



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E
INNOVACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

TESIS

“SOFTWARE PARA EL DISEÑO AERODINÁMICO
DE UN ROTOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA”

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA:

MONSERRAT VELASQUEZ IRINEO

DIRECTOR DE TESIS :

DR. ORLANDO LASTRES DANGUILLECOURT

CODIRECTOR DE TESIS :

MTRO. CRISTOFER AGUILAR JIMENEZ



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA GENERAL
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Fecha: 11 de abril de 2024

C. Monserrat Velasquez Irineo

Pasante del Programa Educativo de: **Ingeniería en Renovables**

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
Software para el Diseño Aerodinámico de un Rotor Eólico de Baja Potencia

En la modalidad de: **Tesis Profesional**

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Antonio Verde Añorve

Dr. Joel Pantoja Enriquez

Mtro. Cristofer Aguilar Jiménez

Firmas:

Ccp. Expediente



CONTENIDO

Índice de figuras	4
Índice de tablas	5
Índice de diagramas	5
Índice de gráficas	6
Dedicatoria	7
Agradecimientos.....	8
Simbología	10
Letras griegas.....	11
RESUMEN	12
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Introducción	13
1.1.1. Panorama energético de México	14
1.1.2. Turbina eólica	16
1.1.3. Clasificación de los aerogeneradores modernos	18
1.1.4. Rotor	21
1.2. Planteamiento del problema	23
1.3. Justificación	23
1.4. Hipótesis.....	23
1.5. Objetivos	23
1.5.1. Objetivo general.....	23
1.5.2. Objetivos específicos	24
CAPITULO II. FUNDAMENTOS TEORICOS	25
2.1. Energía eólica	25

2.1.1. Recurso eólico	25
2.2. Aerodinámica	26
2.2.1. Sistema de vórtices detrás de una turbina eólica	27
2.3. Teoría del momento unidimensional	29
2.3.1. Parámetros importantes en una turbina con rotación en la estela	32
2.3.2. Límite de Betz y coeficiente de potencia.....	33
2.5. Teoría del elemento del álabes	36
2.4. Perfiles aerodinámicos	40
2.4.1. Sustentación (Lift) y arrastre (Drag).....	41
2.4.1.1. Elección de perfiles aerodinámicos	43
2.5. Geometría del álabes	43
2.6. Diseño de álabes.....	44
2.6.1. Diseño del álabes para velocidad variable	45
2.6.2. Diseño óptimo del álabes para una velocidad constante	46
2.7. Teoría del impulso del elemento de álabes (BEM).....	46
2.7.1. Factor de pérdida de Prandtl.....	51
2.7.2. Corrección de Glauert.....	53
2.8. Procedimiento general de diseño de rotores	56
2.8.1. Determinar los parámetros básicos del rotor	56
2.8.2. Definir la forma del álabes	57
2.8.3. Calcular el coeficiente de potencia del rotor y modificar el diseño de los álabes	58
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	59
3.1 Evaluación de perfiles aerodinámicos	60
3.2. Metodología de algoritmo para diseño	61

3.3. Modelo BEM.....	62
3.4. Validación de resultados	63
CAPITULO IV. RESULTADOS.....	64
4.1. Parámetros de entrada del aerogenerador.....	64
4.2. Evaluar perfiles aerodinámicos	64
4.3. Resultados de la geometría del álabe	68
4.3.1. Linealizar la geometría del álabe	72
4.4. Simulación del rotor en estado estacionario.....	73
4.6. Validación de resultados mediante el software comercial QBlade	83
Conclusiones.....	86
REFERENCIAS.....	88
ANEXOS	90

Índice de figuras

Figura 1. Evolución de la capacidad instalada eólica en México [5].....	15
Figura 2. Partes de un aerogenerador [17].....	17
Figura 3. Aerogenerador tipo vertical [18]	18
Figura 4. Eje horizontal [18].....	19
Figura 5. Orientación del rotor [6].....	20
Figura 6. Número de álabes [19].....	20
Figura 7. Vectores de velocidad vistos desde el álabe [10].....	26
Figura 8. Rotor de una turbina eólica [12]	27
Figura 9. Vista de los perfiles aerodinámicos después del corte radial [9]	27
Figura 10. Esquema del sistema de vórtices detrás de la turbina eólica [10].....	28
Figura 11. Extracción de energía de una turbina eólica [9]	29

Figura 12. Velocidad y presión en el plano del rotor [11]	30
Figura 13. Coeficiente de potencia y coeficiente de empuje para la teoría del momento unidimensional en función del factor de inducción axial [13]	35
Figura 14. Esquema de álabes dividido en N secciones [6]	36
Figura 15. Ilustración del flujo con rotación [12]	37
Figura 16. Partes de un perfil aerodinámico [6]	40
Figura 17. Fuerzas que actúan sobre un perfil aerodinámico [6]	41
Figura 18. Velocidades en el plano del rotor [10]	48
Figura 19. Fuerzas ejercidas sobre el perfil aerodinámico [10]	49

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de aerogeneradores según la potencia [8]	19
Tabla 2. Número de álabes para diferentes velocidades de punta [6]	56
Tabla 3. Parámetros nominales de entrada para un aerogenerador de 10kW	64
Tabla 4. evaluación de perfiles aerodinámicos	64
Tabla 5. Fuerzas y potencia del diseño del rotor teórico	72
Tabla 6. Factor de inducción axial	77
Tabla 7. Factor de inducción tangencial	77
Tabla 8. Torque evaluado para diferentes TSR	81
Tabla 9. Comparación de resultados nominal de QBlade vs los resultados de fuerzas y potencia	85
Tabla 10. Dimensiones para cada sección del álabes teórico	90
Tabla 11. Dimensiones del álabes linealizado	90

Índice de diagramas

Diagrama 1. Metodología general del desarrollo de este trabajo	59
Diagrama 2. Evaluación de perfiles aerodinámicos	60
Diagrama 3. Metodología de algoritmo para el diseño teórico del álabes	61

Diagrama 4. Pasos del método BEM	62
Diagrama 5. Evaluación de resultados con el software libre QBlade	63

Índice de gráficas

Gráfica 1. Relación C_l - α de los 3 perfiles	65
Gráfica 2. C_d vs α de cada perfil	66
Gráfica 3. Relación C_l/C_d vs α	67
Gráfica 4. C_m - α de cada perfil	67
Gráfica 5. Relación entre el ángulo de torsión, flujo y ataque	69
Gráfica 6. Fuerza axial y tangencial para cada sección del álabe	70
Gráfica 7. Torque axial y torque tangencial vs número de secciones del álabe	71
Gráfica 8. Coeficiente de potencia para cada sección del álabe	71
Gráfica 9. a) Cuerda linealizada b) Ángulo de torsión linealizado	72
Gráfica 10. Ángulo de flujo en toda la extensión del álabe	73
Gráfica 11. velocidad efectiva en toda la extensión del álabe	74
Gráfica 12. Ángulo de ataque del análisis de BEM	75
Gráfica 13. Número de Reynolds	76
Gráfica 14. Coeficiente de sustentación	76
Gráfica 15. a) Factor de inducción axial b) Factor de inducción tangencial vs radio del álabe	78
Gráfica 16. Corrección de Prandtl del análisis BEM	79
Gráfica 17. a) Fuerza axial b) Fuerza tangencial vs cada sección del álabe	80
Gráfica 18. Fuerza de torque para cada sección del álabe	81
Gráfica 19. Coeficiente de potencia en cada sección del álabe	82
Gráfica 20. Torque del rotor simulado en software vs torque simulado en QBlade	83
Gráfica 21. Empuje del rotor (N)	84
Gráfica 22. Coeficiente de potencia	84

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres que, con el sudor de su frente y su paciencia me apoyaron hasta el final para culminar una carrera profesional, los amo.

Agradecimientos

A mis padres, **Genoveva Irineo Mendoza** y **Ricardo Velasquez Ramírez** por su gran esfuerzo para que pudiera estudiar y culminar una carrera profesional. Gracias, mamá por ser un apoyo incondicional en mi desarrollo personal y académico, por ser mi confidente y por ser una mamá excepcional con la que sé que siempre podré contar en todos los sentidos de mi vida. Gracias, papá por acompañarme en mi primer día de universidad para calmar mis nervios, por los consejos que me das día a día y por siempre confiar en mí e inculcarme hábitos saludables.

A mi hermano, **Ivan Velasquez Irineo**, por ser mi modelo para seguir. Siempre escuchar en cada entrega de calificaciones las felicitaciones que te daban por ser un excelente alumno; me impulsó a querer ser una estudiante dedicada como tú.

A mis abuelitos, **Francisca Vázquez Espinosa** y **Crescencio Ramírez Lucho**, que, aunque ya no están conmigo en esta tierra, siempre los llevo presentes en mi corazón y mente. Gracias abuelita panchita por consentirme mucho y siempre quererme ver bien en todos los aspectos. Gracias a mi abuelito Lucho por haber sido como un segundo padre, por siempre hablar conmigo de todos los temas de la vida, por aconsejarme y siempre recordarme que tenía que prepararme para ser una profesional y poderme abrir paso sola sin depender de ningún hombre.

A mi abuelita **Carmen Ramírez Espinosa**, por su amor incondicional y siempre estar al pendiente de mí.

A mi mejor amiga, **Samantha Gonzales Pineda**, por siempre confiar en mí y animarme cuando no me sentía capaz en la carrera; gracias a ti puedo decir con certeza que conozco lo que significa la amistad verdadera.

A mis amigos de la universidad **Daniel, Marlin, Pedro, Ulises, Oswaldo y Gabriela** por hacer más amenos mis días en la universidad y siempre contar con ellos en cualquier situación.

Gracias al **Dr. Orlando Lastres** por su disposición, creer en mí y animarme a seguirme preparando para ser una mejor profesional.

Gracias al **Dr. Antonio Verde Añorve** por permitirme realizar mis prácticas profesionales en su empresa RTO energy, por asesorarme, guiarme en la redacción de este trabajo y por sus consejos de superación.

Gracias al **Mtro. Cristofer Aguilar** por apoyarme en el desarrollo de este trabajo y tenerme la paciencia para desenvolverme en la programación.

Agradezco a los **Docentes** que me apoyaron en mi trayecto universitario, por la paciencia y por el tiempo que me brindaron fuera de su horario de clases para atender mis dudas para expandir mi conocimiento.

A **Licenciada Rosa Aurelia** por la maravillosa persona que es y por su apoyo moral y emocional cuando más lo necesitaba.

A **DIOS** que me ha permitido llegar hasta este punto donde me encuentro hoy en día, por la salud, por los buenos momentos, pero también por los malos, y por enseñarme que los obstáculos siempre se superan y que ayudan al crecimiento como persona, así como también, las bendiciones que me ha dado con todas las personas buenas que me rodean y que me sigo encontrando en el camino.

Simbología

a	Factor de inducción axial
a'	Factor de inducción tangencial
B	Número de álabes
C_p	Coefficiente de potencia
C_T	Coefficiente de empuje
C_l	Coefficiente de sustentación
C_d	Coefficiente de arrastre
C_n	Coefficiente de carga normal
C_m	Coefficiente de momento
C_t	Coefficiente de carga tangencial
$c(r)$	Cuerda local (m)
D	Fuerza de arrastre incremental (N)
M	Torque (N.m)
Ma	Número de Mach
\dot{m}	Flujo másico
L	Fuerza de sustentación incremental (N)
r	Posición radial del volumen de control
P_N	Fuerza normal
P_T	Fuerza tangencial

V_a	Velocidad axial (m/s)
V_{rot}	Velocidad del rotor
V_{rel}	Velocidad relativa
V_o	Velocidad del viento

Letras griegas

α	Ángulo de ataque
θ	Ángulo de torsión
λ	Relación de velocidad de punta (-)
ν	Viscosidad cinemática (m ² /s)
ρ	Densidad (kg/m ³)
σ	Solidez (-)
φ	Ángulo de flujo/entrada
Ω	Velocidad angular (rpm)
ω	Velocidad angular

RESUMEN

El diseño del rotor eólico juega un papel fundamental para la extracción de energía en el dimensionado de los aerogeneradores, ya que en este se determinan los parámetros óptimos de operación, donde el aerogenerador trabajará en su máxima eficiencia. El objetivo de este trabajo es desarrollar un software para el diseño y análisis del comportamiento aerodinámico del rotor eólico de baja potencia que ayuden a que el usuario pueda ser capaz de optimizar la eficiencia de la turbina y a su vez, ahorrar tiempo en la aplicación de los métodos clásicos.

Para el desarrollo del software se empleó el método BEM donde a través de funciones lineales se busca optimizar la geometría del álabe, además, mediante la metodología utilizada se determinan las cargas, torques y potencias para cada sección del aspa y mediante la integración las del rotor eólico.

Para validar el software se realiza el análisis comparativo del dimensionado de una turbina eólica de 10kW empleando la metodología y el software desarrollado con el dimensionado realizado con el software comercial QBlade. En el análisis se muestran los resultados obtenidos de la respuesta de los perfiles aerodinámicos, el dimensionado del aspa, la simulación de las cargas y la eficiencia del rotor eólico en diferentes condiciones de operación obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras clave: Diseño de rotores, perfiles aerodinámicos, BEM.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El consumo exponencialmente creciente de combustibles fósiles ha desencadenado una gran cantidad de problemas, que continuamente dan lugar a titulares en medios de comunicación y que influyen de manera esencial en las vidas de los habitantes del mundo [1].

Uno de los principales problemas son los medioambientales que tienen como consecuencia el calentamiento global, la lluvia ácida, contaminación del aire, entre otros.

En los últimos años se ha tenido un auge importante en las energías renovables por las diferentes problemáticas actuales, además, de que se obtienen de fuentes inagotables, reducen la producción e importación de combustible fósiles y son competitivas.

Hoy en día el uso de los recursos energéticos se centra en 3 grandes tecnologías, como lo son, la hidráulica, la fotovoltaica y la eólica. La energía eólica es una tecnología bastante atractiva. Se ha calculado que el potencial eólico es unas veinte veces el actual consumo de energía mundial, lo que hace de la energía eólica una de las fuentes de energía renovable más importantes [2].

El viento se define como una corriente de aire resultante de las diferencias de presión en la atmósfera, provocadas en la mayoría de los casos, por variaciones de temperatura [3].

Una máquina eólica es cualquier dispositivo accionado por el viento y se utiliza para generar energía mecánica o energía eléctrica, el principio de funcionamiento de una turbina eólica es muy simple, cuando el viento incide sobre los álabes del aerogenerador y los hace girar, el movimiento rotativo producido se dirige al generador a través de un sistema de multiplicador de velocidad; por ende, el generador producirá corriente eléctrica y esta se dirigirá hasta las líneas de transmisión del sistema eléctrico.

La manufactura de un aerogenerador se lleva a cabo mediante varias fases en su construcción, una de ellas es el diseño aerodinámico, el cual permite al aerogenerador ser capaz de captar la mayor energía del viento para así convertirla en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica. por ello, el rendimiento del aerogenerador depende del diseño aerodinámico de sus álabes. El diseño aerodinámico consta de disminuir la resistencia del viento para que un objeto se mueva, es por esto por lo que en este trabajo se evalúan diferentes perfiles aerodinámicos para no afectar la eficiencia del aerogenerador.

1.1.1. Panorama energético de México

La CENACE (Centro Nacional de Control de Energía) reportó que la generación de energía eólica y solar fotovoltaica en México se redujo después de cuatro años consecutivos de incrementos, en 2022 la energía que se generó a partir del viento y el sol fue de 3.6% y 4.6% menor a la observada el año anterior, respectivamente. Así, México se encuentra en un punto lejos de llegar a la meta establecida en el acuerdo de París y en la ley de transición energética que menciona que el 35% de la producción de energía debe ser cubierta por energías renovables. Esta disminución de generación de energía a partir de fuentes renovables es consecuencia de los cambios estructurales asociados a la política energética del Gobierno Federal que ha limitado el desarrollo de nuevas capacidades renovables por parte del sector privado. México cuenta con los suficientes recursos naturales energéticos para retomar e incluso para acelerar el ritmo del crecimiento de las energías limpias y alcanzar sus metas de generación [4].

La Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) es una asociación civil que se dedica a impulsar el desarrollo del Sector Eólico en México, esta asociación tiene por objetivo participar en los procesos de decisión públicos y privados que inciden sobre la planeación, organización y regulación del Sector Eólico, para la promoción, implementación, instalación y operación de parques eólicos promoviendo las

mejores prácticas de la industria y el aprovechamiento de tecnología de vanguardia a nivel mundial. AMDEE reporta 70 parques en operación en 15 estados con 7,317 MW que representan el 8.16% de la capacidad instalada y 810 MW terminados y en pruebas operativas. También, menciona el top 3 de los estados que contribuyen más a la generación de energía, los cuales son, Oaxaca con 2,758 MW, Tamaulipas con 1,715 MW y Nuevo León con 793 MW; en la actualidad se cuentan con 3,247 turbinas instaladas en todo el país. El total de electricidad generada por energía eólica en 2022 fue de más de 20 mil Gigawatts-hora (GWh), lo que representó 6.09% de la generación de electricidad en México. En la figura 1 se muestra la evolución de la capacidad instalada eólica en México desde el 2010 hasta el 2022 [5].

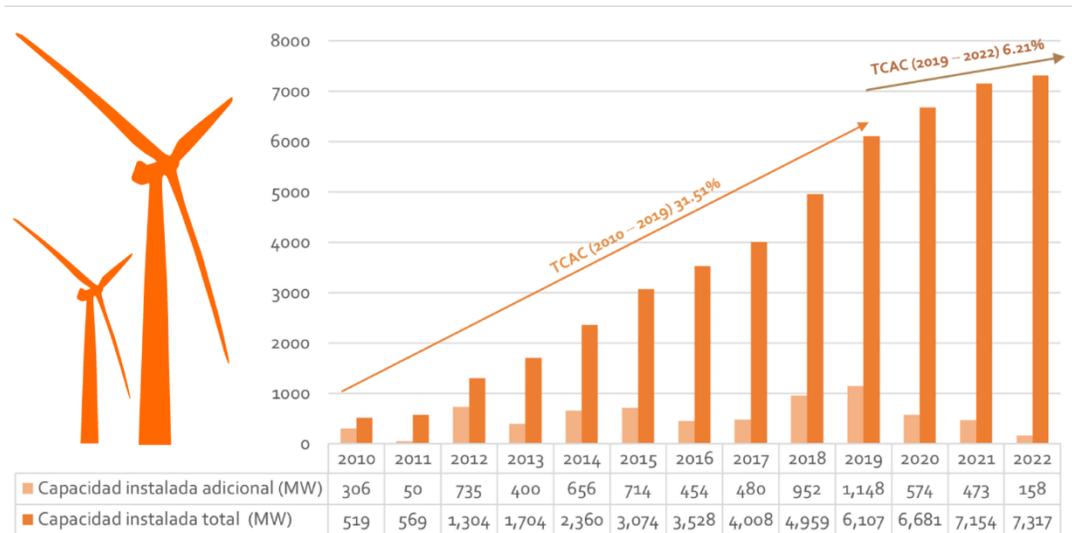


Figura 1. Evolución de la capacidad instalada eólica en México [5]

1.1.2. Turbina eólica

Una turbina eólica, es una máquina que convierte la energía del viento en electricidad, como generadores de electricidad, los aerogeneradores están conectados a alguna red eléctrica, estas redes incluyen circuitos de carga de baterías, sistemas de energía a escala residencial, redes aisladas y grandes redes de servicios públicos. En las turbinas eólicas modernas, el proceso de conversión real utiliza la fuerza aerodinámica básica de sustentación para producir un par neto positivo en un eje giratorio, lo que da como resultado primero la producción de energía mecánica y luego su transformación en electricidad en un generador [6] .

El aerogenerador se constituye de las siguientes partes:

- Rotor

Es el elemento que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, este se constituye a la vez de los álabes, eje y buje.

- Caja multiplicadora

La caja multiplicadora es un elemento conectado al rotor que multiplica la velocidad de rotación del eje para alcanzar el elevado número de revoluciones se necesita un generador eléctrico.

- Generador eléctrico

Tiene como función transformar la energía mecánica en energía eléctrica, en función de la potencia del aerogenerador se utilizan como generadores síncronos y asíncronos.

- La góndola

Es la estructura en la que se resguardan los elementos básicos de transformación de energía, es decir, el eje del rotor, el multiplicador, el generador y los sistemas auxiliares, en la góndola también se encuentra el sistema de orientación.

- La torre

Es el elemento de sujeción y el que sitúa el rotor y los mecanismos que lo acompañan a la altura idónea [2].

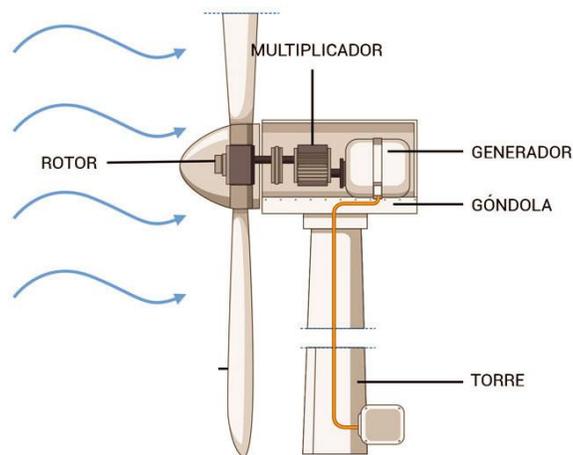


Figura 2. Partes de un aerogenerador [17]

1.1.3. Clasificación de los aerogeneradores modernos

Los aerogeneradores se clasifican por diferentes criterios, siendo de los más habituales los siguientes:

Por la posición del eje de rotación

Dependiendo de la posición del eje de giro de los aerogeneradores respecto a la dirección del viento:

- Eje vertical

También conocido como VAWT por sus siglas en inglés. En este tipo de dispositivos el eje de rotación está en dirección perpendicular al suelo [7].

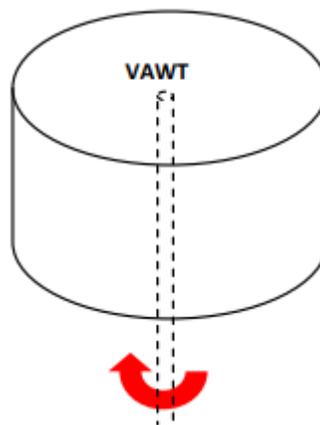


Figura 3. Aerogenerador tipo vertical [18]

- Eje horizontal

También conocido como eje horizontal, HAWT, por sus siglas en inglés. Su eje de rotación se encuentra paralelo al suelo, este tipo de aerogenerador son los más populares y utilizados [7].

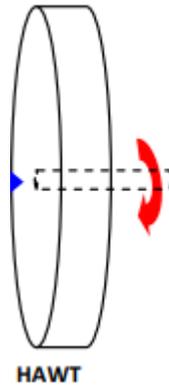


Figura 4. Eje horizontal [18]

De acuerdo con la potencia generada

De acuerdo con los criterios de potencia, se distinguen los siguientes seis tipos de aerogeneradores o turbinas eólicas.

Tabla 1. Clasificación de aerogeneradores según la potencia [8]

Denominación	Potencia
Micro	<1kW
Mini	1 - 10kW
Baja	10 - 100 kW
Media	100 - 1000 kW
Alta	1000 – 10 000 kW
Muy alta	>10 000 kW

De acuerdo con la orientación al viento

- Orientación a barlovento: se refiere cuando el rotor se enfrenta al viento.
- Orientación a sotavento: se refiere cuando el rotor se mueve con el viento que sale detrás de la góndola.

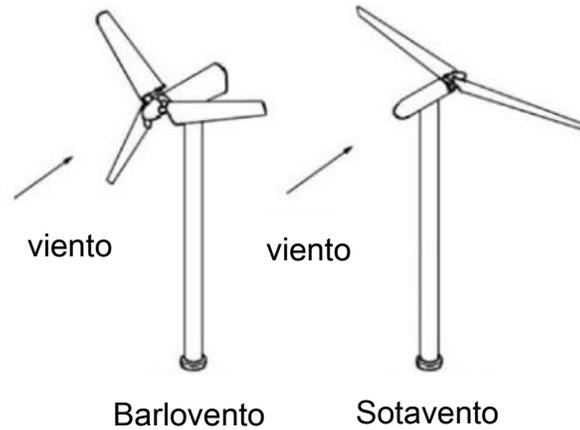


Figura 5. Orientación del rotor [6]

De acuerdo con el número de álabes

- Monopala: consta de un solo álabe
- Bipala: consta de dos álabes
- Tripala: consta de tres álabes
- Multipala: consta de 6 a 24 álabes



Figura 6. Número de álabes [19]

1.1.4. Rotor

El rotor es uno de los elementos principales de una máquina eólica. Está compuesto por un determinado número de álabes, siendo su misión la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica utilizable. [3]

Las características generales de un rotor se definen por los siguientes parámetros:

- Velocidad específica
- Solidez
- Rendimiento aerodinámico

Velocidad específica

También conocido como TSR por sus siglas en inglés *Tip Speed Ratio*, se define como la relación entre la velocidad de la punta del álabe y la velocidad del viento, este parámetro es adimensional permite clasificar los rotores en lentos (velocidad específica próxima a 1) o rápidos (velocidad específica de 5 a 8) [3].

Solidez

Se define como la relación entre la superficie proyectada por los álabes y la superficie descrita por las mismas en su movimiento de rotación. Este parámetro permite comparar diferentes tipos de rotores desde el punto de vista de la eficacia del material utilizado y de la sencillez constructiva [3].

Eficiencia del aerogenerador

También conocido como coeficiente de potencia (C_p), expresa la parte de la energía del viento que se transforma en energía mecánica en el eje del rotor. A su vez, el coeficiente de potencia de un rotor depende de las características geométricas del álabe, tales como: [3]

- Radio local

- Cuerda local
- Ángulo de torsión local
- Tipo de perfil aerodinámico local

La aplicación de métodos matemáticos para la simulación de aerogeneradores ha tenido una gran importancia en los trabajos, ya que, permite evaluar múltiples alternativas en cuanto a parámetros, niveles de las variables y tecnologías, también, permite cuantificar los riesgos para conocer si es factible o no el uso de una tecnología en especial. La simulación de estos métodos permite optimizar procesos para encontrar la mejor solución u opción de un problema o elemento. Hoy en día se han desarrollado herramientas para predecir el comportamiento del rotor sometido a distintos flujos de viento.

En este trabajo se realizará la simulación de un rotor eólico de 10kW mediante Python, un software libre de programación que por medio del método BEM se realizará el análisis aerodinámico de dicho rotor y al finalizar esta tarea, se hará una comparación mediante un software libre llamado QBlade.

1.2. Planteamiento del problema

El bajo rendimiento aerodinámico causa problemas como altos valores de resistencia en el álabe, baja potencia, altas magnitudes de torque, baja eficiencia en el aerogenerador, entre otros. Teniendo como consecuencia una baja generación de energía.

1.3. Justificación

El desarrollo de un software que permita determinar el comportamiento de la eficiencia del álabe en determinadas condiciones de operación y los esfuerzos producidos en sus secciones es necesario para mejorar el diseño del rotor eólico, ya que permite comparar el comportamiento de perfiles aerodinámicos y determinar la mejor opción de acuerdo con los requerimientos de diseño. Este trabajo aporta una herramienta útil para el diseñador de álabes de aerogeneradores que permite disminuir los tiempos de análisis del diseñador y contribuye al desarrollo de aerogeneradores al facilitar el análisis de la respuesta del álabe.

1.4. Hipótesis

Si se implementa un software para el diseño y análisis del comportamiento del rotor eólico permitirá al diseñador optimizar la eficiencia, mejorar la respuesta estructural y reducir el tiempo de análisis.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar un software para el diseño y análisis del comportamiento aerodinámico del rotor eólico de baja potencia.

1.5.2. Objetivos específicos

- Implementar la metodología de diseño de rotores eólicos para la selección del perfil aerodinámico óptimo y su geometría.
- Simular el rotor en estado estacionario para obtener su curva de eficiencia (C_p - λ).
- Validar los resultados con el software de simulación QBlade.

CAPITULO II. FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. Energía eólica

2.1.1. Recurso eólico

El viento es una consecuencia de la radiación solar. Las diferencias de insolación entre los distintos puntos de la tierra generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan diferencias de densidad en las masas de aire, que se traducen en variaciones de presión. Se establece así cierto equilibrio por transferencia de energía entre las zonas de diferente temperatura, lo que ocasiona un desplazamiento de masas de aire, lo que produce el viento [3].

La energía disponible en el viento varía con el cubo de la velocidad del viento, por lo que la comprensión de las características del recurso eólico es fundamental para todos los aspectos de la explotación de la energía eólica, desde identificar sitios adecuados y predicciones de la viabilidad económica del parque eólico hasta el diseño de las propias turbinas eólicas. El viento es un recurso variable tanto geográficamente como temporalmente; por ejemplo, hay meses en donde la velocidad del viento es más rápida mientras que en otros meses los vientos son escasos, al igual que los lugares. La topografía tiene un efecto importante en el viento. Se experimenta más viento en la cima de las colinas y montañas que en terrenos elevados o en valles protegidos debido a que los obstáculos como los árboles o edificios reducen la velocidad del viento. Al ser el viento un recurso muy variable significa que la cantidad de viento varía de un año al siguiente; estas variaciones dificultan la realización de predicciones precisas sobre la viabilidad económica de proyectos de parques eólicos. La variación de año a año en la velocidad media anual del viento sigue siendo difícil de predecir, las variaciones de la velocidad del viento durante el año se caracterizan bien en términos de una distribución de probabilidad. Se ha encontrado que la distribución de Weibull brinda una buena representación de la variación en la velocidad media del viento por hora durante un año en muchos sitios típicos. Sin embargo, las variaciones también son

resultado de los cambios en la insolación durante el año debido a la inclinación del eje de rotación de la tierra [9].

En definitiva, se considera que, a nivel general las variables que definen el régimen de viento en un punto determinado son las siguientes:

- Situación geográfica.
- Características climáticas locales.
- Estructura topográfica de la zona.
- Irregularidades puntuales del terreno.
- Altura sobre el nivel del suelo.

2.2. Aerodinámica

Un álabe es una viga de longitud finita con perfiles aerodinámicos como secciones transversales y, por lo tanto, se crea una diferencia de presión entre el lado inferior y superior, dando lugar a la sustentación. Las líneas de corriente que fluyen sobre el ala se desviarán hacia adentro y las líneas de corriente que fluyen debajo del ala se desviarán hacia afuera (figura 7).

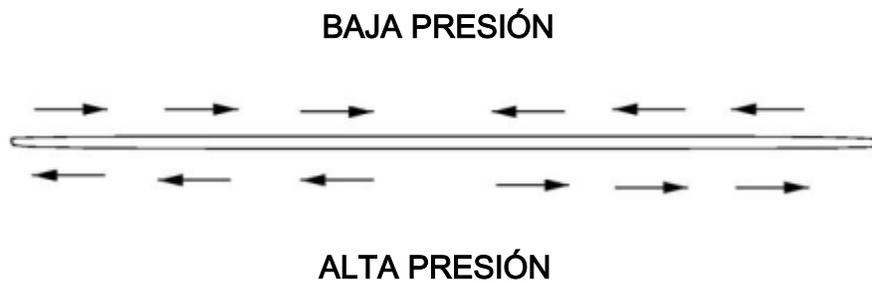


Figura 7. Vectores de velocidad vistos desde el álabe [10]

Debido a esta diferencia de presión, se crea una capa continua de vorticidad en el sentido de la corriente detrás del álabes, conocido como vórtices posteriores [10].

2.2.1. Sistema de vórtices detrás de una turbina eólica

El rotor de una turbina eólica de eje horizontal consta de varios álabes; si se hace un corte a una distancia radial, r , del eje de rotación, se observa una serie de perfiles aerodinámicos (figura 8) [10].

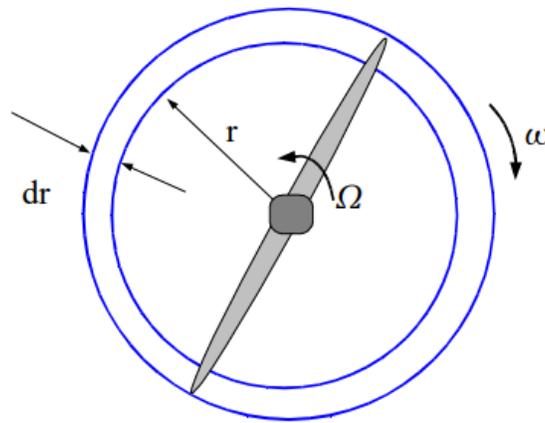


Figura 8. Rotor de una turbina eólica [12]

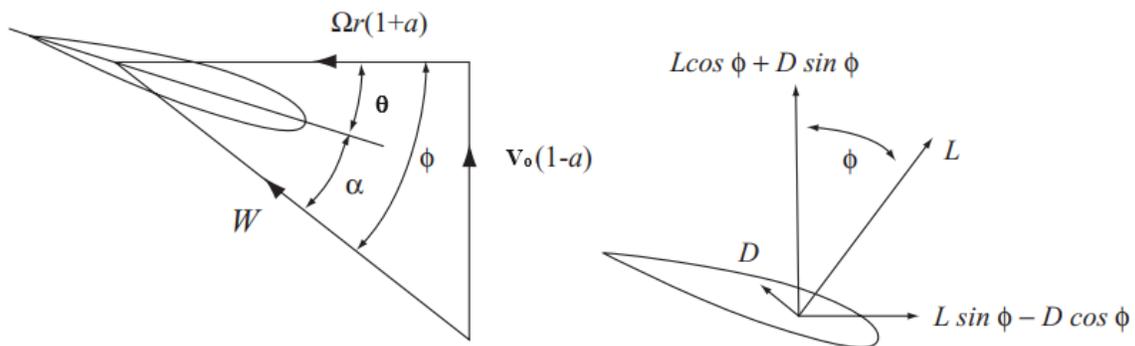


Figura 9. Vista de los perfiles aerodinámicos después del corte radial [9]

La figura 9 muestra las velocidades vistas para los perfiles aerodinámicos, donde θ es el ángulo local entre la cuerda y el plano de rotación; ϕ es el ángulo entre el plano de rotación y la velocidad relativa, se recuerda que la velocidad relativa vista por una sección del álabe es una combinación de la velocidad axial $(1-a)V_0$ y la velocidad tangencial $(1+a')\omega r$ en el plano del rotor. Y, por último, α es el ángulo de ataque local.

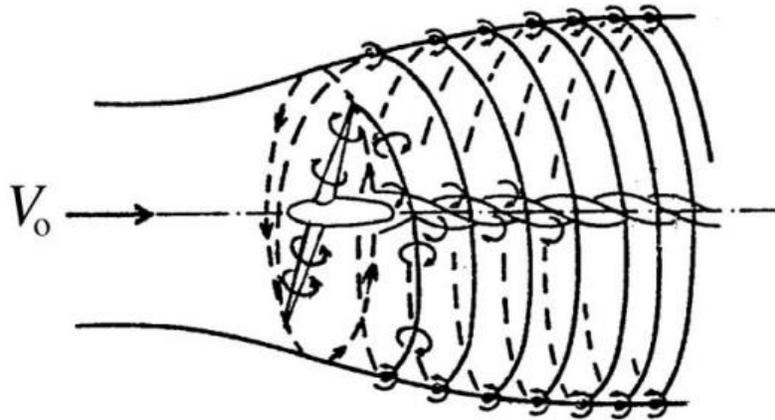


Figura 10. Esquema del sistema de vórtices detrás de la turbina eólica [10]

La figura 10 muestra el sistema de vórtices que se induce en una turbina eólica donde la componente de velocidad axial es opuesta a la dirección del viento y la componente de velocidad tangencial opuesta a la rotación de los álabes del rotor. La velocidad inducida en la dirección axial se especifica mediante el factor de inducción axial (aV_0), mientras, la velocidad tangencial inducida en la estela del rotor se representa mediante el factor de inducción tangencial ($2a'\Omega r$); dado que el flujo no gira aguas arriba del rotor, la velocidad inducida tangencial en el plano del rotor es $a'\Omega r$, Ω denota la velocidad angular del rotor y r es la distancia radial desde el eje de rotación [10].

2.3. Teoría del momento unidimensional

Un aerogenerador es capaz de extraer la energía cinética del viento. El dispositivo que se encarga de la extracción de energía se denomina disco actuador; el disco se considera ideal, en otras palabras, no tiene fricción y no hay componente de velocidad de rotación en la estela [10].

El disco tiene la característica de reducir la velocidad del flujo y extraer toda la energía resultante de esta reducción de velocidad [11]. Aguas arriba del disco, el tubo de flujo tiene un área de sección transversal menor que la del disco y aguas abajo un área mayor que el disco (figura 10).

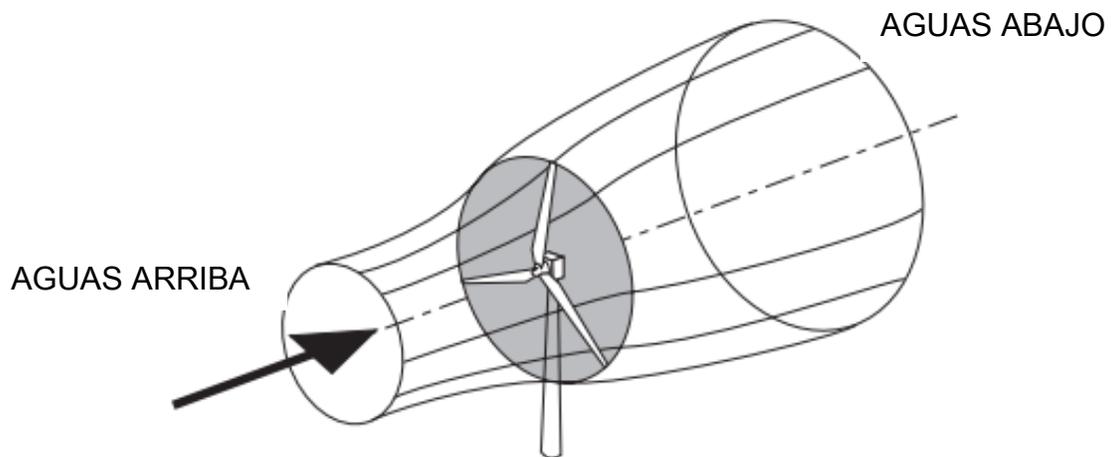


Figura 11. Extracción de energía de una turbina eólica [9]

A partir de la ecuación de Bernoulli, es posible establecer una relación entre la presión y la velocidad tanto aguas arriba como aguas abajo del rotor. Esta relación establece que cuando la velocidad disminuye, la presión aumentará y viceversa, este análisis solo se aplica para el flujo aguas arriba y aguas abajo del plano del rotor, sin embargo, para el plano a través del rotor no es aplicado ya que aquí ocurre una caída de presión, la caída de presión también se expresa como el cambio de momento del aire que pasa a través de una unidad de área del rotor por segundo (figura 11). El disco del rotor actúa como un dispositivo de arrastre que reduce la velocidad del viento desde V_0 , muy aguas arriba del rotor, hasta u en el plano del rotor y hasta u_1 en la estela; muy cerca del rotor hay un pequeño aumento de presión desde el nivel atmosférico p_0 hasta p antes de una caída de presión discontinua Δp sobre el rotor, después del rotor, la presión se recupera continuamente hasta el nivel atmosférico [10].

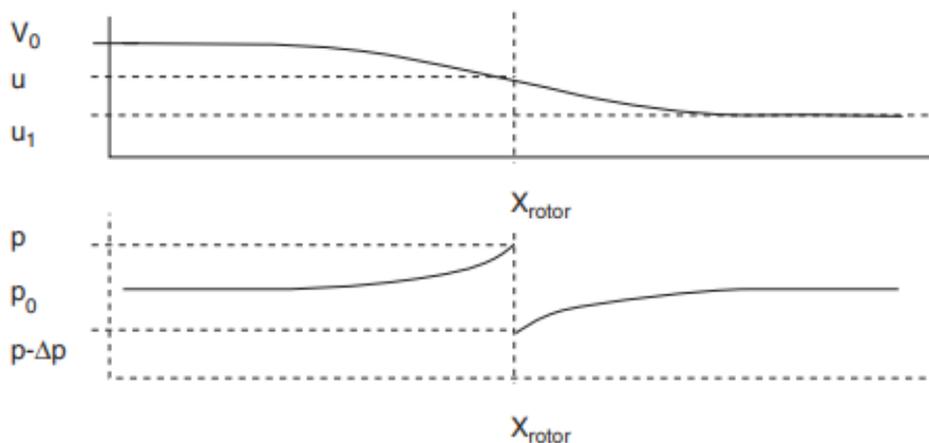


Figura 12. Velocidad y presión en el plano del rotor [11]

Solo una parte de la energía cinética que se extrae del viento se convierte en energía útil, el resto se devuelve al viento en forma de turbulencia y, finalmente se disipa en forma de calor [9].

El empuje es la fuerza en la dirección de la corriente resultante de la caída de presión sobre el rotor y se representa con la letra, T (también es conocido como la fuerza del viento sobre la turbina eólica [6]). Y se utiliza para reducir la velocidad del viento V_o a u_1 . Aplicando la conservación del momento lineal al volumen de control que encierra todo el sistema del disco actuador, se encuentra la fuerza neta que actúa sobre ese volumen de control. Esa fuerza es igual y opuesta al empuje; si el empuje se reemplaza por la caída de presión sobre el rotor, se observa en la ecuación 1:

$$u = \frac{1}{2}(V_o + u_1) \quad \text{Ec. 1}$$

La ecuación 1 indica que la velocidad del aire en el plano del rotor se ha desacelerado a exactamente la mitad del déficit de velocidad total que experimentará desde aguas arriba hasta aguas debajo de la estela del rotor. Así que la otra mitad de la desaceleración del viento se produce en la estela, aguas abajo del rotor.

El factor de inducción axial se define como, a , en la ecuación 2: [10]

$$u = (1 - a)V_o \quad \text{Ec. 2}$$

Combinando la ecuación 1 y ecuación 2, se tiene la ecuación 3:

$$u_1 = (1 - 2a)V_o \quad \text{Ec. 3}$$

2.3.1. Parámetros importantes en una turbina con rotación en la estela

En el caso de un rotor de turbina eólica giratoria, el flujo detrás del rotor gira en dirección opuesta al rotor en reacción al torque ejercido por el flujo sobre el rotor. La generación de energía cinética rotacional en la estela da como resultado una menor extracción de energía por parte del rotor de lo que se esperaría sin la rotación de la estela. Por lo tanto, las turbinas eólicas de funcionamiento lento experimentan más pérdidas por rotación de estela que las maquinas eólicas de alta velocidad [12]. Si se supone que la velocidad angular impartida a la corriente de flujo (ω) es pequeña en comparación con la velocidad angular (Ω) del rotor de la turbina eólica, entonces, se supone que la presión en la estela lejana es igual a la presión en la corriente libre.

Se define un factor de inducción angular (a') como:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad \text{Ec. 4}$$

Tenga en cuenta que cuando se incluye la rotación de la estela en el análisis, la velocidad inducida en el rotor consta no solo de la componente axial ($V_o a$) sino también de una componente en el plano del rotor ($r\Omega a'$).

La relación de velocidad de punta, definida como la relación entre la velocidad de punta del álabe y la velocidad del viento de corriente libre, está dada por:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_o} \quad \text{Ec. 5}$$

La relación de velocidad de punta a menudo es utilizada en las ecuaciones aerodinámicas del rotor. La relación de velocidad local es la relación entre la velocidad del rotor en un radio intermedio y la velocidad del viento [6].

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_o} \quad \text{Ec. 6}$$

2.3.2. Límite de Betz y coeficiente de potencia

Si se define el factor de inducción axial como la disminución fraccionaria de la velocidad del viento entre la corriente libre y el plano del rotor; y a medida que el factor de inducción axial aumenta desde 0, la velocidad del viento detrás del rotor disminuye cada vez más.

El rendimiento del rotor de un aerogenerador suele caracterizarse por su coeficiente de potencia, C_P .

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V_o^3 A} = \frac{\text{Potencia rotor}}{\text{Potencia del viento}} \quad \text{Ec. 7}$$

El coeficiente de potencia adimensional representa la fracción de la potencia del viento que es extraído por el rotor.

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad \text{Ec. 8}$$

El valor máximo alcanzable del coeficiente de potencia se conoce como límite de Betz en honor al aerodinámico alemán Albert Betz. El límite no se debe a ninguna deficiencia en el diseño, sino que el tubo de flujo tiene que expandirse aguas arriba del disco actuador y, por lo tanto, la sección transversal del tubo es donde el aire se encuentra en su punto máximo.

El C_P máximo se determina tomando la derivada del coeficiente de potencia con respecto a a que, igualándolo a cero dando como resultado el factor de inducción axial 1/3, por eso:

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad \text{Ec. 9}$$

De manera similar a la potencia, el empuje de una turbina eólica se caracteriza mediante un coeficiente de empuje adimensional

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\text{Fuerza de empuje}}{\text{Fuerza dinámica}} \quad \text{Ec. 10}$$

El coeficiente de empuje para una turbina eólica ideal se observa en la ecuación 11.

$$C_T = 4a(1 - a) \quad \text{Ec. 11}$$

C_T tiene un máximo de 1.0 cuando $a=0.5$ y la velocidad aguas abajo es cero. A la máxima potencia de salida ($a=1/3$), C_T tiene un valor de 8/9. Aunque la máxima potencia se encuentra cuando $a = 1/3$, esta potencia es la máxima teóricamente, en la práctica, tres efectos conducen a una disminución del coeficiente de potencia máximo alcanzable: [6]

- Rotación de la estela detrás del rotor.
- Número finito de álabes y pérdidas de punta asociadas.
- Resistencia aerodinámica distinta de cero.

La figura 12 muestra la variación de C_P y C_T , se observa cómo tanto C_P y C_T aumentan al aumentar el factor de inducción axial para valores pequeños de, a . Sin embargo, para valores de a mayores a $1/3$ el C_P disminuye mientras que C_T aumenta; para valores de a mayores a $1/3$ la teoría es cada vez más incierta en comparación con la aerodinámica real del rotor. Para a igual a 0.5, la estela lejana se ha detenido y, para a mayor a 0.5, el resultado es un flujo inverso en la estela lejana. Por tanto, para a mayor igual a 0.5 la teoría se derrumba [13].

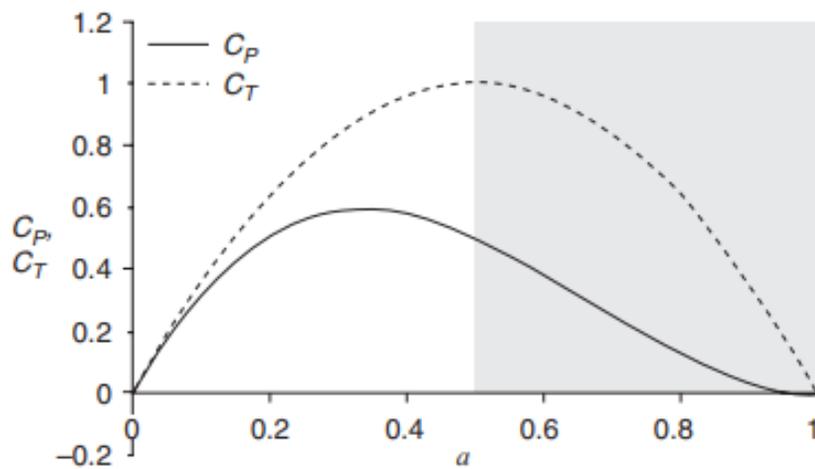


Figura 13. Coeficiente de potencia y coeficiente de empuje para la teoría del momento unidimensional en función del factor de inducción axial [13]

2.5. Teoría del elemento del álabe

Para este análisis se determina que el álabe está dividido en N secciones (figura 13) y se calculan las fuerzas en cada una de estas secciones; estas fuerzas se integran a lo largo de todo el álabe para obtener las fuerzas y los momentos producidos por el álabe.

Esta teoría se basa en dos supuestos:[12]

- No hay interacción aerodinámica entre diferentes secciones del álabe.
- Las fuerzas sobre las secciones del álabe están determinadas únicamente por los coeficientes de sustentación y resistencia.

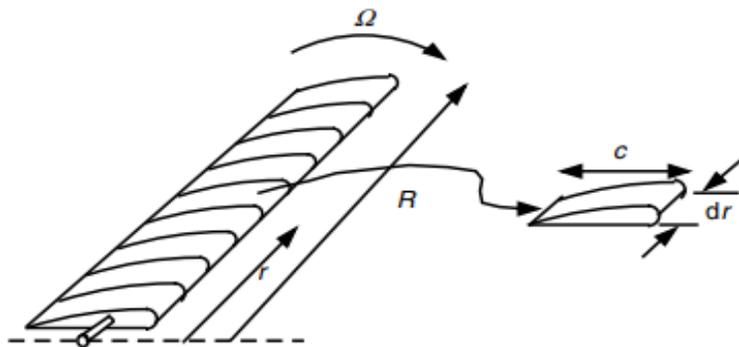


Figura 14. Esquema de álabe dividido en N secciones [6]

Al dividir en álabe en N secciones, cada uno de los elementos del álabe experimentará un flujo ligeramente diferente, ya que tienen una velocidad de rotación diferente, una longitud de cuerda diferente y un ángulo de torsión diferente. En la práctica, el flujo gira ligeramente cuando pasa sobre el perfil aerodinámico, por lo que para obtener una estimación más precisa del rendimiento del perfil aerodinámico se utiliza un promedio de las condiciones de flujo de entrada y salida para estimar el rendimiento.

El flujo alrededor de los álabes comienza en el punto 2 y termina en el punto 3 (figura 14). A la entrada de los álabes (punto 2) el flujo no gira, mientras que a la salida de

los álabes (punto 3) el flujo gira a una velocidad de rotación ω , es decir, hay rotación en la estela [12].

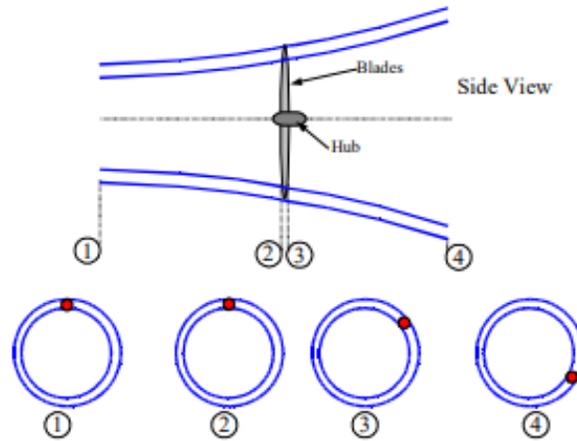


Figura 15. Ilustración del flujo con rotación [12]

Al analizar las fuerzas sobre la sección del álabes, se debe tener en cuenta que las fuerzas de elevación y arrastre son perpendiculares y paralelas, respectivamente al viento relativo. Para cada sección de álabes se hace el siguiente análisis de fuerza [6]:

La fuerza de sustentación se muestra en la ecuación 12:

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c dr \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

dF_L = Fuerza de sustentación

C_l = es el coeficiente de sustentación

ρ = es la densidad (kg/m^3)

V_{rel} = Velocidad relativa

c = es la cuerda local

Fuerza de arrastre visto en la ecuación 13:

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c dr$$

Ec. 13

Donde:

dF_D = Fuerza de arrastre

C_d = es el coeficiente de arrastre

ρ = es la densidad (kg/m³)

V_{rel} = Velocidad relativa

c = es la cuerda local

Fuerza normal descrito en la ecuación 14:

$$dF_N = dF_L \cos \phi + dF_D \sin \phi$$

Ec. 14

Donde:

dF_N = Fuerza normal

dF_L = es la fuerza de sustentación

dF_D = es la fuerza de arrastre

ϕ = es el ángulo de flujo

Fuerza tangencial visto en la ecuación 15:

$$dF_T = dF_L \sin \phi - dF_D \cos \phi$$

Ec. 15

Donde:

dF_T = Fuerza tangencial

dF_L = es la fuerza de sustentación

dF_D = es la fuerza de arrastre

ϕ = es el ángulo de flujo

las características generales de rendimiento están determinadas por la integración numérica a lo largo del álabe.

Si el rotor tiene cierto número de álabes, la fuerza normal total sobre la sección a una distancia r , se representa con la ecuación 16:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c dr \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

dF_N = Fuerza normal

B = Número de álabes

V_{rel} = Velocidad relativa

C_l = Coeficiente de sustentación

C_d = Coeficiente de arrastre

ϕ = es el ángulo de flujo

c = cuerda local

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) c r dr \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

dQ = Torque

B = Número de álabes

V_{rel} = Velocidad relativa

C_l = Coeficiente de sustentación

C_d = Coeficiente de arrastre

ϕ = es el ángulo de flujo

c = cuerda local

La ecuación 16 y 17 definen la fuerza normal (empuje) y la fuerza tangencial (torque) sobre la sección anular del rotor como una función de los ángulos de flujo en los álabes y características del perfil aerodinámico [6].

2.4. Perfiles aerodinámicos

Los álabes de las turbinas eólicas utilizan perfiles aerodinámicos para desarrollar potencia mecánica [6]. Un perfil aerodinámico es la forma de la sección transversal de un ala bidimensional (envergadura infinita) [14].

Los perfiles aerodinámicos son estructuras con formas geométricas específicas que se utilizan para generar fuerzas mecánicas debido al movimiento relativo del perfil aerodinámico y el fluido circundante y son usadas para desarrollar potencia mecánica. El ancho y la longitud del álabes son funciones del rendimiento aerodinámico deseado; la máxima potencia deseada del rotor, las propiedades asumidas del perfil aerodinámico y las consideraciones de resistencia. En la figura 15 se muestran los términos que caracterizan el perfil aerodinámico [6].

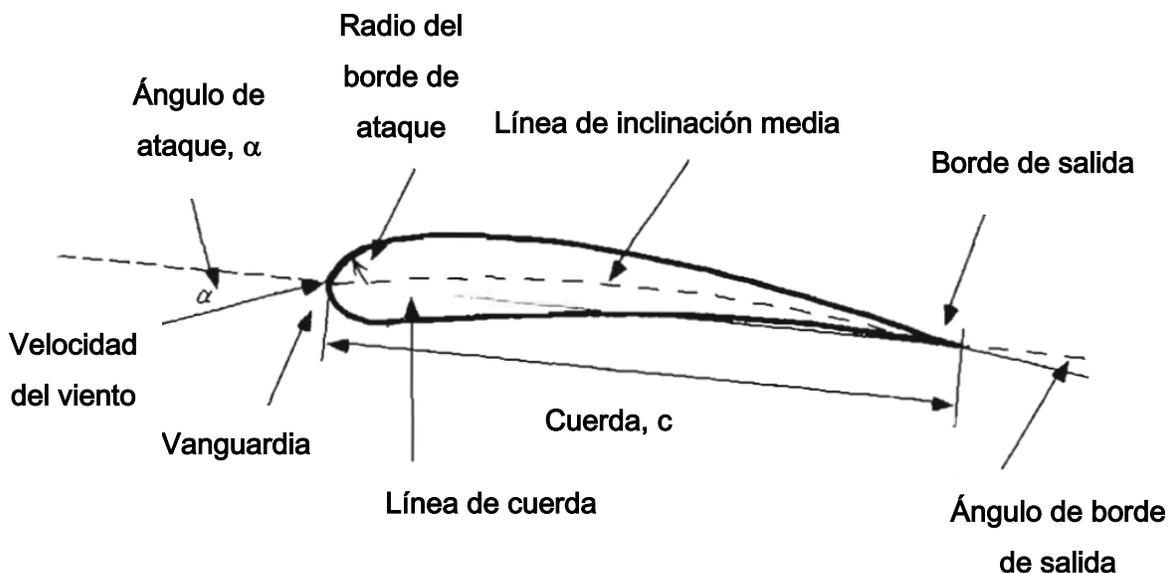


Figura 16. Partes de un perfil aerodinámico [6]

2.4.1. Sustentación (Lift) y arrastre (Drag)

El flujo de aire sobre un perfil aerodinámico produce una distribución de fuerzas sobre la superficie del perfil aerodinámico; la velocidad del flujo sobre los perfiles aerodinámicos aumenta sobre la superficie convexa. La resultante de todas estas fuerzas de presión y fricción generalmente se resuelve en dos fuerzas y un momento que actúa a lo largo de la cuerda (figura 16).

- Fuerza de sustentación: es una consecuencia de la presión desigual sobre las superficies aerodinámicas superior e inferior.
- Fuerza de arrastre: se debe tanto a las fuerzas de fricción viscosa en la superficie del perfil aerodinámico como la presión desigual en las superficies del perfil aerodinámico que miran hacia y desde el flujo que se aproxima.
- Momento: es una tendencia al giro en el eje perpendicular a la sección transversal de la superficie aerodinámica ubicado a un cuarto de la cuerda del perfil.

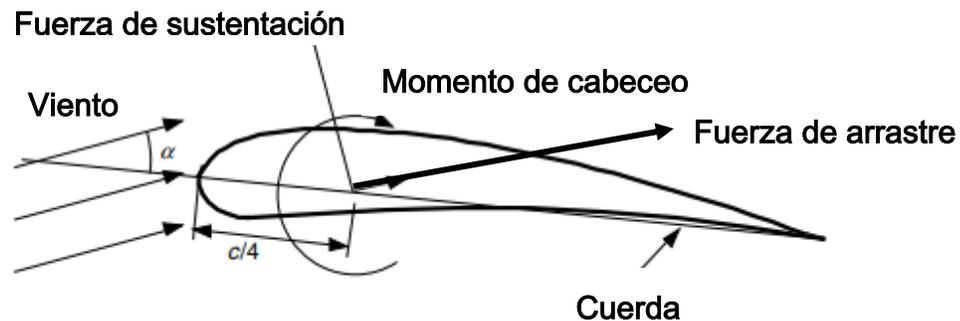


Figura 17. Fuerzas que actúan sobre un perfil aerodinámico [6]

Algunos problemas de flujo que se presentan en el perfil se encuentran en parámetros no dimensionales, como lo es, el número de Reynolds está definido en la ec. 18 [6].

$$R_e = \frac{V_o L}{\nu} = \frac{\rho V_o L}{\mu} = \frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza viscosa}} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

ρ = es la densidad del fluido,

μ = es la viscosidad del fluido,

ν = es la viscosidad cinemática,

V_o = es la velocidad del viento

L = es la longitud de la cuerda.

Se define el coeficiente de fuerza y de momento como coeficientes no dimensionales, ya que, son funciones del número de Reynolds, para objetos bidimensionales o tridimensionales. El diseño del rotor generalmente usa coeficientes bidimensionales, determinados para un rango de ángulos de ataque y número de Reynolds, en pruebas de túnel de viento.

Los coeficientes de sustentación, arrastre y de momento de cabeceo de un perfil aerodinámico son generados por la variación de presión sobre la superficie del perfil aerodinámico y la fricción entre el aire y el perfil aerodinámico. El arrastre provoca el desarrollo de dos regiones diferentes de flujo: una más alejada de la superficie aerodinámica y la capa límite.

El aire posee viscosidad, es decir, tiene cierto espesor y ofrece resistencia a las deformaciones, por tanto, cuando circula libre y sin oposición, la velocidad en todos sus puntos es la misma. Sin embargo, al entrar en contacto con una superficie genera fuerzas de rozamiento que dificultan el avance de este, pero dicha

resistencia no es la misma a lo largo de toda la extensión de flujo aerodinámico, esta es conocida como capa límite. Las capas límite laminares generan fuerzas de fricción mucho más bajas que las capas límite turbulentas; un perfil aerodinámico solo produce sustentación de manera eficiente siempre que las distribuciones de presión superficial puedan ser soportadas por capa límite [6].

Los perfiles aerodinámicos para las turbinas eólicas de eje horizontal están diseñados para usarse en ángulos bajos de ataque, donde los coeficientes de elevación son bastantes altos y los coeficientes de arrastres bastante bajos. El comportamiento del perfil aerodinámico cambia según en diferentes números de Reynolds; además, para cada cierto rango de ángulos de ataque, estos se clasificarán en algún régimen de flujo; los álabes de las turbinas eólicas a menudo operan en la región estancada [6].

2.4.1.1. Elección de perfiles aerodinámicos

Para escoger el perfil aerodinámico adecuado se debe tomar en cuenta algunas características, como:

- Mayor relación sustentación-arrastre (C_l/C_d).
- Pequeños coeficientes de empuje (C_m).
- Manufactura accesible.

Estos parámetros son tomados en cuenta para mejorar el rendimiento aerodinámico del rotor.

2.5. Geometría del álabe

El propósito de la mayoría de las turbinas eólicas es extraer tanta energía del viento como sea posible y cada componente de la turbina debe optimizarse para ese objetivo [9]. Optimizar el diseño de un álabe significa maximizar la potencia de salida y, por lo tanto, es necesario una solución adecuada para el elemento del álabe.

Los aerogeneradores de eje horizontal son muy sensibles a los cambios de perfil y el diseño de las aspas [15].

Los parámetros geométricos que tienen un efecto sobre el rendimiento aerodinámico de un perfil aerodinámico son: el radio del borde de ataque, la línea de inclinación media, el espesor máximo, la distribución del espesor del perfil y el ángulo del borde de salida [6].

2.6. Diseño de álabes

Los álabes de los aerogeneradores deben diseñarse para convertir la energía cinética del viento en torque, empuje, potencia, entre otros y al mismo tiempo que tienen propiedades estructurales que garantizan la resistencia estática y a la fatiga necesarias para una larga vida. El punto de partida para el diseño de álabes de turbinas eólicas supone un flujo axial uniforme aguas arriba de la turbina eólica con un flujo bidimensional sobre los álabes y condiciones de operación en estado estable, aunque en los casos reales el flujo axial no es uniforme. Un rotor de eje horizontal consta de uno o más álabes, cada uno con una serie de formas aerodinámicas a lo largo del álabe. La elección del perfil aerodinámico, la longitud de la cuerda y la torsión a lo largo de del álabe determinan el rendimiento del rotor en una variedad de condiciones de flujo. En conclusión, el diseño de álabes se rige a partir de condiciones aerodinámicas de diseño que se define por la relación entre la velocidad del rotor y la velocidad del viento [6].

Para llevar a cabo el diseño de álabes se hace uso de códigos computacionales, con el propósito de calcular parámetros que describan el funcionamiento del rotor, como, cargas fluctuantes en todo el álabe, generación de ruido, el comportamiento del flujo sobre la superficie del perfil, entre otros. Estos códigos son llamados códigos aeroelásticos, ya que, no solo modelan la aerodinámica del rotor, si no, también, las deformaciones que sufren los alabes y la interacción entre los movimientos y el flujo. Los códigos que normalmente son usados en la ingeniería

se basan en la teoría del impulso del elemento del álabe (BEM); esta teoría ayuda a comprender el comportamiento del rotor en estado estable, además de dar extensiones para también realizar análisis en estado no estable.

Para desarrollar el máximo coeficiente de potencia posible se requiere una geometría de álabe adecuada, la optimización del álabe se lleva a cabo mediante dos condiciones, para velocidades en la punta variables o constantes [9]

2.6.1. Diseño del álabe para velocidad variable

Una turbina que opera a velocidad variable mantiene una relación de velocidad de punta constante requerida para desarrollar el coeficiente de potencia máximo independientemente de la velocidad del viento.

Para una relación de velocidad de punta elegida el par desarrollado en cada estación del álabe se maximiza si:

$$a := \frac{1}{3} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

a = es el coeficiente de inducción axial

Y

$$a' = \frac{a(1 - a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

a' = es el coeficiente de inducción tangencial

a = es el coeficiente de inducción axial

λ = es la velocidad de punta del álabe

μ = es la viscosidad del fluido

La ecuación 19 Y la ecuación 20 muestran los factores de inducción del flujo para obtener la potencia máxima. Aquí las pérdidas no se han tomado en cuenta [9].

2.6.2. Diseño óptimo del álabe para una velocidad constante

Si la velocidad de rotación de una turbina se mantiene a un nivel constante, como ocurre en algunas turbinas conectadas a la red, entonces, la relación de velocidad de punta cambia continuamente y un álabe optimizado para una relación de velocidad de punta fija no sería necesariamente apropiada. No se dispone de una técnica sencilla para el diseño óptimo de un álabe y que funcione a una velocidad de rotación constante. Alternativamente, se elige una relación de velocidad de punta de diseño que corresponda a la velocidad del viento en el sitio especificado que contiene la mayor cantidad de energía, o más práctico, se ajusta a el ángulo de inclinación de todo el álabe para maximizar la captura de energía [9].

2.7. Teoría del impulso del elemento de álabe (BEM)

Anteriormente se explicó que para la obtención de resultados ideales se hacía uso de la teoría del disco actuator donde, el flujo se caracterizó mediante la conservación del momento lineal y angular, sin embargo, en la práctica no sucede así, por ellos existen otros métodos que realizan el análisis para condiciones dadas en la vida real, como lo es el modelo BEM. Este método se basa en dos teorías, la teoría del momento y la teoría del elemento del álabe; esta teoría se utiliza para relacionar la forma de los álabes con la capacidad del rotor para extraer energía del viento; con este modelo es posible calcular las cargas estacionarias y, por tanto, también el empuje y la potencia para diferentes ajustes de velocidad del viento, velocidad de rotación y ángulo de inclinación [10].

El diseño inicial de la geometría del álabe se obtiene refiriéndose a la geometría teórica o ideal y comienza con la selección y colocación de perfiles aerodinámicos

a lo largo del tramo del álabe, después de dividir las secciones a lo largo del tramo del álabe y seleccionar los perfiles aerodinámicos, se determina el ángulo de ataque (α) de cada perfil aerodinámico (a partir de los datos correspondientes del perfil aerodinámico), además el radio local, se calcula de acuerdo con la posición radial del rotor (r) y el ángulo de entrada ideal $\phi(r)$ del viento para cada sección [16].

En el modelo de BEM se asume lo siguiente para los elementos anulares:

1. Lo que sucede en un elemento no puede ser sentido por los demás
2. La fuerza de los álabes sobre un flujo es constante en cada momento anular

En esta teoría también se introduce una corrección conocida como factor de pérdida de punta de Prandtl para corregir este último supuesto y calcular un rotor con un número finito de álabes, es decir, se supone que el álabe se divide en un número determinado de secciones a lo largo del álabe.

A partir del rotor ideal se encontró que la velocidad en la estela podría expresarse mediante el factor de inducción axial (a) y la velocidad del viento como $u_1 = (1-2a)U$, entonces el empuje y el torque se calculan como: [10]

$$dT = 4\pi r \rho V_o^2 a(1 - a)dr \quad \text{Ec. 21}$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_o \omega (1 - a)a'dr \quad \text{Ec. 22}$$

La velocidad relativa vista por una sección del álabe es una combinación de la velocidad axial $(1+a)V_o$ y la velocidad tangencial $(1+a')\Omega r$ en el plano del rotor (figura 17).

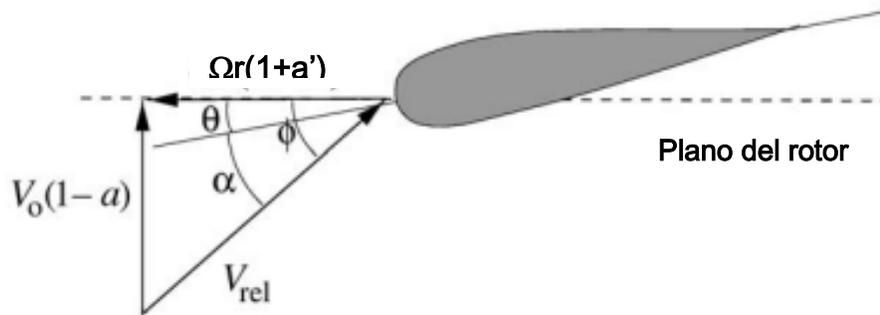


Figura 18. Velocidades en el plano del rotor [10]

θ es el ángulo de paso local del álabe, en otras palabras, es el ángulo que se forma entre la cuerda y el plano de rotación.

ϕ es el ángulo entre el plano de rotación y la velocidad relativa

α en ángulo de ataque es el ángulo dado por:

$$\alpha = \phi - \theta \quad \text{Ec. 23}$$

$$\tan \phi = \frac{(1 - a)V_o}{(1 + a')\omega r} \quad \text{Ec. 24}$$

La sustentación es perpendicular a la velocidad vista por el perfil aerodinámico y la resistencia es paralela a la misma velocidad. La fuerza normal (P_N) y tangencial (P_T) se ven en el plano del rotor (figura 18).

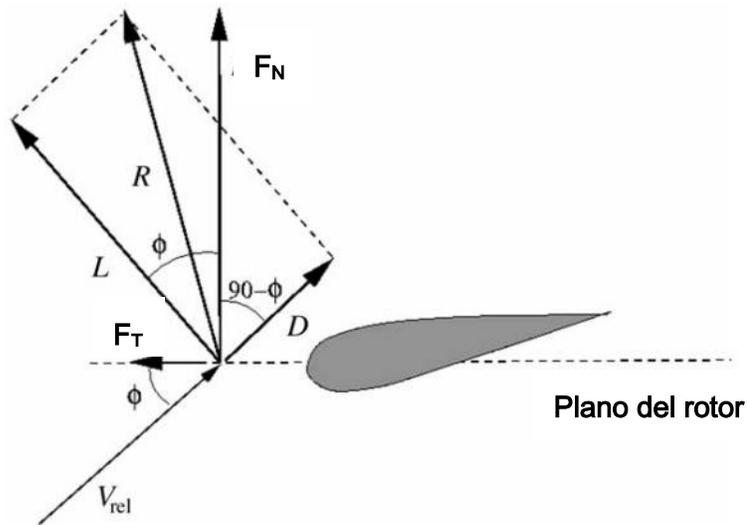


Figura 19. Fuerzas ejercidas sobre el perfil aerodinámico [10]

La figura 19 muestra las direcciones en las que se proyectan la fuerza normal, F_N , la fuerza tangencial, F_T , la sustentación, L , el arrastre, D .

Para conocer el coeficiente normal y el coeficiente de empuje, se hace uso de la ecuación 25 y 26:

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad \text{Ec. 25}$$

$$C_t = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad \text{Ec. 26}$$

Por la geometría se observa que:

$$V_{rel} \sin \phi = V_o(1 - a) \quad \text{Ec. 27}$$

$$V_{rel} \cos \phi = \omega r(1 - a') \quad \text{Ec. 28}$$

Se define la solidez (σ), como la fracción del área anular en el volumen de control que está cubierta por los álabes:

$$\sigma = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

$c(r)$ = es la cuerda local

B = Número de álabes

r = radio

sí se introduce la definición de solidez en el empuje y una nueva expresión para el factor de inducción axial es definido por la ecuación 30:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

ϕ = es el ángulo de flujo

σ = solidez

C_n = coeficiente normal

Mientras que para el factor de inducción axial se deriva por la ecuación 31:

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

Ec. 31

El algoritmo se resume en los siguientes pasos [10]:

- 1) Iniciar con $a = a' = 0$
- 2) Calcular el ángulo de flujo.
- 3) Calcular el ángulo de ataque local.
- 4) Leer $C_l(\alpha)$ y $C_d(\alpha)$ de la tabla.
- 5) Calcular C_n y C_t .
- 6) Calcular de a y a' .
- 7) Si a y a' han cambiado de una cierta tolerancia, regresar al paso 2 o finalizar.
- 8) Calcular las cargas locales en las secciones del álabe.

Las ecuaciones mostradas anteriormente comprenden el principio del método de BEM pero para obtener mejores resultados es necesario aplicar dos correcciones a este algoritmo; el primero es llamado pérdida de Prandtl el cual asume un infinito número de álabes y el segundo es la corrección de Glauert y es una relación empírica entre el coeficiente de empuje y el factor de inducción axial para valores mayores de 0.4 [10].

2.7.1. Factor de pérdida de Prandtl

El factor de pérdida de punta de Prandtl corrige la suposición de un número infinito de álabes; Prandtl derivó un factor de corrección F [10].

Donde la fuerza tangencial:

$$dT = 4\pi\rho V_o^2 a(1 - a)F dr$$

Ec. 32

Y

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_o^2 \omega (1 - a) a' F dr \quad \text{Ec. 33}$$

F se calcula de la siguiente manera:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

$$f = \frac{B}{2} \frac{R - r}{r \sin \varphi} \quad \text{Ec. 35}$$

Tomando en cuenta estas correcciones, se derivan las nuevas ecuaciones para a y a'

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad \text{Ec. 36}$$

Y

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad \text{Ec. 37}$$

2.7.2. Corrección de Glauert

Cuando el factor de inducción axial llega a ser mayor que aproximadamente 0.4, la teoría del momento no es aplicable. Se hacen diferentes relaciones empíricas entre el coeficiente de empuje C_T y del factor de inducción axial para que se ajusten las mediciones:

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq \frac{1}{3} \\ 4a \left(1 - \frac{1}{4}(5-3a)a\right)F & a > \frac{1}{3} \end{cases} \quad \text{Ec. 38}$$

O

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq a_c \\ 4(a_c^2 + (1-2a)a)F & a > a_c \end{cases} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde, a_c es igual a 0.2.

Para un volumen de control anular, C_T es por definición:

$$C_T = \frac{dT}{\frac{1}{2} \rho V_o^2 2\pi r dr} \quad \text{Ec. 40}$$

$$C_T = \frac{(1 - a)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \phi} \quad \text{Ec. 41}$$

Esta expresión para C_T ahora puede equiparse con la expresión empírica

Si $a < a_c$

$$4a(1 - a)F = \frac{(1 - a)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \phi} \quad \text{Ec. 42}$$

Si $a > a_c$

$$4a(a_c^2 + (1 - a_c)a)F = \frac{(1 - a)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \phi} \quad \text{Ec. 43}$$

El nuevo factor de inducción axial

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c - 1)} \right] \quad \text{Ec. 44}$$

Donde

$$K = \frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma C_n}$$

Ec. 45

Para calcular correctamente las velocidades inducidas para velocidades de viento pequeñas la ecuación. 44. y la ecuación 37. reemplazan las ecuaciones de la teoría del momento simple [10].

2.8. Procedimiento general de diseño de rotores

El procedimiento comienza con la elección de varios parámetros del rotor y la elección del perfil aerodinámico. Luego, se determina una forma inicial del álabe utilizando la forma óptima del álabe suponiendo una rotación de estela. La forma y el rendimiento final del álabe se determina de forma iterativa teniendo en cuenta la resistencia, las pérdidas en la punta y la facilidad de fabricación [6].

2.8.1. Determinar los parámetros básicos del rotor

- I. Comenzar por decidir la potencia, una velocidad del viento particular, un C_p probable y la eficiencia, de algún componente (por ejemplo, caja de cambios, generador, bomba). El radio del rotor se determina a partir de la ecuación 46 [6]:

$$P = C_p \eta \left(\frac{1}{2} \right) \rho \pi R^2 V_o^3 \quad \text{Ec. 46}$$

- II. Elegir una relación de velocidad de punta, según el tipo de aplicación del aerogenerador.
- III. Elegir un número de aspas, se muestra en la siguiente tabla una relación de número de álabes según la velocidad de la punta.

Tabla 2. Número de álabes para diferentes velocidades de punta [6]

λ	B
1	8-24
2	6-12

3	3-6
4	3-4
>4	1-3

IV. Seleccionar un perfil aerodinámico. Si $\lambda < 3$, se utilizan placas curvas, si $\lambda > 3$, utilice una forma más aerodinámica.

2.8.2. Definir la forma del álabe

V. Elegir las condiciones aerodinámicas de diseño, C_l y α , donde C_l/C_d sea el máximo para cada sección del álabe [6].

VI. Dividir el álabe en N secciones (entre 10 y 20), λ_r se calcula de acuerdo con la posición radial del rotor, así como también el ángulo de entrada ideal, ϕ_r del viento para cada sección del álabe. Una vez calculado el ángulo de entrada ideal, se calcula la cuerda, c_r , y el ángulo de torsión, θ_r [6].

$$\lambda_r = \lambda \left(\frac{r}{R} \right) \quad \text{Ec. 47}$$

$$\phi_r = \left(\frac{2}{3} \right) \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \quad \text{Ec. 48}$$

$$c_r = \frac{8\pi r}{BC_l} \left(\frac{\sin \phi}{3\lambda_r} \right) \quad \text{Ec. 49}$$

$$\phi_r = \theta_r + \alpha_r \quad \text{Ec. 50}$$

- VII. Usando una forma óptima del álabe como guía, hay que seleccionar una forma que prometa ser una buena aproximación. Se realiza la linealización en las distribuciones ideales de cuerda y torsión [6].

$$c_r = a1_r + b1 \quad \text{Ec. 51}$$

$$\theta_r = a2(R - r) \quad \text{Ec. 52}$$

Donde, **a1** es la pendiente del perfil de la cuerda y **a2** es el coeficiente que define la distribución de torsión del álabe; **b1** es una intersección de la función lineal de la cuerda [6].

2.8.3. Calcular el coeficiente de potencia del rotor y modificar el diseño de los álabes

- VIII. Se elige algún método para resolver las ecuaciones del rendimiento del álabe.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra la metodología implementada en la geometría, simulación y validación del diseño del rotor, así como la metodología general usada en el respectivo trabajo. La metodología se divide en 5 secciones, la metodología general, la evaluación del perfil aerodinámico, implementación del algoritmo para el diseño, el análisis del método BEM y la validación de resultados.

El diagrama 1 consiste en los pasos llevados a cabo para el desarrollo de este trabajo, desde la elección de los parámetros de entrada necesarios para la turbina eólica hasta la validación de los resultados al término del diseño del rotor.

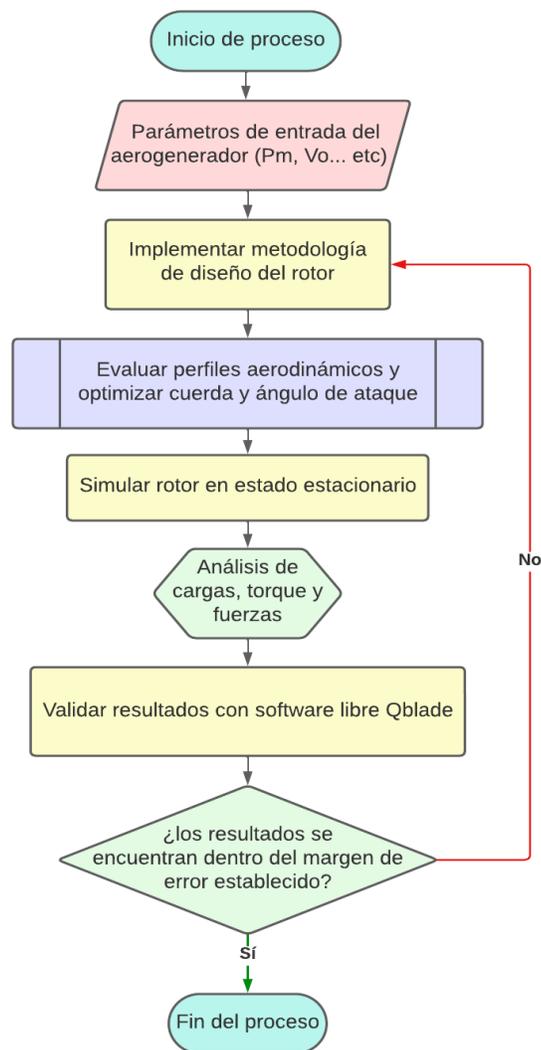


Diagrama 1. Metodología general del desarrollo de este trabajo

3.1 Evaluación de perfiles aerodinámicos

El diagrama 2 muestra la evaluación del perfil para su elección y garantizar una buena sustentación en el rotor. Para la selección del perfil aerodinámico se propusieron 3 perfiles aerodinámicos, NACA 4418, NREL S823 y el WORTMANN FX 63-137, esto con base en la literatura consultada, así como el número de Reynolds que representa el régimen del flujo del aire. Regularmente los números de Reynolds típicos encontrado en la operación de turbinas eólicas se encuentran en el rango de 500 000 y 10 000 millones [6]. Cuando se evaluaron los perfiles aerodinámicos se hizo uso del software libre QBlade que permite comparar los criterios de selección establecidos, que son, mayor relación C_l/C_d y menor coeficiente de momento, C_m .

Si el perfil cumple con los criterios de selección de perfil se procede a su selección para continuar con el proceso del diseño del rotor.

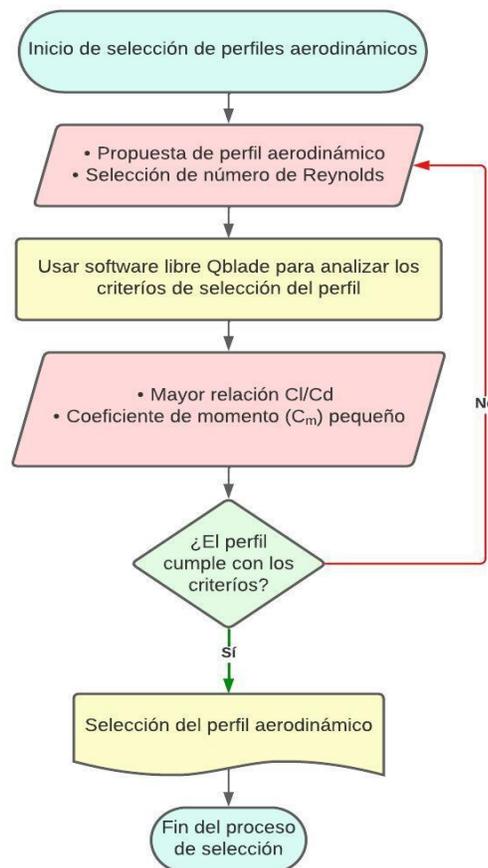


Diagrama 2. Evaluación de perfiles aerodinámicos

3.2. Metodología de algoritmo para diseño

La metodología utilizada en el desarrollo de diseño del álabe se observa en el diagrama 3 después de la selección del perfil aerodinámico se determina el ángulo de ataque donde la relación C_l/C_d es el máximo del perfil antes seleccionado. Se calcula el ángulo de flujo con la ecuación 24 donde se utiliza el factor de inducción axial igual a un tercio (el valor máximo de a donde se extrae la mayor energía del viento); A partir de la relación entre el ángulo de flujo y el ángulo de ataque se calcula el ángulo de torsión del álabe.

Después de encontrar los ángulos de ataque, de flujo, de torsión y la cuerda se procede a linealizar dicha cuerda para que el diseño del álabe sea más sencillo y simple. Por último, si el diseño del álabe cumple con todos los parámetros antes calculados se procede con el siguiente paso.

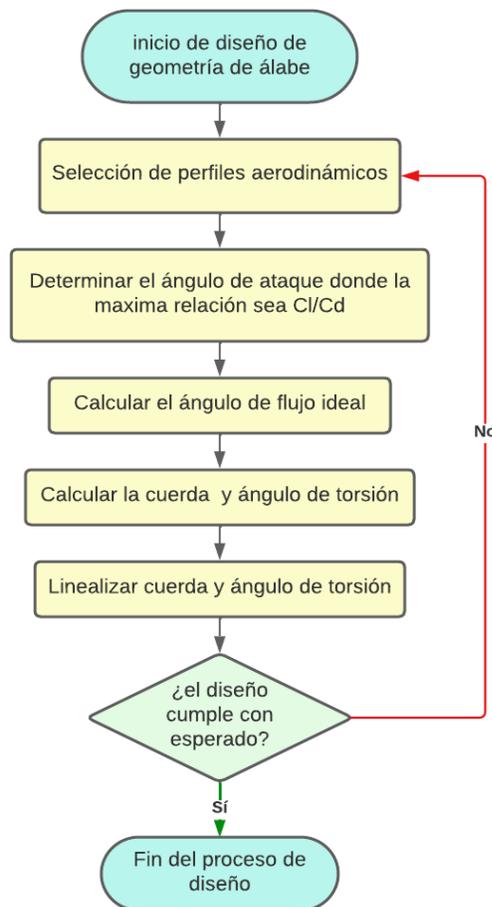


Diagrama 3. Metodología de algoritmo para el diseño teórico del álabe

3.3. Modelo BEM

El método BEM permite conocer las fuerzas aerodinámicas del álabe, consiste en dos teorías; la teoría del disco actuador y la teoría del elemento del álabe.

El modelo BEM inicia definiendo parámetros de entrada como la geometría del álabe, velocidad del viento constantes y la velocidad angular constante. El proceso define inicialmente el factor de inducción axial y el factor tangencial igual a cero; seguido de esto se calcula el ángulo de flujo con la ecuación 27; con este ángulo se encuentra el ángulo de ataque local en cada sección del álabe dividida. XFLR5 permite analizar perfiles aerodinámicos para el diseño de álabes donde se conoce la sustentación y arrastre del perfil aerodinámico escogido antes.

Realizado esto, se proceden a calcular la fuerza normal y tangencial producidas por la sustentación con estos datos se calculan los nuevos factores de inducción axial y tangencial si los nuevos factores se encuentran dentro del margen de error establecido se continúa con el proceso y finalmente, se calculan las fuerzas axiales, tangenciales, torque y la potencia, así como su rendimiento aerodinámico expresado por el C_p .

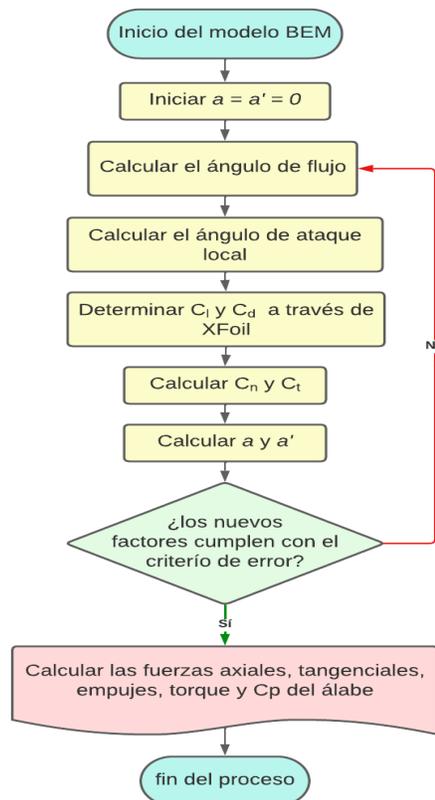


Diagrama 4. Pasos del método BEM

3.4. Validación de resultados

La validación de resultados se realizó a través de un software libre de diseño de aerogeneradores y rotores llamado "QBlade". Se ingresaron los resultados obtenidos del análisis BEM y se compilaron en el software; este software realiza el mismo análisis de BEM, pero con algunas excepciones, como que, el análisis lo realiza con un solo número de Reynolds y solo considera la pérdida en la punta de Prandtl para obtener los resultados de las fuerzas y potencia. Después, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos del análisis de BEM y QBlade, si se cumple que el margen del error se encuentra dentro de un 5%, se concluye que el álabe es eficiente y se finaliza el proceso, si no es así, el proceso retorna hasta el inicio de selección del perfil aerodinámico (ir a diagrama 2).

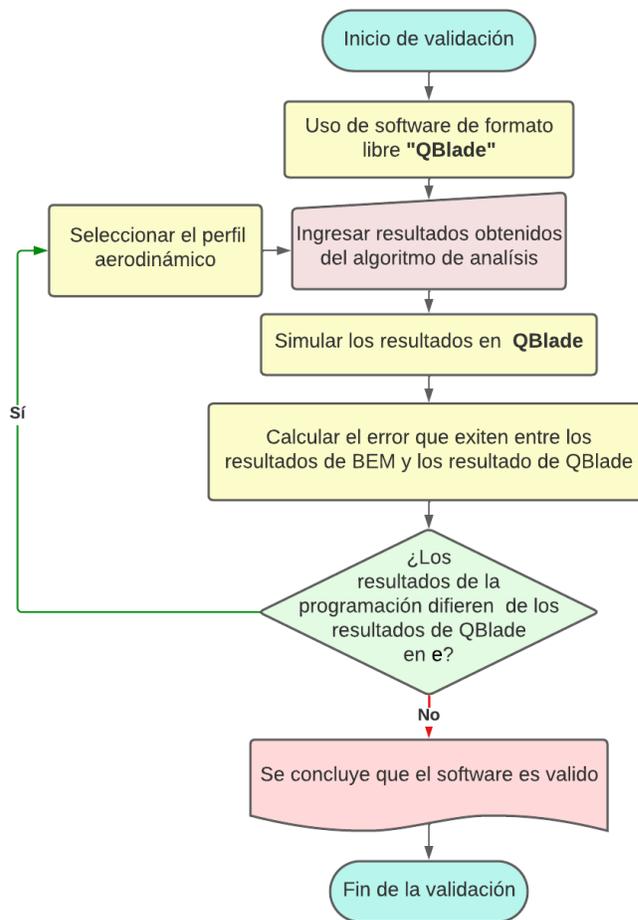


Diagrama 5. Evaluación de resultados con el software libre QBlade

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.1. Parámetros de entrada del aerogenerador

Para obtener el diseño teórico del rotor se necesitan los parámetros de funcionamiento de un aerogenerador, en este trabajo se realizó el diseño del álabe para un aerogenerador de 10 kW. Los parámetros de entrada se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Parámetros nominales de entrada para un aerogenerador de 10kW

Características	Valor	Unidades
V_0	10.5	m/s
P_m	13,219.3	W
Rpm	245	-
Radio	3.37	m
η_{mec}	1	-
η_{elec}	0.85	-
N_s	18	-
C_p	0.35	-
Re	1×10^6	-

4.2. Evaluar perfiles aerodinámicos

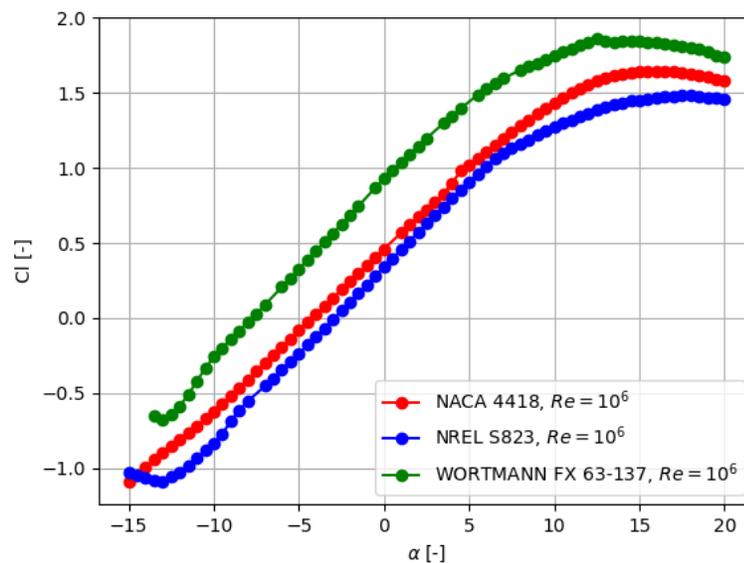
Los perfiles fueron evaluados con un ángulo de ataque de 5° , los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. evaluación de perfiles aerodinámicos

Perfil	C_l	C_d	C_l/C_d	C_m
NACA 4418	1.0234	0.00902	113.45	-0.0987
NREL S823	0.9085	0.00937	96.9584	-0.129

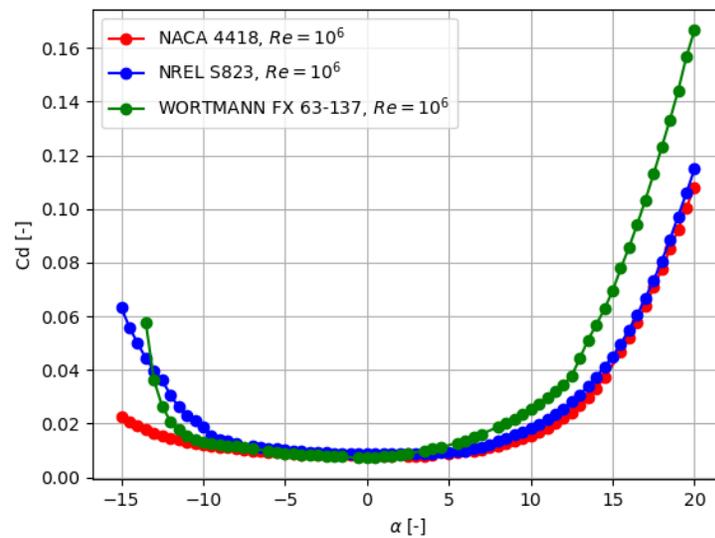
La evaluación de los tres perfiles se realizó mediante el software libre QBlade, obteniendo así, el perfil que presenta mayor rendimiento aerodinámico. Para este estudio se utilizó el perfil WORTMANN FX 63-137 para obtener la geometría teórica, para el análisis de las fuerzas y potencia que es capaz de producir el rotor que se diseñó.

La grafica 1 muestra la curva del coeficiente de sustentación el cual permite evaluar el comportamiento de distintos perfiles aerodinámicos. Se observa que el perfil que presenta mayor C_l es el WORTMANN FX 63-137 se observa que C_l máximo donde genera la mayor sustentación es de 1.85 y se encuentra con un ángulo de ataque 15° este ángulo representa el ángulo de entrada en pérdida donde la capa límite se comienza a desprender, es decir, donde la curva deja de ser lineal y por ello, pérdida de sustentación. Mientras que, para el perfil NACA 4418 su C_l máximo es de 1.64 con el mismo ángulo de ataque de 15° y el NREL S823 cuenta con un C_l máximo de 1.48 con un ángulo de ataque de 17° .



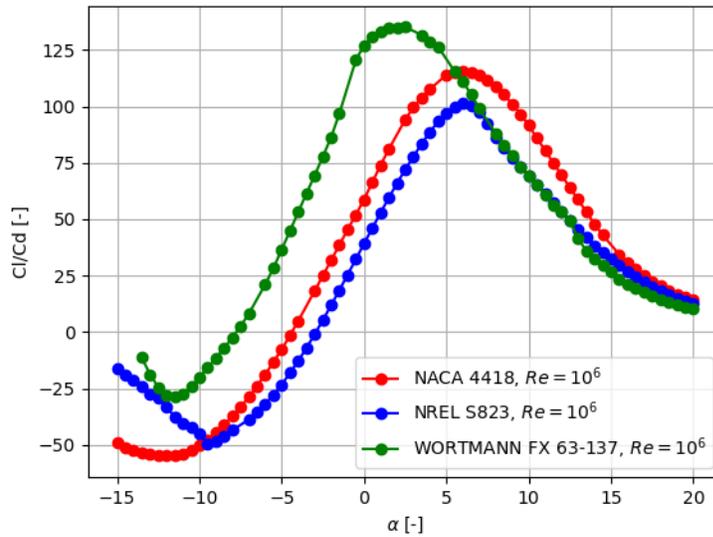
Gráfica 1. Relación C_l - α de los 3 perfiles

La grafica 2 representa el coeficiente de arrastre; este coeficiente cuantifica la resistencia que sufre el perfil cuando interactúa con el viento, se busca que el C_d sea pequeño para que no afecte la eficiencia aerodinámica del perfil. Se observa que para ángulos de ataque bajos de -10° hasta 4° los coeficientes de arrastre son menores y parecidos lo que quiere decir que la resistencia es casi nula, mientras que para ángulos de ataque mayores a 5° el C_d aumenta y, por ende, la resistencia lo cual no es conveniente. El perfil que presenta menor coeficiente de arrastre se encuentra entre el perfil NACA 4418 y NREL S823, mientras que el perfil WOTMANN FX 63-137 muestra un C_d ligeramente mayor.



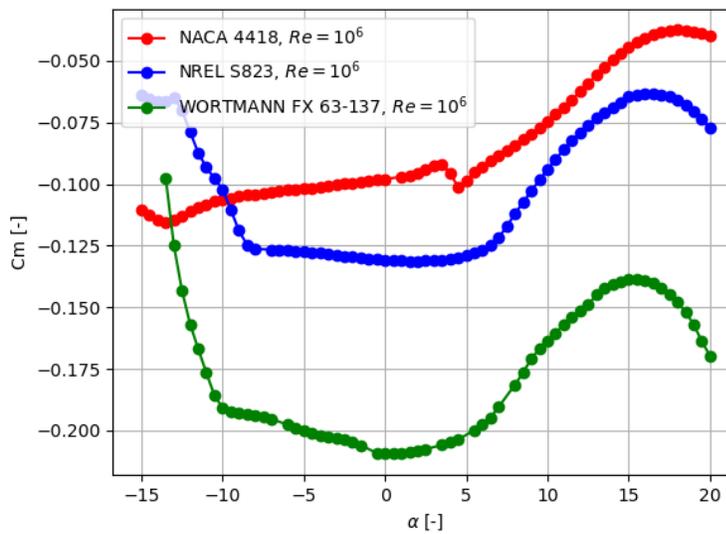
Gráfica 2. C_d vs α de cada perfil

La gráfica 3 muestra la relación C_l/C_d , esta relación indica la eficiencia aerodinámica del perfil, es decir, el comportamiento del perfil que se encuentra en un entorno con viento. Se observa que el perfil WORTMANN FX 63-137 tiene la mayor eficiencia para ángulos de ataque entre -14° y 5° , sin embargo, a partir de 5° esta relación decae, mientras, que para ángulos mayores a 5° la mayor eficiencia se encuentra en el perfil NACA 4418 dejando al NREL S823 como el perfil que menor eficiencia presenta.



Gráfica 3. Relación C_l/C_d vs α

En la gráfica 4 se muestra el coeficiente de momento, este coeficiente permite medir la estabilidad del álabo según cada perfil, por ende, se busca que el C_m sea lo más pequeño posible. Se observa que el perfil aerodinámico con coeficientes de momentos más pequeños se encuentra en el perfil WORTMANN FX 63-137 lo que lo hace más atractivo para su uso, descartando los perfiles NACA 4418 y NREL S823 ya que presentan coeficientes de momentos más grandes.



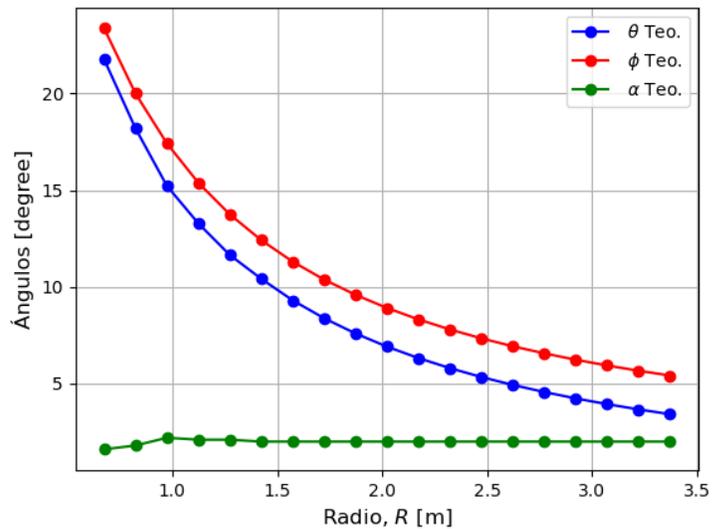
Gráfica 4. $C_m - \alpha$ de cada perfil

4.3. Resultados de la geometría del álabe

A través del procedimiento general de diseño de rotores visto antes, se realiza el diseño teórico del álabe utilizando los parámetros de entrada descritos en la tabla 3 se procedió a dividir el álabe en 18 secciones y calcular los parámetros de diseño como, el radio local, cuerda local, el ángulo de torsión, de ataque y de flujo; y el tipo de perfil utilizado en toda la longitud del álabe.

Una vez seleccionado el perfil aerodinámico que será utilizado para cada sección del álabe se encontraron las dimensiones de la cuerda y su distribución en toda la longitud del álabe. La cuerda mide 0.43 metros para un radio de 0.67 metros, y comienza a disminuir hasta 0.11 metros cuando el radio llega a su totalidad de 3.37 m.

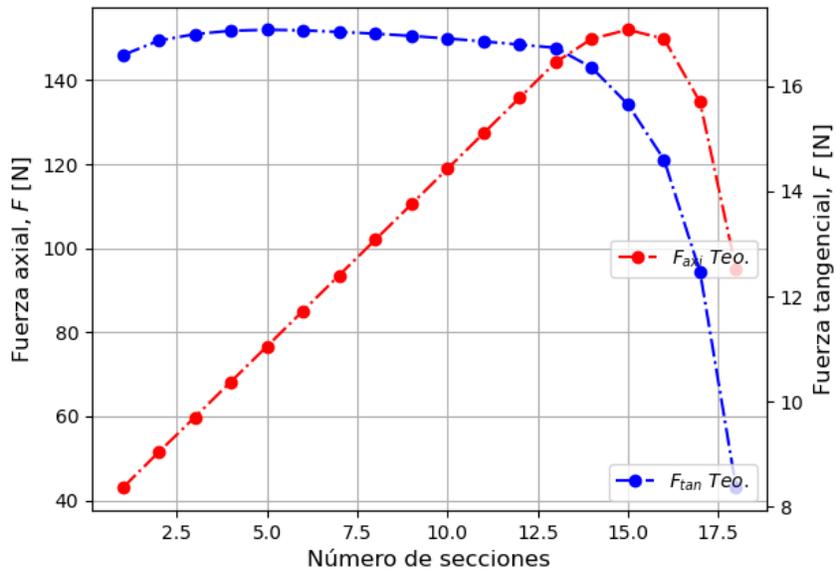
La gráfica 5 muestra la relación entre el ángulo de torsión, de flujo y de ataque para cada perfil y como van cambiando en toda la longitud del álabe. El ángulo de flujo será distinto para cada sección del álabe por la variación del ángulo de torsión, se observa que el perfil en la raíz del álabe tiene un valor de 23.37° y va decreciendo hasta llegar hasta 5.41° . Mientras el ángulo de torsión comienza con un ángulo de 21.77° y decrece hasta llegar a 3.41° , se presenta una mayor torsión en las primeras secciones del álabe debido a la baja velocidad relativa y el aumento de esta velocidad hace difícil la torsión en el resto del álabe. El ángulo de ataque en las primeras cinco secciones del álabe hay una variación de 1.6 a 2.1, sin embargo, en la sección seis hasta la decima octava permanece a 2° constantemente, hay que recordar que el ángulo de ataque es el ángulo que se crea entre la cuerda del perfil aerodinámico y la velocidad relativa; y es el ángulo que describe la sustentación y arrastre de cada perfil aerodinámico.



Gráfica 5. Relación entre el ángulo de torsión, flujo y ataque

A continuación, se muestra en la gráfica 6 la fuerza axial y tangencial en cada sección del álabe, se observa que para la fuerza axial en la sección 15 del álabe las fuerzas actúan en lo mayor posible y comienza a decaer hasta aproximarse a la punta del álabe. Mientras, que para la fuerza tangencial se mantiene constante entre valores de 0 a 20 y disminuye su valor a partir de la sección 15 la caída de la fuerza axial se debe a que la velocidad del flujo de aire aumenta cuanto más se aproxima a la punta, por lo tanto, disminuye la presión y por ende también la fuerza axial.

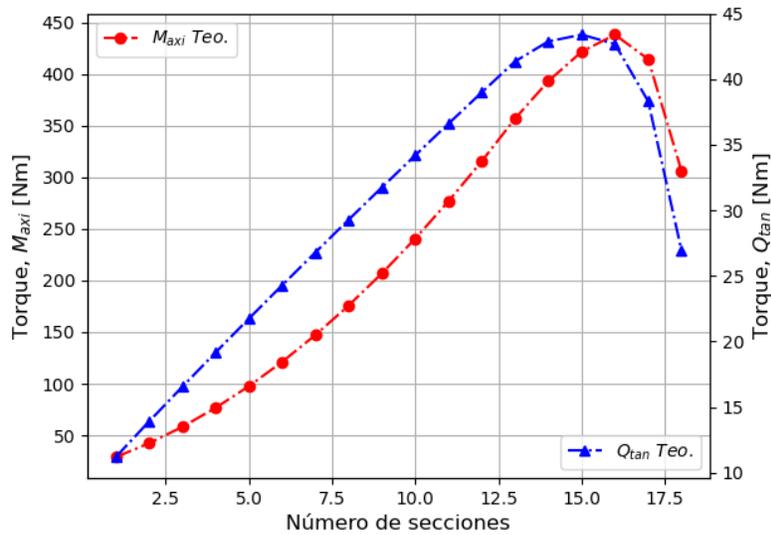
La fuerza tangencial es la causante de que el rotor cambie su velocidad y, además, es la responsable de la aparición del torque, se observa que la sección 1 inicia con una fuerza de 16.5 N y a partir de la segunda sección aumenta hasta 17 N permaneciendo constante hasta la sección 13, a partir de esta sección comienza a decaer hasta la última sección.



Gráfica 6. Fuerza axial y tangencial para cada sección del álabe

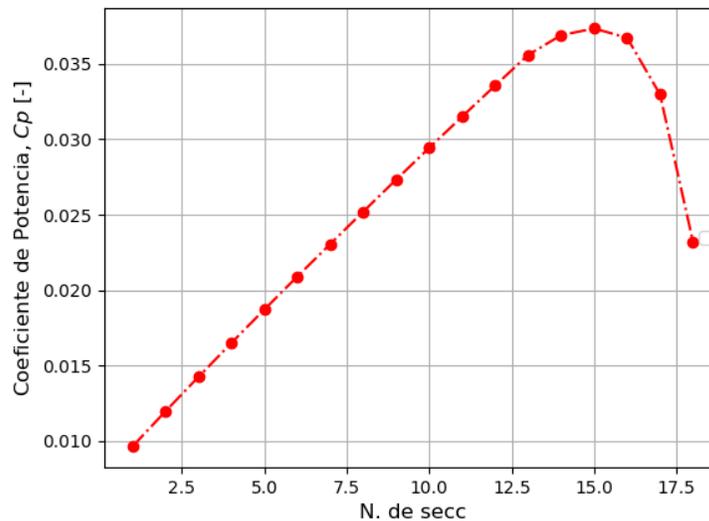
La gráfica 7 muestra el torque tangencial necesario para producir el movimiento de rotación, se observa como el torque aumenta progresivamente desde la sección 1 con un valor de 11 Nm hasta llegar a la sección 15 donde se obtiene el mayor torque con un valor de 43 Nm, a partir de la sección 17 comienza a disminuir esta fuerza hasta la sección 18 donde la rotación del rotor es menor.

El torque M_{axial} , también conocido como momento de cabeceo permite medir la estabilidad del álabe y aparece debido a las fuerzas aerodinámicas (de sustentación y de arrastre) que actúan sobre el perfil. Se observa que la curva de Torque M_{axial} crece desde la primera sección con un valor de 29 Nm y va aumentando hasta la sección 16 con un valor de 421.46, lo cual se traduce que esta parte del álabe se presenta una menor estabilidad. A partir de esta misma sección comienza a decaer el Torque M_{axial} hasta llegar a la última sección con un valor de 306.10 Nm.



Gráfica 7. Torque axial y torque tangencial vs número de secciones del álabe

La gráfica 8 muestra el coeficiente de potencia obtenida para cada sección del álabe, se observa que el coeficiente de potencia aumenta progresivamente hasta llegar al mayor C_P que se encuentra en la sección 15 del álabe y comienza a decaer hasta la última sección del álabe.



Gráfica 8. Coeficiente de potencia para cada sección del álabe

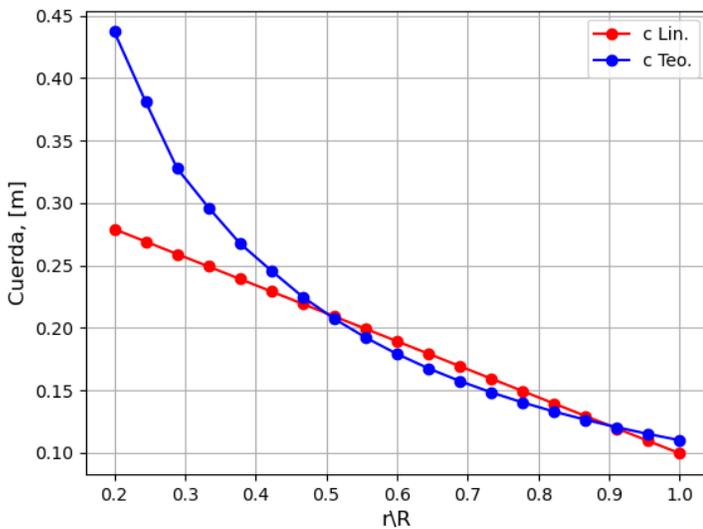
En la tabla 5 se muestra el empuje, torque, potencia y rendimiento del álabe teórico obtenidas con el valor nominal del viento de 10.5 m/s.

Tabla 5. Fuerzas y potencia del diseño del rotor teórico

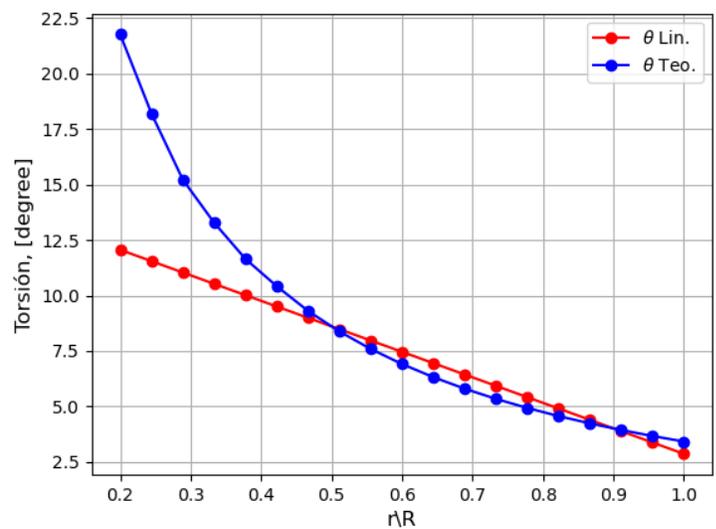
Parámetros	Simbología	Rotor Teo.	Unidades
Empuje	T	2,519.33	N
Torque	Q	825.23	Nm
Potencia mecánica	P_m	15,614.17	W
Coefficiente de potencia	C_p	0.465	-

4.3.1. Linealizar la geometría del álabe

Se realizó la linealización del álabe a partir del 50% al 90% de su longitud total, estos porcentajes se eligieron con base a asegurar ser una buena aproximación para la fácil fabricación [6]. En la tabla 7 se muestra la nueva cuerda, el nuevo ángulo de torsión, y el perfil utilizado en toda la longitud el álabe. La linealización se muestra en la gráfica 9a y gráfica 9b.



a)



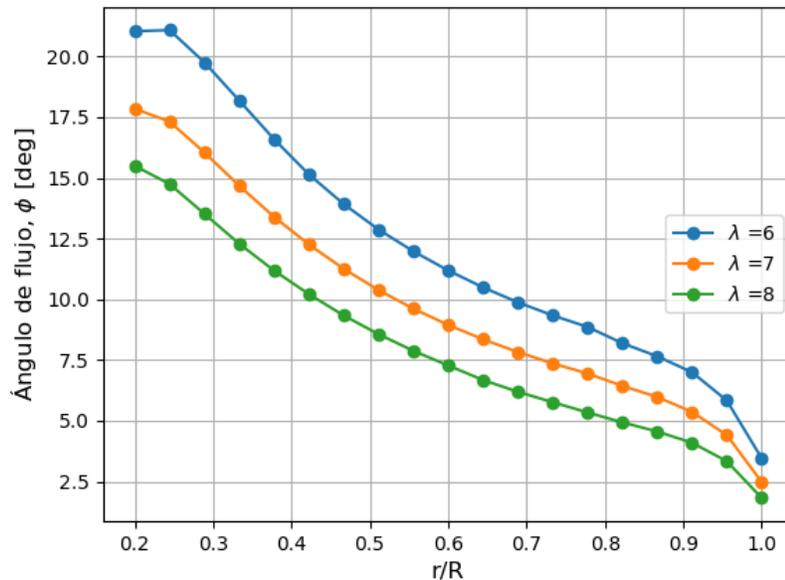
b)

Gráfica 9. a) Cuerda linealizada b) Ángulo de torsión linealizado

4.4. Simulación del rotor en estado estacionario

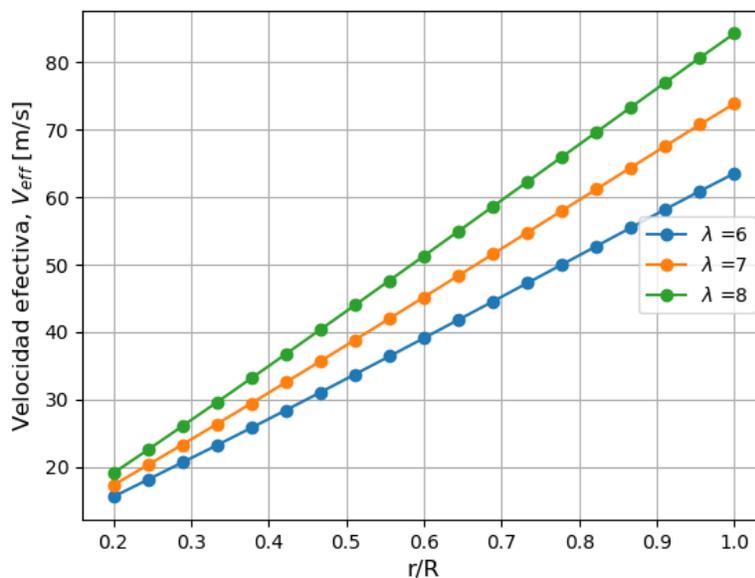
Las simulaciones del software con el modelo BEM, se realizaron con los datos de la geometría del rotor linealizado (ver en anexos tabla 11).

En la gráfica 11 se observa el ángulo de flujo el cual describe la dirección del viento, este ángulo que aparece entre la cuerda de cada perfil aerodinámico ubicado en cada sección en las que se dividió el álabe y la velocidad relativa; se ve como el ángulo de flujo disminuye en toda la longitud del álabe en cuanto aumenta λ ; se ve que para λ óptimo de 7 el ángulo de flujo en la primera sección del álabe es de 17.32° y va disminuyendo hasta 2.47° , mientras que, para un λ de 6 el ángulo de la primera sección es de 21.04° en la última sección del álabe se obtuvo un ángulo de 3.45° y para una λ de 8 al inicio se presenta un ángulo de 15.49° y la sección final un ángulo de 15.49° . El aumento de λ tiene un efecto de reducción en el ángulo de flujo.



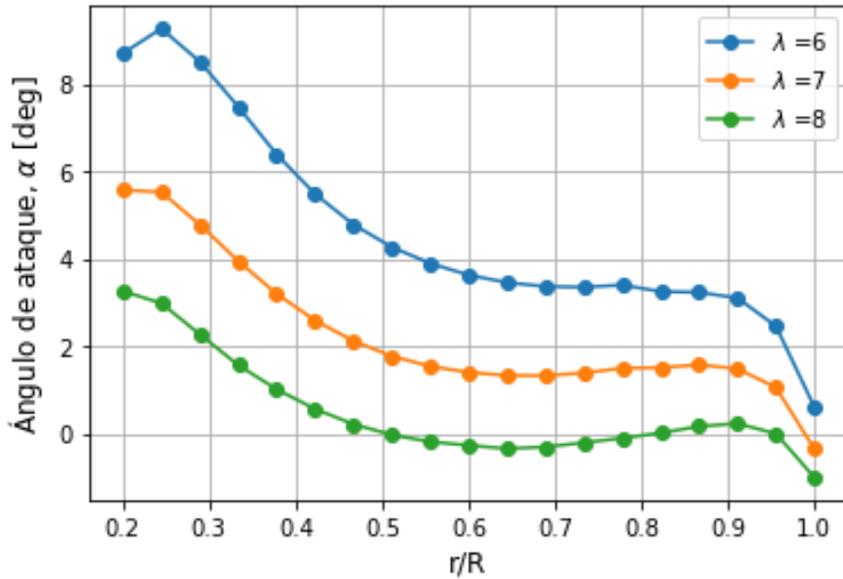
Gráfica 10. Ángulo de flujo en toda la extensión del álabe

La gráfica 12 muestra la velocidad efectiva, esta velocidad se compone de la velocidad del viento y la velocidad de la punta del álabe; entre más se acerque el viento a la punta del álabe más grande será la velocidad. Para un λ óptimo de 7 la raíz del álabe cuenta con una velocidad efectiva de 17.5 m/s hasta llegar a 74 m/s; el aumento o disminución de esta velocidad para λ de 6 y 8 se debe a que incremente o disminuya la velocidad de la punta lo que tiene efecto en la suma de la velocidad del viento y de la punta para obtener la velocidad relativa.



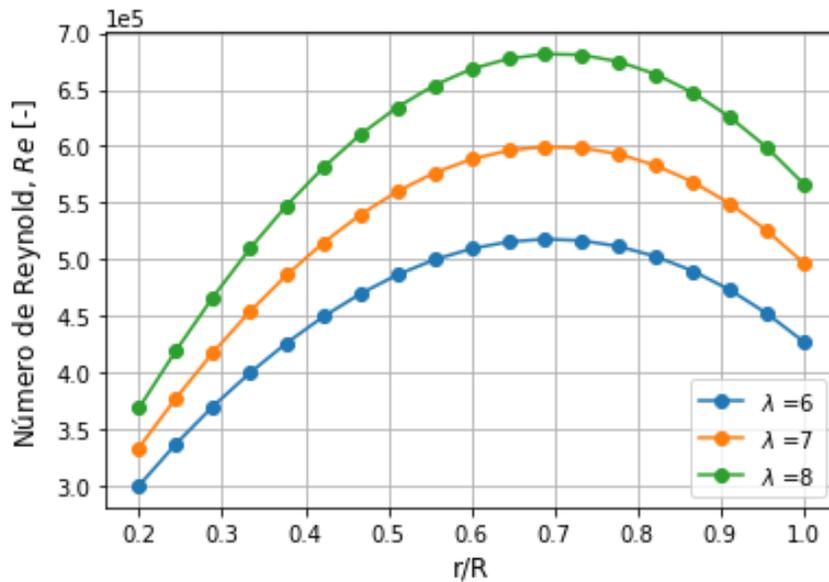
Gráfica 11. velocidad efectiva en toda la extensión del álabe

La gráfica 12 muestra como el ángulo de ataque disminuye desde la raíz del álabe hasta la punta, se puede visualizar la capacidad del perfil para generar sustentación en cada sección del álabe evaluado para un λ de 6, 7 y 8. Para un λ óptimo de 7 el ángulo de ataque disminuye desde 5.7° hasta -0.38° , para un λ de 6 el ángulo disminuye desde 8.98° hasta 0.59° y para un λ de 8 disminuye desde 3.43° hasta -1.04° .



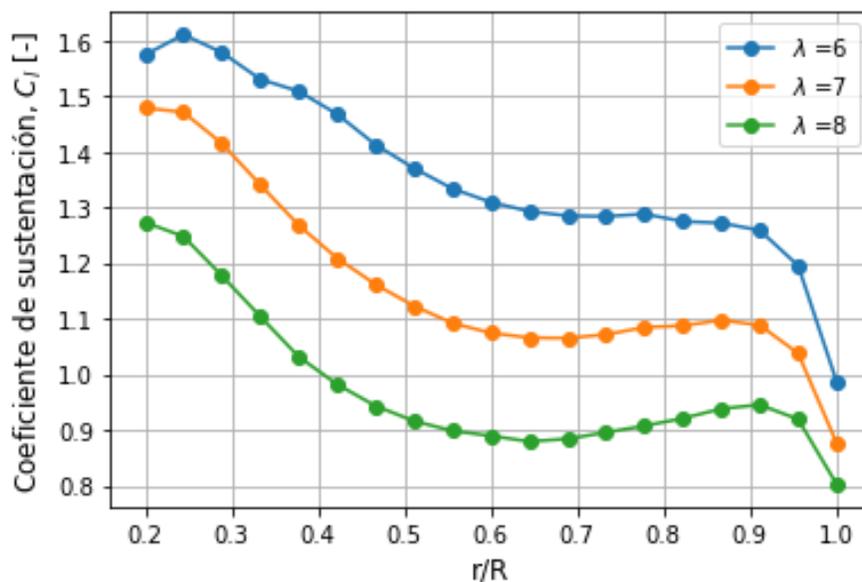
Gráfica 12. Ángulo de ataque del análisis de BEM

El número de Reynolds varia a lo largo del álabe como se muestra en la gráfica 13 para un λ igual a 6 el número de Reynolds empieza desde 3×10^5 y comienza a descender a partir de 5.13×10^5 hasta llegar a 4.30×10^5 , para λ óptimo igual a 7 comienza desde 3.27×10^5 decayendo a partir de 5.94×10^5 hasta llegar a 5.00×10^5 ; para un λ de 8 comienza en 3.61×10^5 llegando a 5.13×10^5 y cayendo hasta 5.70×10^5 . El aumento de λ incrementa los valores de Reynolds, se observa que en la raíz del álabe los valores de Reynolds son pequeños lo que significa que el flujo se comporta de forma laminar, mientras que a partir del 60 al 80 por ciento del álabe el flujo se torna turbulento, y volviendo a decaer hasta valores por debajo de 300,000 donde el flujo se va desprendiendo del álabe conforme se va acercando a la punta; se aprecia que la gráfica tiene una forma cóncava que hace fácil de entender el trayecto y comportamiento del flujo.



Gráfica 13. Número de Reynolds

En la gráfica 14 muestra el coeficiente de sustentación obtenido para cada λ evaluado. Se observa que el aumento de λ tiene un efecto que induce a la reducción de C_l . Para un λ de 6 se tiene un C_l de 1.59 y decae a 0.98, para un λ óptimo de 7, C_l tiene 1.47 al inicio y al final del álabo 0.87; para un λ de 8 C_l empieza con un valor de 1.26 y termina con 0.80. Se nota en general que para los tres λ evaluados, la mayor sustentación se produce en la raíz del álabo ya que el viento se comporta parcialmente laminar y turbulento mientras que del 50 al 100 por ciento del álabo el viento se comporta mayormente turbulento haciendo que el álabo disminuya su sustentación.



Gráfica 14. Coeficiente de sustentación

La gráfica 16 muestra el factor de inducción axial (a) y tangencial(a') y su comportamiento a lo largo del álabe; la tabla 6 muestra que el aumento de λ tiene un efecto de incremento en el factor de inducción axial, para un λ óptimo de 7 el factor inicia con 0.50 y llega hasta 0.69. Se sabe que el factor de inducción axial describe el intercambio de energía cinética entre el viento y la turbina, también que, la máxima energía extraíble del viento por la turbina se encuentra con un factor de inducción axial igual a $1/3$, sin embargo, estos factores de evaluados para un λ de 6,7 y 8 están por encima de $1/3$, esto como resultado de tomar en cuenta algunas de las pérdidas que sufre el rotor como la de Prandtl y Glauert. Finalmente, esta variación de factores de inducción axial se traduce como la disminución fraccionaria de la velocidad del viento al pasar a través del rotor.

Tabla 6. Factor de inducción axial

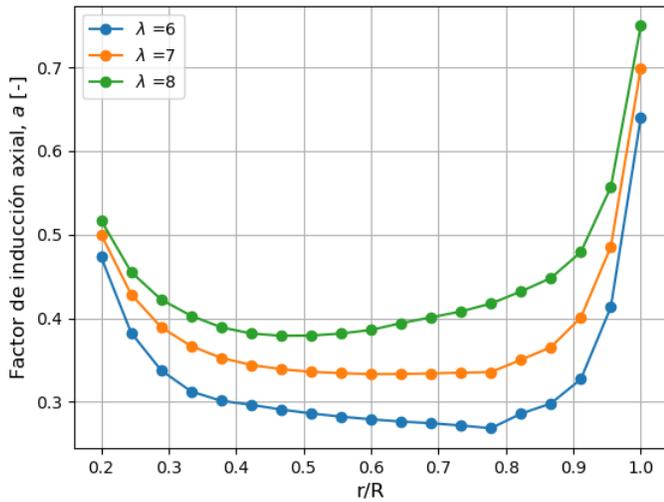
λ	a inicial	a final
6	0.47	0.64
7	0.50	0.69
8	0.51	0.74

La tabla 7 muestra la variación del factor de inducción tangencial, el cual representa el cambio de velocidad del viento al pasar por el rotor. El comportamiento del factor de inducción tangencial depende de la velocidad de la punta a la que está operando la turbina, se observa como los valores de a' al acercarse al final del álabe se acercan a cero debido a la disminución de la velocidad del viento, se observa que el aumento de λ desde 6 hasta 8 reduce el factor tangencial.

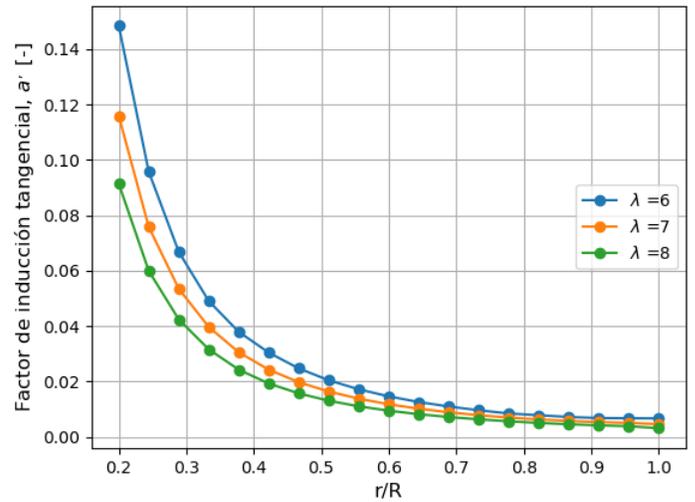
Tabla 7. Factor de inducción tangencial

λ	a' inicial	a' final
6	0.17	0.006

7	0.11	0.004
8	0.09	0.003



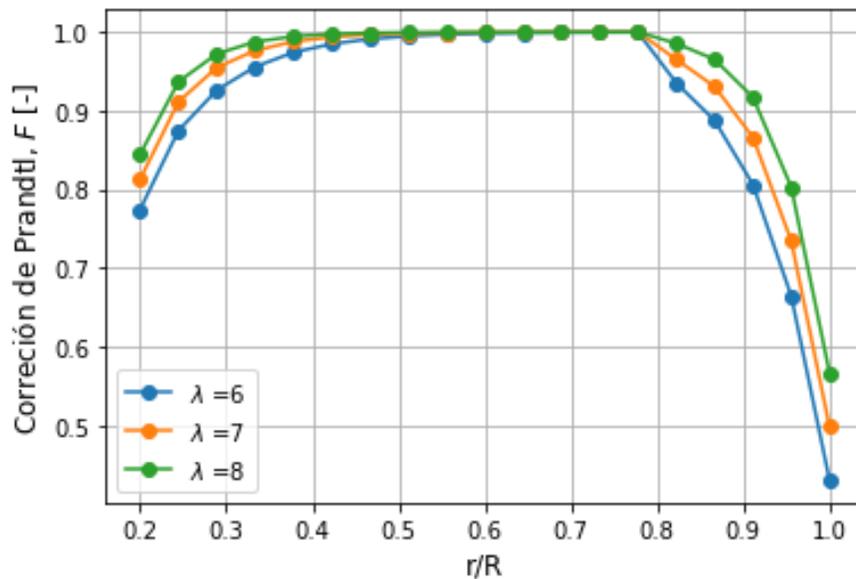
a)



b)

Gráfica 15. a) Factor de inducción axial b) Factor de inducción tangencial vs radio del álabe

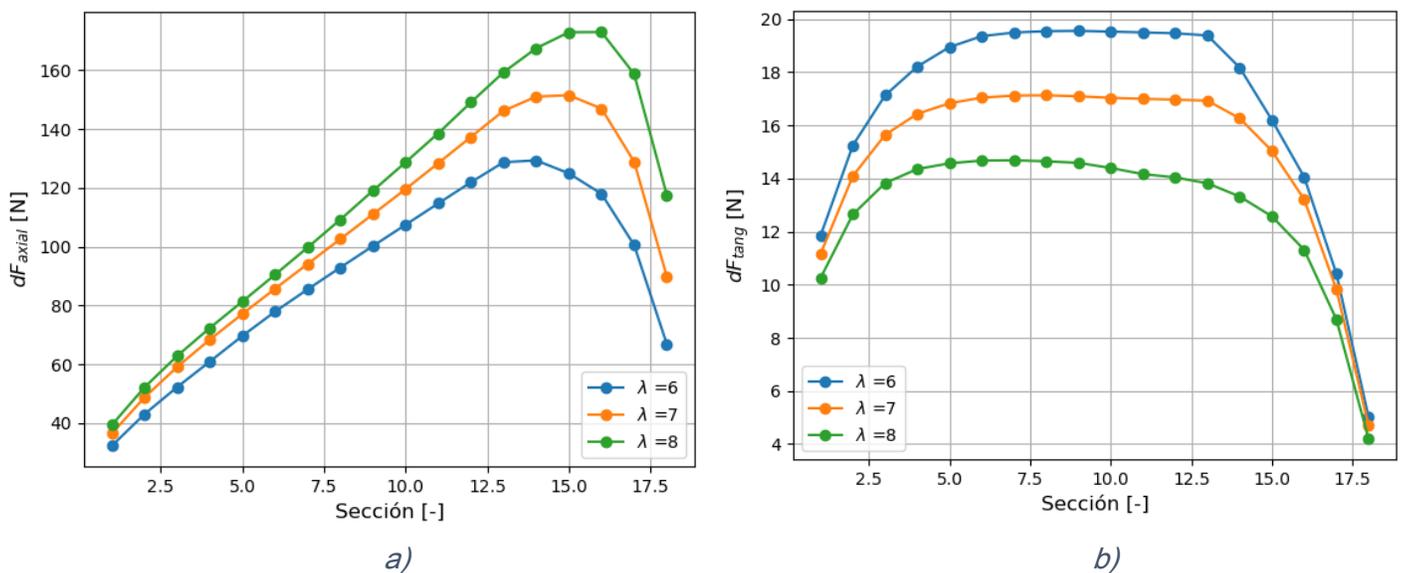
La gráfica 17 muestra la corrección de Prandtl el cual corrige la suposición de que el rotor opere con un número infinito de álabes, esta corrección es importante ya que el rotor opera de forma diferente con número infinito de álabes que con un número finito. Esta corrección se encuentra entre valores de 0 y 1, se observa que en la raíz de la punta del álabe las pérdidas se encuentran muy cercanas entre sí, mientras que del 40 al 80 por ciento del álabe este factor se comporta de la misma manera para todos los λ ya que esta parte del álabe los vórtices tienen más presencia debido a la transición del comportamiento del viento; a partir del 80 por ciento en adelante las pérdidas de Prandtl decaen en cuanto más se acerca a la punta donde los vórtices creados por el viento desaparecen. El incremento de λ disminuye las perdidas en la punta obteniéndose así para un λ de 6 el factor de perdida de Prandtl cae hasta 0.43, para un λ de 7 cae hasta 0.50 y para un λ de 8 hasta 0.57.



Gráfica 16. Corrección de Prandtl del análisis BEM

La gráfica 18a muestra cómo se distribuye la fuerza axial a lo largo del álabe; se observa que para un λ de 6 la fuerza axial comienza en la primera sección con un valor de 32.26 N obteniendo una fuerza máxima de 129.5 N y disminuyendo en la última sección del álabe hasta 66.94 N; para λ óptimo de 7 la fuerza axial comienza desde 36.45 N alcanzando una fuerza axial máxima de 152.2 N y disminuyendo hasta 89.93 N; para un λ de 8 la fuerza axial al inicio tiene un valor de 39.34 hasta llegar a 173.5 N y disminuyendo hasta 117.63 N. El incremento de λ tiene como efecto el aumento de las fuerzas axiales, es decir, la fuerza que ejerce la turbina al viento, desde la raíz del álabe hasta el 70% la fuerza incrementa, mientras que para el 30% restante de las secciones la fuerza decae en la punta.

La grafica 18b muestra como la fuerza tangencial se mantiene constante desde el 5% del álabe hasta el 70% esta fuerza es necesaria para la generación del torque, la gráfica 19 muestra el torque que se requiere para ejercer la fuerza de rotación en el álabe, se observa que los aumentos de λ disminuye la fuerza tangencial; para un λ de 6 la fuerza tangencial tiene un valor de 11.85 N y disminuye hasta 5 N; para un λ óptimo de 7 se obtiene al inicio una fuerza de 11.16 N y disminuye hasta 4.69 N; para un λ de 8 la fuerza tangencial comienza en 10.25 N y termina en 4.18 N. A partir de la sección número 18 el decremento de la fuerza tangencial es bastante notoria.

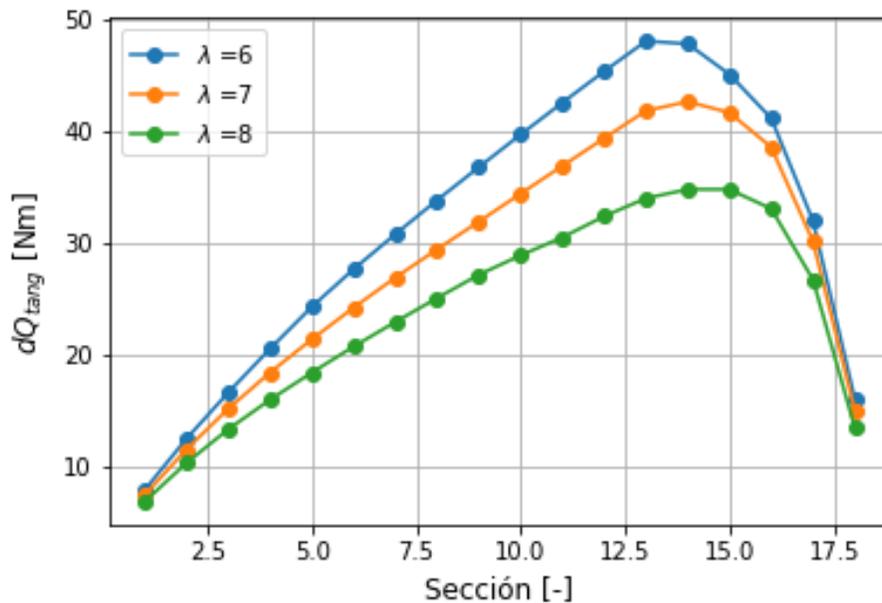


Gráfica 17. a) Fuerza axial b) Fuerza tangencial vs cada sección del álabe

La tabla 9 muestra los valores de torque necesarios para hacer rotar al rotor, se muestra el torque inicial y final obtenidos para cada λ evaluado; la gráfica 19 muestra el comportamiento del torque en cada sección del álabe donde, el torque va aumentando gradualmente hasta alcanzar su máximo entre la sección 13 y 15 del álabe. El rotor operando con un λ óptimo de 7 necesita inicialmente 7.53 N que rote el rotor y va aumentando hasta alcanzar un torque máximo de 43 N y decayendo hasta 15.11 N.

Tabla 8. Torque evaluado para diferentes TSR

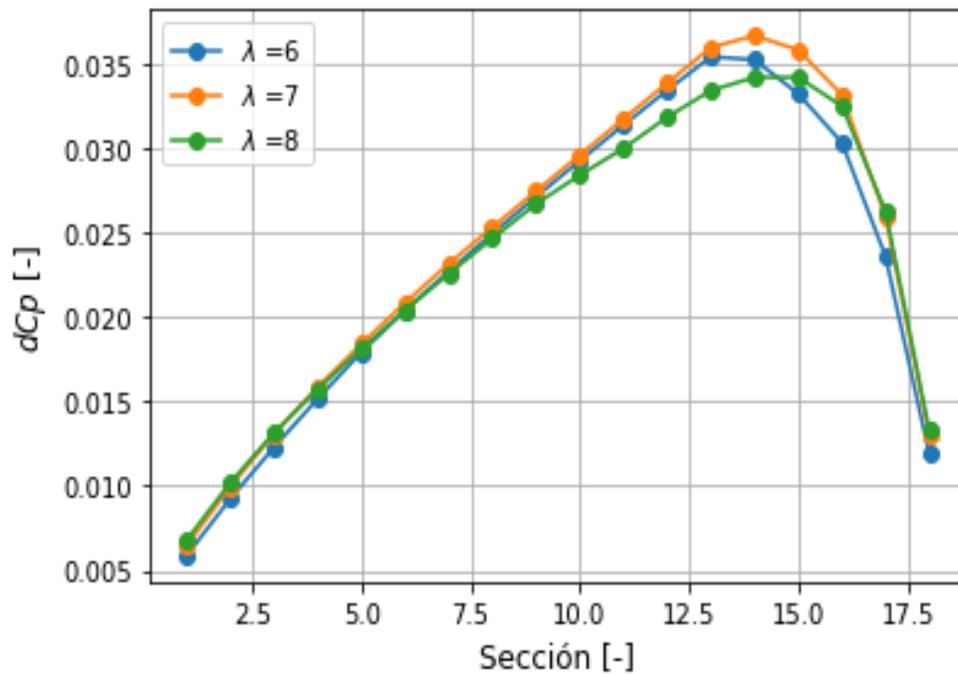
λ	dQ_{tang} Inicial	dQ_{tang} máximo	dQ_{tang} final
6	8 N	48 N	16.13 N
7	7.53 N	43 N	15.11 N
8	7 N	35 N	13.48 N



Gráfica 18. Fuerza de torque para cada sección del álabe

La figura 20 muestra el coeficiente de potencia la cual describe el rendimiento del rotor. Se obtuvo la potencia total extraíble para un λ de 7 es de 11 kW, para un λ de 6 se obtiene una potencia de 10.6 kW y para un λ de 8 se tiene una potencia de 10.757 kW.

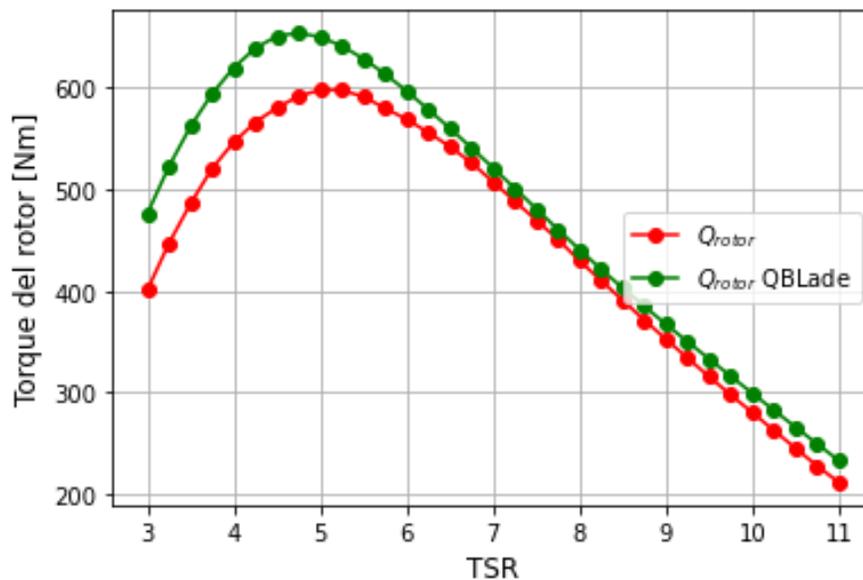
Así mismo, el coeficiente de potencia muestra los mismos valores, pero expresados en términos de rendimiento, es decir, la capacidad del rotor de extraer energía del viento, siendo 7 el λ que obtuvo el mejor coeficiente de potencia de 0.44, mientras para un λ de 6 se obtiene 0.42 y un λ de 8, 0.42.



Gráfica 19. Coeficiente de potencia en cada sección del álabe

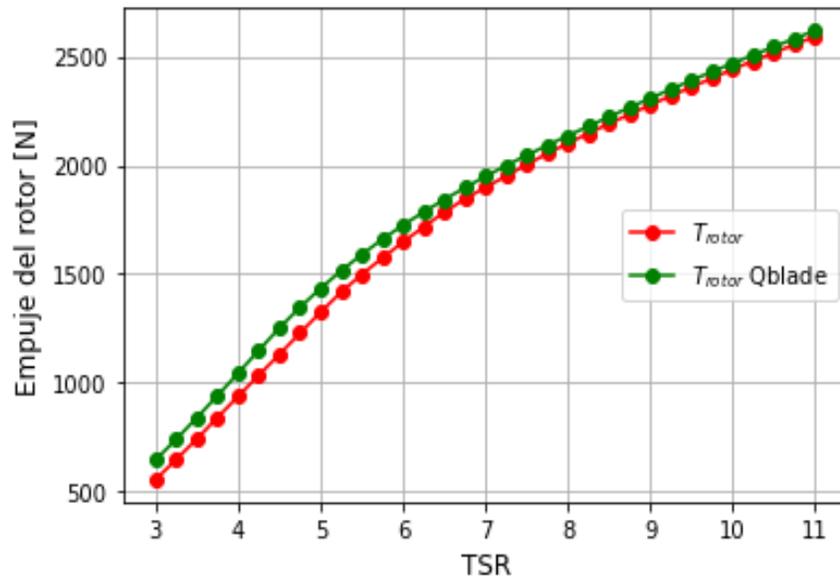
4.6. Validación de resultados mediante el software comercial QBlade

La validación de resultados se llevó a cabo con el software QBlade, el cual se realizó con los resultados obtenidos de la geometría linealizada. La gráfica 21 muestra los torques necesarios para que la rotación del rotor para cada λ , la curva del rotor BEM muestra que el torque mayor es para un λ óptimo de 7 con un valor de 508.05 Nm mientras que el torque de QBlade obtuvo un torque 4371.30 Nm.



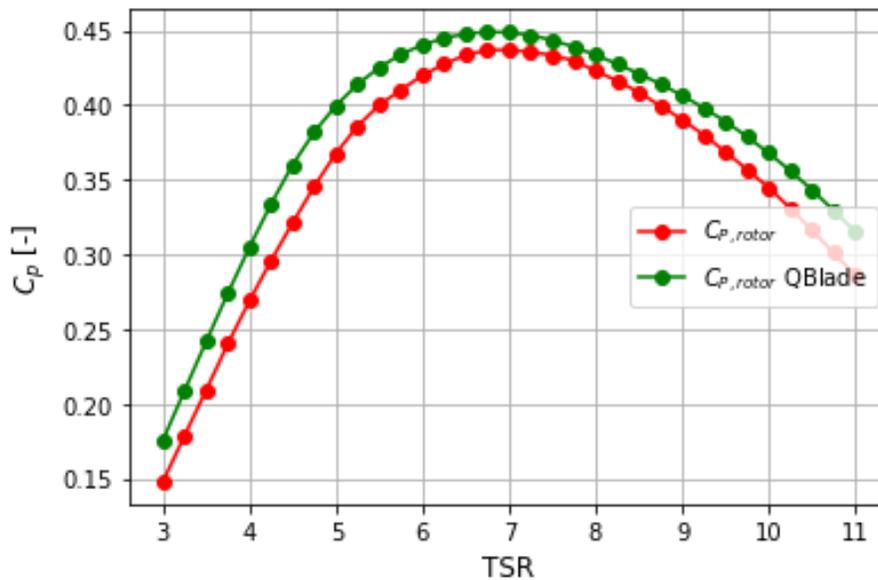
Gráfica 20. Torque del rotor simulado en software vs torque simulado en QBlade

En la gráfica 22 se muestra la fuerza de empuje que se refiere a la fuerza resultante ejercida por el álabe al viento; para un λ de 7 la curva de empuje BEM obtiene 1883 N correspondiendo a un coeficiente de empuje de 0.78, mientras que para la curva de empuje de QBlade con el mismo λ se obtiene 1948 N representado en un coeficiente de empuje de 0.81.



Gráfica 21. Empuje del rotor (N)

La gráfica 23 Muestra el rendimiento de la turbina representado por el coeficiente de potencia, para la curva del rotor en BEM se obtuvo un C_p de 0.44 que representa una potencia de 11,062 W, mientras, que el C_p obtenido en QBlade es de 0.45 lo cual corresponde a una potencia total de 11,370 W.



Gráfica 22. Coeficiente de potencia

Las variaciones que se observan entre los resultados de QBlade y el modelo BEM, se atribuyen a los inconvenientes que existen en el software libre, ya que, su análisis lo resuelve a través de un solo número de Reynolds mientras el software analiza el comportamiento de los perfiles usado en el álabe para diferentes números de Reynolds, Mach, C_l , C_d y, además, solo toma en cuenta las perdidas en la punta de Prandtl, a diferencia del modelo BEM que no solo aplica está perdida, sino, también la corrección de Glauert.

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos en el software de diseño realizado y el software QBlade donde se observa el porcentaje de error que existe entre ambos resultados, donde se cumple el margen de error establecido, estos valores se obtuvieron con un valor de viento nominal de 10.5 m/s.

Tabla 9. Comparación de resultados nominal de QBlade vs los resultados de fuerzas y potencia

Fuerza y Potencia	Rotor BEM	Rotor QBlade	Unidades	ϵ
Empuje	1883	1948	N	3.36 %
Torque	508	521	Nm	2.49 %
Potencia del rotor	11,370	11,062.4	W	2.7 %
C_p	0.44	0.45	-	3 %

Conclusiones

Este proyecto de tesis mostró resultados favorables para cumplir el objetivo general que consiste en desarrollar un software para el diseño y análisis del comportamiento aerodinámico de un rotor eólico de baja potencia.

Para determinar el éxito de este trabajo presentado se muestran las conclusiones obtenidas:

- Se implementó una metodología de diseño de rotores eólicos para la selección del perfil aerodinámico con el fin de obtener el perfil con mejor rendimiento y geometría. Con este principio se seleccionó el perfil WORTMANN FX 63-137 para su uso en toda la extensión del álabe, ya que cumplió con los mejores resultados según los criterios de selección del perfil aerodinámico. Con la selección de este perfil aerodinámico se obtuvo la geometría del álabe teórico, la potencia obtenida por este rotor ideal es de 15.614 kW lo cual representa un coeficiente de potencia de 0.46.
- Se obtuvo la curva de eficiencia C_P vs λ a través de la simulación del software en estado estacionario; esta simulación se realizó con una velocidad de viento constante de 10.5 m/s a través de este y otros parámetros de diseño del rotor se logró obtener las fuerzas ejercidas sobre el álabe y con ello su potencia y respectivo C_P . Se graficaron los resultados obtenidos para cada λ evaluado, sin embargo, se observó que la máxima potencia se obtiene con un λ de 7, el mismo utilizado para el diseño del rotor. Por último, la simulación mostró resultados favorables, se obtuvo una potencia de 11 kW representado con un C_P de 0.44.
- La validación de los resultados se obtuvo a través del software QBlade de código libre, los resultados obtenidos se basaron en tomar el valor real como el resultado de QBlade y compararlo con los resultados obtenidos por el software desarrollado considerando un margen de error del 5 por ciento. Uno de los resultados que más se encontró a favor fue la potencia generada, el software desarrollado obtuvo una potencia de 11 kW que en comparación

con la potencia generada por QBlade resultó ser de 11.3 kW encontrando un error absoluto entre el valor real establecido y el aproximado de 2.7% cumpliendo el margen de error tomando en cuenta para el culmino de este trabajo.

El trabajo presentado mostró resultados favorables en el análisis del rendimiento aerodinámico de la turbina eólica evaluada; este análisis proporciona la información suficiente y concisa para conocer el comportamiento del álabe sometido a una velocidad de viento constante donde se permite analizar las fuerzas que genera el álabe y como impacta en su rendimiento.

REFERENCIAS

- [1] Velasco Gonzáles Jaime, “Energías renovables”, Barcelona, 2009.
- [2] J. M. Jiménez, *ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA Y ENERGIA EOLICA*, 6a ed. Madrid : ANTONIO MADRID VICENTE EDITOR, 2014.
- [3] F. Jarabo *et al.*, “El Libro de las Energías Renovables”.
- [4] Díaz Diego, “SIN LA ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR EL SECTOR ELÉCTRICO EN MÉXICO SE QUEDARÁ EN EL PASADO”, Centro de Investigación en Política Pública.
- [5] Asociación Mexicana de Energía Eólica, “El viento en números”, amdee.
- [6] J. F. Manwell, J. G. McGowan, y A. L. Rogers, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”, 2010.
- [7] D. Pola Fernández, “Diseño de la geometría de los álabes de un mini aerogenerador eólico”.
- [8] S. García García, “Estudio de viabilidad de sistema de aprovechamiento eólico urbano”, ESCUELA DE INGENIERIA DE BILBAO, Bilbao, 2019.
- [9] Burton Tony, Sharpe David, Jenkins Nick, y Bossanyi Ervin, “WIND ENERGY HANDBOOK”.
- [10] Hansen O. L. Martin, “Aerodynamics of Wind Turbines Second Edition”, 2008.
- [11] P. Brondsted y R. Nijssen P. L., *Advances in wind turbine blade design and materials*. Woodhead Pub, 2013.
- [12] G. Ingram, “Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method. Version 1.0”, 2005.
- [13] M. Mueller y Henk. Polinder, *Electrical drives for direct drive renewable energy systems*. Woodhead Pub, 2013.
- [14] D. G. Hull, “Fundamentals of Airplane Flight Mechanics”.
- [15] P. J. Schubel y R. J. Crossley, “Wind turbine blade design”, *Energies*, vol. 5, núm. 9. MDPI AG, pp. 3425–3449, 2012. doi: 10.3390/en5093425.

- [16] K. Yang, "Geometry design optimization of a wind turbine blade considering effects on aerodynamic performance by linearization", *Energies (Basel)*, vol. 13, núm. 9, may 2020, doi: 10.3390/en13092320.
- [17] Ronergy, "Funcionamiento de un aerogenerador". Consultado: el 28 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ronergy.com/funcionamiento-de-un-aerogenerador/#:~:text=Es%20una%20caja%20de%20engranajes,el%20rotor%20en%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica>.
- [18] P. J. Schubel y R. J. Crossley, "Wind turbine blade design", *Energies*, vol. 5, núm. 9. MDPI AG, pp. 3425–3449, 2012. doi: 10.3390/en5093425.
- [19] I. Morales Hernandez, "INSTALACIÓN DE DOS AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE SINALOA", Universidad Politécnica de Sinaloa , Mazatlán , 2015.

ANEXOS

A continuación, se muestran las tablas obtenidas del álabe teórico (tabla 10) y del álabe linealizado (tabla 11) de cada sección del álabe donde se muestra la distribución de radio, cuerda, y ángulo de torsión.

Tabla 10. Dimensiones para cada sección del álabe teórico

r/R	Radio local [m]	Cuerda teórica [m]	Ángulo de torsión [deg]
0.2	0.674381	0.43705	21.77331
0.244444	0.824244	0.380912	18.19972
0.288889	0.974107	0.327661	15.22193
0.333333	1.123969	0.29629	13.28168
0.377778	1.273832	0.267616	11.64917
0.422222	1.423694	0.245729	10.41772
0.466667	1.573557	0.224784	9.304383
0.511111	1.723419	0.207319	8.379055
0.555556	1.873282	0.192225	7.58994
0.6	2.023144	0.179083	6.909783
0.644444	2.173007	0.167555	6.317952
0.688889	2.32287	0.157374	5.798598
0.733333	2.472732	0.148325	5.339382
0.777778	2.622595	0.140236	4.93057
0.822222	2.772457	0.132964	4.564396
0.866667	2.92232	0.126395	4.23459
0.911111	3.072182	0.120433	3.936042
0.955556	3.222045	0.114999	3.664547
1	3.371907	0.110028	3.416616

Tabla 11. Dimensiones del álabe linealizado

r/R [-]	radio local [m]	Cuerda lineal [m]	Ángulo de torsión lineal [degree]
0.2	0.674325182	0.284132364	12.06014549
0.244444	0.824175223	0.273836573	11.54906825
0.288889	0.974025263	0.263540783	11.03799101
0.333333	1.123875304	0.253244993	10.52691377
0.377778	1.273725344	0.242949203	10.01583653
0.422222	1.423575385	0.232653413	9.504759294
0.466667	1.573425425	0.222357622	8.993682055
0.511111	1.723275466	0.212061832	8.482604815
0.555556	1.873125506	0.201766042	7.971527576

0.6	2.022975547	0.191470252	7.460450336
0.644444	2.172825587	0.181174462	6.949373097
0.688889	2.322675628	0.170878671	6.438295857
0.733333	2.472525668	0.160582881	5.927218618
0.777778	2.622375709	0.150287091	5.416141378
0.822222	2.772225749	0.139991301	4.905064139
0.866667	2.92207579	0.129695511	4.393986899
0.911111	3.07192583	0.11939972	3.88290966
0.955556	3.221775871	0.10910393	3.37183242
1	3.371625911	0.09880814	2.860755181
