



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS  
RENOVABLES

## TESIS

“METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DE ROTORES  
EÓLICOS”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO  
EN MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS  
RENOVABLES

PRESENTA

**ING. ÁNGEL DE JESÚS RAMOS CIRILO**

DIRECTOR(ES)

**DR. ORLANDO LASTRES DANGUILLECOURT  
M.E.R. ANDRÉS LÓPEZ LÓPEZ**

Tuxtla Gutiérrez; Chiapas

Mayo de 2020





# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

## DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 25 de mayo de 2020  
Oficio No. DGIP/CP/0083/2020  
Asunto: Autorización de impresión de tesis

**C. Ángel de Jesús Ramos Cirilo**  
**Candidato al Grado de Maestro en Materiales**  
**y Sistemas Energéticos Renovables**  
**UNICACH**

**Presente**

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **"Metodología de optimización de rotores eólicos"**, mismo que cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

**RESPECTUOSAMENTE**  
**"POR LA CULTURA DE MI RAZA"**

**DR. RICARDO DAVID ESTRADA SOTO**  
**DIRECTOR GENERAL**



DIRECCION DE INVESTIGACION  
Y POSGRADO

C.c.p. Dr. Pascual Ramos García. Secretario General UNICACH. - Para su conocimiento.  
Lic. Aurora E. Serrano Roblero. Secretaria Académica UNICACH. - Para su conocimiento.  
Dr. Pascual López de Paz. Director del IIIER UNICACH. - Para su conocimiento  
Mtro. Luis A. Hernández Domínguez. Coordinador de la Maestría en MySER UNICACH. - Para su conocimiento.  
Expediente  
\*RDES/igp/rags



Dirección General de  
**Investigación**  
y Posgrado



# Resumen

Una de las partes fundamentales e importantes de los aerogeneradores es el rotor eólico, es donde inicia la captación de energía del viento; el cual, está conformado primordialmente de álabes diseñados aerodinámicamente para permitir el paso del fluido sobre la superficie del álabes, generando la fuerza necesaria para que se haga girar el eje interno del rotor y obtener energía mecánica de rotación. Para el diseño de los rotores eólicos se ha desarrollado métodos aerodinámicos y estructurales.

Se presenta la metodología de diseño aerodinámico- estructural de rotores eólicos desarrollada, con la finalidad de obtener alabes con características esenciales que garanticen el mejoramiento del comportamiento aerodinámico y estructural del rotor. Esta incluye la característica del viento, el diseño aerodinámico, la selección adecuada de perfil o perfiles aerodinámicos y un diseño estructural.

Como resultado se obtiene una metodología que proporciona un equilibrio entre el diseño aerodinámico y estructural del álabes, tomando en consideración ciertos criterios como son: máxima eficiencia, producción de energía adecuada y reducción de costos, este último se ve reflejado en la reducción del espesor del álabes sin afectar drásticamente las características aerodinámicas y la proporción de materiales para su fabricación. Se obtuvo el diseño de un rotor eólico de 10kW, teniendo una longitud de 3 metros y un coeficiente de potencia de 48%.

Esta metodología fue desarrollada tomando varios factores tanto aerodinámico como estructural, enfocándose en ambas para obtener buenos resultados en ambas disciplinas, esto es una ventaja en comparación con trabajos publicados que solo trabajan el diseño de rotores con una disciplina ya sea aerodinámica o estructural; aunque en este trabajo de investigación solo se propone un análisis estructural interno, con eso se puede garantizar la resistencia estructural del álabes.

El presente trabajo está conformado por 5 capítulos; en el primero se encuentra conceptos generales del trabajo de investigación, en el segundo capítulo se fundamenta las teorías aplicadas en el desarrollo de la metodología, en el siguiente capítulo se presenta la metodología desarrollada que está conformada de 3 bloques principales, el cuarto capítulo es el análisis y discusión de los resultados, donde se aplica la metodología desarrollada diseñando un rotor eólico para un aerogenerador de 10kW, por último en el capítulo quinto se presentan las conclusiones por cada objetivo alcanzado y los trabajos a futuros que se pretende realizar.

## **Dedicatoria**

A mis padres Eneyda y Ángel, por su apoyo y comprensión en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos Carlos y Luis por ser un ejemplo de vida y por motivarme a seguir adelante en cada proceso de mi vida; y a mi hermano Alexander por siempre estar conmigo en las malas y las buenas por darme la razón del por qué luchar.

A mis amigos por alentarme a nunca rendirme y ser de gran apoyo en este proyecto.

## **Agradecimientos.**

Agradezco al concejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca No. 498082 otorgada y a la Universidad de Ciencia y Artes de Chiapas, por su apoyo y la facilidad para la realización de este proyecto; así mismo, agradezco a mis directores de tesis, el Dr. Orlando Lastres Danguillecourt y el M.E.R Andrés López López quienes me guiaron y me dieron la atención necesaria para culminar este proyecto. Al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) por el espacio y los recursos brindados para la realización del trabajo de investigación.

# Contenido

Resumen.....	1
Dedicatoria .....	5
Agradecimientos. ....	6
CAPITULO 1 .....	10
GENERALIDADES.....	10
1.1.- Introducción .....	10
1.2.-Antecedentes .....	14
1.2.1.-Diseño aerodinámico .....	14
1.2.2.- Diseño estructural.....	16
1.2.3.- Tendencia .....	17
1.3.- Planteamiento del problema .....	18
1.4.- Justificación.....	18
1.4.1.-Pertinencia .....	18
1.4.2.- Relevancia .....	18
1.5.- Hipótesis.....	19
1.6.- Objetivos .....	19
1.6.2- General.....	19
1.6.2.-Específicos.....	19
CAPÍTULO 2 .....	20
FUNDAMENTO TEÓRICO .....	20
2.1.- Introducción .....	20
2.2.- Conversión de la energía del viento.....	21
2.3.-Perfiles aerodinámicos.....	26
2.4.- Método de BEM Teoría combinada del elemento de alabe .....	28
2.5.- Análisis estructural en rotores eólicos.....	33
2.6- Teoría de laminación clásica (CLT). ....	33
2.7.- Método combinado para el análisis de las propiedades de la sección transversal. ....	34
2.9.- Resistencia ultima a la flexión.....	36
CAPÍTULO 3 .....	38
METODOLOGÍA.....	38
3.1 Diseño aerodinámico. ....	39
3.1.1 Parámetros externos.....	39

3.1.2.- Selección de perfiles aerodinámicos.....	40
3.1.3.-Metodo de diseño.....	41
3.1.4.- Linealización.....	44
3.2.- Diseño estructural.....	46
3.2.1.- Cargas aerodinámicas.....	46
3.2.2.- Propiedades seccionales del álabe.....	49
3.3.- Análisis y comparación de esfuerzos.....	50
3.5.1.- Dimensionado del álabe.....	51
CAPÍTULO 4 .....	53
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	53
4.1.- Diseño aerodinámico .....	53
4.1.1- Parámetros externos.....	53
4.1.2.- Análisis Aerodinámico.....	54
4.1.3.- Método de diseño.....	56
4.2.- Análisis estructural.....	59
4.2.1.- Cargas aerodinámicas.....	60
4.2.1- Propiedades seccionales.....	61
4.3.- Pruebas Experimentales.....	63
4.4.- comparación de resultados.....	64
4.4.1 Diseño aerodinámico .....	64
4.4.2.- Análisis de cargas.....	66
4.4.3.- Análisis de las secciones del álabe.....	68
4.4.4.- Análisis y comparación de esfuerzos .....	69
4.4.5-Simulacion.....	70
4.6.- Dimensionado del álabe.....	73
CAPÍTULO 5 .....	75
CONCUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	75
5.1 Conclusiones.....	75
5.2 Trabajos futuros.....	76





# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1.- Introducción

La eólica es una de las fuentes de energía renovables con mayor auge en la actualidad. Los aerogeneradores son los encargados de aprovechar las corrientes o masas de aire para generar electricidad a través de varios procesos de transformación de la energía, primero se extrae la energía cinética del viento a través de los rotores eólicos, segundo se transforma a energía mecánica rotacional y tercero a través de un generador eléctrico conectado a un eje horizontal del rotor, se transforma en energía eléctrica.[1]

El diseño de los rotores depende de la capacidad de generación del aerogenerador que se clasifican en alta, media y baja potencia. Los aerogeneradores de baja potencia son situados a bajas alturas que no difieren en estructura a los de alta potencia, sin embargo el diseño es más simple y su manufactura más sencilla y rápida, estos aerogeneradores puede tener una importante aportación energética aplicada a zonas urbanas y rurales en generación de energía distribuida[2] [3].

En este apartado se describen los conceptos generales y fundamentales en el desarrollo de este trabajo de investigación, de manera general se describe brevemente que son los rotores eólicos y la ciencia detrás de ellos para garantizar la obtención de álabes eficientes.

#### **Rotores eólicos.**

Se denomina rotores eólicos a toda máquina o ingenio, que transforma parte de la energía del viento en energía mecánica de rotación. A su vez, esta energía mecánica de rotación disponible en el rotor de la máquina y obtenida de la fuente natural que es el viento, se puede transformar en cualquier otro tipo de energía por medio de dispositivos especiales, como por ejemplo en energía eléctrica mediante un generador eléctrico y que entonces se le denomina aerogenerador, o bien en energía de vaivén mediante un mecanismo de biela y manivela, el cual aplica a aerobombas, también se transforma en energía hidráulica para mover un mecanismo hidráulico a cierta distancia llamándose aerohidráulica, o como se hacía antaño esta energía mecánica movía finalmente una muela de piedra que era empleada en moler granos de trigo, llamándose entonces molino de viento, etc. Su denominación más genérica es rotor eólico o aeroturbina [4].

Los rotores se clasifican por su orientación en horizontales y verticales, de estos los más comercializados y utilizados en la actualidad son los horizontales por su alta eficiencia y producción de energía; estos a su vez se clasifican por el número de álabes utilizados, siendo así el tripala (3 álabes) el modelo más implementado.[3]

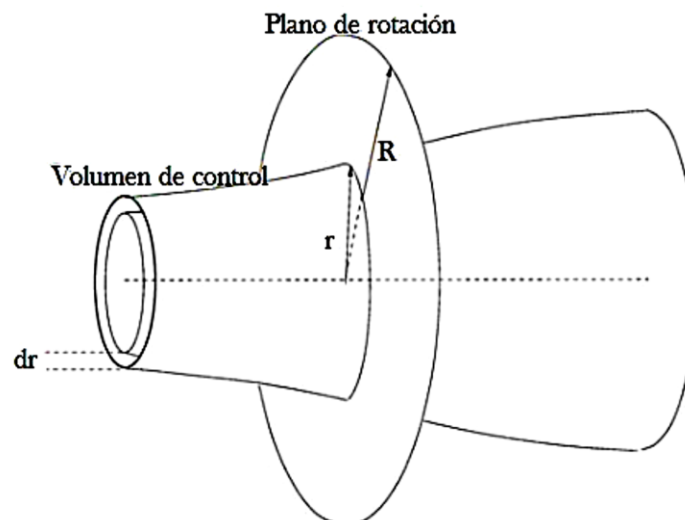
Los álabes son la parte primordial y fundamental de los rotores, son los elementos activos con forma de viga esbelta donde el viento al pasar en la superficie induce las fuerzas aerodinámicas que hacen girar al rotor [5].

### **Aerodinámica de aerogeneradores.**

El funcionamiento adecuado de los aerogeneradores para la extracción de la energía del viento se debe a la geometría aerodinámica de sus álabes; el cual, a través de la aplicación del método de BEM se puede diseñar esta geometría, que comprende dos teorías fundamentales: la primera es la teoría del momento unidimensional que parte de la idea de una turbina ideal, donde se considera que el rotor en este modelo es un disco permeable; en otras palabras, no tiene fricción y no hay componentes de velocidad de rotación por estela. El disco del rotor actúa en un volumen de control circular figura 1.1, desde una velocidad inicial aguas arriba (delante del rotor) hasta aguas abajo (detrás del rotor). La segunda es la teoría de elemento de pala que se basa en el triángulo de velocidades presente en la figura 1.2; se utiliza para calcular las cargas estables, el empuje y la potencia para diferentes configuraciones de velocidades de viento, velocidad de rotación y ángulo de inclinación. El método de BEM combina la teoría del impulso con los eventos locales que tiene lugar en las cuerdas reales del alabe; el tubo de corriente (volumen de control) introducido en la teoría del impulso unidimensional se discretiza en  $N$  elementos anulares de altura “ $dr$ ” (diferencia radial) para determinar las propiedades aerodinámicas de cada segmento obtenido [5] [6].

El método asume los siguientes criterios para los elementos del volumen anular que se presenta en figura 1.1 [6]

- Sin dependencia radial, en otras palabras, lo que sucede en un elemento no puede ser sentido por los demás.
- La fuerza de los álabes en el flujo es constante en cada elemento anular, corresponde a un rotor con un número infinito de álabes.



*Figura 1.1.- Volumen de control en forma de elemento anular.*

Se define un triángulo de velocidades que comprende la interacción del viento con cada elemento del álabe como se puede observar en la figura 1.2.

Del triángulo de velocidades se determinan los siguientes parámetros:

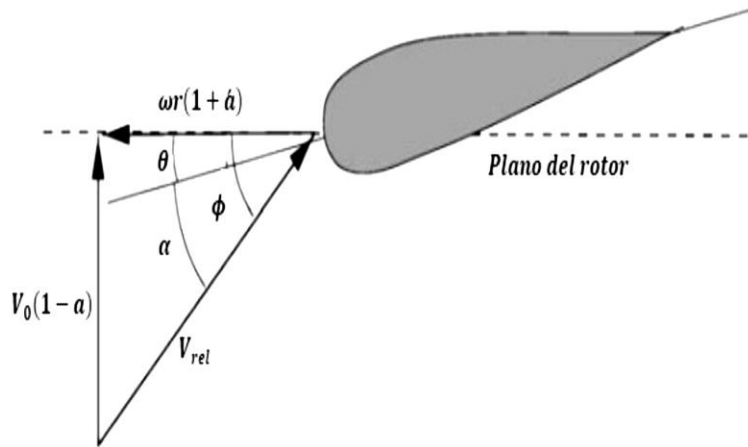


Figura 1.2. - Triángulo de velocidades en el plano del rotor.

- Alpha ( $\alpha$ ), es el ángulo de ataque que se encuentra entre la línea de cuerda y la velocidad relativa.
- Theta ( $\theta$ ), es el ángulo de paso o pitch de la pala, en otras palabras es el ángulo local entre la cuerda y el plano de rotación.
- Phi ( $\phi$ ), es el ángulo entre el plano de rotación y la velocidad relativa.
- Velocidad relativa ( $V_{rel}$ ), vista por una sección del álabe es una combinación de la velocidad axial  $(1-a)V_w$  y la velocidad tangencial  $(1+a')\omega r$  en el plano del rotor.
- Factor de inducción axial ( $a$ ).
- Factor de inducción tangencial ( $a'$ ).
- Velocidad del fluido ( $V_w$ ).
- Velocidad rotacional ( $\omega r$ ).

El método de BEM solo como tal no considera algunas suposiciones, que al acoplarse con algunos métodos corrige imperfecciones de BEM que mejora de manera significativa el proceso de cálculo; estos se describen brevemente [7]:

- Pérdida de punta de Prandtl: corrige la suposición de un número infinito a uno finito de álabes para un rotor, ya que el sistema vortex en la estela difiere en dependencia del número de álabes. Prandtl derivó un factor de corrección F incluido en el proceso de diseño del método de BEM [7] :

El factor F es calculado como:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e - f \quad (1.3)$$

Donde

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \quad (1.4)$$

Donde:

$B$  = es el número de palas.

$R$  = es el radio total del rotor.

$r$  = es el radio local.

$\phi$  = es el ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa.

- Corrección de Glauert: corrige valores altos del factor de inducción axial ( $a$ ) cuando toma valores altos o cercanos a 0.4, la teoría del momento simple no converge. Se pueden hacer diferentes relaciones empíricas entre el coeficientes de empuje y el factor de inducción axial, por ejemplo:

$$C_T = 4a(1 - a)F \quad a \leq \frac{1}{3} \quad (1.5)$$

$$C_T = 4a \left( 1 - \frac{1}{4}(5 - 3a) \right) \quad a \leq \frac{1}{3} \quad (1.6)$$

Donde

$a$  = factor de inducción axial.

$F$  = factor de pérdidas de punta de Prandtl.

### **Análisis estructural.**

Un estudio importante en los rotores eólicos es determinar que el álabe sea resistente a las cargas aerodinámicas que genera el viento; existen métodos para el análisis estructural de los álabes como si se tratase de vigas en cantilibra, que se refiere a la determinación de los efectos de las cargas y la fuerzas internas de la estructura, con la finalidad de garantizar la resistencia del álabe.

Para comprender o estudiar la interacción de las fuerzas sobre el álabe se debe considerar algunos términos mecánicos como son:

- Esfuerzos: el esfuerzo son los diferentes tipos de acciones a las que puede estar sometido un cuerpo, cada una de las fuerzas que actúa sobre una estructura produce en ella un esfuerzo diferente. Dependiendo de cómo actúen las fuerzas, el comportamiento de la materia variará, esta puede causar diferentes deformaciones en los cuerpos: estirarlo (esfuerzo de tracción), aplastarlo (esfuerzo de compresión), doblarlo (esfuerzo de flexión), cortarlo (esfuerzo cortante o de corte), o torcerlo (esfuerzo de torsión).
- Esfuerzo cortante: Es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico como por ejemplo una viga o un pilar. Dicho esfuerzo está impidiendo que el objeto se deforme y así pueda mantener su rigidez, de esta forma, internamente en el acero dentro de una viga (ejemplo), está procurando que no se flexione; lo contrario a ello sería que el peso sobre la viga exceda la resistencia a la flexión del acero y este termine deformándose.

- **Momento de flexión:** Es aquel momento de fuerza que resulta de la distribución de las tensiones sobre un plano perpendicular al eje longitudinal sobre el cual se genera la flexión o sobre una pieza prismática que se encuentra flexionada [8].

## **1.2.-Antecedentes**

En la literatura, se han propuesto diferentes métodos y configuraciones de diseño aerodinámico y estructural. La diferencia en cada configuración de diseño está en la selección de los parámetros de diseño y las herramientas a ocupar para maximizar el proceso de cálculo. A continuación se presentan los trabajos existentes y relevantes en el área de diseños de rotores eólicos, enfocados en el diseño aerodinámico y estructural.

### **1.2.1.-Diseño aerodinámico**

En el diseño aerodinámico de los álabes se implementa el método de BEM como método base del procedimiento por su facilidad de uso y de manipulación, al acoplarlo con otros método ya sea de corrección o numéricos, esta aplicación maximiza el proceso de cálculo como la precisión de los resultados.

El diseño de los rotores eólicos parte del entendimiento de los principios de la aerodinámica, como se mencionó anteriormente uno de los principales y más usado es el método de BEM, que se ha utilizado para diseñar y optimizar el diseño de los álabes del rotor, al combinar con métodos numéricos como por ejemplo el algoritmo genético (GA), además de implementar el método de Viterna para obtener la distribución de los coeficientes de sustentación y arrastre en el régimen posterior al paro, que consiste en extrapolar los coeficientes en el régimen de alta elevación, obteniendo un código para determinar la distribución de la cuerda y ángulo de giro que desarrollaron en [9], obteniendo como resultado un aumento del coeficiente de potencia de un rotor de 0.37% a 0.38%. En el año 2013 [10] con la misma configuración pero con el criterio de aumentar la producción de energía, desarrollaron un método de optimización, para determinadas características del viento con un tamaño de población de 10 realizaron el estudio, logrando obtener aproximadamente un 10% de aumento en la producción de energía. En [11] en el año 2016 presentaron un análisis de optimización detallado de la altura y el diámetro del rotor para una amplia gama de aerogeneradores de baja potencia, utilizando el algoritmo genético; aquí, los valores del diámetro y la altura de la torre se consideran las partes principales del sistema de conversión de energía eólica, que son necesarias para maximizar la potencia de salida. El costo, la geometría específica de la torre y el rotor se seleccionaron para ser las restricciones en este proceso de optimización, en la tabla 1.1 se presentan los resultados obtenidos para dos clases de rotores eólicos, uno de 10kW y otro de 1.5 kW a diferentes configuraciones e instaladas en distintos tipos de terrenos. El orden de cada grupo de 4 datos tabulados es el siguiente: de arriba abajo es primero altura (metros), el segundo diámetro del rotor (metros), el tercero el cociente entre el diámetro y la altura, el cuarto la potencia máxima.

**Tabla 1.1.- Valores óptimos de altura de la torre y el diámetro del rotor para varios tipos de aerogeneradores instalados en diferentes niveles de terrenos, utilizando el enfoque de la ley de potencia.**

Aero\tipo de terreno	Campo abierto	Tierra de cultivo	Agua	Pueblos + suburbios
10kW Autosuficiente	20.033	28.22	16.9	69.22
	10.88	19.5	8.26	10184
	0.543	0.691	0.489	1.471
	0.004	0.013	0.003	0.297
10kW Estándar	87.65	87.65	87.65	87.65
	160.06	160.06	160.06	160.06
	1.826	1.826	1.826	1.826
	0.839	0.839	0.839	0.841
10kW Inclinado	87.65	87.65	79.16	87.64
	160.06	160.06	129.32	160.06
	1.826	1.826	1.634	1.826
	0.810	0.810	0.501	0.812
1.5kW Estándar	30.43	56.54	23.78	87.64
	22.28	69.4	10.5	160.06
	0.732	1.227	0.442	1.826
	0.060	0.537	0.019	2.68
1.5kW Inclinado	19.47	29.82	16.96	87.65
	10.38	21.48	7.94	10.06
	0.533	0.720	0.468	1.826
	0.014	0.055	0.007	2.47

Para lograr obtener los valores óptimos de cuerda y ángulo de torsión, el método de BEM es flexible al unirlo con otros métodos para generar buenos resultados; en 2007 en [12], desarrollaron un método de optimización para maximizar la extracción de energía de los rotores eólicos, así mismo hacer que los aerogeneradores de baja potencia sean de arranque automático. Para lograr estos objetivos se implementó el método numérico de evolución diferencial y el método de BEM del cual se determinan los valores de la cuerda y ángulo de torsión, que forman los genes para la evolución, al incluir la relación de la velocidad de la punta ( $\lambda$ ) como un gen adicional, lograron una mejora de hasta 10% en el coeficiente de potencia. Al igual que la implementación del algoritmo genético, el método de BEM da buenos resultados al unirlo con métodos numérico que en ambas configuración se lograron aumento de los diferentes criterios a optimizar.

Además de utilizar métodos numéricos para mejorar el método de BEM, existen otros métodos que ayudan a obtener valores más exactos que toman otras consideraciones que el BEM; en [13] implementaron un modelo matemático basado en el método de BEM tomando en cuenta la influencia de la estela del plano del rotor en su forma general, esta influencia se considera cuando la relación de la velocidad de la punta es pequeña, lo que justifica el desarrollo de formulaciones que predicen los efectos de la estela en el plano del rotor. El modelo presentado es una extensión del método de BEM, utilizando el modelo de Glauert modificado y el factor de pérdida de punta de Prandtl para el diseño de rotores eólicos. El análisis realizado es la determinación de la potencia del rotor en la región posterior al paro de los álabes, en base a este análisis obtuvieron el dimensionado y un mayor comportamiento de los álabes en esta región, lo que repercute en el aumento del coeficiente de potencia de un rotor del 5%. De igual manera esta corrección de Glauert se utilizó junto con el método de BEM y la corrección de las pérdidas de punta de Prandtl en [14], donde desarrollaron un

método de optimización para el diseño de rotores eólicos definiendo tres criterios a optimizar: coeficiente de máxima de potencia, máxima producción de energía anual y mínimo costo de energía. Utilizaron un túnel de viento para obtención de los coeficientes de sustentación y arrastre de los perfiles seleccionados; al unir estos tres métodos e introducirlo en el software de Matlab para la solución, obtuvieron un diseño de álabes óptimos para un aerogenerador de 10 kW, con un coeficiente de potencia mayor a 0.45.

Parte de la aerodinámica de los rotores eólicos depende de la selección adecuada de los perfiles aerodinámicos, sin un buen perfil o perfiles el método de BEM o los métodos a utilizar para el diseño de rotores no proporcionarían los resultados requeridos; el obtener las características aerodinámicas de los perfiles es fundamental, por ello la utilización de software que realicen este análisis es necesario, como por ejemplo, XFOIL, XFLR5, que son programas especializados en analizar perfiles, pero proporcionan datos para un rango limitado de ángulos de ataque; en [15], implementaron dos métodos para la extrapolación experimental de datos aerodinámicos, el primero es el de Viterna, se formuló basándose en la teoría del flujo potencial y para utilizarse se necesita un conjunto de datos de la superficie aerodinámica, y el segundo es el de Montgomerie que es un poco más complicado que el anterior, tiene mayor precisión y esta formulado en base a la suposición de que existe un comportamiento similar al flujo potencial en una superficie aerodinámica real, alrededor de un ángulo de ataque de  $0^\circ$ . Ambos métodos se utilizaron en el perfil NACA-23012 donde comprobaron la precisión de los dos, obteniendo un análisis completo de los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil.

### **1.2.2.- Diseño estructural**

Para el análisis estructural de los rotores eólicos existen programas que realizan simulaciones del álabes obtenido, aplicando cargas aerodinámicas las cuales se determinan en el proceso de diseño aerodinámico (BEM), o generando estas cargas a través de ciertas condiciones de viento. En [16] desarrollaron un método de optimización de forma aerodinámica – estructural en dos módulos, el primero realiza un análisis aerolástico basado en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para la configuración completa del álabes donde extraen las condiciones de flujo de las secciones del álabes, el segundo realiza una optimización de forma bidimensional de las secciones del álabes para maximizar la relación de sustentación y arrastre en condiciones de flujo de las secciones dadas. El procedimiento es cíclico hasta que la solución converge satisfactoriamente; realizaron pruebas a rotores eólicos de aerogeneradores de referencia como NREL fase VI y NREL de 5 MW, obteniendo como resultado el aumento en el rendimiento aerodinámico de los álabes. Con el uso del CFD se analiza el comportamiento del fluido en interacción con un objeto, y se da solución a las ecuaciones de Navier stoke para analizar los campos de flujo complejos y separados de las superficies de sustentación de perfiles aerodinámicos; en [17], desarrollaron un método de optimización que incorpora GA y CFD para la evaluación de perfiles gruesos. Seleccionaron perfiles con 40% y 35% de espesor como referencia. Optimizaron las superficies de sustentación para maximizar simultáneamente la eficiencia aerodinámica y el grosor del álabes; mejoraron la relación del coeficiente de sustentación y arrastre ( $CL/CD$ ) en un 30% en comparación con las superficies de sustentación de referencia.



Otra manera de realizar un análisis estructural es a través de software de diseño mecánico como es el caso de SolidWorks donde se obtiene el diseño sólido del álabe además de poder realizar análisis estáticos; al combinar este diseño mecánico con ANSYS que es una herramienta que funciona bajo la teoría de elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluido, se comprende la interacción física de la estructura con el fluido, analizando su deformación, concentración de esfuerzos, momentos entre otros. La aplicación de estos programas se implementaron en [18], para el diseño de optimización del contorno aerodinámico, al determinar que éste junto al análisis del rendimiento de los álabes son parte importante para el diseño de rotores eólicos. Con el objetivo del análisis de rendimiento dinámico de la lámina compuesta, propusieron un método de modelado para combinar SolidWord con ANSYS referido a la estructura de capa real.

En [19], desarrollaron un método de optimización de la forma aero estructural para rotores eólicos tomando en cuenta los vientos específicos del sitio para maximizar la producción de energía; el método consiste en utilizar BEM como base en el diseño aerodinámico, en la parte estructural utilizaron modelos estructurales teóricos como es el caso del modelo de viga. Para optimizar la pala tomando en cuenta el análisis estructural utilizaron un algoritmo basado en gradientes ya que tiene mayor idoneidad para resolver problemas con varias variables de diseño. La evaluación demostró que el diseño óptimo depende de la distribución del viento, obteniendo un incremento de producción del 3 al 5%. Así como el modelo teórico anterior propusieron en [20], un método de optimización para rotores eólicos utilizados en sitios de baja velocidad de viento. La teoría del ímpetu del elemento de álabe se usa para evaluar el rendimiento aerodinámico y la teoría clásica de laminado para estimar la rigidez y la masa por unidad de cada sección del álabe, utilizaron un análisis estructural mediante el método de elementos finitos para verificar la resistencia en condiciones extremas de carga. En [21], utilizaron la misma teoría clásica de laminado con una extensión de la teoría de flujo de corte Bredt-Batho (EBSFT), para determinar las propiedades de la sección transversal del álabe compuestas; el modelo considera los efectos de la red de corte y los efectos de deformación de los álabes compuestos, por lo que mejora en gran medida la precisión del cálculo de la rigidez torsional en comparación con los resultados del uso directo de la teoría de laminado 3D.

### **1.2.3.- Tendencia**

En base a la revisión bibliográfica, se puede observar que la problemática que han abordado diversos autores, desde diferentes puntos de vista es el mejoramiento en el rendimiento aerodinámico de los rotores eólicos, tomando en cuenta la resistencia estructural del álabe, en los cuales uno de los avances es la aplicación del método de BEM acoplado a diferentes métodos ya sean numérico como el algoritmo genético que ayuden a definir la configuración adecuada de cuerdas y ángulos del álabe; así como, el uso de software de diseño en los cuales se puedan simular el comportamiento estructural o aerodinámico de los perfiles y álabes obtenidos, esto para mejorar la producción de energía anual y aumentar el coeficiente de potencia.

Parte importante sobre el diseño de los rotores eólicos es tener en cuenta un equilibrio entre tener un álabe robusto que tenga una resistencia estructural alta pero aerodinámicamente no sea bueno, debe existir un balance entre la parte aerodinámica y estructural.

### **1.3.- Planteamiento del problema**

En la actualidad la industria eólica ha crecido notoriamente en las regiones con mayor potencial eólico de México implementándose un gran número de aerogeneradores de gran potencia en campos eólicos. Tanto en grandes aerogeneradores como en los de baja potencia se han registrado fallas técnicas estructurales en los álabes a causa de no contemplar en su diseño los regímenes de vientos característicos de la zona a instalar. Los aerogeneradores de baja potencia además son instalados a menor altura y en zonas con altas rugosidad como las zonas urbanas, por lo que se suman a estos problemas los siguientes:

- Altos costos en la manufactura del dispositivo y en la fabricación de álabes, repercutiendo en la elevación del costo de producción de la energía.
- Eficiencia bajas, debido a que el recurso eólico aprovechable es poco.
- Rendimiento de arranque deficiente.

Los puntos antes mencionados se resumen en encontrar un equilibrio en tres criterios que son: reducción de costos, máxima eficiencia y producción de energía máxima. Que al no realizarse un dimensionado adecuado de cada elemento involucrado en el diseño de rotores eólicos presentará los problemas ya mencionados. Lo anterior sugiere que la metodología de diseño debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- Características del viento.
- Método de diseño aerodinámico adecuado.
- Análisis y selección de perfiles aerodinámicos.
- Análisis estructural interno y externo de los álabes.

### **1.4.- Justificación**

#### **1.4.1.-Pertinencia**

El desarrollo de esta investigación es necesario porque sus resultados contribuyen en la solución de la relación óptima entre un diseño de álabe de alta eficiencia y estructuralmente resistente.

#### **1.4.2.- Relevancia**

Disponer de una metodología de diseño aerodinámico-estructural de rotores eólicos aporta al desarrollo de tecnologías propias de aerogeneradores, al poner a disposición de ingenieros y estudiantes un método práctico y eficiente de diseño.

Se logra una metodología de diseño de álabe de aerogeneradores que vincula en un solo método las características del viento, la aerodinámica de perfiles y el análisis estructural de un álabe simplificando, mejorando sustancialmente el resultado del diseño.

Con el método se facilita el proceso de diseño de rotores eólicos de alta eficiencia, producción de energía adecuada y mínimos costos de manufactura.

Da la pauta para indagar en temas de análisis de estructuras compuestas, análisis de perfiles y el comportamiento aerodinámico en diferentes condiciones de viento.

### **1.5.- Hipótesis**

Una metodología de diseño que acople la optimización aerodinámica con el diseño estructural permite obtener diseños fiables optimizado para máxima producción de energía y mínimo costos de materiales.

### **1.6.- Objetivos**

#### **1.6.2- General**

Desarrollar una metodología de optimización aerodinámica- estructural para el dimensionado de rotores eólicos de baja potencia.

#### **1.6.2.-Específicos**

- Desarrollar una metodología de diseño aerodinámico de álabes.
- Desarrollar una metodología para el análisis de las propiedades seccionales del álabe.
- Analizar y comparar esfuerzos por flexión teóricos del álabe y experimentales.
- Implementar la metodología obtenida para el desarrollo de un rotor eólico de 10kW.

### **1.7.- ESTRUCTURA DE LA TESIS.**

La tesis está estructurada en 5 capítulos:

- Capítulo 1, se presentan las generalidades del tema de investigación como conceptos básicos, estado del arte, planteamiento del problema y objetivos.
- Capítulo 2, se presentan la descripción de las teorías que fundamentan el desarrollo de la investigación.
- Capítulo 3, se detallan los pasos de la metodología desarrollada.
- Capítulo 4, se presenta la aplicación de la metodología en el diseño de un aerogenerador de 10 kW.
- Capítulo 5, se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1.- Introducción

La optimización de rotores eólicos permite obtener un eficiente comportamiento aerodinámico en la extracción de la energía del viento y su transformación en energía mecánica, esto determina el rendimiento del rotor en cuanto a la conversión de la energía. Un rotor eficiente requiere de un mayor diámetro y la energía generada anual es mayor debido a que aprovecha los vientos de baja velocidad; esta condición permite reducir los costos de producción y garantiza que el aerogenerador estará produciendo energía constantemente [22].

El diseño de los rotores eólicos requiere de la participación de diversas disciplinas entre las que destacan la aerodinámica y la dinámica estructural; al desarrollar un acoplamiento entre el diseño aerodinámico y el estructural se generan diseños altamente eficientes, que son de altos costos de producción y no permiten la producción en masa. Los fundamentos aerodinámicos y estructurales para el diseño de rotores eólicos se han desarrollado a lo largo del tiempo, desde modelos experimentales, hasta sofisticados modelo matemáticos que pretenden describir con exactitud los fenómenos físicos en los rotores y así desarrollar geometrías eficientes y de fácil producción [22][23].

Este capítulo trata primeramente sobre la generación de energía; el cual, inicia con la explicación de la conversión de energía, partiendo del entendimiento de la teoría unidimensional o disco actuador, arrojando las ecuaciones que describen la esencia de la teoría, posteriormente se analizan las características de los perfiles aerodinámicos y su forma de selección para su aplicación en los álabes. Para terminar la parte aerodinámica se fundamenta la utilización del método de BEM, arrojando una serie de ecuaciones que forman parte del diseño aerodinámico de la metodología. Posteriormente se fundamenta la aplicación del análisis estructural, en donde se expone una serie de ecuaciones que determinan las propiedades seccionales del álabe para conocer el esfuerzo teórico que este soporta, y por último se presenta la parte teórica de la realización de pruebas experimentales de resistencia por flexión y obtención de esfuerzos, de probetas con diferentes configuraciones de fibra de vidrio y resina.

## 2.2.- Conversión de la energía del viento.

La energía cinética es absorbida por el rotor eólico disminuyendo la velocidad del viento. Asumiendo que la masa de aire que pasa a través del rotor, se separa del contenido total del flujo de aire, entonces la parte separada del campo del flujo sigue a lo largo del tubo de corriente que se encuentra aguas arriba y aguas abajo del rotor. Como el caudal másico es el mismo, para compensar esta pérdida de velocidad, el tubo de corriente se extiende después del rotor como se presenta en la figura 2.1 [24], en otras palabras la velocidad axial de la corriente de aire no disminuye en este proceso, en efecto, permanece constante de acuerdo al principio de la conservación de la energía. La presión de la corriente de aire frente del rotor tiene un valor mayor que la presión atmosférica. El incremento de presión frente al rotor provoca que parte de la corriente libre de aire se desvíe del área barrida por éste. La presión detrás del rotor tiene un valor menor que la presión atmosférica y el flujo en esta zona se expande, la desviación de flujo produce las pérdidas de potencia significativas en el rotor [22].

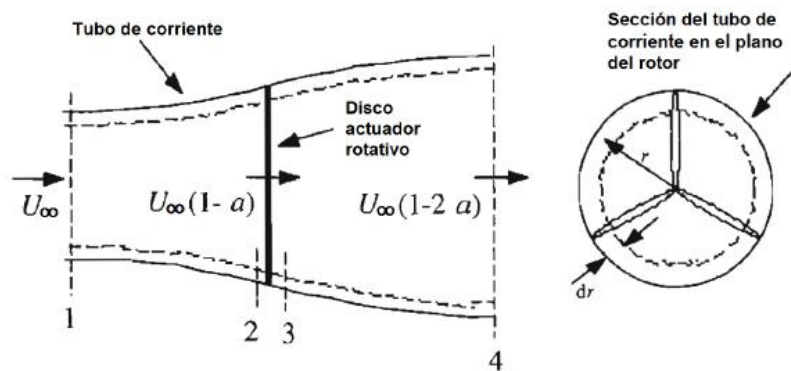


Figura 2.1.- Volumen de control del tubo de corriente del campo de flujo del rotor.

Al aplicar la conservación del momento lineal considerando al rotor como un disco infinitesimal o disco actuador con las siguientes características:

- Tiene un área determinada moviéndose a través de un flujo estacionario.
- Es homogéneo e incompresible y no viscoso.
- Cuenta con un número infinito de álabes.
- Un empuje uniforme sobre toda el área del rotor.
- La estela hidrodinámica sin rotación.
- Presión estática corriente arriba y corriente abajo alejadas del rotor igual a la presión atmosférica.

La mecánica de fluido permite, mediante la combinación de la teoría de cantidad de movimiento y conservación de la masa, aproximar las fuerzas inducidas en el rotor debido a la interacción disco-fluido; la diferencia de presiones entre ambas caras del disco actuador provoca una fuerza neta a lo largo del tubo de corriente [25].

El fluido que atraviesa el disco actuador de la figura 2.2 experimenta una rotación constante a lo largo de la estela; esta rotación dada por el rotor, implica la existencia de una velocidad tangencial, esta transferencia en el movimiento del aire ocurre de manera inmediata a lo largo del espesor del disco [26] [25].

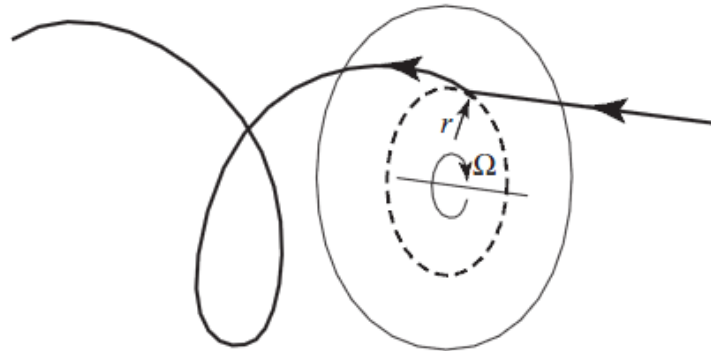


Figura 2.2.- Trayectoria de una partícula de aire que atraviesa el disco.

Con base a la ecuación de Bernoulli, es posible establecer una relación de velocidad y presión para una “corriente arriba” y una “corriente abajo” para el rotor ideal como se presenta en la figura 2.3 [6]. Cerca de la corriente arriba del rotor, existe un pequeño incremento del nivel atmosférico de presión de  $p_0$  a  $p$  antes de una discontinua caída de presión  $\Delta p$  sobre el rotor. En la corriente abajo del rotor, la presión se recupera continuamente al nivel atmosférico [27].

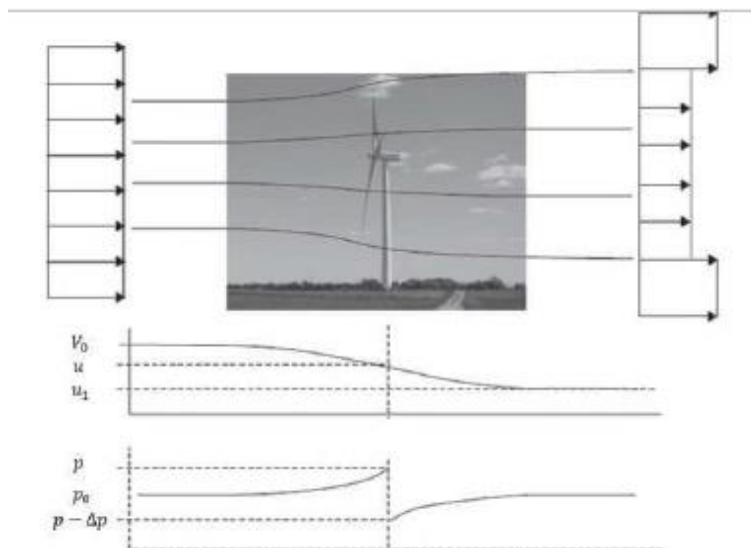


Figura 2.3.- Comportamiento del flujo antes y después de pasar por el plano de rotación del rotor.

En base a esta teoría es posible obtener una relación entre las velocidades de entrada y salida, así como con el empuje y la potencia del rotor. Por lo tanto, la velocidad en el plano del rotor, es la velocidad media del viento  $V_0$  y el valor final en la estela  $u_1$ . En la figura 2.4 se muestra el diagrama del volumen de control alrededor del rotor [27].

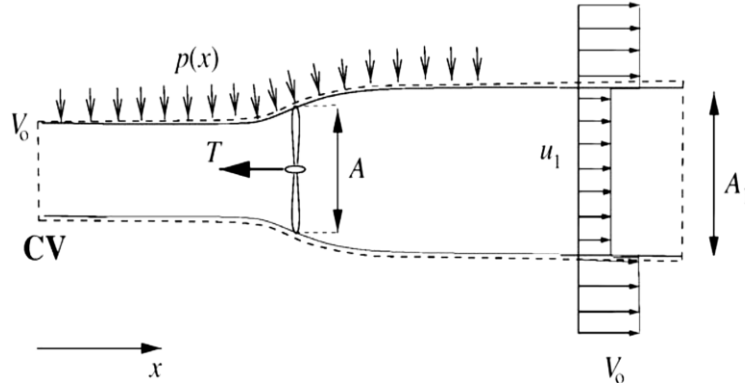


Figura 2.4.- Volumen de control de un rotor eólico.

La fuerza de la distribución de presión a lo largo de las paredes laterales  $F_{pres}$ , es desconocida, por lo que se considera una presión neta. Para este volumen de control, no existe un flujo de masa a través de las capas laterales [25].

Por lo que la ecuación de la fuerza axial se puede expresar de la siguiente manera:

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) + F_{pres} \quad (2.1)$$

Se asume un flujo sin fricción y por lo tanto no hay cambio en la energía interna desde la entrada a la salida y la potencia del eje se puede determinar por medio de la integral de la ecuación de la energía sobre el volumen de control de la figura 2.5 [25] [27].

$$P = \dot{m} \left( \frac{1}{2} V_0^2 + \frac{P_0}{\rho} - \frac{1}{2} u_1^2 - \frac{P_0}{\rho} \right) \quad (2.2)$$

Por lo tanto la potencia se convierte en:

$$P = \frac{1}{2} \rho u A (V_0^2 - u_1^2) \quad (2.3)$$

Se define a la velocidad inducida como  $u_i$ , que es la velocidad que el disco (aspa) rechaza en dirección opuesta a la velocidad del aire.

$$u = V_0 - u_i \quad (2.4)$$

La relación o interferencia del disco al reducir la velocidad incidente, se le denomina factor de inducción axial y se denota como:

$$a = \frac{u_i}{V_0} \quad (2.5)$$

Dejando en función del factor de inducción axial a la potencia y la fuerza axial queda como:

$$P = 2\rho V_0^3 a(1-a)^2 A_r \quad (2.6)$$

$$T = 2\rho V_0^2 a(1-a) \quad (2.7)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido.

$a$  = factor de inducción axial.

$A_r$  = área del rotor.

$V_0^3$  = velocidad del fluido.

La potencia disponible en una sección transversal igual al área barrida por el rotor es [28]:

$$P_{disponible} = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 \quad (2.8)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido.

$A$  = área del rotor.

$V_0^3$  = velocidad del fluido.

El coeficiente de potencia se define de la siguiente manera:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_w^3 A_r} \quad (2.9)$$

Donde:

$P$  = potencia disponible.

$\rho$  = densidad del fluido.

$A$  = área del rotor.

$V_w$  = velocidad del fluido

Así mismo el coeficiente de empuje se define como.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_w^2 A_r} \quad (2.10)$$

Donde:

$T$  = fuerza axial.

$\rho$  = densidad del fluido.

$V_w$  = velocidad del fluido.

$A_r$  = área del rotor.



El rendimiento y el empuje aerodinámico de un rotor eólico al expresarlos en términos del coeficiente de inducción axial, se obtienen los valores máximos para el rendimiento aerodinámico y el empuje ideal de un rotor. El rendimiento aerodinámico será máximo cuando el valor del coeficiente de inducción axial sea igual a  $1/3$ , para esta condición, se tienen un valor máximo del rendimiento del 59.3% que es llamado el límite aerodinámico de Betz, este se ve reducido cuando se toman en cuenta los efectos por rotación de la estela hidrodinámica [29]. El empuje que ejerce un rotor eólico sobre la corriente de aire tiene mucha influencia en el rendimiento aerodinámico, debido a que mientras mayor sea el empuje, se efectúa un mayor bloqueo de la corriente de aire que atraviesa al rotor.

El coeficiente de empuje tiene un valor máximo de 1 cuando la velocidad corriente abajo del rotor es cero y el coeficiente de inducción axial tiene un valor de 0.5, para esta condición de potencia máxima o límite aerodinámico de Betz, el coeficiente de empuje tiene un valor de  $8/9$ .

En la figura 2.5 se presenta esquemáticamente la relación del rendimiento aerodinámico y el coeficiente de empuje en función del factor de inducción axial. La curva azul representa el coeficiente de potencia y se observa que el valor más alto obtenido es el límite de Betz cuando la inducción es 0.333 y la curva roja tiene su pico más alto cuando la inducción es 0.5 afirmando lo antes mencionado.

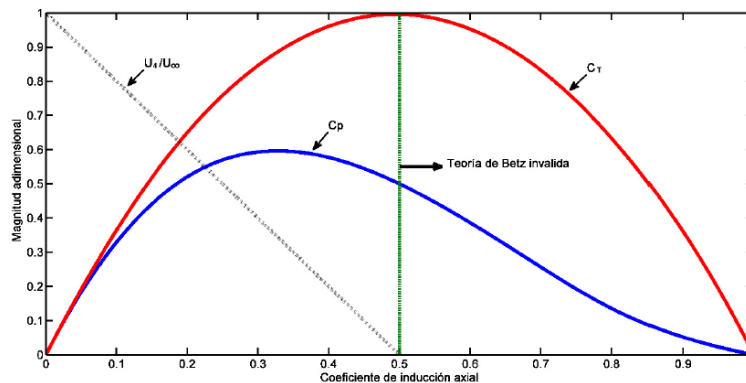


Figura 2.5.-  $C_p$ ,  $C_t$  y  $U_1/U_\infty$  vs coeficiente de inducción axial.

En la práctica existen diversos efectos que reducen el rendimiento aerodinámico máximo que pueden alcanzar los rotores eólicos, pero son de menor escala que la pérdida de rendimiento por desviación de flujo. Algunos de estos son las pérdidas de potencia por rotación de estela, pérdida de potencia por número finito de alabes, pérdidas de punta y raíz y las pérdidas por arrastre aerodinámico en la superficie de los álabes [22] [27].

### 2.3.-Perfiles aerodinámicos

Un perfil aerodinámico es un cuerpo con un diseño determinado, el cual aprovecha al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando este se sitúa dentro de una corriente de aire [30]. Los perfiles generan las fuerzas aerodinámicas en un álabe que son sustentación y arrastre, en dependencia de estas fuerzas se genera la potencia de un rotor eólico[24][17].

Desde punto de vista estructural, el espesor y la distribución de la curvatura son muy importantes. Las superficies de sustentación pueden tener el mismo espesor o valores de diferentes curvatura por diferentes distribuciones. Ambas superficies de sustentación tienen valores de espesor y curvaturas similares. Sin embargo, dado que las distribuciones son diferentes, estos perfiles no se pueden utilizar al mismo tiempo para el mismo álabe; por lo tanto, diferentes perfiles tienen algunas características comunes para usarse juntos en un álabe [31].

El flujo de viento sobre un perfil aerodinámico crea una fuerza distribuida sobre él. Cuando el flujo pasa sobre el lado superior o convexo de la superficie de sustentación, la velocidad de flujo aumenta, lo que disminuye la presión que actúa sobre la superficie. Por otro lado, la velocidad de flujo disminuye cuando pasa sobre la superficie inferior (generalmente cóncava) del perfil aerodinámico y, como resultado, aumenta la presión sobre esta superficie. Además, existe fricción entre el aire y la superficie aerodinámica y la velocidad del flujo de aire disminuye cuando alcanza la superficie aerodinámica. Estas diferencias de presión y fricción crean una fuerza neta y un momento en la superficie de sustentación [24].

La fuerza neta que actúa sobre un perfil aerodinámico se divide en dos componentes como fuerza de sustentación y fuerza de arrastre. La fuerza de sustentación es el componente de la fuerza neta en un perfil perpendicular a la dirección del flujo; la fuerza de arrastre es el componente de la fuerza neta en una superficie de sustentación paralela a la dirección del flujo. El momento que está actuando en un cuarto de la cuerda se llama momento de lanzamiento. Estas fuerzas y cálculos de momento se ilustran en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Sustentación} = L = C_l \frac{1}{2} \rho U^2 c \quad (2.15)$$

$$\text{Arrastre} = D = C_d \frac{1}{2} \rho U^2 c \quad (2.16)$$

$$\text{Momento} = m = C_m \frac{1}{2} \rho U^2 cr \quad (2.17)$$

Donde:

$C_l$  = Coeficiente de sustentación.

$C_d$  = Coeficiente de arrastre.

$C_m$  = Coeficiente de momento.

$c$  = Longitud de la cuerda.

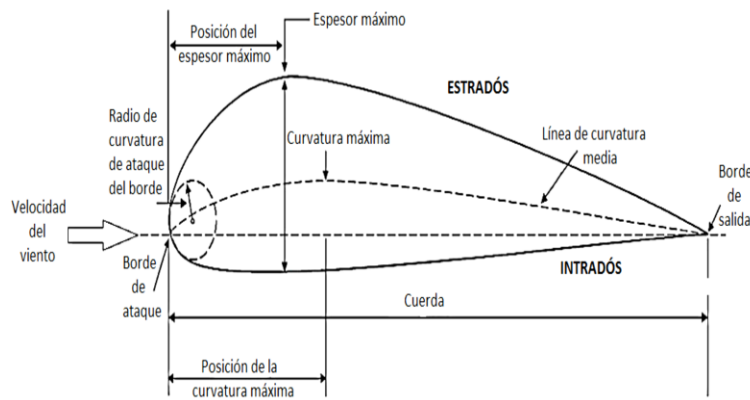
$r$  = Radio de las secciones del álabe.

$U$  = Velocidad del flujo.

$\rho$  = Densidad del fluido.

En la figura 2.6 se presentan las principales variables geométricas de los perfiles aerodinámicos de los cuales resaltan por su importancia los siguientes:

- Borde de ataque.
- Cuerda.
- Espesor máximo.
- Intradós.
- Estradós.
- Borde de salida.



**Figura 2.6.- Geometría del perfil aerodinámico.**

## 2.4.- Método de BEM. Teoría combinada del elemento de alabe

El modelo más usado en el diseño y modelado aerodinámico de rotores eólicos de eje horizontal es el que usa la teoría del elemento de álabe y la teoría del momento. La combinación de estas dos teorías se le conoce comúnmente como modelo combinado o método de BEM y es implementada para obtener las características geométricas de los álabes como son el diámetro del rotor, los perfiles aerodinámicos, la cuerda, el ángulo de ataque y el ángulo de torsión del álabe. En los últimos años, esta teoría ha sido mejorada para la optimización de rotores eólicos con resultados confiables[32]. Algunos problemas que se tienen con este método es la inestabilidad de la convergencia de la solución originada por el cálculo de los coeficientes de inducción axial y tangencial. La convergencia de la solución se da para un intervalo de tolerancia de estos coeficientes de 0 a 0.4 como se puede observar claramente en la figura 2.5 antes presentada, fuera de este intervalo la solución es aproximada a través de correlaciones empíricas [22][33].

El método del momento de elemento de álabe asume que el álabe se puede dividir en pequeños elementos que actúan independientemente de los elementos circundantes y aerodinámicamente se comporta como un perfil bidimensional cuyas fuerzas aerodinámicas se pueden calcular dependiendo de las condiciones locales de flujo y la teoría del momento. El método permite evaluar las fuerzas que se ejercen en cada elemento del álabe, para calcular el torque y la potencia de salida en el eje del rotor en distintas condiciones de operación[34].

En la figura 2.6 se presenta un esquema de la sección transversal de un álabe y las componentes de velocidades que actúan sobre él.

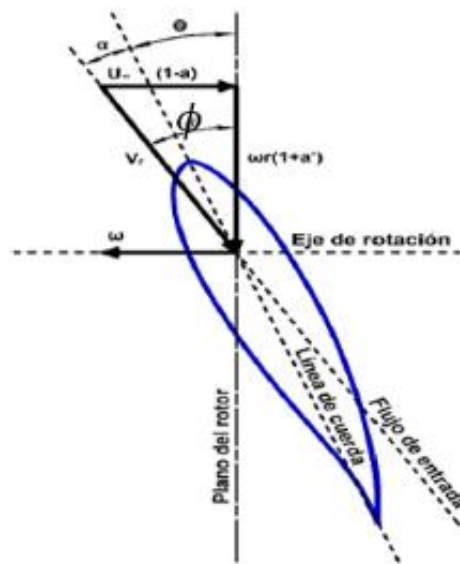


Figura 2.7.- Componentes del triángulo de velocidades de la sección transversal del álabe.

Además de observar la relación entre las velocidades, los coeficientes  $a$  y  $a'$  son los coeficientes de inducción axial y tangencial respectivamente. En la figura 2.7 se esquematizan las fuerzas que se generan al ocurrir el proceso físico del fluido con el perfil aerodinámico, determinando así las fuerzas de sustentación ( $L$ ) y arrastre ( $D$ ); las fuerzas normales ( $P_N$ ) y tangenciales ( $P_T$ ), siendo ésta última la encargada de la rotación del álabe.

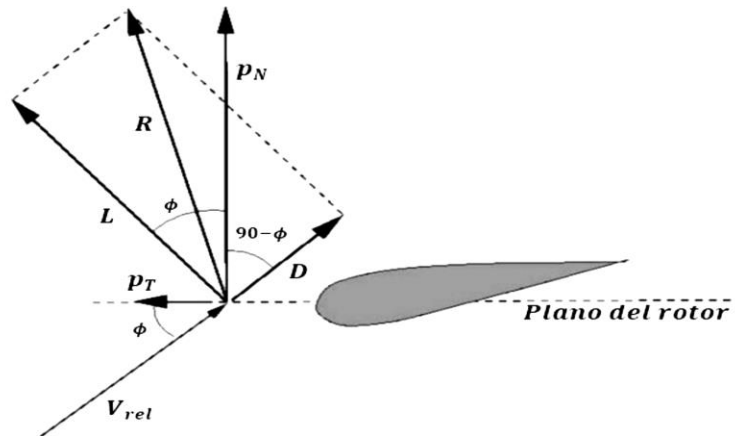


Figura 2.8.- cargas locales sobre el álabe.

Un modelo de diseño preciso requiere considerar detalladamente cada característica relacionada con el dimensionado de álabes. Un factor importante para el diseño de rotores de eje horizontal usando el método de BEM es la determinación de los coeficientes de sustentación y arrastre de los perfiles aerodinámicos que serán empleados en los cálculos. Para un diseño correcto se requiere de una base de datos completa de perfiles aerodinámicos con valores de coeficientes de sustentación y arrastre que consideren efectos tridimensionales y factores de pérdidas [6].

El método de BEM utilizado para el diseño preliminar de rotores eólico de eje horizontal se presenta en las siguientes ecuaciones, tomando como valores fijos a los coeficientes de inducción axial y tangencial e incluyendo el factor de pérdida de punta de Prandtl [6][27].

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2.18)$$

Donde:

$\omega$ =Velocidad angular (rad/s).

$R$ = Radio total del rotor.

$V$ =Velocidad del viento.

$\lambda$ =Relación de velocidad de la punta del aspa con la velocidad del viento o velocidad específica.

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_w}{(1-a')\omega r} \quad (2.19)$$

Donde:

$a$  = factor de inducción axial.

$a'$  = factor de inducción tangencial

$V_w$  = velocidad del fluido.

$\omega$  = velocidad rotacional.

$r$  = radio local

$$\alpha = \phi - \theta \quad (2.20)$$

Donde:

$\theta$  = Ángulo de paso o pitch de la pala, en otras palabras es el ángulo local entre la cuerda y el plano de rotación.

$\phi$  = Ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa

$\alpha$  = Ángulo de ataque.

$$V_{rel} = \frac{V*(1-a)}{\sin \phi} \quad (2.21)$$

Donde:

$V$  = Velocidad del viento.

$a$  = factor de inducción axial.

$\phi$  = Ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa

$V_{rel}$  = Velocidad relativa.

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e - \left( \frac{B}{2} \frac{R-r}{\sin \phi} \right) \quad (2.22)$$

Donde:

$B$  = Número de palas.

$R$  = Radio total del rotor.

$r$  = Radio local.

$\phi$  = Ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa.

$F$  = Factor de pérdida de punta de Prandtl.

$$C_i = \frac{a}{1-a} \frac{8\pi F r_i \sin^2 \phi}{B C_l \cos \phi} \quad (2.23)$$

Donde:

$a$  = factor de inducción axial.

$\phi$  = Ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa.

F= Factor de pérdida de punta de Prandtl.

B = Número de palas.

Cl= Coeficiente de sustentación.

$r_i$ =Radio local inicial.

$c_i$ = Cuerda.

$$Re = \frac{V_{rel}c_i}{\nu} \quad (2.24)$$

Donde:

$V_{rel}$ =Velocidad relativa.

$c_i$ = Cuerda.

$\nu$ = Viscosidad del fluido.

Las ecuaciones anteriores determinan la geometría preliminar del álabe, para poder conocer las propiedades aerodinámicas del perfil seleccionado, se evalúa con el número de Reynolds encontrado en la ecuación 2.24, y seguir el proceso de diseño del álabe. Encontrando los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre se determinan los nuevos valores de los factores de inducción axial y tangencia de la siguiente forma [5][6][26].

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (2.25)$$

Donde:

$\sigma$  = Solidez.

$C_n$  = Coeficiente de fuerza normal.

$\phi$  = Ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (2.26)$$

Donde:

$\sigma$  = Solidez.

$C_t$  = Coeficiente de fuerza tangencial.

$\phi$  = Ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa

Parte importante en el diseño de los rotores eólicos es determinar las cargas aerodinámicas que inciden en el álabe, para ello se utiliza el método de BEM que integra la teoría de elemento de álabe, donde se determina la fuerzas que se generan por cada sección, como se ve reflejado en la figura 2.7. Parte del proceso se presenta con las siguientes ecuaciones:

$$P_n = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (2.27)$$

$$Pt = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (2.28)$$

Donde:

$L$  = Sustentación.

$D$  = Arrastre.

$\phi$  = ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa

$Pn$ =Fuerza normal.

$Pt$ = Fuerza tangencial.

$$C_n = Cl \cos \phi + Cd \sin \phi \quad (2.29)$$

$$C_t = Cl \sin \phi - Cd \cos \phi \quad (2.30)$$

Donde:

$Cd$  = Coeficiente de arrastre.

$Cl$  = Coeficiente de sustentación.

$\phi$  = Ángulo entre el plano del rotación y la velocidad relativa

$C_n$ = Coeficiente de fuerza normal.

$C_t$ =Coeficiente de fuerza tangencial.

$$dT = 4\pi r \rho V_w^2 a(1 - a)Fdr \quad (2.31)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_w \omega(1 - a)a'Fdr \quad (2.32)$$

Donde

$\rho$  = densidad del fluido.

$V_w$ = velocidad del fluido.

$a$  = factor de inducción axial.

$a'$  = factor de inducción tangencial

$dr$  = espesor de los elementos anulares.

$r$  = es la posición radial del volumen de control.

$F$ =Factor de pérdida de punta de Prandtl.

Las ecuaciones de cargas antes descritas forman parte del proceso de diseño de esta tesis, es importante determinar estas cargas aerodinámicas que se ejercen en el álabe, porque posteriormente se usaran para calcular las cargas sobre los ejes de la cuerda necesarios en el análisis estructural propuesto.



## 2.5.- Análisis estructural en rotores eólicos.

Para determinar las propiedades estructurales del rotor eólico, se considera al álabe como una estructura sólida similar a una viga empotrada para realizar el análisis estructural, que en este caso es un análisis estático. Con la aplicación de la teoría de elemento de álabe se determinan las cargas aerodinámicas y los momentos de flexión sobre el álabe. Para comparar dichos cálculos teóricos se utiliza la herramienta de Qblade; es un software especializado en energía eólica específicamente para diseño y simulación de aerogeneradores.

Los álabes de los aerogeneradores están hechos de paredes delgadas con materiales compuestos, de estas capas de paredes delgadas se determinan propiedades de la sección transversal, como la masa por unidad de longitud y la rigidez de la sección del álabe compuesto son información esencial para la dinámica estructural y el análisis de aeroelasticidad del álabe, que a menudo se representa de manera unidimensional en lugar de tridimensional [35]. Sin embargo, debido a la naturaleza intrínseca de los materiales compuestos y la complejidad de las topografías estructurales de los álabes, es bastante difícil obtener las propiedades de la sección transversal del cálculo del álabe [21]. Una de las teorías aplicadas para la determinar los valores de las propiedades de la sección transversal es la teoría de laminación clásica que aunque las aplicaciones sean para álabes huecas con diversas capas de paredes delgadas, en esta investigación se propone este proceso de análisis de propiedades de la sección transversal para álabes sólidas[36] [37].

## 2.6- Teoría de laminación clásica (CLT).

La CLT es una extensión de la teoría clásica de placas a placas laminadas. Las principales suposiciones de la CLT son las hipótesis de Kirchhoff:

- Las líneas rectas que son perpendiculares a la superficie media antes de la deformación permanecen rectas después de la deformación.
- Las normales transversales son inextensibles.
- Las normales transversales rotan de modo que siempre estén perpendiculares a la superficie media.

Las dos primeras suposiciones indican que el desplazamiento transversal es independiente de la coordinación del espesor y que la deformación transversal es cero. El tercer supuesto implica que las deformaciones transversales de corte son cero.

La CLT tiene amplias aplicaciones que incluyen análisis de tensión y deformación de placas laminadas. La validez de esta teoría se ha establecido mediante la comparación de problemas elásticos. En términos de análisis transversal la CLT se puede utilizar para calcular las constantes de ingeniería efectivas de capas en ángulo.

## 2.7.- Método combinado para el análisis de las propiedades de la sección transversal.

Para determinar las propiedades de sección transversal de los álabes, todos los laminados de sección transversal se discretizan en muchos segmentos de área. Cada segmento de área encierra varias capas en ángulo. En primer lugar, los momentos de inercia de cada segmento de área se calculan con respecto a sus ejes locales y centroides; en segundo lugar se transforman a los ejes elásticos y al centro de la sección transversal utilizando la fórmula del eje de transformación y el teorema de eje paralelo. En el siguiente esquema se presentan los pasos de este método para determinar las propiedades de la sección transversal de un álabe sólido.

### 1. Datos de entrada.

Para el inicio de dicha metodología se requieren parámetros de entrada de la sección transversal como son: cuerda, ángulo de torsión y coordenadas del perfil aerodinámico.

### 2. Discretizar la sección transversal en pequeños segmentos de área.

A partir de que se discretiza la sección transversal se calcula el área total del perfil, el cual se determina como la sumatoria de cada segmento de área obtenido como se presenta en la figura 2.8.

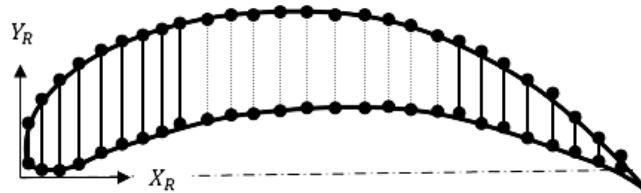


Figura 2.9.- Discretización de la sección transversal del álabe en N segmentos de área.

### 3. Cálculo de momentos de área alrededor de los ejes de referencia.

El cálculo de momentos de área se determina en base a los ejes de referencia Yr y Xr, presentados en la figura 2.8 y se obtienen de la siguiente manera.

$$SXr = \int Yr dA \quad (2.33)$$

$$SYr = \int Xr dA \quad (2.34)$$

### 4. Cálculo del centro elástico.

El centro elástico ( $X_{CE}, Y_{CE}$ ) de la sección transversal también es calculado a través de las siguientes ecuaciones.

$$Xe = \frac{SYr}{A} \quad (2.35)$$

$$Ye = \frac{SXr}{A} \quad (2.36)$$

5. Cálculo de los momentos de inercia de área de cada segmento.  
Los momentos de inercia de área de cada segmento con respecto a los ejes locales, pueden ser calculados usando el siguiente esquema de integración.

$$I_{X_R}^{\bar{s}} = \int \tilde{y}_R^2 dA \quad (2.37)$$

$$I_{Y_R}^{\bar{s}} = \int \tilde{x}_R^2 dA \quad (2.38)$$

$$I_{X_R Y_R}^{\bar{s}} = \int \tilde{x}_R \tilde{y}_R dA \quad (2.39)$$

Donde  $I_{X_R}$ ,  $I_{Y_R}$  y  $I_{X_R Y_R}$  son los momentos de área inerciales y el producto de inercia de cada segmento de área, con respecto a los ejes de referencia correspondientes.  $\tilde{x}_R$  y  $\tilde{y}_R$  son las distancias entre el centroide del segmento y los ejes de referencia.

6. Transferir las fuerzas normal y tangencial a los ejes Flap y Edge.  
Las fuerzas normales y tangenciales de cada segmento de área se transfieren a los ejes Flap y Edge que son generalmente referidos al centro elástico de la sección transversal. Las fuerzas normales y tangenciales se encuentran referidas perpendicular y paralelamente al eje de rotación pero para el análisis de las propiedades seccionales se necesita considerar el ángulo de torsión de cada perfil, y se determina de la siguiente manera.

$$F_{flap} = dF_T \cos(\theta) - dF_N \sin(\theta) \quad (2.40)$$

$$F_{Edge} = dF_N \sin(\theta) + dF_T \cos(\theta) \quad (2.41)$$

7. Obtención de esfuerzos máximos de la sección transversal.  
Al obtener los valores del momento de inercia para cada sección del álabe, es posible calcular los esfuerzos de flexión desarrollado en cada elemento diferencial. En la figura 2.9 se ilustra la distribución de los esfuerzos normales de flexión sobre un elemento diferencial de viga, donde los esfuerzos máximos se alcanzan en la fibra más alejada del eje neutro.  
Para un momento negativo los esfuerzos 1 se encuentran en tensión y los esfuerzos 2 en compresión, C1 y C2 representan la distancia máxima entre el eje neutro de la sección transversal y de sus fibras más alejadas, en las direcciones positivas y negativas respectivamente.

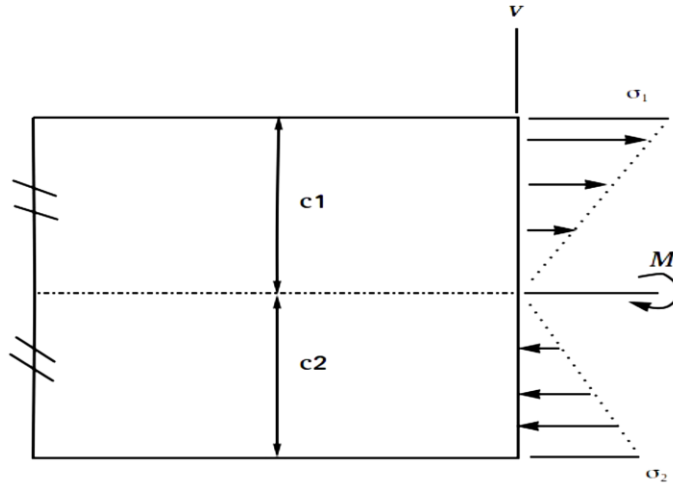


Figura 2.10.- Relación entre el signo de los momento flexionantes y las direcciones de los esfuerzos normales.

Las siguientes ecuaciones determinan los esfuerzos normales en cada eje.

$$\sigma_x = \frac{MFlap * Cx}{Icx} \quad (2.42)$$

$$\sigma_y = \frac{MEdge * Cy}{Icy} \quad (2.43)$$

Donde:

$$MFlap = F_N * r$$

$$MEdge = F_T * r$$

## 2.9.- Resistencia ultima a la flexión.

La resistencia de los materiales compuestos a la flexión, determina de manera experimental el esfuerzo que soporta dicha configuración de fibra y resina; el cual, proporciona información básica de la resistencia de los materiales que se aplican para garantizar la fiabilidad estructural del álabe en funcionamiento.

Para determinar las pruebas experimentales se toma como referencia las indicaciones de la norma ASTM D7264, de manera general este procedimiento consiste en un sistema de flexión en tres puntos, donde se coloca una carga en el centro de una viga (probeta) simplemente apoyada, como se presenta en la figura 2.9.

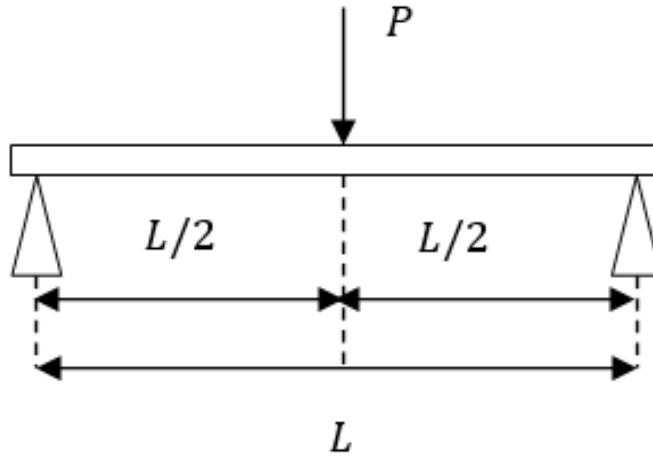


Figura 2.11.- Diagrama de carga del procedimiento en flexión.

La geometría de la probeta es rectangular y las dimensiones se muestran en la figura 2.10, siendo la relación de la distancia entre los apoyos-espesor de 32:1.

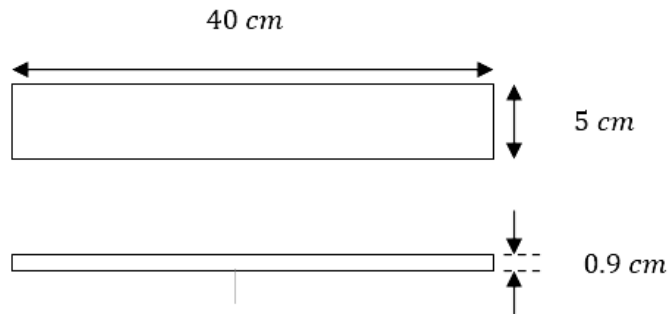


Figura 2.12.- Geometría y dimensiones de las probetas.

El proceso de medición consiste en registrar la carga que se le va aplicando a las probetas, además de ir observando y midiendo la deformación del material, para posteriormente determinar los esfuerzos.

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología desarrollada en 3 bloques; la figura 3.1 presenta el esquema general de la metodología desarrollada, consta de 3 bloques, el primero es el diseño aerodinámico donde se extrae la geometría preliminar del álabe, el segundo bloque es el análisis estructural (diseño estructural), donde una vez obtenida la geometría diseñada se realiza un análisis interno de esfuerzos por cada sección, llamado análisis de propiedades seccionales del álabe que consiste en discretizar el álabe en N segmentos y determinar las propiedades internas de cada sección; por último en el tercer bloque se realiza un comparación de los esfuerzos ejercidos por cada sección y los esfuerzos que soportan cada configuración de material compuesto (fibra-resina) para los álabes.

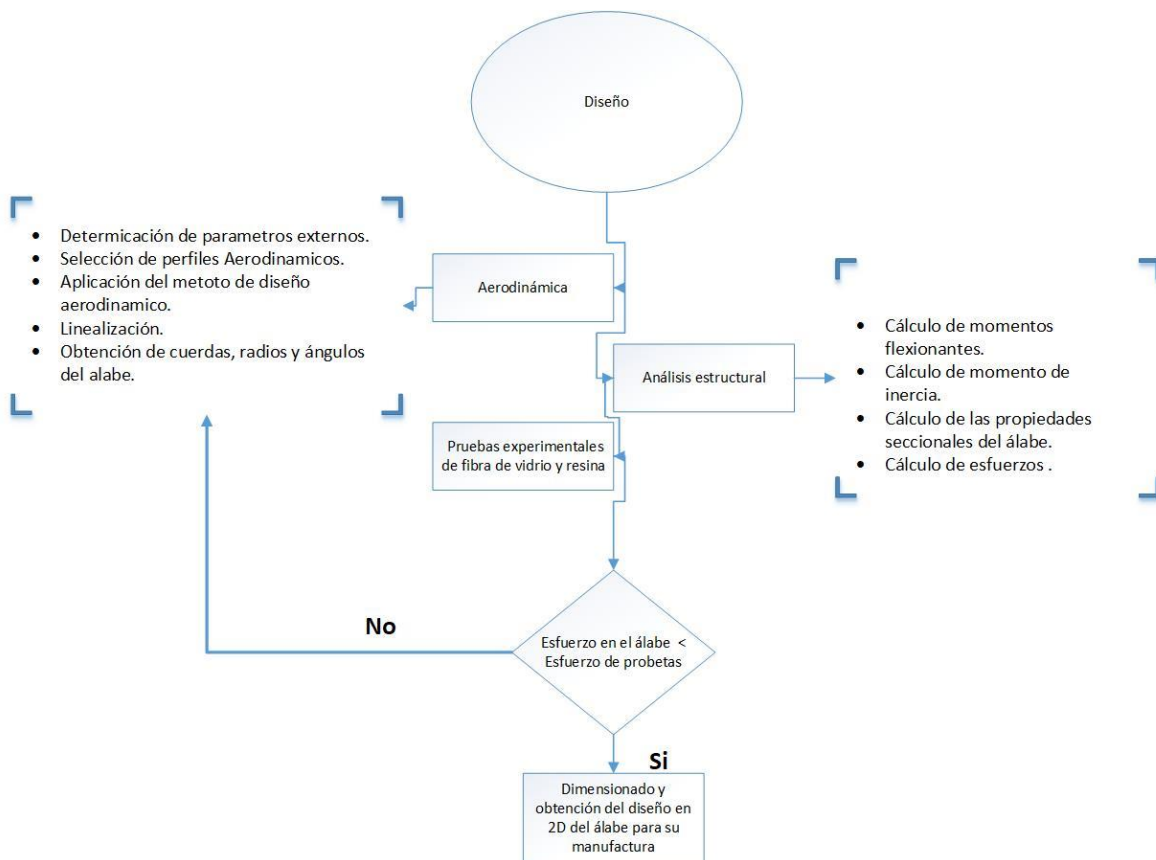


Figura 3.1.- Diagrama general de la metodología desarrollada.

### 3.1 Diseño aerodinámico.

#### 3.1.1 Parámetros externos.

El dimensionado de rotores eólicos es afectado por condiciones o parámetros externos, como el análisis del recurso eólico, la potencia que se requiere extraer y las características del generador a utilizar. La metodología de diseño inicia al determinar las características nominales del aerogenerador que serán los parámetros iniciales del diseño aerodinámico, para ello es importante recopilar información acerca del lugar de instalación, obteniendo la velocidad media anual o velocidad disponible en el lugar, además de tener los datos nominales del generador eléctrico como son, potencia eléctrica, eficiencia y velocidad rotacional.

Para el diseño se debe conocer la potencia mecánica que el rotor eólico debe extraer del viento para suplir la demanda del generador eléctrico, para ello con base a la potencia eléctrica y la eficiencia del generador se obtiene la potencia mecánica (ecuación 3.1).

$$P_m = \frac{P_e}{\eta_g} \quad (3.1)$$

Donde:

$P_e$  = Potencia eléctrica del generador.

$\eta_g$  = Eficiencia del generador.

La velocidad nominal o de diseño ( $V_{diseño}$ ) del viento es dada por la ecuación (3.2)

$$V_{diseño} = 1.4V_{disp} \quad (3.2)$$

Donde:

$V_{disp}$  = Velocidad del viento disponible.

De la ecuación de potencia de un aerogenerador se determina el área y el radio que tendrá el rotor eólico (ecuaciones 3.3-3.5).

$$P_T = \frac{1}{2} \rho V_{diseño}^3 A_T C_P \quad (3.3)$$

$$A_T = \frac{2P_T}{\rho V_{diseño}^3 C_P} \quad (3.4)$$

$$R = \sqrt{\frac{2P_T}{\rho V_{diseño}^3 C_P \pi}} \quad (3.5)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del aire.

$V_{diseño}$  = Velocidad de nominal de diseño.

$C_P$  = Coeficiente de potencia.

Calcular el área de captación del rotor eólico, para ello se necesita el valor del coeficiente de potencia; el cual, es un dato fijo que puede variar según las necesidades del diseñador, al realizar simulaciones con los datos del generador eléctrico para obtener las medidas óptimas que se acople a la demanda energética del generado.

Determinar la velocidad rotacional (rpm) del rotor (ecuación 3.6).

$$rpm = \frac{60\lambda_{diseño}V_{diseño}}{\pi D} \quad (3.6)$$

Donde:

$\lambda_{diseño}$  = Velocidad específica de diseño.

$V_{diseño}$  = Velocidad de diseño.

La relación de velocidad en la punta o velocidad específica se calcula con la ecuación (2.18) del capítulo anterior, tomando los datos de diseño obtenidos.

La velocidad angular (rad/s) del rotor se determina con la siguiente ecuación.

$$\omega_{diseño} = \frac{\pi rpm}{30} \quad (3.7)$$

Donde:

$rpm$  = Velocidad rotacional.

$\pi$  = Valor de pi.

### 3.1.2.- Selección de perfiles aerodinámicos.

Para la evaluación de los perfiles existe el software XFLR5 ® [38] donde se visualizan las características del perfil, así también el XFOIL sirven para evaluar de la misma manera los perfiles aerodinámicos. Se proponen los siguientes pasos para la recolección de datos.

- ❖ Desde el software XFLR5 abrir el perfil a los perfiles a evaluar.
- ❖ Antes de realizar la evaluación, determinar si el perfil cumple con las siguientes consideraciones:
  - I. La forma del perfil debe ser lo más simétrico posible, esto para la hora de construir el molde sea sencillo fabricar dichos álabes.
  - II. Que la terminación en el borde de salida no sea en punta.
  - III. Que el espesor del perfil este entre 7% y 12%. (esto puede variar conforme a las necesidades futuras).
- ❖ Realizar la evaluación por bloques (Batch Analysis), definiendo el intervalo de Reynolds (Re) y de ángulo de ataques ( $\alpha$ ); la selección del perfil depende del comportamiento aerodinámico que esté presente. Se puede visualizar a través de graficas los coeficientes de sustentación (Cl) y de arrastre (Cd) que varían con respecto al ángulo de ataque.
- ❖ Obtener los resultados de la evaluación en formato CSV proporcionado por el software.



- ❖ Determinar el ángulo de ataque óptimo ( $\alpha_{optimo}$ ); el cual, se puede determinar con la mayor relación de (Cl/Cd).
- ❖ Definir el ángulo de ataque óptimo y los valores de Cl, Cd y Cm, los cuales son valores de inicio para el proceso iterativo del método de BEM.

Si no se cuenta con el software adecuado para la evaluación de perfiles, se considera que para ángulo de ataques pequeños, el coeficiente de sustentación se puede obtener a través de la siguiente ecuación.

$$C_l = 2\pi \sin(\alpha - \alpha_0) \quad (3.8)$$

Para valores más grandes del ángulo de ataque (aproximadamente de 10-15 grados), el coeficiente de sustentación asume un valor máximo entre 1.2 y 1.8 aproximadamente, dependiendo de la forma y de Reynolds.

### 3.1.3.-Método de diseño.

En la figura 3.2 se presenta el diagrama del diseño aerodinámico, inicialmente en los pasos anteriores se calcularon los parámetros externo (variables de entrada) como se observa, además de incluir las características aerodinámicas del perfil.

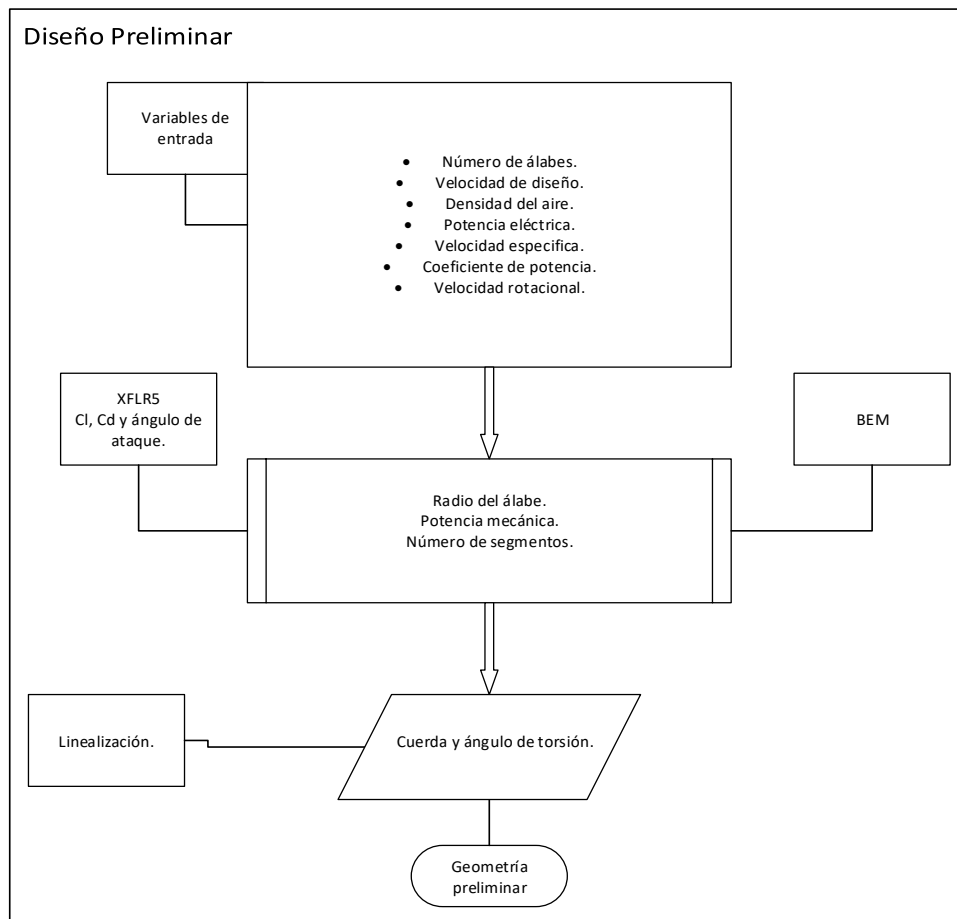


Figura 3.2.- Diagrama del diseño aerodinámico.

Para la aplicación del método de BEM en la tabla 3.1 se resumen los parámetros externos; se considera un radio mínimo (del 15-30% de la longitud del álabe). El proceso iterativo del método de BEM se realizó en la interface de Scilab, que a continuación se presenta.

Tabla 3.1.- Parámetros iniciales del método de BEM.

Variable	Abreviatura
Número de álabes.	B
Velocidad del viento (nominal )	$V_{diseño}$
Ángulo de ataque	$\alpha$
Coefficiente de sustentación	Cl
Coefficiente de arrastre	Cd
Densidad del aire	
Radio del álabe	R
Diámetro del rotor	D
Lambda de diseño	$\lambda_{diseño}$
Velocidad rotacional (Rad/s)	$\omega_{diseño}$
Densidad del aire	$\rho$
Viscosidad del aire	$\nu$
Número de segmentos	N

En el inicio del proceso se define  $N$  y se procede a calcular los siguientes parámetros.

1. Definir la posición radial del álabe denominado radio mínimo ( $r_{min}$ ) o el radio del Hub y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$r_{min} = R(15\%) \quad (3.9)$$

2. Determinar la longitud del álabe a partir de la diferencia entre el radio total y el radio mínimo.

$$L_{\acute{a}} = R - r_{min} \quad (3.10)$$

3. Calcular el incremento radial para cada elemento de la pala con la siguiente ecuación:

$$\Delta_r = \frac{L_{\acute{a}}}{N} \quad (3.11)$$

4. Calcular la relación de las velocidades específica local.

$$\lambda_i = \frac{\omega_{diseño} r_i}{V_{diseño}} \quad (3.12)$$

5. Determinar el ángulo relativo ( $\phi$ ) con la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_i}\right) \quad (3.13)$$

6. Con el valor del ángulo relativo se determina la velocidad relativa.

$$V_{rel} = \frac{V_{diseño}(1-a)}{\sin \phi} \quad (3.14)$$

7. Calcular el ángulo theta ( $\theta$ ), con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \phi - \theta \quad (3.15)$$

$$\theta = \phi - \alpha \quad (3.16)$$

8. Determinar el factor de corrección de Prandtl con las siguientes ecuaciones:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (3.17)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \quad (3.18)$$

9. Determinar la cuerda local con la siguiente ecuación:

$$c_i = \frac{a}{1-a} \frac{8\pi F r_i \sin^2 \phi}{B C_l \cos \phi} \quad (3.19)$$

10. Obtener el número de Reynolds local, a partir de este nuevo valor se evalúa nuevamente el perfil en XFLR5.

$$Re = \frac{V_{rel} c_i}{\nu} \quad (3.20)$$

Con los nuevos valores de los coeficientes de sustentación y arrastre a partir de la evaluación en el software se prosigue con lo siguiente:

11. Calcular la sustentación (L) y arrastre (D) utilizando las siguientes ecuaciones y los nuevos valores de  $C_l$  y  $C_d$ .

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c_i C_l \quad (3.21)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c_i C_d \quad (3.22)$$

12. Calcular los componentes de  $C_n$  y  $C_t$ .

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (3.23)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (3.24)$$

13. Calcular la solidez con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{c_i B}{2\pi r_i} \quad (3.25)$$

14. Calcular los nuevos factores de inducción axial y tangencial con las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi^2}{\sigma c_n} + 1} \quad (3.26)$$

$$\acute{a} = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma c_t} - 1} \quad (3.27)$$

Al terminar este proceso se obtienen los nuevos valores del factor de inducción axial y tangencia, se realizan los mismos pasos para cada elemento del álabe hasta obtener las nuevas cuerdas, ángulos de torsión y Reynolds, generando así el dimensionado del álabe teórico.

### 3.1.4.- Linealización

Los valores de la distribución de las cuerdas y ángulos de torsión son relativamente altos en la zona de la raíz del aspa en el diseño preliminar, es por ello que para corregir estos parámetros con tendencia polinómica se pueden realizar distribuciones lineales. Para la implementación del método de linealización se calculan los parámetros de la función de una recta ( $y = mx + b$ ) que corte los puntos  $(r, c)_{50\%}$  y  $(r, c)_{90\%}$  para la cuerda y  $(r, \beta)_{50\%}$  y  $(r, \beta)_{90\%}$  para el ángulo  $\beta$ .

El inicio del proceso es obtener el valor del largo del álabe a 50% y 90%:

$$r_{50} = (R - r_{min}) * 0.50 \quad (3.28)$$

$$r_{90} = (R - r_{min}) * 0.90 \quad (3.29)$$

Mediante una interpolación lineal se pueden calcular los valores de la cuerda  $[c_{50}, c_{90}]$  y ángulos de torsión  $[\beta_{50}, \beta_{90}]$  para ambos radios locales  $[r_{50}, r_{90}]$ .

$$c_{50} = c(6) + (r_{50} - r(6)) * \left( \frac{c(7) - c(6)}{r(7) - r(6)} \right) \quad (3.30)$$

$$c_{90} = c(14) + (r_{90} - r(14)) * \left( \frac{c(15) - c(14)}{r(15) - r(14)} \right) \quad (3.31)$$

$$\beta_{50} = \beta(6) + (r_{50} - r(6)) * \left( \frac{\beta(7) - \beta(6)}{r(7) - r(6)} \right) \quad (3.32)$$

$$\beta_{90} = \beta(14) + (r_{90} - r(14)) * \left( \frac{\beta(15) - \beta(14)}{r(15) - r(14)} \right) \quad (3.33)$$

A partir de los valores anteriores se determinan la pendiente ( $m_{ci}$  y  $m_{\beta i}$ ) la intercepción ( $b_c$  y  $b_{\beta}$ ) de la ecuación de la recta.

$$m_{ci} = \frac{c_{50} - c_{90}}{r_{50} - r_{90}} \quad (3.34)$$

$$b_c = c_{50} - (r_{50} * m_{ci}) \quad (3.35)$$

$$m_{\beta i} = \frac{\beta_{50} - \beta_{90}}{r_{50} - r_{90}} \quad (3.36)$$

$$b_{\beta} = \beta_{50} - (r_{50} * m_{\beta i}) \quad (3.37)$$

Obtener los valores lineales de las cuerdas y el ángulo de torsión del álabe linealizada con las siguientes ecuaciones:

$$c_{Li} = (m_{ci} * r_i) + b_c \quad (3.38)$$

$$\beta_{Li} = (m_{\beta i} * r_i) + b_{\beta} \quad (3.39)$$

### 3.2.- Diseño estructural

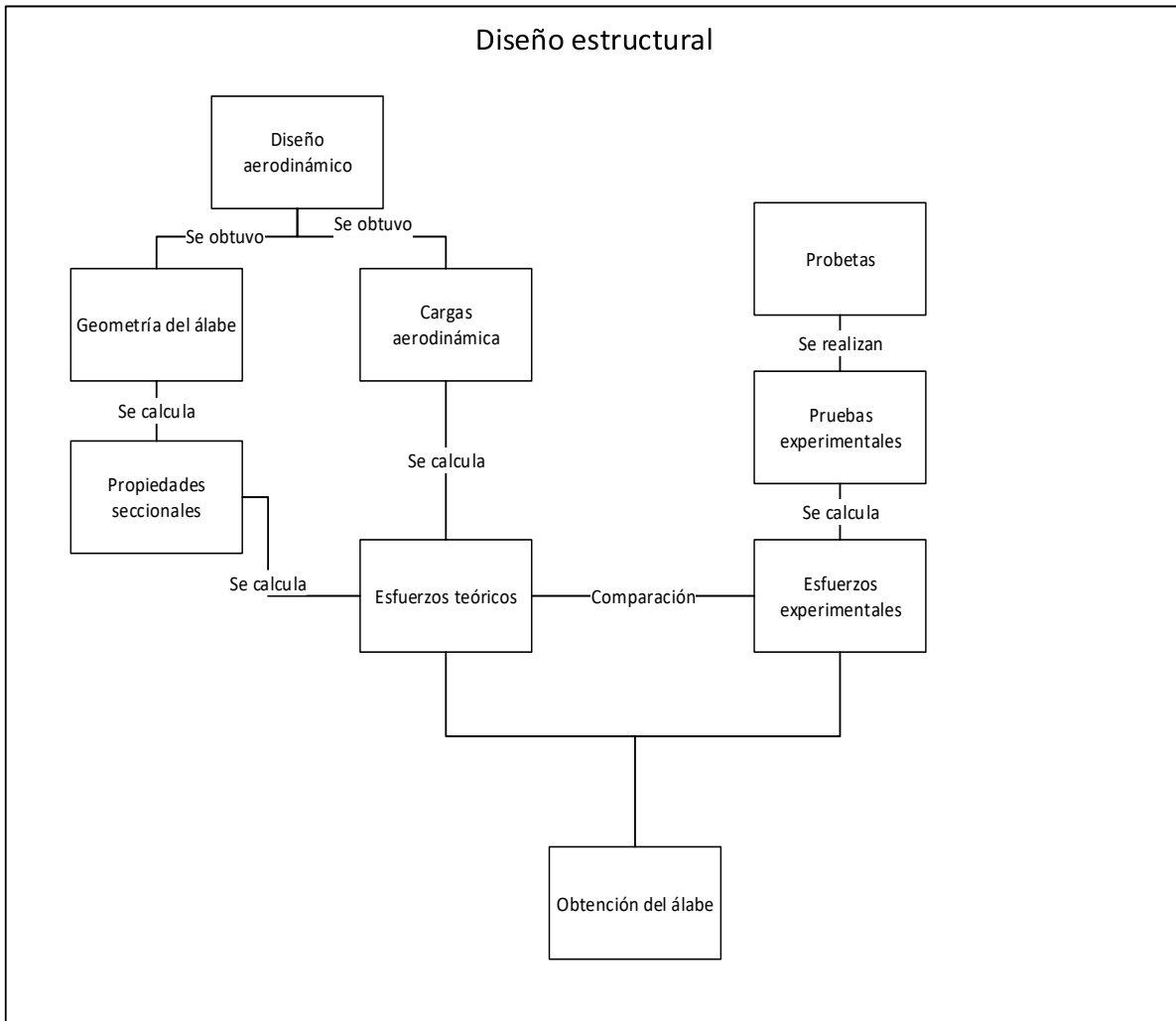


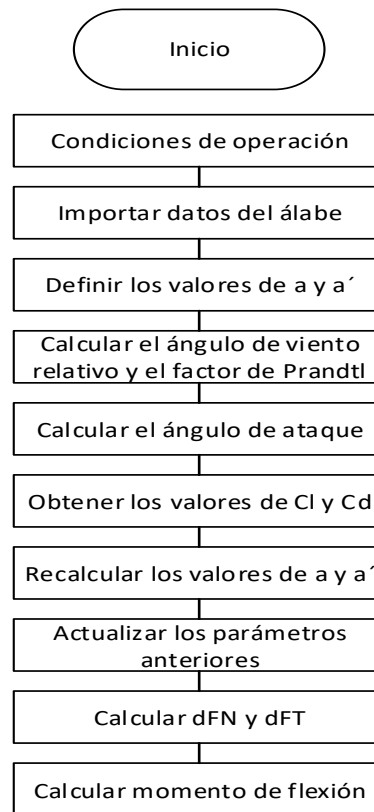
Figura 3.3.- Diagrama general del diseño estructural.

En la figura 3.3 se presenta el diagrama general del diseño estructural que se divide en dos partes; la primera depende directamente de los datos obtenidos del diseño aerodinámico, tomando como datos de entrada la cuerda y el ángulo de torsión para la realización de las propiedades seccionales del álabe; la segunda depende de la realización de probetas de materiales compuestos (fibra de vidrio y resina epoxica) a las que se les realizan pruebas de resistencia a flexión, que se presentará más adelante.

#### 3.2.1.- Cargas aerodinámicas.

En la primera sección antes de realizar el análisis de las propiedades seccionales, se implementó un modelo de carga aerodinámica que como se puede observar en la figura 3.3 parte fundamentalmente del método de BEM con la diferencia que en esta sección es

exclusivamente para determinar las cargas aerodinámicas a diferentes condiciones de vientos; adecuando el proceso iterativo obtenido y complementándolo con los datos del diseño aerodinámico, se presenta el diagrama de flujo de la figura 3.4 que esquematiza el método.



*Figura 3.4.- Diagrama de flujo para el cálculo de cargas aerodinámicas.*

En el diagrama presentado en la figura 3.4 el proceso inicia definiendo las condiciones de operación del rotor eólico, que son; la velocidad de viento a la que se desea analizar, la densidad del aire, la longitud del álabe y la velocidad de rotación; posteriormente se importan los datos del álabe calculado en el diseño aerodinámico, que son; el radio, la cuerda y el ángulo de torsión de cada segmento del álabe.

Para iniciar el método se propone definir los valores de los factores de inducción axial y tangencial; con dichos valores y con un número  $N$  de iteraciones, se calculan el ángulo de velocidad relativa ( $\phi$ ) y el factor de Prandtl con las ecuaciones (3.13), (3.16) y (3.17) respectivamente.

Se determinan el ángulo de ataque con la ecuación (3.14), para obtener los valores del coeficiente de sustentación y arrastre del perfil utilizado, una vez realizado esto, se vuelve a calcular el factor de inducción axial y tangencial con las siguientes ecuaciones.

$$a_{i+1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4F_{p,i} \sin^2(\varphi_i)}{\sigma'(C_{l,i} \cos \varphi_i + C_{d,i} \sin \varphi_i) H}\right]} \quad (3.40)$$

$$a'_{i+1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4F_{p,i} \sin \varphi_i \cos \varphi_i}{\sigma'(C_{l,i} \sin \varphi_i - C_{d,i} \cos \varphi_i) - 1}\right]} \quad (3.41)$$

El parámetro H en las ecuaciones anteriores es usado para situaciones cuando se presentan grandes factores de inducción. Además; en caso de que el factor de inducción axial sea más grande que 0.5, la expresión del coeficiente de arrastre queda de la siguiente manera, cumpliendo las condiciones antes menciona en el capítulo anterior y presentado en la figura 2.5:

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3.42)$$

Necesita ser remplazada por la siguiente expresión:

$$C_T = 0.6 + 0.61a + 0.79 a^2 \quad (3.43)$$

Para una mejor transición, este método es utilizado para situaciones donde el factor de inducción axial es mayor a 0.3539, definiendo así el parámetro H de la siguiente forma.

$$\text{Para } a_{i+1} \leq 0.3539, H = 1$$

$$\text{Para } a_{i+1} > 0.3539, H = \frac{4a(1-a)}{C_T}$$

Obteniendo los nuevos valores de los factores de inducción axial y tangencial, se recalculan los datos mencionado en los pasos anteriores, para finalmente determinar los parámetros de rendimiento para cada elemento del álabe, la fuerza normal ( $dF_N$ ) y la fuerza tangencial ( $dF_T$ ) que se determinan con las siguiente ecuaciones.

$$dF_N = \frac{1}{2} F_p \rho c V_{rel}^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) \quad (3.44)$$

$$dF_T = \frac{1}{2} F_p \rho c V_{rel}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) \quad (3.45)$$

Con las cargas aerodinámicas calculadas se determinan los momentos de flexión con respecto al centro del hub y momento tangencial, del producto vectorial de un vector de posición radial ( $r$ ) con el diferencial de las fuerzas normal y tangencial con las siguientes ecuaciones.

$$F_N = dF_N * r \quad (3.46)$$

$$F_T = dF_T * r \quad (3.47)$$

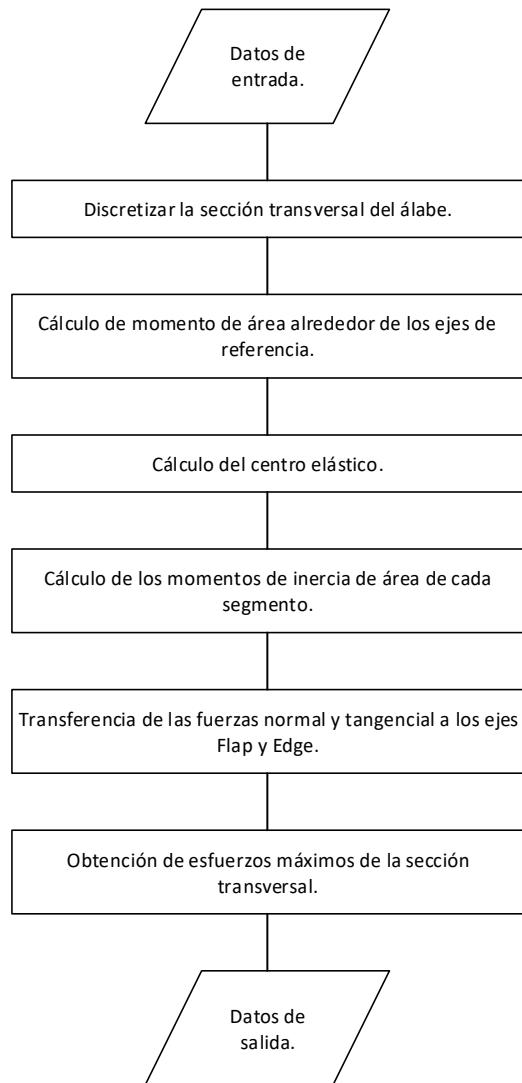


$$M_N = F_N * r \quad (3.48)$$

$$M_T = F_T * r \quad (3.49)$$

### 3.2.2.- Propiedades seccionales del álabe.

Para la obtención de las propiedades seccionales del álabe se implementó la siguiente metodología en la figura 3.4 utilizando las ecuaciones de (2.33) a (2.41).



*Figura 3.5.- Metodología para la determinación de las propiedades seccionales del álabe.*

La figura 3.5 describe los pasos a seguir para determinar las propiedades de cada sección del álabe, obteniendo como datos de salida los esfuerzos ejercidos en cada eje referenciado. El análisis de las propiedades de cada sección del álabe da a conocer la interacción interna de la sección al entrar en contacto con la fuerza ejercida por el viento; con ello se entiende el

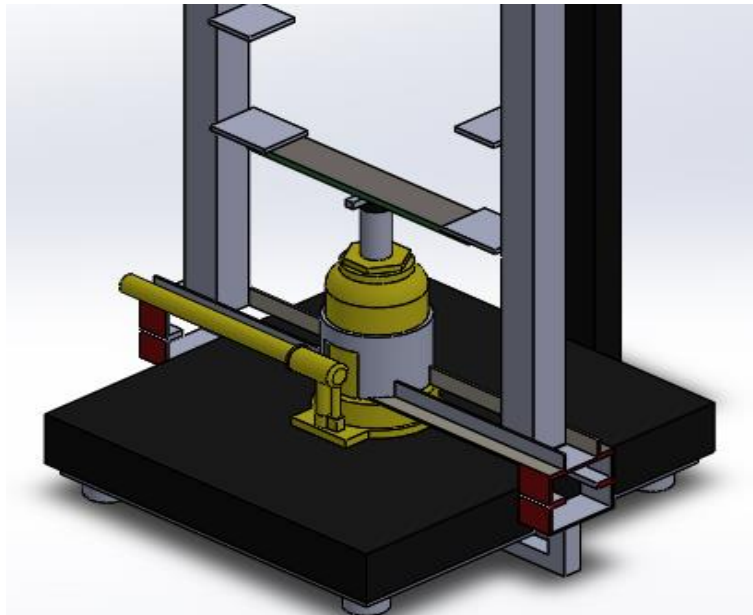
fenómeno físico y se conoce la resistencia de la sección de área, lo cual indica el esfuerzo ejercido por el viento por cada sección analizada del álabe. Como parte de la metodología de diseño la parte estructural presentada es importante ya que al comparar este esfuerzo con la resistencia del material empleado en los álabes, se puede mejorar la configuración del material o modificar el diseño aerodinámico del álabe, para ello se tendría que reducir o ampliar la cuerda que es el parámetro que está relacionado directamente con el espesor del perfil y este con la resistencia estructural.

### 3.3.- Análisis y comparación de esfuerzos.

En la figura 3.3 una parte del diagrama está representado en la realización de probetas con diferentes configuraciones de fibra de vidrio y resina. Para llevar a cabo estas pruebas experimentales se realizaron probetas en base a lo establecido en la norma ASTM D7264.

La obtención de los resultados experimentales se determina a través de la siguiente metodología.

- i. Se realizan probetas de resina con diferentes capas de fibra de vidrio.
- ii. se construyó un banco de pruebas como se presenta en la figura 3.6.



*Figura 3.6.- Banco de pruebas de flexión.*

- iii. Se realizaron pruebas a diferentes intervalos de peso.

La comparación de los esfuerzos se realizan entre el esfuerzo teórico del álabe y el esfuerzo experimental de las probetas, se verifica si el diseño del álabe soporta las cargas aerodinámicas, dado el caso que no, se regresa al diseño aerodinámico a modificar primeramente las dimensiones del perfil aerodinámico, aumentando o disminuyendo el espesor de este, que repercutirá en la modificación de todos los parámetros del diseño aerodinámico y estructural; al obtener los nuevos valores del álabe, se realiza la comparación de esfuerzos, si en dado caso aún no se logra resistir los esfuerzos, se propone probar con otra configuración de resina y fibra de vidrio.

Al obtener el diseño del álabe adecuado, así como la configuración del material (fibra-resina) se pasa al dimensionado del álabe para su diseño en CAD y posteriormente su construcción.

### 3.5.1.- Dimensionado del álabe.

A partir de obtener los parámetros de diseño del álabe se prosigue a dimensionar, para ello se requiere determinar el espesor por cada sección con la siguiente relación.

$$ES_{sección} = C_{lineal}ES_{max} \quad (3.50)$$

Donde:

$ES_{max}$ = Espesor máximo del perfil.

$C_{lineal}$ =Cuerda lineal.

Para dimensionar el álabe se utiliza un método de transformaciones geométricas donde se escala, traslada y rota cada sección del álabe con los datos del perfil aerodinámico, quedando de la siguiente manera:

- Escalado: En esta etapa el perfil toma el valor de la cuerda linealizada; el cual, se obtiene multiplicando cada coordenada polar del perfil por la cuerda.

$$X_{escalado} = X_{Coord}C_{lineal} \quad (3.51)$$

$$Y_{escalado} = Y_{Coord}C_{lineal} \quad (3.52)$$

- Traslado: para calcular el centro de gravedad del perfil, o la distancia del espesor máximo según sea la referencia para realizar dicho proceso; el valor de X en el escalado por el espesor obtenido por cada sección es el valor de la abscisa en el trasladado y para obtener el valor de la ordenada se determinan y fijan los valores de Y en el punto de mayor espesor del perfil.

$$X_{trasladado} = X_{escalado}T_{sección} \quad (3.53)$$

$$Y_{trasladado} = Y_{escalado}\left(\frac{Y_{sup}}{Y_{inf}}\right) \quad (3.54)$$

- Rotado: para determinar los valores de esta etapa se consideran las siguientes ecuaciones:

$$A = D = \cos\left(\frac{\beta\pi}{180}\right) \quad (3.55)$$

$$B = \sin\left(\frac{\beta\pi}{180}\right) \quad (3.56)$$

$$C = -1B \quad (3.57)$$

Con las relaciones anteriores se calculan los valores de  $x$  y  $y$ , de la siguiente manera:

$$X_{rotado} = (X_{trasladado} * A) + (Y_{trasladado} * B) \quad (3.58)$$

$$Y_{rotado} = (X_{trasladado} * C) + (Y_{trasladado} * D) \quad (3.59)$$

Estos pasos se realizan para cada sección de las que se haya dividido el álabe. El valor de las coordenadas en la etapa de rotado, son los que se utilizan para obtener el diseño mecánico en CAD del álabe.

# CAPÍTULO 4

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de aplicar la metodología desarrollada para diseñar un rotor eólico de 10kW de potencia; posteriormente la parte aerodinámica se validó comparando los resultados con el programa HARD y analizando las diferencias en cuestión de potencia y eficiencia, la parte mecánica se validó con las pruebas experimentales de flexión. Se utilizó Qblade para simular el aerogenerador desarrollado y obtener el comportamiento en condiciones de operación.

### 4.1.- Diseño aerodinámico

#### 4.1.1- Parámetros externos.

Para el diseño aerodinámico del rotor eólico se consideran las velocidades de viento predominantes en el Istmo de Tehuantepec, con una velocidad disponible de 8.17 m/s. En la tabla 4.1 se presentan los datos del generador eléctrico, para determinar los parámetros nominales del diseño del rotor eólico.

Tabla 4.1.- Datos del Generador eléctrico.

Descripción	Valor	Unidad
Potencia eléctrica	10000	Watts (W)
Velocidad rotacional	225	rpm
Eficiencia	0.92	[-]

Como primer paso se determina la potencia mecánica que deberá extraer el rotor eólico, con la ecuación (3.1).

$$P_m = \frac{10000}{0.95} = 10,869 \text{ W}$$

La velocidad de diseño se calcula con la ecuación (3.2)

$$V_{diseño} = 1.4(8.17) = 11.44 \text{ m/s}$$

Se determina el área total del rotor con la ecuación (3.4) y el radio con la ecuación (3.5)

$$A_T = \frac{2(10,869 \text{ W})}{\left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{11.44 \text{ m}}{\text{s}}\right)^3} = 30.2 \text{ m}^2 \quad (0.40)$$

$$R = \sqrt{\frac{30.2 \text{ m}^2}{\pi}} = 3.30 \text{ m}$$

Se define el valor de la velocidad angular a través de la siguiente ecuación (3.8).

$$\omega_{diseño} = \frac{\pi(225)}{30} = 23.6 \text{ rad/s}$$

La velocidad específica se obtiene con la ecuación (2.18).

$$\lambda_{diseño} = \frac{(23.6 \text{ rad/s})(3.30\text{m})}{11.44} = 7$$

De esta forma se obtienen los parámetros iniciales del diseño del rotor presentados en la tabla 4.2.

*Tabla 4.2.- Parámetros iniciales de diseño.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia	10,869	Watts
Velocidad rotacional	225	Rpm
Velocidad disponible	8.17	m/s
Velocidad de diseño	11.44	m/s
Velocidad angular	23.6	Rad/s
Densidad	1.225	Kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de potencia	0.4	[-]
Área del rotor	30.2	m <sup>2</sup>
Radio del rotor	3.30	M
Velocidad específica	7	[-]

#### **4.1.2.- Análisis Aerodinámico.**

Parte del inicio del análisis aerodinámico es la selección del perfil aerodinámico el cual se realizó bajo los siguientes criterios de selección:

- Comportamiento aerodinámico: el coeficiente de sustentación no debe aumentar o descender bruscamente a través del ángulo de ataque a diferentes números de Reynolds.
- Espesor: el espesor del perfil sea entre un mínimo de 7% hasta un 18%; esto puede ir variando dependiendo del análisis estructural.
- Fácil manufactura: la terminación en el borde de salida no sea en punta.

La evaluación y selección de perfiles se realizó mediante la utilización del software XFLR5, donde se pudo interactuar con cada perfil evaluado conociendo sus características aerodinámicas. Para el diseño del rotor en este caso se propone utilizar un solo perfil aerodinámico, considerando al perfil A18 smoothed idóneo para el diseño del álabe representado en la figura 4.1.

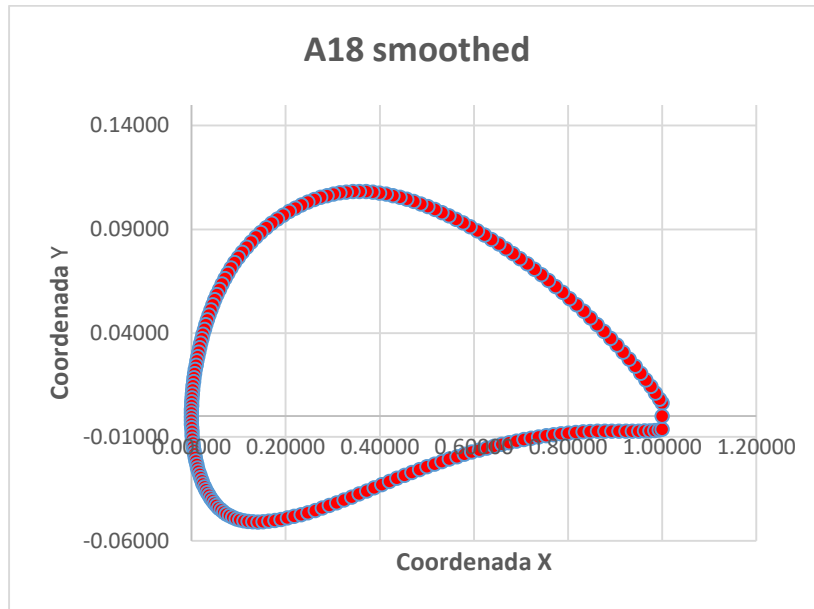


Figura 4 .1.- Perfil obtenido A18.

En la figura 4.2 se presenta el comportamiento del coeficiente de sustentación con respecto al ángulo de ataque a un Reynolds de 500,000, como se observa en la curva de sustentación tiene un comportamiento bueno, al presentar valores altos de  $C_L$  y manteniendo estos valores en un rango amplio de ángulos de ataque.

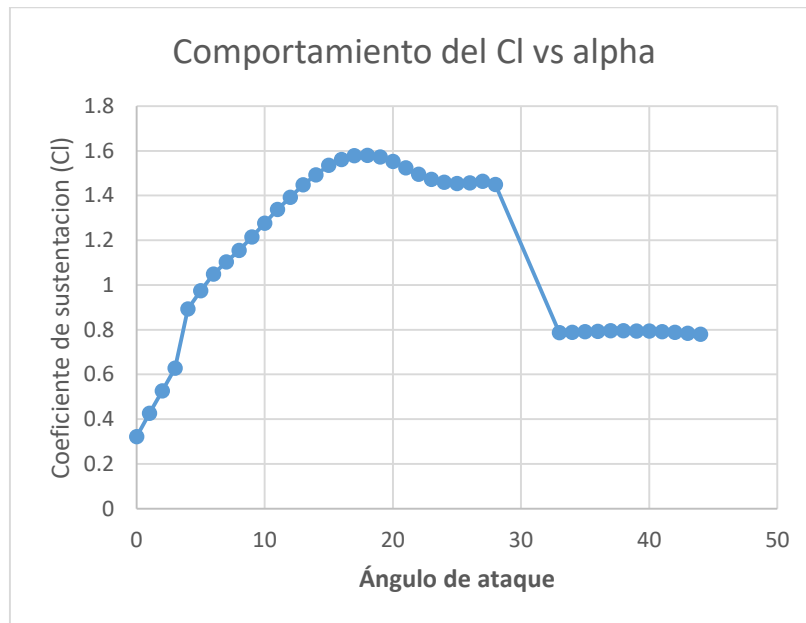


Figura 4.2.- Comportamiento del  $C_L$  vs  $\alpha$ .

### 4.1.3.- Método de diseño.

Tabla 4.3.- Parámetros de entrada para el método de BEM.

Parámetro	Valor	Nomenclatura
Potencia	10,869 W	$P_T$
Velocidad de diseño	11.4 m/s	$V_{diseño}$
Área del rotor	30.2 m <sup>2</sup>	$A_T$
Radio	3.30 m	$R$
Velocidad angular	23.6 rad/s	$\omega_{diseño}$
Densidad del aire	1.225 $\frac{kg}{m^3}$	$\rho$
Viscosidad	0.00001551 $\frac{m^2}{s}$	$\nu$
Número de alabes	3	$B$
Número de secciones del álabe	16	$N$
Velocidad específica	7	$\lambda_{diseño}$
Factor de inducción axial	1/3	$a$
Factor de inducción tangencial	0	$a'$

En la tabla 4.3 se presentan los parámetros de entrada para la realización del método de BEM, se propone un 15% del primer perfil para determinar la posición radial del álabe denominado radio mínimo ( $r_{min}$ ), que se considera desde el centro del Hub y se calcula con la ecuación (3.9).

$$r_{min} = 3.30(15\%) = 0.495m$$

El incremento radial del álabe para cada sección, se calcula relacionando las ecuaciones (3.10) y (3.11).

$$\Delta_r = \frac{3.30m - 0.495m}{16} = 0.18m$$

Para seguir con el proceso de diseño de la metodología se inicia la primera iteración tomando en consideración los parámetros calculados anteriormente.

- ❖ Se determina la velocidad específica o lambda local para cada sección del álabe, a través de la relación de radios.

$$\mu = \frac{0.495m}{3.30m} = 0.15.$$

$$\lambda_i = (7)(0.15) = 1.05$$



- ❖ Con el valor de Lambda se calcula el ángulo relativo ( $\phi$ ) con la ecuación (3.13). se determina el ángulo beta con la ecuación (3.16), tomando el ángulo de ataque óptimo del perfil A18 (smotte) que tiene el valor de  $5^\circ$ .

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1}\left(\frac{1}{1.05}\right) = 32.41^\circ$$

$$\beta = 32.41^\circ - 5^\circ = 27.41^\circ$$

- ❖ Se obtiene la velocidad relativa con la ecuación (3.14).

$$V_{rel} = \frac{11.44(1 - \frac{1}{3})}{\sin 32.41^\circ} = 14.23 \text{ m/s}$$

- ❖ Se calcula el factor de Prandtl con la ecuación (3.17) y (3.18), para la corrección de pérdidas en la punta y se aplica al calcular la cuerda local con la ecuación (3.19).

$$f = \frac{3}{2} \left( \frac{(3.30m - 0.495m)}{(0.495(\sin(32.41^\circ)))} \right) = 15.855$$

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-15.855}) = 0.98$$

$$c_i = \frac{\frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{3}} \left( \frac{8\pi(0.98)(0.495m)\sin^2(32.41^\circ)}{3(0.9743)\cos(32.41^\circ)} \right) = 0.399m$$

- ❖ Se calcula el Reynolds para cada elemento del álabe con la ecuación (3.20).

$$Re = \frac{14.23 \text{ m/s}(0.399m)}{0.00001551} = 366,071$$

Obteniendo el valor del Reynolds local se prosigue a evaluar al perfil aerodinámico con este nuevo valor y determinar los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre correspondiente al ángulo de ataque óptimo. Con estos datos actualizados se prosigue con los siguientes cálculos.

- ❖ Se determinan las fuerzas de sustentación ( $L$ ) y arrastre ( $D$ ) con las ecuaciones (3.21) y (3.22).

$$L = \frac{1}{2} \left( 1.225 \frac{kg}{m^3} \right) (14.23)^2 (0.399m) 0.9743 = 48.21 \text{ N}$$

$$D = \frac{1}{2} \left( 1.225 \frac{kg}{m^3} \right) (14.23)^2 (0.399m) 0.01092 = 0.5403 \text{ N}$$

- ❖ Con las ecuaciones (3.23) y (3.24) se determinan las componentes de las fuerzas normal y tangencial para su uso en el cálculo de los factores de inducción axial y tangencial.

$$C_n = (0.9743) \cos(32.41^\circ) + (0.01092) \sin(32.41^\circ) = 0.8283$$

$$C_t = (0.9743) \sin(32.41^\circ) - (0.01092) \cos(32.41^\circ) = 0.5312$$

- ❖ Se obtiene el factor de solidez con la ecuación (3.25) y se determinan los nuevos valores de los factores de inducción axial y tangencial con las ecuaciones (3.26) y (3.27).

$$\sigma = \frac{(0.399 \text{ m})(3)}{2\pi(0.495)} = 0.3848$$

$$a = \frac{1}{\frac{4(0.98) \sin^2(32.41^\circ)}{(0.3848)(0.8283)} + 1} = 0.3330$$

$$\acute{a} = \frac{1}{\frac{4(.98) \sin(32.41^\circ) \cos(32.41^\circ)}{(0.3848)(0.5312)} - 1} = 0.2531$$

Se culmina el proceso del método de diseño obteniendo para cada segmento del álabe el nuevo valor de los factores de inducción axial y tangencial, modificando los valores de los pasos anteriores.

Del proceso de diseño aerodinámico se obtiene el radio, la cuerda y el ángulo de torsión del álabe para realizar la aproximación lineal utilizando las ecuaciones del (3.28) al (3.39), determinando el 50% y 90% del radio del álabe.

$$r_{50} = 3.30m (0.50) = 1.65m$$

$$r_{90} = 3.30m (0.9) = 2.97m$$

Utilizando el método de interpolación para calcular los valores de la cuerda y el ángulo de torsión al 50 % y 90 % del álabe. En este caso se toman 16 datos que el número de segmentos del álabe.

$$c_{50} = 0.216m + (1.65m - 1.617m) * \left( \frac{0.196m - 0.216m}{1.804m - 1.617m} \right) = 0.2122m$$

$$c_{90} = 0.125m + (2.97m - 2.926m) * \left( \frac{0.118m - 0.125m}{3.113m - 2.926m} \right) = 0.1237m$$

$$\beta_{50} = 9^\circ + (1.65m - 1.617m) * \left( \frac{7.88^\circ - 9^\circ}{1.804m - 1.617m} \right) = 8.802$$

$$\beta_{90} = 4.13^\circ + (2.97m - 2.926m) * \left( \frac{3.76^\circ - 4.13^\circ}{3.113m - 2.926m} \right) = 4.045$$

Se determinan los siguientes componentes

$$m_{c1} = \frac{0.2122m - 0.1237m}{1.65m - 2.97m} = -0.0671$$

$$b_{c1} = 0.2122m - (1.65m(0.0671)) = 0.3228$$

$$m_{\beta i} = \frac{8.802 - 4.045}{1.65m - 2.97m} = -3.5237$$

$$b_{\beta 1} = 8.802 - (1.65m(-3.5237)) = 14.621$$

Los valores lineales de la cuerda y el ángulo de torsión se obtienen de la siguiente manera.

$$c_{L1} = (-0.0671(0.495)) + 0.3228 = 0.290m$$

$$\beta_{L1} = (-3.5237(0.495m)) + 14.621 = 12.72^\circ$$

Se determina el valor de la cuerda que tendrá la raíz, utilizando el espesor máximo del perfil multiplicado por la cuerda máxima.

$$Raiz = 2(0.290m)(0.27) = 0.156m$$

Con los nuevos valores de la cuerda se modifican los datos del método BEM, resolviendo para datos lineales. Con la obtención de esto datos se obtiene el diseño aerodinámico para su análisis estructural como se muestra en la metodología.

#### 4.2.- Análisis estructural.

En esta etapa de la metodología se determinan las cargas aerodinámicas como se muestra en el esquema de la 3.4. En este proceso se optó por separar del método de BEM de la parte de cargas para obtener el comportamiento del rotor eólico a diferentes velocidades de viento.

#### 4.2.1.- Cargas aerodinámicas.

Para iniciar el cálculo de las cargas se determinan las condiciones de operación.

Tabla 4.4.-Condiciones de operación para determinar cargas aerodinámicas.

Parámetro	Valor	Nomenclatura
Velocidad del viento de diseño	11.44 m/s	$V_0$
Densidad del aire	$1.225 \frac{kg}{m^3}$	$\rho$
Radio del álabe	3.30 m	$R$
Número de álabes	3	$NB$
Velocidad específica	7	[-]
Número de segmentos	16	[-]

En la tabla 4.4 se presentan los datos requeridos para evaluar y calcular las cargas aerodinámicas del álabe. A través de un archivo CSV (anexo A) se extrae del diseño aerodinámico los valores del radio, la cuerda y el ángulo de torsión lineales para seguir con los cálculos. Se inicia definiendo los valores de los factores de inducción axial y tangencial, dando el valor de  $a=1/3$  y  $a'=0$ .

Se obtiene el ángulo del viento relativo a través de la siguiente ecuación.

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\left(1 - \frac{1}{3}\right) 11.44m}{\frac{s}{(1-0)24.266rad}} \right) = 36.01^\circ$$

$$\frac{s(0.495m)}{s(0.495m)}$$

Se calcula el factor de Prandtl con las ecuaciones (3.17) y (3.18).

$$f = \frac{3}{2} \left( \frac{(3.30m - 0.495m)}{0.495(\sin(36.01^\circ))} \right) = 15.855$$

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-15.855}) = 0.99$$

Con los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre definidos por las características del perfil (anexo B), se recalculan los valores de los factores de inducción axial y tangencial; se calcula el parámetro de solidez.

$$\sigma' = \frac{3(0.290m)}{2\pi(0.495)} = 0.279$$

$$a = \frac{1}{\left(1 + \frac{4(0.99) \sin^2(36.01^\circ)}{0.279(0.973 (\cos 36.01^\circ) + 0.011 (\sin 36.01^\circ))}\right)} = 0.22$$

$$\dot{a} = \frac{1}{\frac{4(.98) \sin(36.01^\circ) \cos(36.01^\circ)}{0.279(0.973 (\sin 36.01^\circ) - 0.011 (\cos 36.01^\circ))} - 1} = 0.075$$

Finalmente se determinan los parámetros de rendimiento para cada elemento del álabe. La fuerza normal y la fuerza tangencial con respecto a la cuerda que se determinan de la siguiente forma con las ecuaciones (3.44) y (3.45) respectivamente.

$$dF_{Nc} = \frac{1}{2} 0.99 \left( 1.225 \frac{kg}{m^3} \right) 0.290m \left( \frac{14.32m}{s} \right) (0.973 \cos 5^\circ + 0.011 \sin 5^\circ) = 49.57N$$

$$dF_{Tc} = \frac{1}{2} 0.99 \left( 1.225 \frac{kg}{m^3} \right) 0.290m \left( \frac{14.32m}{s} \right) (0.973 \sin 5^\circ - 0.011 \cos 5^\circ) = 17.00 N$$

Se obtiene la distribución de momentos flexionantes con las ecuaciones (3.46)- (3.49).

$$F_N = 49.57N(0.495) = 24.53N$$

$$F_T = 17.00N(0.495) = 8.415N$$

$$M_N = 24.53N(0.495) = 12.14Nm$$

$$M_T = 8.415N(0.495) = 4.16Nm$$

#### 4.2.1- Propiedades seccionales.

Para el análisis de las propiedades seccionales del álabe, primeramente se introduce con un formato CSV las coordenadas del perfil aerodinámico (anexo C). Se prosigue a discretizar el perfil en pequeños segmentos de área, obteniendo el valor del área total.

$$\text{Área} = 0.0010556 m^2$$

El momento de área se determina en base a los ejes de referencia representados en la figura 2.8, y multiplicado por el diferencial de área de cada segmento, obteniendo el valor del momento de área de cada eje de referencia con las ecuaciones (2.33) y (2.34).

$$SXr = 0.0000067 m^2$$

$$SYr = 0.0000445 \text{ m}^2$$

Con los datos anteriores se determina el centro elástico (centroide) de la sección transversal con las ecuaciones (2.35) y (2.36).

$$CXe = \frac{0.0000445 \text{ m}^2}{0.0010556 \text{ m}^2} = 0.0421272 \text{ m}$$

$$CYe = \frac{0.0000067 \text{ m}^2}{0.0010556 \text{ m}^2} = 0.0063387 \text{ m}$$

El cálculo de los momentos de inercia de área de cada segmento se obtiene al multiplicar el valor de los ejes de referencia; es decir, son las distancias entre el centroide del segmento y los ejes de referencia de la sección, y se obtienen con las ecuaciones (2.37), (2.38) y (2.39).

$$Icy = 0.0000006 \text{ m}^4$$

$$Icx = 8.17 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$Icxy = 6.387 \times 10^{-09} \text{ m}^4$$

Se determinan la distancia máxima entre el eje neutro de la sección transversal y sus fibras más alejadas esquematizadas en la figura 2.10.

$$Cx = 0.0017413 \text{ m}$$

$$Cy = 0.0588728 \text{ m}$$

Obteniendo los valores del momento de inercia para cada sección del álabe se calculan los esfuerzos por flexión desarrollado en cada segmento a través de las ecuaciones (2.42) y (2.43).

$$\sigma_F = 85967782 \text{ Pa}$$

$$\sigma_E = 264539.92 \text{ Pa}$$

### 4.3.- Pruebas Experimentales.

En la tabla 4.5 se muestran las configuraciones de las probetas que se realizaron con diferente configuración de fibra de vidrio y resina, tomando en cada probeta un total de 16 capas con dos diferentes tipos de fibra de vidrio, aplicando la norma ASTM D-7264, las dimensiones de las probetas son: 35cm de longitud, 0.9 cm de altura y 5.5 cm de ancho.

*Tabla 4.5.- configuración de probetas.*

Probetas	Capaz	Configuración
<b>1</b>	<b>16</b>	<b>14 de fibra bi-axial y 2 de petatillo.</b>
<b>2</b>	<b>16</b>	<b>16 de fibra bi-axial.</b>
<b>3</b>	<b>16</b>	<b>13 de fibra multi-axial y 3 de fibra bi-axial.</b>
<b>4</b>	<b>16</b>	<b>14 de fibra multi-axial y 2 de fibra bi-axial.</b>
<b>5</b>	<b>16</b>	<b>15 de fibra multi-axial y 1 de fibra bi-axial.</b>

Las pruebas consisten en aplicar una carga puntual a cada probeta e ir midiendo la deformación por cada aumento de peso aplicado, obteniendo una distribución de esfuerzo por cada flexión.

Con las pruebas experimentales se puede obtener el esfuerzo máximo que resiste el material antes de pasar al límite plástico y posteriormente a la ruptura. Con estos resultados se compara el esfuerzo máximo de la sección transversal del perfil y se determina si el diseño del álabo fabricado con alguna de estas configuraciones es apto estructuralmente, en dado caso que no sea así se prosigue a regresar al diseño aerodinámico donde se puede modificar las características del perfil en primera estancia aumentando o reduciendo el espesor según sea el caso a tratar, en segunda estancia sería modificar los puntos de linealización para no disminuir demasiado la cuerda en la raíz ya que en este sitio se concentran la mayor cantidad de esfuerzos.

#### 4.4.- Comparación de los resultados

En este apartado se analiza y comparan los resultados obtenidos al diseñar un rotor eólico para un aerogenerador de 10 kW de potencia, aplicando la metodología antes desarrollada; se compara el resultado obtenido en el diseño aerodinámico (cuerda, radio y ángulo de torsión) con el software HARP. Se simulan los datos obtenidos con el software Qblade para obtener el comportamiento aerodinámico del rotor en operación.

##### 4.4.1 Diseño aerodinámico.

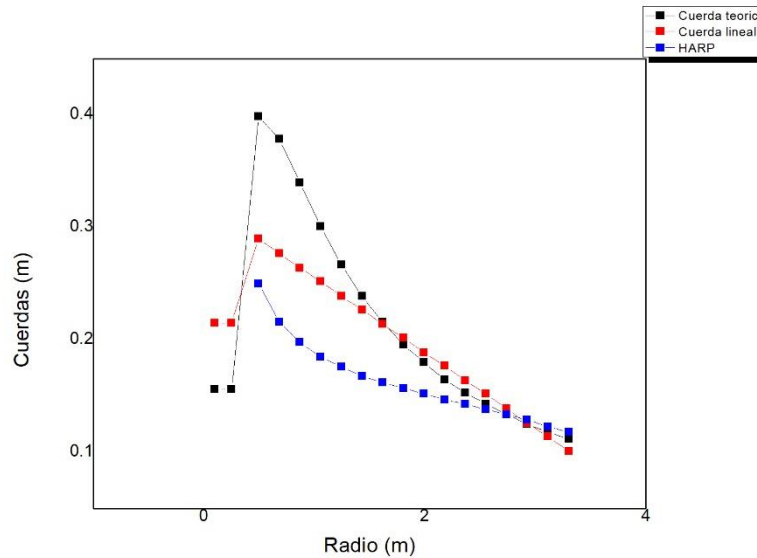
Los resultados del diseño aerodinámico se presentan en la tabla 4.6, tomando como condiciones iniciales la velocidad de viento con un valor de 11.44 m/s, y los datos del generador presentados en la tabla 4.1 de parámetros iniciales en el capítulo anterior. Se utilizó el perfil A18 smoteed con un ángulo de ataque óptimo de 5 grados.

Tabla 4.6.-Datos del diseño aerodinámico del álabe.

Secciones	$r(m)$	$V_{rel}(\frac{m}{s})$	$\beta_{teorico} (^{\circ})$	$C_{teorica}(m)$	$\beta_{lineal} (^{\circ})$	$C_{lineal}(m)$	$\lambda[-]$	$\phi(^{\circ})$	$Re[-]$
1	0.495	14.2	27.41	0.399	9.96	0.290	1.05	16.7	265661
2	0.682	18.2	19.74	0.379	9.29	0.277	1.45	15.9	325491
3	0.869	25.1	12.72	0.340	8.62	0.264	2.09	15.0	427225
4	1.056	29.2	10.40	0.301	7.94	0.252	2.46	14.2	474349
5	1.243	31.1	10.14	0.267	7.27	0.239	2.64	13.3	480222
6	1.430	35.5	9.75	0.239	6.60	0.227	3.03	12.5	519652
7	1.617	40	9.00	0.216	5.92	0.214	3.43	11.6	552310
8	1.804	44.4	7.88	0.196	5.25	0.202	3.83	10.8	578025
9	1.991	48.9	6.97	0.180	4.57	0.189	4.22	9.9	596687
10	2.178	53.4	6.21	0.165	3.90	0.177	4.62	9.1	608224
11	2.365	57.9	5.57	0.153	3.23	0.164	5.02	8.2	612584
12	2.552	62.4	5.02	0.143	2.55	0.152	5.41	7.4	609732
13	2.739	66.9	4.55	0.134	1.88	0.139	5.81	6.5	599642
14	2.926	71.4	4.13	0.125	1.20	0.126	6.21	5.7	582293
15	3.113	75.9	3.76	0.118	0.53	0.114	6.60	4.8	557672
16	3.30	80.4	3.44	0.112	0.00	0.101	7.00	4.0	525760



En la tabla 4.6 se presentan los datos del diseño aerodinámico del álabe: el radio de cada segmento, la velocidad relativa, la velocidad específica, el ángulo de paso, el número de Reynolds, las cuerdas, los ángulos de torsión teóricos y lineales.



*Figura 4.3- Relación de cuerdas.*

En la figura 4.3 se presenta las cuerdas teóricas y lineales, donde se observa la intersección a 50% y 90% de la cuerda a través del método de linealización, con ello se reduce la cuerda obteniendo un álabe menos robusto. Además se compara las cuerdas obtenidas de la metodología con las de software HARP; el cual, es un software de diseño aerodinámico comercial, se observa que el valor de la cuerda obtenida es poco mayor que la del software, esto representa que el álabe con HARP será más delgado que el desarrollado con la metodología de este trabajo. Como se observa la cuerda lineal obtenida se encuentra entre la cuerda teórica y la del software, teniendo un álabe no tan robusto ni tan esbelto, compensando la parte estructural con la aplicación de materiales compuesto.

#### 4.4.2.- Análisis de cargas.

En la tabla 5.2 se presentan los resultados de las cargas aerodinámicas y momentos por cada cuerda.

Tabla 4.7.-Cargas aerodinámicas.

$\alpha$	$\alpha'$	$dFN_{cuerda}$ (N)	$dFT_{cuerda}$ (N)	$M_{Flap}$ (N.m)	$M_{Edge}$ (N.m)
0.12	0.03	35.26	4.0	1317.3	110.753
0.23	0.07	76.80	22.3	1009.0	81.591
0.27	0.05	108.00	24.2	895.7	70.943
0.27	0.04	135.25	23.2	785.2	61.074
0.30	0.03	152.61	18.3	678.4	52.050
0.28	0.02	182.71	20.4	576.4	43.839
0.30	0.02	208.64	18.2	479.7	36.269
0.30	0.01	227.52	17.8	389.4	29.413
0.30	0.01	258.61	19.0	306.4	23.191
0.30	0.01	288.83	20.6	231.3	17.593
0.30	0.01	313.66	22.3	165.3	12.658
0.30	0.01	334.14	24.4	109.4	8.442
0.30	0.01	341.59	26.0	64.4	5.007
0.30	0.01	328.18	26.4	31.2	2.425
0.30	0.01	281.42	21.5	9.8	0.752
0.00	0.01	0.00	0.0	0.0	0.000

En los datos de la tabla 4.7 se presentan los factores de inducción axial y tangencial, la fuerza normal y tangencial en la cuerda, los momentos por flexión en los ejes correspondientes a la cuerda que nombramos como Flap y Edge. Con el valor de los dos últimos se determina el esfuerzo normal de cada sección del álabe. Se observa que los valores más altos de momentos se encuentran cerca de la raíz, es donde se concentran la mayor cantidad de esfuerzo.

En la figura 4.4 se presenta la distribución del momento flap por cada sección del álabe. Los momentos flexionantes dependen de la distancia del punto de aplicación de la fuerza a la raíz del álabe; en este caso todas las cargas generan un momento interno máximo en la raíz, que va decreciendo conforme avanza la longitud del álabe como se observa en la figura el valor del momento más alto es de 1317.3 N.m, y va decreciendo hasta llegar a 0 o también llamado equilibrio estático conforme crece el radio local.

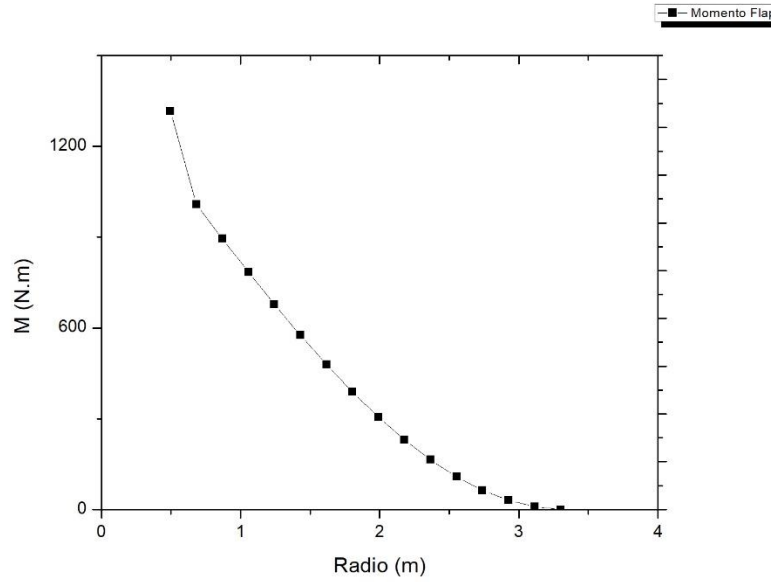


Figura 4.4.- Momento de Flexión en el Flap.

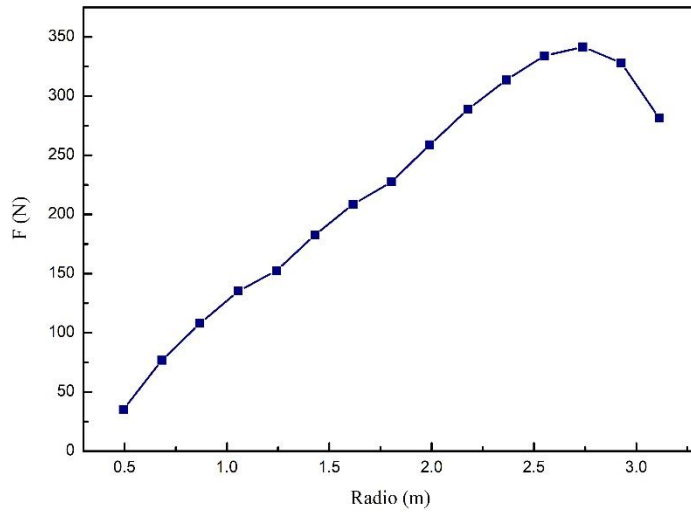


Figura 4.5 Distribución de Fuerza.

En la figura 4.5 se presenta la distribución de fuerza ejercida en cada sección del álabe; observando el comportamiento de la curva se nota que entre más alejado de la raíz la fuerzas son mayores que al comparar con los momento calculados vemos que son contrarias pues todas las fuerzas distribuidas recaen en la raíz ya que es la encargada de soportar todas las cargas del álabe.

#### 4.4.3.- Análisis de las secciones del álabe.

Tabla 4.8.- Propiedades de la sección.

Centroide x (m)	Centroide y (m)	Momento Ix (m <sup>4</sup> )	Momento Iy (m <sup>4</sup> )	Cflap (m)	Cedge (m)	Esfuerzo F (kPa)	Esfuerzo E (Kpa)
0.1210	0.0182	5.53E-08	0.000042	0.0079	0.1690	1.44E+08	3.28E+05
0.1155	0.0174	4.62E-08	0.000035	0.0075	0.1615	1.46E+08	3.27E+05
0.1101	0.0166	3.81E-08	0.000029	0.0072	0.1539	1.48E+08	3.25E+05
0.1051	0.0158	3.17E-08	0.000024	0.0069	0.1469	1.47E+08	3.18E+05
0.0997	0.0150	2.56E-08	0.000019	0.0065	0.1393	1.47E+08	3.14E+05
0.0947	0.0142	2.09E-08	0.000016	0.0062	0.1323	1.42E+08	3.04E+05
0.0893	0.0134	1.65E-08	0.000013	0.0058	0.1247	1.38E+08	2.94E+05
0.0843	0.0127	1.31E-08	0.000010	0.0055	0.1177	1.29E+08	2.76E+05
0.0788	0.0119	1.00E-08	0.000008	0.0051	0.1102	1.19E+08	2.55E+05
0.0738	0.0111	7.71E-09	0.000006	0.0048	0.1032	1.03E+08	2.24E+05
0.0684	0.0103	5.68E-09	0.000004	0.0045	0.0956	8.60E+07	1.87E+05
0.0634	0.0095	4.19E-09	0.000003	0.0041	0.0886	6.36E+07	1.40E+05
0.0580	0.0087	2.93E-09	0.000002	0.0038	0.0810	4.03E+07	8.84E+04
0.0526	0.0079	1.98E-09	0.000002	0.0034	0.0734	1.71E+07	3.68E+04
0.0475	0.0072	1.33E-09	0.000001	0.0031	0.0665	0.000	2.21E-09
0.0421	0.0063	8.17E-10	0.000001	0.0028	0.0589	0.000	3.18E-09

En la tabla 4.8 se presentan las propiedades de la sección transversal del álabe que son el centroide, los momentos de inercia y la distancia del centro a la última fibra, en base a estos datos se obtienen los esfuerzos normales en el Flap y en el Edge.

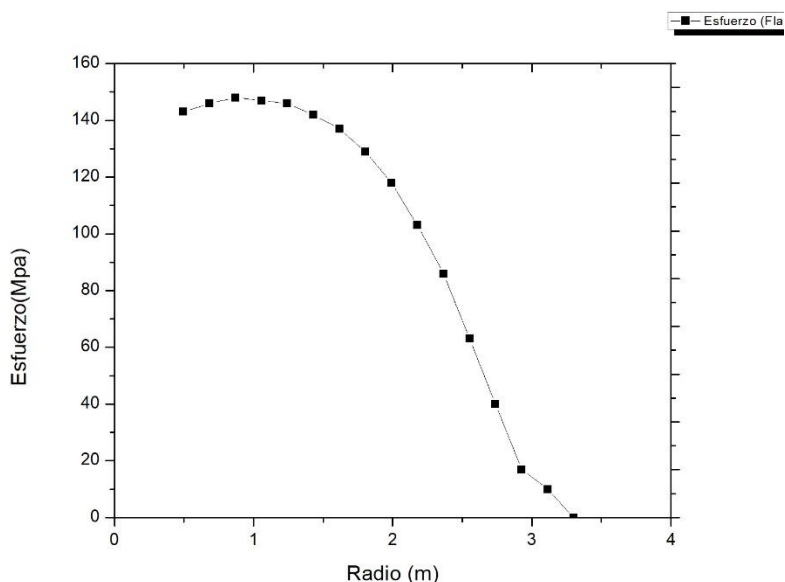


Figura 4.6.- Esfuerzo normal en el Flap.

En la figura 4.6 se presenta la distribución de esfuerzos a lo largo del álabe, se observa que la mayor concentración de esfuerzos son en la raíz, y conforme va avanzando hacia la punta los esfuerzos son menores, esto debido a que los momentos flexionantes producen una mayor cantidad de esfuerzos, como se observa en la figura 4.4 la mayor cantidad de momentos se encuentra en la raíz.

#### 4.4.4.- Análisis y comparación de esfuerzos

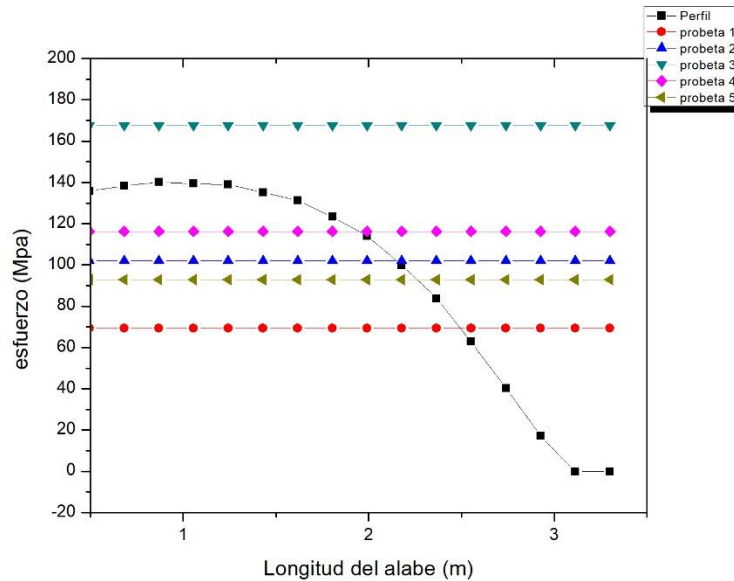


Figura 4.7.- Comparación de esfuerzos.

Analizando la figura 4.7 donde se observa la distribución de los esfuerzos por cada sección del álabe, teniendo la mayor concentración en la raíz hasta dos terceras parte del álabe. En el proceso de linealización se sacrifica parte del diseño aerodinámico donde se busca reducir la cuerda del álabe por conveniencia de diseño, reducir material y costo de fabricación. Esta gráfica de la figura 4.6 presenta además de la curva de esfuerzos teórico del álabe, 5 líneas más que son el resultado de las pruebas experimentales de las probetas con diferentes configuraciones de fibra de vidrio y resina presentado en la tabla 4.58.

Se observa que el esfuerzo teórico en las dos terceras partes del álabe sobrepasa el esfuerzo experimental de 4 probetas, para este caso se propone que la configuración de la probeta 3 que consiste en 13 capas de fibra multi-axial y 3 de bi-axial, se posicione en esta parte del álabe, que como se observa en la figura 4.6 resiste más esfuerzos de lo que el álabe requiere, en el siguiente tramo a partir de los 2 metros de longitud del álabe se propone utilizar la configuración de la probeta 4 y en el último tramo que parte de los 2.5 metros de radio hasta la punta del álabe se utilice la configuración de la probeta 1. Al realizar esta distribución de diferentes configuraciones de fibra de vidrio y resina en todo el álabe, se garantiza la fiabilidad estructural del álabe en condiciones óptimas de funcionamiento.

#### 4.4.5-Simulacion

Se realizó la simulación del álabe en Qblade, se obtiene el valor del coeficiente de potencia con respecto a la velocidad específica ( $\lambda$ ) con los datos aerodinámicos obtenidos, se obtiene un coeficiente de potencia de 0.48 este valor es importante, indica el porcentaje de producción de energía que se extrae en base a la relación de velocidades (Lambda), en este caso el álabe se diseñó a un lambda 7. En la figura 4.8 se observa que los valores altos de coeficiente de potencia se encuentran entre el rango de 7 -8 de lambda.

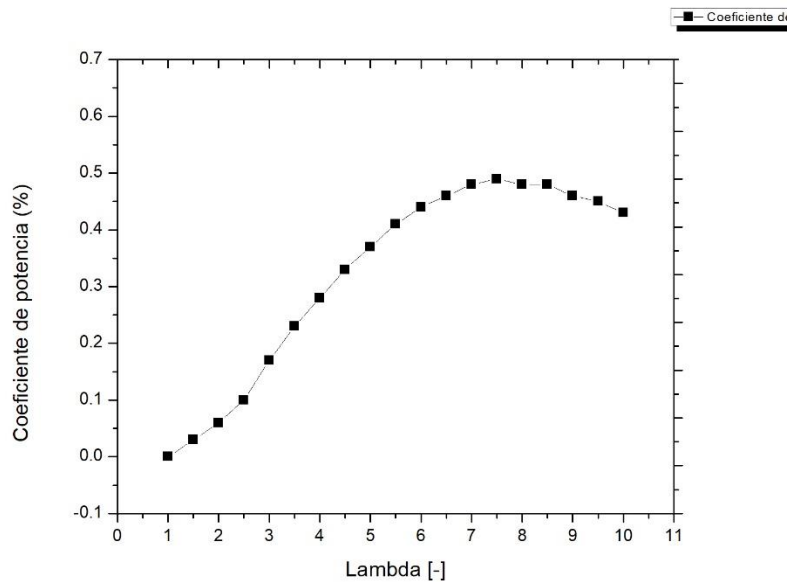


Figura 4.8.-Coeficiente de potencia vs Lambda.

El diseño del álabe fue simulado en un intervalo de velocidad de 3-25 m/s, considerado como el rango de operación del aerogenerador, en la tabla 4.9 se presentan los resultados de la simulación del aerogenerador en operación normal, obteniendo la potencia, el coeficiente de potencia, el torque, el empuje y el momento flexionante.

Tabla 4.9.- Datos del aerogenerador de 10 kW.

V(m/s)	P (kW)	Rotación (rpm)	$C_p$	Torque "Q" (N-m)	Empuje "T" (N)	Momento Flexionante (N-m)
3.00	194.44	100.00	0.297	18.58	203.84	137.31
3.50	418.29	100.00	0.402	39.97	260.91	173.48
4.00	706.63	100.00	0.455	67.52	329.88	218.70
4.50	1067.85	100.00	0.483	102.12	406.16	267.80
5.00	1475.89	100.00	0.487	141.24	474.49	310.78
5.50	1940.84	103.56	0.481	179.10	543.27	354.59
6.00	2519.74	112.98	0.481	213.14	646.54	421.99
6.50	3203.63	122.39	0.481	250.15	758.78	495.25
7.00	4001.26	131.81	0.481	290.11	880.01	574.37
7.50	4921.37	141.22	0.481	333.04	1010.21	659.35
8.00	5972.72	150.64	0.481	378.92	1149.40	750.20
8.50	7164.06	160.05	0.481	427.77	1297.56	846.90
9.00	8504.13	169.47	0.481	479.57	1454.70	949.47
9.50	10000.00	178.88	0.481	533.84	1616.82	1055.14
10.00	10000.00	188.30	0.412	507.14	1411.28	904.29
10.50	10000.00	197.71	0.356	482.99	1317.74	825.23
11.00	10000.00	207.13	0.310	461.04	1249.82	769.76
11.50	10000.00	216.54	0.271	440.99	1197.95	726.64
12.00	10000.00	225.96	0.239	422.62	1157.82	691.40
12.50	10000.00	235.37	0.211	405.71	1138.53	669.63
13.00	10000.00	244.79	0.188	390.11	1124.45	650.83
13.50	10000.00	254.20	0.168	375.66	1120.94	638.96
14.00	10000.00	263.61	0.150	362.25	1121.76	629.75
14.50	10000.00	273.03	0.135	349.75	1119.21	618.23
15.00	10000.00	282.44	0.122	338.10	1117.06	606.43
15.50	10000.00	291.86	0.111	327.19	1124.37	600.41
16.00	10000.00	301.27	0.101	316.96	1125.11	589.37
16.50	10000.00	310.69	0.092	307.36	1137.99	586.25
17.00	10000.00	320.10	0.084	298.32	1146.51	580.02
17.50	10000.00	329.52	0.077	289.80	1171.36	584.48
18.00	10000.00	338.93	0.071	281.75	1168.98	570.08
18.50	10000.00	348.35	0.065	274.13	1185.94	568.39
19.00	10000.00	350.00	0.060	272.84	1192.47	559.11
19.50	10000.00	350.00	0.056	272.84	1165.17	526.66
20.00	10000.00	350.00	0.052	272.84	1136.72	493.81
20.50	10000.00	350.00	0.048	272.84	1134.19	479.10
21.00	10000.00	350.00	0.045	272.84	1099.13	440.34
21.50	10000.00	350.00	0.041	272.84	1096.53	424.16
22.00	10000.00	350.00	0.039	272.84	1087.29	403.03
22.50	10000.00	350.00	0.036	272.84	1077.60	381.34
23.00	10000.00	350.00	0.034	272.84	1068.53	359.82
23.50	10000.00	350.00	0.032	272.84	1059.59	338.39
24.00	10000.00	350.00	0.030	272.84	1052.71	319.23
24.50	10000.00	350.00	0.028	272.84	1041.60	296.76
25.00	10000.00	350.00	0.026	272.84	1029.82	273.88

Con los datos de la tabla anterior se obtienen las siguientes gráficas. La curva característica del aerogenerador se presenta en la figura 4.9, donde se observa que su potencia nominal se alcanza alrededor de los 10 m/s, siendo este un factor importante que describe el rendimiento del aerogenerador. Se observa que una vez alcanzado la potencia nominal y conforme avanza la velocidad de viento, el valor de la potencia sigue constante, esto se debe al sistema de control que al momento de simular el aerogenerador se busca que siempre se mantenga generando esta potencia aun cuando la velocidad aumente; después de los 25 m/s de velocidad la línea se acaba, este el límite de corte del aerogenerador, pasando esta velocidad entra el sistema de frenado para evitar grandes daños estructurales en el aparato.

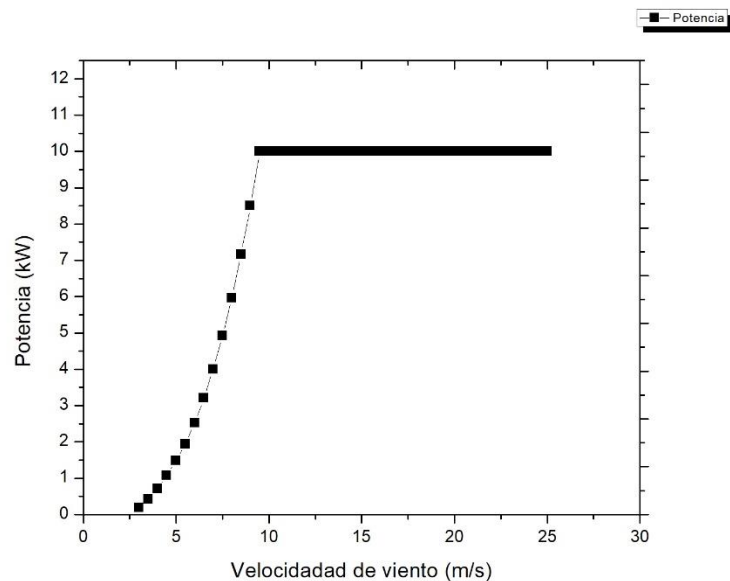


Figura 4.9.- Curva de potencia.

En la figura 4.10 se presentan dos curvas, la primera de color negro es la obtenida a través del software HARP y la segunda de color rosa es la simulación desarrollada con los datos obtenidos de la metodología, se observa que los resultados de la metodología están ligeramente por arriba del diseño de HARP que obtiene un 47% de eficiencia, y el diseño obtenido arroja un 48.5% de eficiencia; esto indica que la metodología desarrollada proporciona diseños de rotores eólicos eficientes arriba de los 45% de eficiencia sin dejar de lado la parte estructural, teniendo un equilibrio entre aerodinámica y estructural.



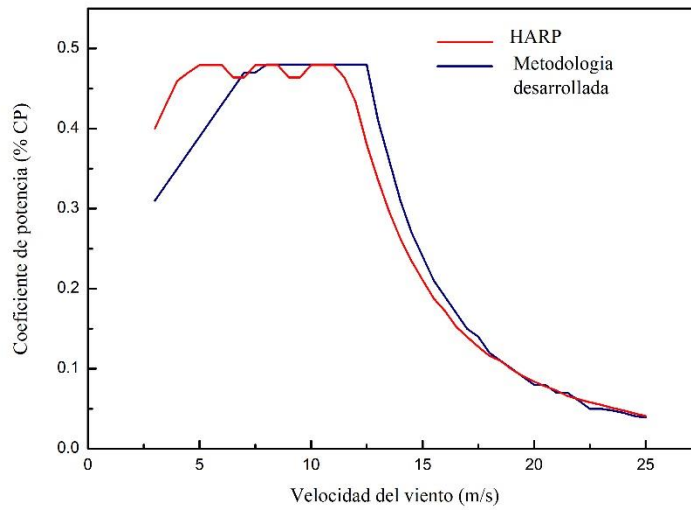


Figura 4.10.- Coeficiente de potencia vs Velocidad de viento.

#### 4.6.- Dimensionado del álabes

Se presentan en la tabla 4.10, los parámetros del álabes que se utilizarán para el modelo CAD, siendo estos afectados por las coordenadas del perfil.

Tabla 4.10.- Parámetros del álabes.

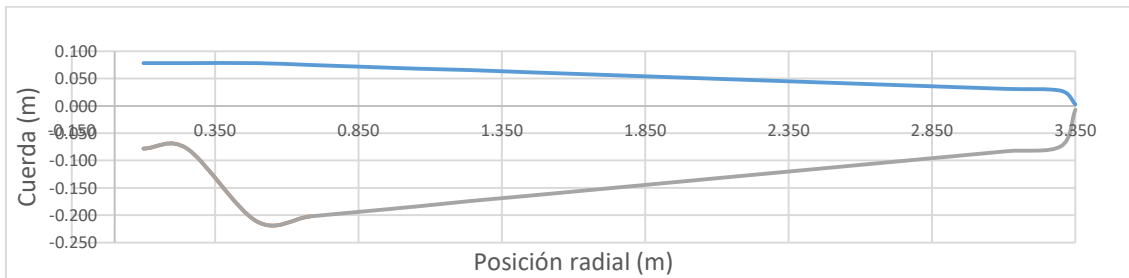
Radio del álabes (mm)	Curda [mm]	Ángulo	Perfil	Espesor
100	156	0	Rectangular	60
252	156	0	Rectangular	60
495	290	9.96	A18	43
682	277	9.29	A18	42
869	264	8.62	A18	40
1056	252	7.94	A18	38
1243	239	7.27	A18	36
1430	227	6.60	A18	34
1617	214	5.92	A18	32
1804	202	5.25	A18	30
1991	189	4.57	A18	28
2178	177	3.90	A18	26
2365	164	3.23	A18	25
2552	152	2.55	A18	23
2739	139	1.88	A18	21
2926	126	1.20	A18	19
3113	114	0.53	A18	17
3300	101	0	A18	15
3350	10	0	A18	2

Para tener un acercamiento visual del álabe en 2D, se definen las coordenadas tanto para la parte de borde de ataque como el borde de salida, los cuales se presentan en la tabla 4.11

*Tabla 4.11.- Coordenadas del borde de salida y de ataque.*

Radio (m)	Cuerda (m)	Borde de ataque	Borde de salida
0.100	0.156	0.078	-0.078
0.252	0.156	0.078	-0.078
0.495	0.290	0.078	-0.211
0.682	0.277	0.075	-0.202
0.869	0.264	0.071	-0.193
1.056	0.252	0.068	-0.184
1.243	0.239	0.065	-0.174
1.430	0.227	0.062	-0.165
1.617	0.214	0.058	-0.156
1.804	0.202	0.055	-0.147
1.991	0.189	0.051	-0.138
2.178	0.177	0.048	-0.129
2.365	0.164	0.045	-0.119
2.552	0.152	0.041	-0.110
2.739	0.139	0.038	-0.101
2.926	0.126	0.034	-0.092
3.113	0.114	0.031	-0.083
3.300	0.101	0.028	-0.074
3.350	0.010	0.003	-0.007

En la figura 4.11 se presenta la representación en 2D del álabe obtenido, teniendo una primera vista de las dimensiones en dibujo del álabe.



*Figura 4.11.- Representación en 2D del álabe.*

El modelo CAD es parte importante en el diseño del álabe, ya que una vez definido la geometría se puede desarrollar los moldes para la manufactura de la pieza sólida. Con la obtención del álabe física se pueden realizar diferentes pruebas tanto estáticas o dinámicas.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se desarrolló una metodología de diseño aerodinámica-estructural de álabes para aerogeneradores de baja potencia obteniendo diseños eficientes tanto en la parte aerodinámica como estructural. Aplicando esta metodología se diseñó un álabe para un aerogenerador de 10 kW.

Se concluye lo siguiente:

- Se desarrolló una metodología de diseño aerodinámico tomando en cuenta diferentes condiciones como son características del viento, utilización de un método de diseño aerodinámico, análisis y selección de perfiles que garantizo obtener un diseño aerodinámico adecuado.
- Se desarrolló una metodología para el análisis estructural de las propiedades seccionales del álabe, con la cual se llega a conocer de manera interna el comportamiento estructural de la sección transversal del álabe al interactuar con las cargas aerodinámicas del viento.
- Se aplicó la evaluación de probetas experimentales para comparar y validar los esfuerzos de cada sección del álabe obteniendo la configuración adecuada para que el álabe sea estructuralmente fiable, así mismo se simuló el diseño aerodinámico en Qblade y se comparó con la ejecución del software HARP donde el rendimiento aerodinámico esta 1% arriba teniendo una eficiencia de 48.5%.
- Se diseñó un rotor eólico para un aerogenerador de baja potencia con velocidades del Istmo de Tehuantepec, teniendo un radio de 3.30 metros de longitud, una producción de 10kW, un coeficiente de potencia de 48%.

Lo importante de esta metodología es el acoplamiento logrado de la parte aerodinámica – estructural y la consideración de tres criterios esenciales para obtención de álabes eficientes y de bajo.

## 5.2 Trabajos futuros.

A partir de los resultados obtenidos, se enlistan algunas modificaciones y recomendaciones para trabajos futuros.

- Ampliar el conocimiento de métodos de diseño aerodinámicos donde se tomen en consideración algunos efectos de rotación y estela lo cual puede repercutir en el diseño estructural.
- Implementar la parte dinámica en el análisis estructural del álabe para obtener un diseño más amplio.
- Desarrollar un software especializado en la optimización de rotores eólicos, donde se integre la metodología desarrollada.

## Bibliografía

- [1] V. C. J. Muñiz Orozco Juan Pablo, *Diseño y construcción de soportes para pequeños aerogeneradores.*, Sociedad m. 2015.
- [2] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraja, and V. H. Krishna, “A review on small scale wind turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1351–1371, 2016.
- [3] K. Windröder, *Introducción a la teoría de las turbinas eólicas.* 2009.
- [4] F. A. Vega, *fundamentos en aerodinamica para aeroturbinas de eje horizontal.* 2008.
- [5] F. A. Vega, *fundamentos de aerodinamica para aeroturbinas de eje horizontal.* En la Villa y Corte de Madrid. España, 2008.
- [6] M. O. . Hansen, *Aerodynamics of wind turbines*, Earthscan. U.S.A and UK, 2008.
- [7] W. Z. Shen, R. Mikkelsen, J. N. Sørensen, and C. Bak, “Tip loss corrections for wind turbine computations,” *Wind Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 457–475, 2005.
- [8] J. R. E. Beer, Ferdinand, Dewolf John, *Mecànica de Materiales*, Tercera ed. .
- [9] A. Hassanzadeh, A. Hassanzadeh Hassanabad, and A. Dadvand, “Aerodynamic shape optimization and analysis of small wind turbine blades employing the Viterna approach for post-stall region,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 3, pp. 2035–2043, 2016.
- [10] O. Polat and I. H. Tuncer, “Aerodynamic shape optimization of wind turbine blades using a parallel genetic algorithm,” *Procedia Eng.*, vol. 61, pp. 28–31, 2013.
- [11] M. Hamdan and M. H. Abderrazzaq, “Optimization of Small Wind Turbines using Genetic Algorithms,” *Int. J. Appl. Metaheuristic Comput.*, vol. 7, no. 4, pp. 50–65, 2016.
- [12] M. J. Clifton-Smith and D. H. Wood, “Further dual purpose evolutionary optimization of small wind turbine blades,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 75, no. 1, 2007.
- [13] J. R. P. Vaz, J. T. Pinho, and A. L. A. Mesquita, “An extension of BEM method applied to horizontal-axis wind turbine design,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 1734–1740, 2011.
- [14] X. Tang, X. Huang, R. Peng, and X. Liu, “A direct approach of design optimization for small horizontal axis wind turbine blades,” *Procedia CIRP*, vol. 36, pp. 12–16, 2015.
- [15] F. Mahmuddin, S. Klara, H. Sitepu, and S. Hariyanto, “Airfoil Lift and Drag Extrapolation with Viterna and Montgomerie Methods,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 811–816, 2017.
- [16] D. O. Yu, H. M. Lee, and O. J. Kwon, “Aerodynamic shape optimization of wind turbine rotor blades considering aeroelastic deformation effect,” *J. Mech. Sci.*

*Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 705–718, 2016.

- [17] J. H. Jeong and S. H. Kim, “Optimization of thick wind turbine airfoils using a genetic algorithm,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 3191–3199, 2018.
- [18] Z. T. F. Song, Y. Ni, “optimization design, modeling and dynamic analysis for composite wind turbine blade,” *Jom*, vol. 47, no. 1, pp. 31–33, 1995.
- [19] G. Kenway and J. Martins, “Aerostructural Shape Optimization of Wind Turbine Blades Considering Site-Specific Winds,” *12th AIAA/ISSMO Multidiscip. Anal. Optim. Conf.*, no. September, pp. 1–12, 2008.
- [20] H. Yang, J. Chen, X. Pang, and G. Chen, “A new aero-structural optimization method for wind turbine blades used in low wind speed areas,” *Compos. Struct.*, vol. 207, no. July 2018, pp. 446–459, 2019.
- [21] S. M. Wang Lin, Liu Xiongwei, Guo Lianggang, Renevier Nathalie, “A mathematical model for calculating cross-sectional properties of modern wind turbine composite blades,” *Renew. Energy*, pp. 52–60, 2014.
- [22] M. Vega del carmen, ““Software para diseño de turbinas eòlicas de alto rendimiento para generaciòn de energia elèctrica (VDTURBINE),” Instituto Politécnico Nacional, 2017.
- [23] H. Jiang, Y. Li, and Z. Cheng, “Performances of ideal wind turbine,” *Renew. Energy*, vol. 83, pp. 658–662, 2015.
- [24] C. Ozlem, “Aerodynamic Design and Optimization of Horizontal Axis Wind,” 2016.
- [25] H. Machrafi, *Green Energy and Technology*. 2012.
- [26] B. E. Burton T., Sharpe D., Jenkins N., *Wind Energy Handbook*, John Wiley. UK, 2001.
- [27] A. G. Canales, I. H. Arriaga, J. Alberto, D. Pacheco, and I. Alvarado, “Tema A4a Termofluidos : Aerodinámica Diseño aerodinámico de un rotor para una turbina eòlica de 30 kW,” pp. 200–211, 2017.
- [28] B. Storti, I. Peralta, and S. Careno, “De Baja Potencia,” no. 1, pp. 2–5.
- [29] R. L. U. de F. Pinto and B. P. F. Gonçalves, “A revised theoretical analysis of aerodynamic optimization of horizontal-axis wind turbines based on BEM theory,” *Renewable Energy*, vol. 105. pp. 625–636, 2017.
- [30] P. G. M. A., “Perfiles Aerodinàmicos,” pp. 1–14, 2013.
- [31] U. del B.-B. Oyarzún Suárez Cristian A.(Facultad de ingenieria, “Análisis de dinámica de fluidos en un perfil aerodinámico,” 2005.
- [32] B. Akay, D. Ragni, C. S. Ferreira, and G. J. W. Van Bussel, “Investigation of the root flow in a Horizontal Axis,” *Wind Energy*, no. August 2009, pp. 1–20, 2013.
- [33] J. Escalera Siles, “Estudio aerodinámico de un aerogenerador mediante teoría BEM (Blade Element Momentum),” 2014.

- [34] L. S. J. I., “Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines,” *Energy environ*, 2012.
- [35] E. M. Fagan, O. De La Torre, S. B. Leen, and J. Goggins, “Validation of the multi-objective structural optimisation of a composite wind turbine blade,” *Compos. Struct.*, vol. 204, pp. 567–577, 2018.
- [36] S. M. Domnica, C. Ioan, and T. Ionut, “Structural Optimization of Composite from Wind Turbine Blades with Horizontal Axis Using Finite Element Analysis,” *Procedia Technol.*, vol. 22, pp. 726–733, 2016.
- [37] J. Meng and D. Sun, “Structural optimization of wind turbine blades with ring shear webs,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 40, no. 6, pp. 1–9, 2018.
- [38] “Software XFOIL, XFLR5.” [Online]. Available: <http://www.xflr5.com/xflr5.htm>.