0.024071
0.028344	-0.027683
0.036913	-0.031156
0.046563	-0.034479
0.057272	-0.037641
0.069015	-0.040631
0.081765	-0.043437
0.095492	-0.046049
0.110163	-0.048457
0.125745	-0.050651
0.142201	-0.052625
0.159492	-0.054372
0.177579	-0.055886
0.196419	-0.057164
0.215968	-0.058205
0.23618	-0.059008
0.257008	-0.059576
0.278404	-0.05991
0.300318	-0.060017
0.322698	-0.059903
0.345492	-0.059575
0.368646	-0.059042
0.392108	-0.058314

0.415822	-0.057403
0.439732	-0.05632
0.463783	-0.055077
0.487918	-0.053687
0.512082	-0.052162
0.536217	-0.050516
0.560268	-0.048762
0.584179	-0.046912
0.607892	-0.04498
0.631354	-0.042978
0.654509	-0.040917
0.677303	-0.038811
0.699682	-0.03667
0.721596	-0.034506
0.742992	-0.032329
0.76382	-0.030152
0.784032	-0.027983
0.803581	-0.025834
0.822421	-0.023714
0.840508	-0.021635
0.8578	-0.019605
0.874255	-0.017635
0.889837	-0.015735
0.904509	-0.013914
0.918235	-0.012182
0.930985	-0.010549
0.942728	-0.009022
0.953437	-0.007611
0.963087	-0.006324
0.971656	-0.005169
0.979123	-0.004152
0.985471	-0.00328
0.990685	-0.00256
0.994753	-0.001994
0.997666	-0.001587
0.999416	-0.001342
1	-0.00126

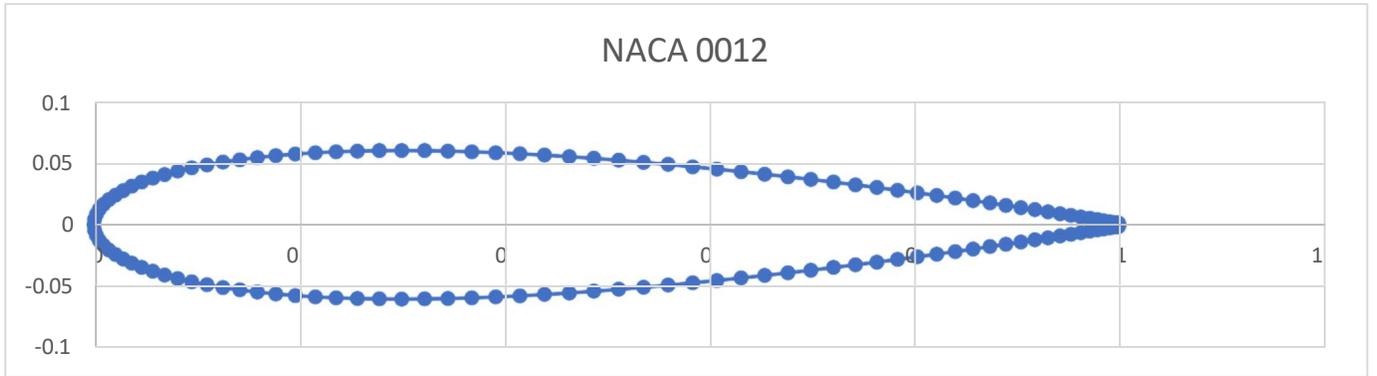


Figura B.3 Perfil NACA 0012.

Tabla B.4 Coordenadas de perfil MH-106.

1	0
0.996339	0.000135
0.985727	0.000819
0.968925	0.002316
0.946424	0.004365
0.91836	0.006857
0.885031	0.009977
0.846996	0.013848
0.804874	0.018478
0.759333	0.023823
0.711071	0.029782
0.6608	0.0362
0.609231	0.042884
0.557058	0.0496
0.504949	0.056093
0.453529	0.062092
0.403381	0.067316
0.355036	0.071513
0.309071	0.074371
0.265804	0.075348
0.225065	0.074205
0.186818	0.071244
0.15137	0.066784
0.119042	0.061026
0.090137	0.054175
0.064937	0.046415
0.043666	0.037922
0.026468	0.028916

0.013455	0.019686
0.004698	0.010634
0.001888	0.006233
0.00081	0.003815
0.000167	0.001548
0.000002	0.000146
0.000108	-0.001125
0.00056	-0.002345
0.001337	-0.003614
0.002978	-0.005588
0.005135	-0.007634
0.009624	-0.011067
0.022573	-0.01833
0.040247	-0.025603
0.062329	-0.032607
0.088532	-0.039073
0.118588	-0.044716
0.152291	-0.049286
0.189463	-0.052595
0.229967	-0.05458
0.273563	-0.05534
0.319882	-0.054991
0.368515	-0.053672
0.418961	-0.051568
0.470637	-0.048842
0.522913	-0.045622
0.575158	-0.041982
0.626796	-0.037995
0.677246	-0.033787
0.725909	-0.029472
0.772196	-0.025152
0.815543	-0.020922
0.855413	-0.016871
0.891299	-0.013079
0.92273	-0.00962
0.949272	-0.006537
0.970608	-0.00385
0.986498	-0.001727
0.996525	-0.00043
1	0

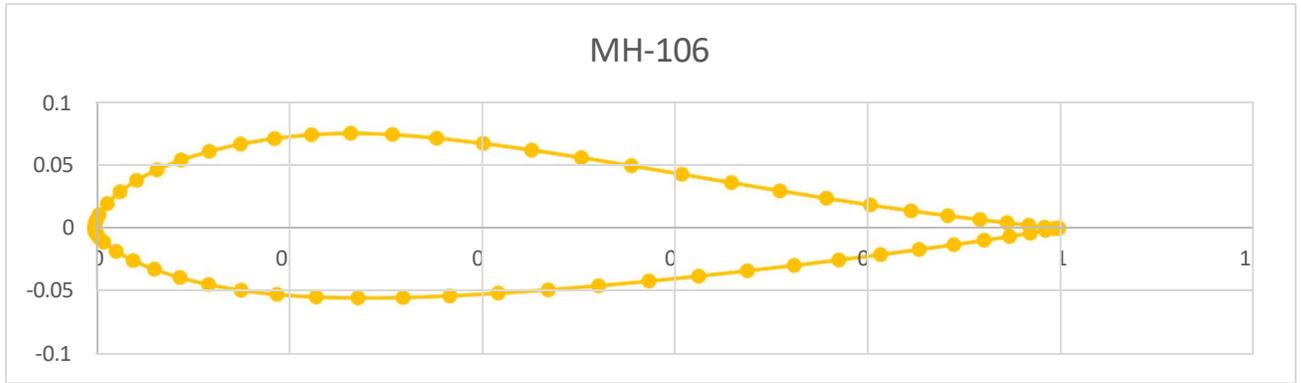


Figura B.4 Perfil MH-106.

En la siguiente figura se muestran los cuatro perfiles adjuntos en el programa de Qblade para que posteriormente se pudiera realizar la evaluación de cada uno de ellos y ver cuál sería más factible trabajar.

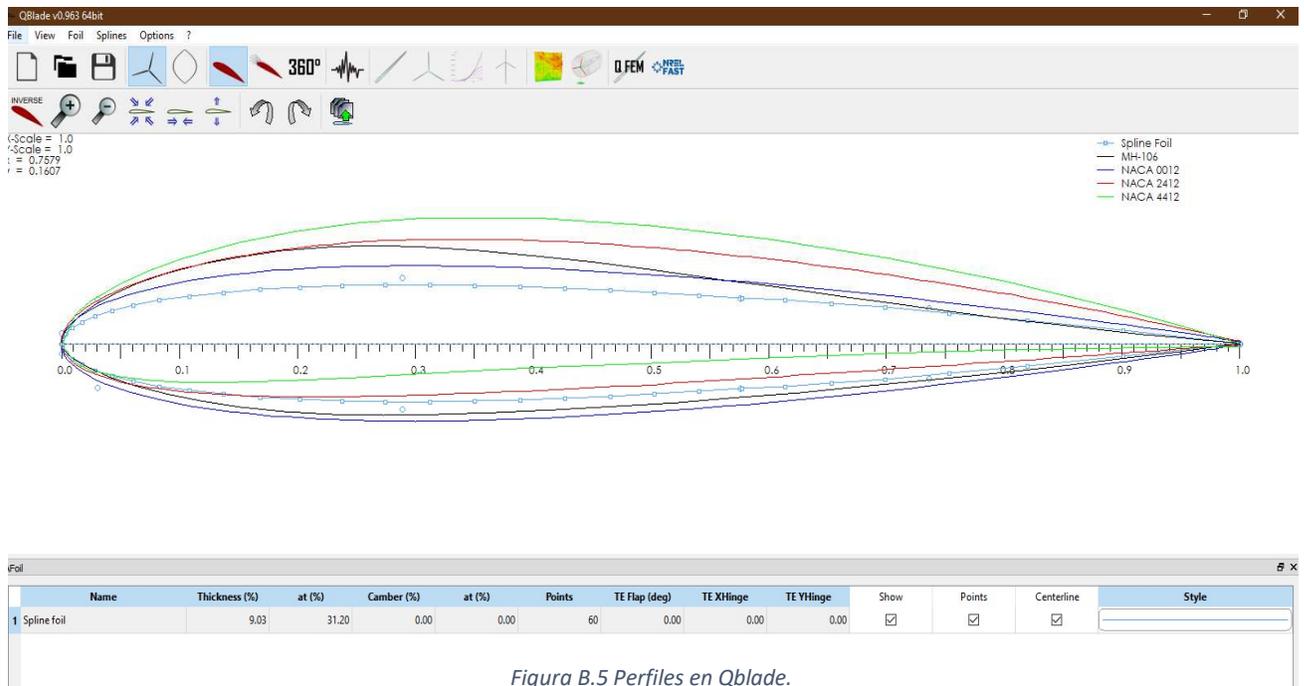


Figura B.5 Perfiles en Qblade.

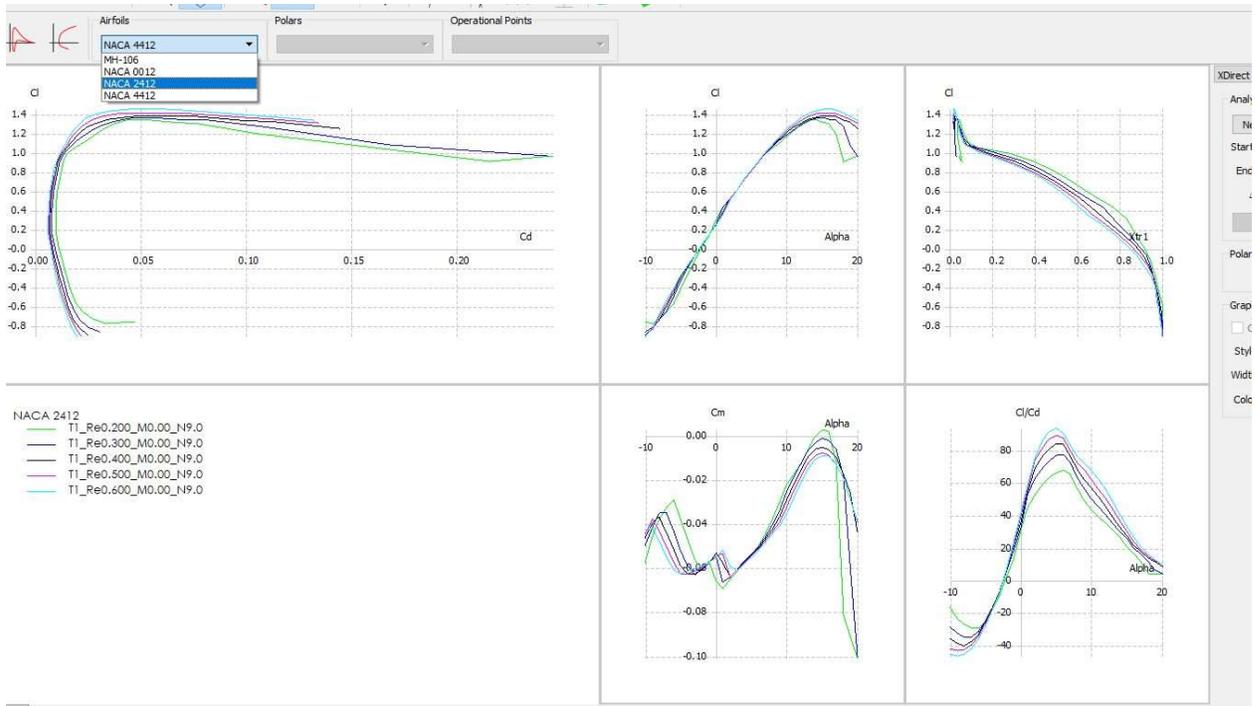


Figura B.6 Graficas de Cl, Cd & Alpha de los 4 perfiles a evaluar con los Re 200000 a 600000.

Tabla B.5 Promedio de los Numero de Reynolds del Perfil NACA 4412.

PROMEDIOS

alpha	CL	CD	Cm	CL/CD
-10	-0.45888	0.072522	-0.07064	-11.8503698
-9	-0.39146	0.064164	-0.07326	-11.3533139
-8	-0.35504	0.04205	-0.09508	-12.8515091
-5.6	-0.21616	0.020084	-0.08848	-9.74645797
-6	-0.14278	0.015962	-0.11694	-8.85404146
-5	-0.02482	0.013564	-0.118	-1.34257098
-4	0.0942	0.0118	-0.11898	8.72041673
-3	0.20898	0.010688	-0.119	20.4950965
-2	0.32068	0.00993	-0.11854	33.3690282
-1	0.42994	0.009274	-0.11768	47.1994141
0	0.54048	0.008288	-0.11678	66.0923432
1	0.65036	0.008258	-0.11574	80.7708789
2	0.75636	0.008836	-0.1144	87.5942651
3	0.86244	0.009502	-0.1132	92.7471156
4	0.96778	0.010232	-0.112	96.5841947
5	1.07152	0.01102	-0.1106	99.2928239

6	1.16934	0.01186	-0.10812	100.515155
7	1.26272	0.012814	-0.10496	100.165905
8	1.34566	0.01424	-0.1002	95.5235378
9	1.39664	0.017048	-0.09046	82.2451623
10	1.4156	0.022008	-0.07764	64.778873
8.8	1.14626	0.0224	-0.05364	41.5733336
12	1.4655	0.033704	-0.06104	44.2338161
13	1.48516	0.041234	-0.05564	36.5849487
14	1.49898	0.050164	-0.05188	30.2540563
15	1.50762	0.060512	-0.04974	25.1354133
16	1.50906	0.07248	-0.04914	20.9359973
17	1.50078	0.08639	-0.05026	17.4284066
18	1.48452	0.102118	-0.05344	14.5649703
19	1.4705	0.118122	-0.05844	12.4660647
20	1.44254	0.13797	-0.0679	10.5075594

	1.50906
0.9	1.358154
menor/mayor	0.97444767
1-?	0.02555233

0.008258 **Cd Max** **100.515155**

Tabla B.6 promedio de los números de Reynolds NACA 2412.

PROMEDIOS

alpha	CL	CD	Cm	CL/CD
-10	-0.86154	0.028814	-0.04794	-33.3423266
-9	-0.80956	0.023378	-0.04104	-36.5832623
-8	-0.71454	0.019732	-0.04006	-37.6527415
-7	-0.59606	0.016824	-0.043	-36.3409504
-6	-0.4644	0.014474	-0.04812	-32.5404712
-5	-0.32446	0.012552	-0.05442	-26.0783181
-3.2	-0.16014	0.009314	-0.04612	-13.7318678
-3	-0.07138	0.009806	-0.06048	-7.21421255
-1.6	0.03266	0.006816	-0.04788	4.0994691
-1	0.14716	0.007708	-0.0574	19.6917821
0	0.26424	0.007416	-0.0564	36.3577024
1	0.39638	0.007602	-0.05954	52.8948392
2	0.5251	0.008056	-0.06316	66.3450624
3	0.62502	0.0086	-0.06076	73.9708304

4	0.72032	0.009294	-0.05728	78.8229555
5	0.81552	0.01014	-0.05396	81.6181305
6	0.90902	0.011338	-0.05062	80.9845535
7	0.99562	0.013272	-0.04662	75.5164166
8	1.07174	0.016162	-0.04138	66.9754091
9	1.14406	0.019078	-0.03562	60.9460216
10	1.20948	0.022032	-0.02904	55.9912705
11	1.26602	0.02552	-0.02202	50.7264327
12	1.31688	0.029794	-0.01578	45.2411252
13	1.35564	0.035174	-0.01014	39.3885071
14	1.37966	0.042166	-0.00582	33.3382546
15	1.3842	0.052056	-0.0039	27.1498977
16	1.37926	0.06443	-0.00498	21.8076221
17	1.3476	0.082026	-0.0108	16.9240702
18	1.26	0.120188	-0.0312	12.1260598
19	1.20948	0.147252	-0.04614	9.2666435
20	1.16476	0.179634	-0.06442	7.28916926

	1.3842
0.9	1.24578
menor/mayor	0.91027308
1-?	0.08972692

0.006816 **Cd Max** **81.6181305**

Tabla B.7 Promedio de los números de Reynolds NACA 0012.

PROMEDIOS

alpha	CL	CD	Cm	CL/CD
-----	-----	-----	-----	
-10	-1.0281	0.021934	-0.01332	-46.8724355
-9	-0.951	0.018902	-0.00838	-50.3121363
-8	-0.87362	0.016386	-0.00282	-53.315025
-7	-0.79464	0.014366	0.00288	-55.3139357
-6	-0.71362	0.012742	0.00826	-56.0053367
-5	-0.62072	0.011274	0.01096	-55.0576548
-4	-0.5031	0.009998	0.00846	-50.320064
-3	-0.3597	0.008938	0.00112	-40.2439024
-2	-0.21906	0.007964	-0.0042	-27.5062783
-1	-0.10614	0.007322	-0.00278	-14.4960393
0	-0.00202	0.00717	0.00098	-0.28172943
1	0.10598	0.007598	0.00372	13.9484075

2	0.2325	0.00848	0.00184	27.4174528
3	0.36626	0.009572	-0.00274	38.2636858
4	0.49972	0.010606	-0.00804	47.1167264
5	0.61626	0.011964	-0.01028	51.5095286
6	0.70814	0.013572	-0.00738	52.1765399
7	0.7889	0.015446	-0.00194	51.0747119
8	0.87008	0.017596	0.00338	49.4476017
9	0.9502	0.020328	0.00842	46.7434081
10	1.02828	0.023498	0.01314	43.76032
11	1.09718	0.027358	0.01828	40.1045398
12	1.14656	0.032374	0.02468	35.4160746
13	1.16406	0.03911	0.03142	29.7637433
14	1.14902	0.051056	0.0322	22.5050924
15	1.09586	0.077314	0.02032	14.174147
12.8	0.87082	0.075372	0.0094	11.5536273
13.6	0.83666	0.093872	-0.0011	8.91277484
18	0.91666	0.170876	-0.03006	5.36447482
19	0.8622	0.207198	-0.05166	4.16123708
20	0.83656	0.239964	-0.0702	3.4861896

	1.16406
0.9	1.047654
menor/mayor	0.74808859
1-?	0.25191141

0.00717 **Cd Max** 52.1765399

Tabla B.8 Promedio de los números de Reynolds MH-106.

PROMEDIOS

alpha	CL	CD	Cm	CL/CD
-----	-----	-----	-----	
-3.2	-0.31302	0.012894	-0.00256	-10.1620609
-7	-0.7051	0.021324	-0.00044	-33.6349079
-6	-0.6218	0.016126	0.00498	-39.1411736
-5	-0.52	0.012786	0.00646	-41.0149969
-4	-0.41878	0.009576	0.0076	-44.0852888
-3	-0.31888	0.008932	0.0106	-36.0803804
-1.6	-0.17478	0.006932	0.01078	-20.3421958
-1	-0.11588	0.008102	0.01636	-14.5483581
0	0.00024	0.008204	0.01672	-0.34594185
1	0.13972	0.008666	0.01186	15.854546

2	0.29014	0.009162	0.0039	31.7509872
3	0.43034	0.009552	-0.00248	45.7088325
4	0.55468	0.00986	-0.00574	57.6447252
5	0.65612	0.010212	-0.00408	66.0590406
6	0.7523	0.010614	-0.00126	72.8417505
7	0.84598	0.011346	0.00184	75.9095054
8	0.93004	0.013264	0.00576	70.7831397
9	1.00548	0.016022	0.0105	63.59125
10	1.07134	0.01926	0.0161	56.6449851
11	1.11298	0.023572	0.02354	48.4158448
12	1.12454	0.029768	0.03024	39.1261826
13	1.11926	0.040494	0.02984	28.4706877
14	1.09826	0.055082	0.02544	20.2155775
15	1.07304	0.071382	0.01942	15.1689223
16	1.0348	0.091784	0.0104	11.3830475
17	0.99068	0.116518	-0.00222	8.64459644
18	0.93534	0.150792	-0.01944	6.51468882
19	0.89452	0.184112	-0.0358	5.07432931
16	0.67554	0.180588	-0.04508	3.03500304

	1.12454	0.006932	Cd Max	75.9095054
0.9	1.012086			
menor/mayor	0.9542035			
1-?	0.0457965			

En la siguiente Tabla B.9 se muestra los criterios de evaluación para la selección del perfil seleccionado.

Tabla B.9 Criterio de evaluación para selección de perfil.

Criterios de evaluación del perfil				
Rango 1-4	NACA 4412	NACA 2412	NACA 0012	MH-106
Max (Cl/Cd)	4	3	1	2
Cd mínimo	1	4	2	3
Cl Max	4	3	2	1
Manufactura	3	1	4	2
Selección de perfil	12	11	9	8
CL/CD MAX	100.515155	81.6181305	52.1765399	75.9095054
Cd mínimo	0.008258	0.006816	0.00717	0.006932
CL MAX	1.50906	1.3842	1.16406	1.12454
Manufactura	3	2	4	1

Anexo C

Una vez que se obtuvieron los parámetros de trabajo del perfil seleccionado, se metieron los datos como se explica en el Capítulo 3 a el programa Spider como la velocidad de diseño, velocidad media, velocidad angular y potencia. Par que posteriormente se obtengan los perfiles y obtener el BEM, y así mismo los datos teóricos y lineales del rotor de la pala y poder dibujar el perfil en SolidWorks.

Tabla C.1 Valores teóricos para el dimensionamiento de la pala mediante la metodología BEM.

r/R	radio local [m]	Cuerda opt [m]	Teta [deg]	lamda local [-]	Fi [deg]	Alfa [deg]	F	a [-]	a' [-]	Solidez [-]
0.15	0.34794	0.29602252	20.38659478	1.242	25.4866	5.1	1	0.33452	0.124794884	0.406216386
0.22083333	0.51225	0.214450346	12.74885941	1.8285	18.9489	6.2	1	0.33417	0.060495689	0.199887699
0.29166667	0.67656	0.172802232	8.619996682	2.415	14.92	6.3	1	0.334	0.035188579	0.121951317
0.3625	0.84086	0.143666572	5.930437678	3.0015	12.2304	6.3	1	0.33388	0.022772871	0.081577739
0.43333333	1.00517	0.123612387	4.153094036	3.588	10.3531	6.2	1	0.33379	0.015899807	0.058716998
0.50416667	1.16948	0.107544297	2.763418741	4.1745	8.96342	6.2	1	0.33373	0.011678742	0.043907347
0.575	1.33378	0.094891407	1.696822585	4.761	7.89682	6.2	1	0.33368	0.008908865	0.033969018
0.64583333	1.49809	0.084874427	0.853946611	5.3475	7.05395	6.2	1	0.33365	0.006999614	0.027050814
0.71666667	1.6624	0.077246581	0.271858083	5.934	6.37186	6.1	1	0.33362	0.005628451	0.022186358
0.7875	1.8267	0.070408592	-0.29103811	6.5205	5.80896	6.1	1	0.33359	0.004613813	0.018403441
0.85833333	1.99101	0.064524169	-0.7632417	7.107	5.33676	6.1	0.95551368	0.33357	0.003841705	0.015473565
0.92916667	2.15532	0.059484878	-1.16490255	7.6935	4.9351	6.1	0.82946627	0.33355	0.003241336	0.013177618
1	2.31962	0.05571515	-1.410643312	8.28	4.58936	6	0.37775697	0.33354	0.002766048	0.011468253

Tabla C.2 Valores teóricos para el dimensionamiento de la pala mediante la metodología BEM (2da parte)

Vel eff. [m/s]	Re	CL	Cd	Cl/Cd max	Cn [-]	Ct [-]	CT	i	error a [-]	airfoil
14.0519509	284911	1.0099	0.0113	89.3717	0.91648	0.42436	0.89047	4	3.3E-06	NACA4412
18.6294536	273636	1.1155	0.0123	90.6911	1.05904	0.3506	0.89005	3	2.9E-05	NACA4412
23.5028031	278174	1.1251	0.01272	88.4513	1.09044	0.27739	0.88978	2	1.2E-06	NACA4412
28.5611337	281047	1.1258	0.01275	88.298	1.10295	0.22603	0.88989	1	0.00021	NACA4412
33.6735192	285100	1.1183	0.01269	88.1245	1.10237	0.18849	0.88973	1	0.00017	NACA4412
38.8462549	286143	1.1194	0.01271	88.0724	1.10771	0.16185	0.88961	1	0.00015	NACA4412
44.0571551	286346	1.122	0.01277	87.8622	1.11311	0.1415	0.88952	1	0.00013	NACA4412
49.2938172	286561	1.1235	0.0128	87.7734	1.11657	0.12527	0.88946	1	0.00011	NACA4412
54.5485959	288609	1.1172	0.01277	87.4863	1.11172	0.1113	0.8894	1	0.0001	NACA4412
59.8166743	288466	1.119	0.01281	87.3536	1.11455	0.10051	0.88935	1	9.1E-05	NACA4412
65.0946929	287684	1.123	0.01289	87.1218	1.11933	0.09162	0.88932	1	8.3E-05	NACA4412
70.3804578	286752	1.1274	0.01298	86.8567	1.12434	0.08406	0.88928	1	7.6E-05	NACA4412
75.6722381	288773	1.1201	0.01293	86.628	1.11754	0.07673	0.88926	1	7.1E-05	NACA4412

Tabla C.3 Geometría del rotor Teórico.

r/R	Radio local [m]	Cuerda opt [m]	Teta [deg]	airfoil
0.15	0.347943477	0.29602252	20.38659478	NACA4412
0.2208333	0.512250119	0.214450346	12.74885941	NACA4412
0.2916667	0.676556762	0.172802232	8.619996682	NACA4412
0.3625	0.840863404	0.143666572	5.930437678	NACA4412
0.4333333	1.005170046	0.123612387	4.153094036	NACA4412
0.5041667	1.169476688	0.107544297	2.763418741	NACA4412
0.575	1.33378333	0.094891407	1.696822585	NACA4412
0.6458333	1.498089972	0.084874427	0.853946611	NACA4412
0.7166667	1.662396614	0.077246581	0.271858083	NACA4412
0.7875	1.826703256	0.070408592	-0.29103811	NACA4412
0.8583333	1.991009898	0.064524169	-0.7632417	NACA4412
0.9291667	2.15531654	0.059484878	-1.16490255	NACA4412
1	2.319623182	0.05571515	-1.410643312	NACA4412

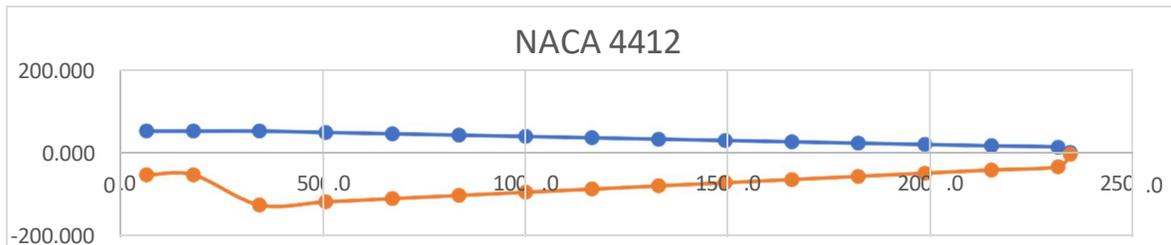


Figura C.1 Perfil linealizado en Excel.

Posteriormente las coordenadas de los perfiles linealizados se meten en el programa SolidWorks, se realizaron varias pruebas de diseño del perfil donde se realizó por diferentes técnicas para dibujar el perfil como se muestran en la figura C.9 y C.10.

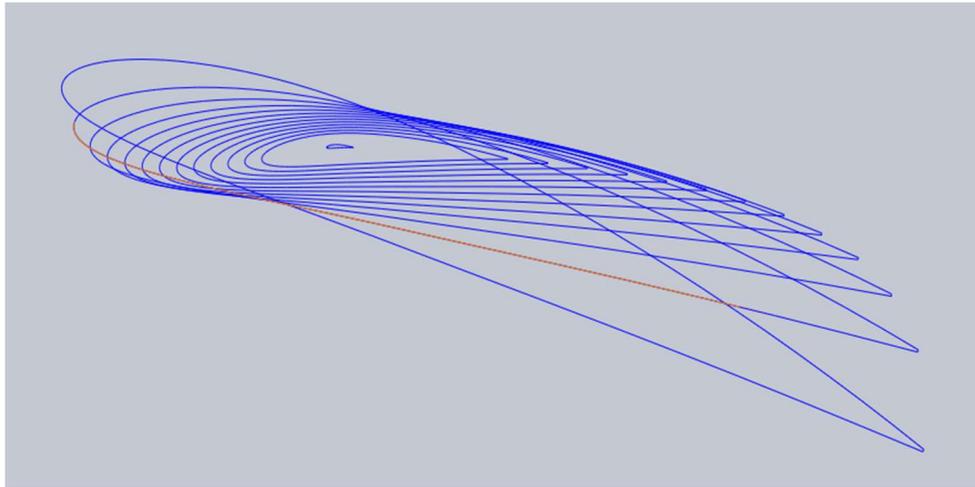


Figura a) Coordenadas adjuntas

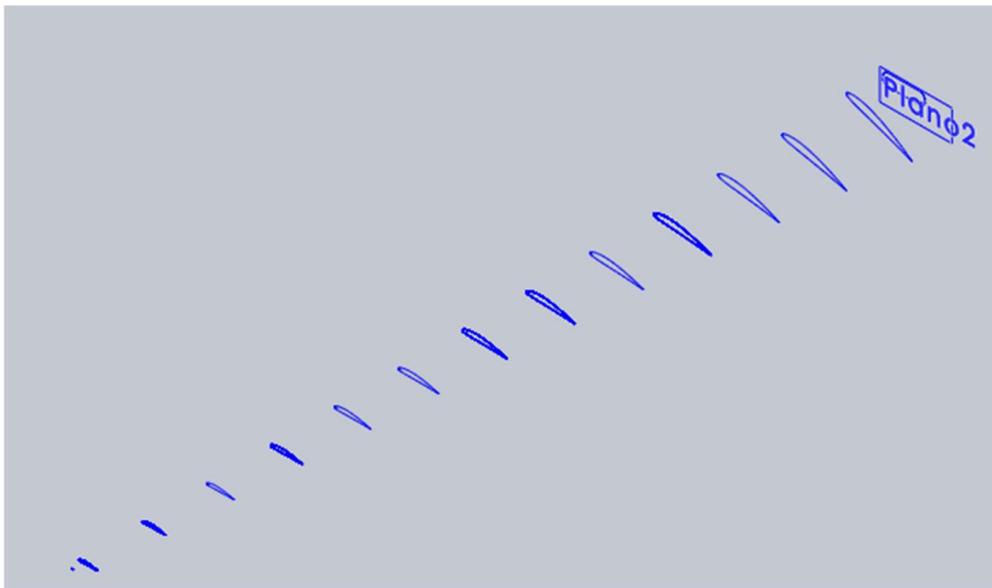


Figura b) Perfiles dibujados en un plano 2da prueba.

Figura C.2 Prueba de perfiles.

En las siguientes figuras (a y b) se muestra el ultimo diseño de prueba que se realizó y se seleccionó para dibujar la pala.

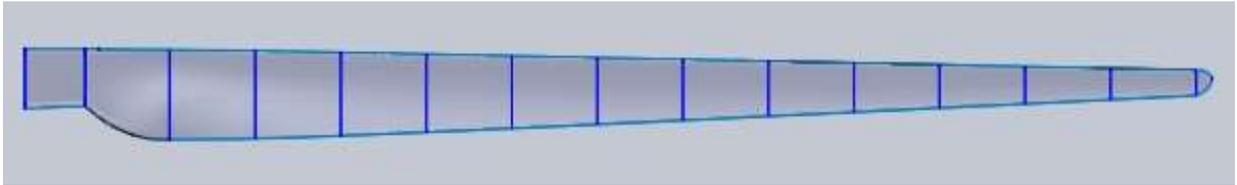


Figura a) Extradós.



Figura b) Intradós.

Figura C.3 Diseño de perfil de alabe linealizado (Extradós e Intradós).