



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA



T E S I S

“Comparación de Herramientas de Diseño para Álabes de Aerogeneradores Eólicos de Baja Velocidad de Viento”

Proyecto de tesis para obtener el título de:

M. en C. En Ingeniería de Manufactura

P R E S E N T A:

Ing. Eduardo Orozco Magallon

Director de tesis:

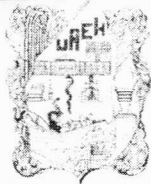
Dr. José Manuel Sausedo Solorio

Codirector de Tesis:

Dr. Oleksandr Karelin



Pachuca de Soto, Hidalgo, Febrero 2014.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DIRECCIÓN

M. en A. Julio César Leines Medécigo

Director de Administración Escolar

PRESENTE

Por este conducto le comunico que el jurado asignado al pasante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería en Manufactura, Ing .Eduardo Orozco Magallon, con número de cuenta 246723, quien presenta el trabajo de tesis titulado "COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS DE DISEÑO PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES EÓLICOS DE BAJA VELOCIDAD DE VIENTO", después de revisar el trabajo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión del mismo una vez realizadas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado.

PRESIDENTE: Dr. Manuel González Hernández

SECRETARIO: Dr. Joselito Medina Marín

VOCAL: Dr. José Manuel Sausedo Solorio

SUPLENTE: Dr. Oleksander Karelin

Handwritten signatures of the jury members on lines.

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

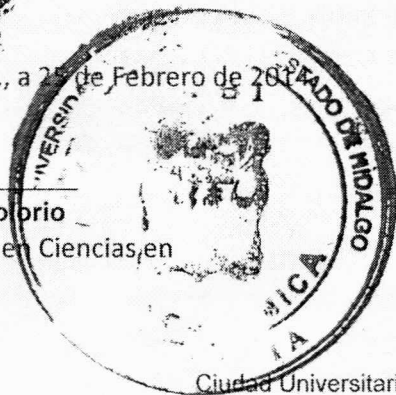
ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

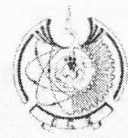
Mineral de la Reforma, Hgo., a 25 de Febrero de 2011

Handwritten signature of Dr. José Manuel Sausedo Solorio

Dr. José Manuel Sausedo Solorio
Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Manufactura



Ciudad Universitaria Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5Js/n Col. Carboneras C.P. 42184
Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.
Tel: (771)7172000 ext. 2230 , 2231



Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme sabiduría, salud, fuerzas para vencer los obstáculos que se presentaron a lo largo del camino recorrido para alcanzar la meta trazada.

Agradezco al Dr. José Manuel Sausedo Solorio director de tesis quien confió en mí para terminar este trabajo, por su apoyo, conocimientos que me impartió, su paciencia, consejos, que me sirvieron para concluir esta tesis.

Agradezco al Dr. Alejandro Luna Avilés por su apoyo incondicional, su paciencia, consejos, que fueron decisivos para la realización de este proyecto, gracias Dr. Luna es usted un gran ser humano.

Agradezco a mi esposa e Hijo que me brindaron su tiempo y apoyo para invertirlo en mi desarrollo profesional, sin su ayuda no habría sido posible llevar a cabo este proyecto, muchas gracias.

A todos los profesores que me impartieron de su conocimiento para lograr el objetivo trazado.

Dedico esta tesis a mi esposa Sandra, mi hijo David y mi madre Rebeca son las personas más queridas y especiales para mí.

Resumen

En la actualidad existen muchas empresas dedicadas al desarrollo de partes de aerogeneradores, éstas enfocan sus investigaciones y trabajos a máquinas de gran envergadura, que se puedan usar para generar energía eléctrica para las grandes ciudades o pequeñas poblaciones sin embargo, no se han interesado en desarrollar aerogeneradores para uso doméstico y que, adicionalmente, funcionen con bajo flujo de aire.

En el presente documento se muestra un estudio sobre la comparación de herramientas de diseño tales como SolidWorks y FlowSimulation contra DesingFoil las cuales permiten simular el comportamiento del perfil eólico en un túnel de viento (FlowSimulation) y el comportamiento del álabe en condiciones simuladas de viento(Solidworks), con el fin de caracterizar las variables de álabes de aerogeneradores eólicos de baja velocidad de viento los cuales usando la teoría de la sustentación y arrastre para aeronaves, permite obtener un perfil para una pala de aerogenerador éstos puede ser usado para la fabricación de máquinas generadoras de energía eléctrica de uso doméstico y en lugares de relativamente bajo flujo de aire, con el fin de obtener energía eléctrica por medio del aprovechamiento de un recurso natural y ayudar al cuidado del medio ambiente así como a la economía de las familias y del país.

Para la evaluación de los perfiles se utilizó principalmente la teoría de arrastre y sustentación que permiten obtener perfiles con un desempeño adecuado para un mejor aprovechamiento de la potencia del aire. Se utilizó la teoría de la dinámica de fluidos, con ésta, se desarrolló una ecuación que permite calcular la fuerza que el fluido proporciona a la superficie de la pala del aerogenerador ya sea que éste se encuentre fijo o moviéndose con el fluido. También se utilizó un software que simula un túnel de viento con el fin de obtener los parámetros característicos del perfil que permitieran conocer los coeficientes necesarios para obtener el desempeño óptimo del perfil propuesto así como un software que permite simular el comportamiento del perfil en tercera dimensión y de este modo observar el comportamiento del fluido en el perfil propuesto.

Abstract

Currently, there is a strong number of companies devoted to develop aerogenerator components, aiming their research and efforts in heavy machines that can be used to generate electricity for big cities or small towns, however, their interests have left aside the development of aerogenerators for domestic use, and that additionally work with a low airflow.

This paper shows a study that addresses the comparison of design tools, such as SolidWorks and FlowSimulation, against DesignFoil. These applications allow to simulate the wind profile behavior in a wind tunnel (FlowSimulation) and the behavior of the blade in simulated wind conditions (Solidworks) in order to characterize the variables from low speed wind turbine blades that, using the theory of lift and draft for aircraft, allows to generate a profile for aerogenerator blades, which then can be used to build electricity generating machines for domestic use, and in places where the airflow is relatively low, aiming the generation of electricity taking advantage of natural resources and helping the preservation of the environment, representing as well savings for the families and the country.

The evaluation of profiles was based mainly on the lift and drag theory, allowing the generation of profiles with a proper performance for an improved use of air strength. The dynamic fluids theory was used to develop an equation that allows to calculate the strength that the fluid applies over the surface of the turbine blade, regardless it is still or moving along the fluid. Also, a software that simulates an air tunnel was used aiming to establish the typical parameters of the profile that will allow to identify the required coefficients for its optimal performance, as well as a software to simulate the behaviour of the profile in 3 dimensions and watch over the behaviour of the proposed profile.

Índice

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	10
INTRODUCCIÓN	11
1.1 INTRODUCCIÓN	12
1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA.....	17
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	17
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	18
1.5 METAS.....	18
1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.6.1 <i>Hipótesis de Trabajo</i>	18
CAPÍTULO 1.....	19
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
2.1 GENERADORES.....	20
2.1.1 <i>Introducción</i>	20
2.1.2 <i>Generadores</i>	21
2.1.3 <i>Aerogeneradores de Eje Vertical Tipo Savonius</i>	23
2.1.4 <i>Aerogeneradores de Eje Vertical Tipo Darrieus</i>	25
2.1.5 <i>Aerogeneradores de Eje Horizontal</i>	26
2.1.6 <i>Características de los Aerogeneradores</i>	28
2.2 AERODINÁMICA DE LA TURBINA	31
2.2.1 <i>Introducción</i>	31
2.2.2 <i>Arrastre y Sustentación</i>	32
2.2.3 <i>Sustentación y Arrastre en Superficies</i>	34
2.2.4 <i>Límite de Betz</i>	39
2.3. ROTOR EÓLICO REAL.....	45
2.3.1 <i>Rendimiento</i>	45
2.4 VELOCIDAD ESPECÍFICA DEL ROTOR EÓLICO (TSR)	47
2.4.1 <i>Velocidad de giro del rotor</i>	49
2.4.2 <i>Par de giro del rotor</i>	49
2.4.3 <i>Características de potencia y par de giro del rotor</i>	50

2.4.4 La característica par de giro versus velocidad de giro:	51
2.5 TEORÍA DE PALA.....	52
2.5.1 Nociones Generales	52
2.5.3 Fuerzas de sustentación y resistencia	54
2.6 POLARES DE UN PERFIL	54
2.7 ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE UN ELEMENTO DE PALA	54
2.7.1 Coeficiente de potencia de toda la pala.....	56
2.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO:	57
CAPÍTULO 2.....	59
FUNDAMENTOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FLUIDOS.....	59
3.1 INTRODUCCIÓN	60
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS:	60
3.2.1. Ecuación de continuidad:.....	60
3.2.2 Ecuación de Bernoulli.....	63
3.3 NÚMERO DE REYNOLDS.....	64
3.4 FUERZAS DESARROLLADAS POR FLUIDOS EN MOVIMIENTO	66
3.4.1 Principio de impulso- Cantidad de movimiento:	66
3.5 FUERZAS SOBRE OBJETOS EN MOVIMIENTO	67
3.5.1 Ecuación general Propuesta	68
3.6 CAPA LÍMITE	69
3.6.1 Ecuación de la Capa Límite	70
3.6.2 Espesor de la capa limite.	72
3.7 ELEMENTO FINITO	72
3.7.1 Elemento Finito en una Dimensión	73
3.7.2 Elemento Finito en Dos Dimensiones (Elemento Triangular)	75
3.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO:.....	78
CAPÍTULO 3.....	80
RESULTADOS.....	80
4.1 INTRODUCCIÓN	81
4.2 SIMULACIÓN CON ANSYS PARA PERFILES NO AERODINÁMICOS.	82
4.2.1 Placa Plana	82
4.2.2 Esfera	85
4.3 POLARES DE PERFIL NACA 4412.	88
4.3.1 Simulación con JavaFoil	91
4.3.2. Tabla de Coeficientes.	92
4.3.3 Simulación con DESING FOIL	93
4.4 PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA OBTENER UN PERFIL AERODINÁMICO EFICIENTE PARA VELOCIDADES BAJAS.	96
4.5 SIMULACIÓN DEL PERFIL NACA 4412 CON FLOWSIMULATION	101
4.6 PERFIL SIMÉTRICO PROPUESTO.	103
4.7. PERFIL FINAL	106
4.8 TABLA DE RESULTADOS OBTENIDOS.	108
4.9 ANÁLISIS DE FUERZA AERODINÁMICAS	109
4.10 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	113

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXOS:	118

Índice de figuras

FIGURA 1. MAPAS DE LOCALIZACIÓN DE LAS CENTRALES EOLO ELÉCTRICAS DE LA VENTA I, II Y II.	13
FIGURA 2. CENTRALES EOLO ELÉCTRICAS DE LA VENTA I, II Y III EN EL ESTADO DE OAXACA.	14
FIGURA 3. VISTA AÉREA DE LA CENTRAL OAXACA I, II Y III.	15
FIGURA 2. 1 MAPA CON POSIBILIDADES DE CONSTRUCCIÓN DE CENTRALES EOLOELÉCTRICAS [6].	21
FIGURA 2. 2 MUESTRA LA SUSTENTACIÓN AERODINÁMICA. [7].	22
FIGURA 2. 3 ROTOR TIPO SAVONIUS.....	24
FIGURA 2. 4 ROTOR TIPO DARRIEUS.....	26
FIGURA 2. 5 AEROGENERADOR HÍBRIDO DARRIEUS-SAVONIUS.....	26
FIGURA 2. 6 GENERADORES DE EJE HORIZONTAL [11].....	27
FIGURA 2. 7 COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR.....	30
FIGURA 2. 8 DIRECCIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.....	32
FIGURA 2. 9 ESFERA EN UNA CORRIENTE DE FLUIDO [14].	33
FIGURA 2. 10 LONGITUDES DE TRAMO Y CUERDA PARA UNA SUPERFICIE SUSTENTADORA [15].	34
FIGURA 2. 12 MODELO DE HÉLICE. [16].....	36
FIGURA 2. 13 POTENCIA DE UN CAUDAL DE AIRE (VIENTO). [19].....	40
FIGURA 2. 14 COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN UN ROTOR BAJO CONDICIONES IDEALES. [19].....	40
FIGURA 2. 15 CÁLCULO DE LA SUPERFICIE BARRIDA POR LA ZONA DE LAS PALAS CERCANA AL BUJE DEL ROTOR [20].	44
FIGURA 2. 16 LA APORTACIÓN DE LA ZONA DE LAS PALAS ENTRE EL EJE Y EL RADIO R A LA POTENCIA TOTAL DEL ROTOR. [20].....	45
FIGURA 2. 17 TURBULENCIA DE LA MASA DE AIRE DETRÁS DEL ROTOR EÓLICO (REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA) [20].....	46
FIGURA 2. 18 VELOCIDAD DE LAS PUNTAS DE LAS PALAS. [20].....	47
FIGURA 2. 19 A) ROTOR “LENTO”: PEQUEÑA DISTANCIA ENTRE LAS PALAS; B) ROTOR “RÁPIDO”: GRAN DISTANCIA ENTRE LAS PALAS [21].....	48
FIGURA 2. 20 LAS FUERZAS AERODINÁMICAS EN UN ALA DE AVIÓN [19].....	52
FIGURA 2. 21 DESCOMPOSICIÓN DE LA FUERZA AERODINÁMICA QUE ACTÚA SOBRE EL ALA EN LAS COMPONENTES DE SUSTENTACIÓN Y DE RESISTENCIA [19].	53
FIGURA 2. 22 ACCIÓN DEL AIRE SOBRE EL ELEMENTO DE PALA (A ÁNGULO DE ATAQUE DE LA PALA, Δ ÁNGULO DE CALADO DE LAS PALAS = POSICIÓN DE LAS PALAS CON RESPECTO AL PLANO DEL ROTOR) [22].....	55
FIGURA 2. 23 SUPERFICIE BARRIDA POR EL ELEMENTO DE PALA [19].....	57
FIGURA 3. 1 TUBO DE FLUJO DE MASA [17].....	62
FIGURA3. 2 MOVIMIENTO DE UN FLUJO DE UNA ALTURA A OTRA [23].....	63
FIGURA3. 3 FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO [16].....	65
FIGURA 3. 4 FLUJO LAMINAR [16].....	65
FIGURA 3. 5 TRANSICIÓN DE FLUJO LAMINAR A TURBULENTO [16].....	65
FIGURA 3. 6 FLUJO TURBULENTO [16].....	65
FIGURA 3. 7 PALETA EN MOVIMIENTO [28].....	67

FIGURA 3. 8 CAPA LÍMITE SOBRE UNA PLACA PLANA [29].....	69
FIGURA 3. 9 ELEMENTO LINEAL CON DOS NODOS	73
FIGURA 3. 10 FUNCIÓN LINEAL DE INTERPOLACIÓN [34]	75
FIGURA 3. 11 ELEMENTO TRIANGULAR LINEAL [33].....	76
FIGURA 4. 1 SISTEMA MALLADO	82
FIGURA 4. 2 CONTORNOS DE VELOCIDAD EN M/S.....	83
FIGURA 4. 3 VELOCIDAD CERO EN LA PARED DE LA PLACA PLANA	83
FIGURA 4. 4 VECTORES DE VELOCIDAD	84
FIGURA 4. 5 CONTORNOS DE PRESIÓN.....	84
FIGURA 4. 6 VECTORES DE PRESIÓN.....	85
FIGURA 4. 7 GRÁFICA DE LA PRESIÓN TOTAL EN LA PLACA PLANA.	85
FIGURA 4. 8 ESFERA EN UNA CORRIENTE DE FLUIDO [14]	86
FIGURA 4. 9 EFECTOS DE LA VELOCIDAD EN LA ESFERA	86
FIGURA 4. 10 VELOCIDAD EN EL PERÍMETRO DE LA ESFERA.	87
FIGURA 4. 11 VECTORES DE VELOCIDAD	87
FIGURA 4. 12 PUNTO CREADO PARA LA MEDICIÓN.....	88
FIGURA 4. 13 POLAR DEL PERFIL NACA 4412 [38].....	89
FIGURA 4. 14 POLAR DEL PERFIL NACA 4412, CON SUS COEFICIENTES DE SUSTENTACIÓN, ARRASTRE Y LA FINEZA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ATAQUE [38]	90
FIGURA 4. 15 COORDENADAS DEL PERFIL NACA 4412 [38].....	91
FIGURA 4. 16 PERFIL CARGADO EN EL SISTEMA	91
FIGURA 4. 17 POLARES DEL PERFIL NACA 4412 CON EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN JAVAFOIL	92
FIGURA 4. 18 POLARES DEL PERFIL NACA 4412 CON EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN DESING FOIL. SE USÓ LA VERSIÓN DE PRUEBA DEL DESING FOIL	94
FIGURA 4. 19 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE UN PERFIL AERODINÁMICO [39].....	97
FIGURA 4. 20 . METODOLOGÍA PROPUESTA PARA OBTENER LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ÁLABE DE AEROGENERADOR ASÍ COMO SU COMPORTAMIENTO APROXIMADO EN UN TÚNEL DE VIENTO.	100
FIGURA 4. 21 GRÁFICA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE EL PERFIL	102
FIGURA 4. 22 GRÁFICA DE LA PRESIÓN TOTAL DEL VIENTO SOBRE EL PERFIL.	102
FIGURA 4. 23 VECTORES DE PRESIÓN SOBRE EL PERFIL NACA 4412.....	103
FIGURA 4. 24 VISTA FRONTAL DE LOS VECTORES DE PRESIÓN SOBRE EL PERFIL NACA 4412.	103
FIGURA 4. 25 PERFIL SIMÉTRICO Y SUS PARÁMETROS DE CÁLCULO.....	104
FIGURA 4. 26 POLARES DEL PERFIL SIMÉTRICO.	104
FIGURA 4. 27 DATOS PARA EL PERFIL SIMÉTRICO.....	105
FIGURA 4. 28 POLARES PARA EL PERFIL PROPUESTO.....	106
FIGURA 4. 29 DATOS PARA EL PERFIL PROPUESTO.	106
FIGURA 4. 30 CARACTERÍSTICAS DE PRESIÓN Y VELOCIDAD EN EL PERFIL PROPUESTO.....	107
FIGURA 4. 31 FUERZA DE ARRASTRE RESPECTO A LA VELOCIDAD DEL VIENTO.	110
FIGURA 4. 32 FUERZA DE SUSTENTACIÓN RESPECTO A LA VELOCIDAD DEL VIENTO.	111

Índice de tablas

TABLA 2. 1 CARACTERÍSTICAS DE LOS AEROGENERADORES DE DOS Y TRES PALAS [11]	28
TABLA 2. 2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN AEROGENERADOR	30
TABLA 4. 1 DATOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN POR SOFTWARE CON EL JAVAFOIL	92
TABLA 4. 2 . DATOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN POR SOFTWARE CON EL DESING FOIL.....	94
TABLA 4. 3 RESULTADOS OBTENIDOS CON FLOW SIMULATION.....	101
TABLA 4. 4 RESULTADOS OBTENIDOS CON FLOW SIMULATION PARA EL PERFIL PROPUESTO.	108
TABLA 4. 5 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO PARA EL ALABE PROPUESTO.	108

Glosario de términos

Aerogenerador o turbina eólica: Transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica sin usar combustible, pasando por el estado intermedio de conversión a energía mecánica de rotación a través de las palas.

Fuerza de arrastre: El arrastre es la fuerza sobre un cuerpo provocado por un fluido que resiste el movimiento en la dirección del recorrido del cuerpo.

Fuerza de sustentación: Es una fuerza provocada por el fluido en la dirección perpendicular a la dirección del recorrido del cuerpo.

Ángulo de Ataque (α): Es el ángulo que forma la placa entre su línea de cuerda y la velocidad relativa del fluido.

Polares de un perfil aerodinámico: La polar de un perfil aerodinámico se define como la gráfica que se obtiene al ingresar la estructura (álabe) a un túnel de viento en el cual se obtienen sus parámetros aerodinámicos.

Fineza de un perfil: La fineza es un indicador de la “calidad” de un perfil. Una fineza elevada significa, que la fuerza de sustentación es mucho más grande que la fuerza de arrastre.

Introducción

1.1 Introducción

El motor que mueve al mundo son las diferentes energías como la eléctrica, química, térmica, etc. Estas energías son obtenidas por lo general del petróleo, sin embargo, éste es cada día más difícil de extraer y, por supuesto, más caro. Otro fenómeno que está teniendo mayor relevancia en el mundo es el calentamiento global, fenómeno que entre otras cosas es causado por la quema de combustibles fósiles, proceso necesario para la producción de energías. Así mismo, no se puede prescindir de energía ya que se tiene una fuerte dependencia de las mismas, esto hace necesario buscar otras fuentes de energías que permitan solucionar los problemas antes mencionados. Un medio muy usado para este fin, son las energías renovables provenientes de medios naturales, por ejemplo, la energía solar, la energía térmica, eólica, entre otras, que permiten generar energías necesarias para el funcionamiento de la vida en la tierra, tal es el caso de la energía eléctrica.

En México, el desarrollo de la tecnología de conversión de energía eólica a electricidad, se inició con un programa de aprovechamiento de la energía eólica en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en febrero de 1977, cuando la Gerencia General de Operación de Comisión Federal de Electricidad, cedió al IIE la Estación Experimental Eolo eléctrica de El Gavillero, en las cercanías de Huichapan, Hidalgo. [1]

En este lugar se pretendía energizar el ejido a partir de una micro central eólica, integrada por dos aerogeneradores australianos Dunlite de 2 Kw cada uno, un banco de baterías, y un inversor de 6 Kw para alimentar la red de distribución del poblado. El experimento no pudo llevarse a cabo físicamente, debido a ciertos problemas técnicos, sin embargo, estando instrumentado el sitio, se tenían los promedios horarios de velocidad del viento y conociéndose las características de respuesta de los aerogeneradores era posible estimar numéricamente la energía que podrá suministrarse al ejido.

En la región del Istmo de Tehuantepec se presentan velocidades de viento ideales para este tipo de generación. Por este motivo CFE, decidió instalar un primer proyecto experimental, la central eólica piloto de la Venta I en el estado de Oaxaca y mediante el cual se comprobó el potencial de la región atrayendo importantes inversiones para el desarrollo de nuevos parques de generación eólica.

La Central Venta I, está en operación comercial desde el año 1994 (fue la primera en América Latina) y cuenta con 7 aerogeneradores, cada uno con capacidad de producción de 225 kW, conformando un total de 1.575 MW. La Central CE La Venta II puesta en operación en Enero del 2007, cuenta con 100 aerogeneradores, cada uno con una capacidad de producción de 850 kW, conformando un total de 83.3 MW.

La Central CE La Venta III inaugurada en Octubre del 2012 cuenta con 121 aerogeneradores, cada uno con una capacidad de producción de 850 kW, conformando un total de 102.85 MW, en la figura 1 se muestra el mapa de localización de las centrales CE antes citadas y en la figura 2 se muestran fotografías del lugar.

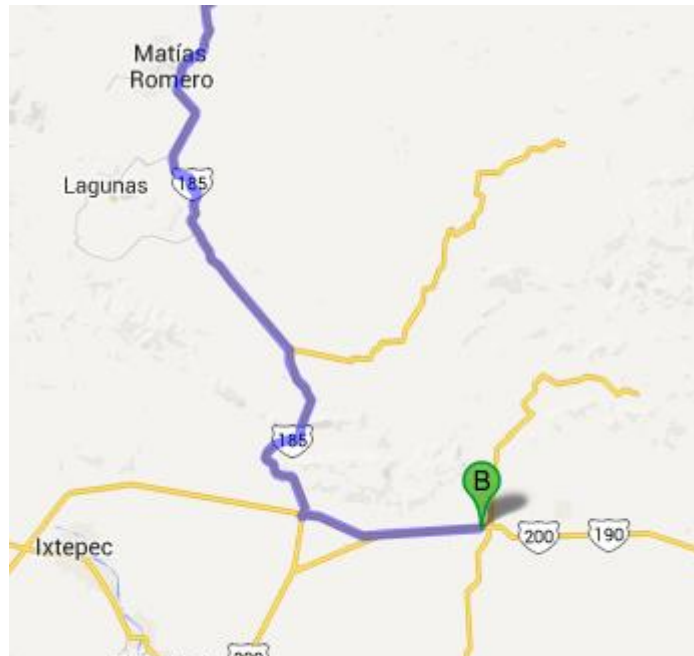


FIGURA 1. Mapas de localización de las centrales Eolo eléctricas de la venta I, II y III.



FIGURA 2. Centrales Eolo eléctricas de la venta I, II y III en el Estado de Oaxaca.

Con 167 aerogeneradores de 1.5 megawatts cada uno, el parque eólico Eurús en Oaxaca, al sur de México, contará con una capacidad de generación eléctrica de 250 MW en su primera etapa, lo que proveerá el 25% de nuestras necesidades energéticas en México, la puesta en marcha de dicho proyecto fue en el primer trimestre del 2009, será uno de los mayores parques eólicos del mundo y el más grande de América Latina. Será también el segundo en reducción de emisiones registrado ante el Mecanismo de Desarrollo Limpio de las Naciones Unidas y contará con uno de los índices más altos de reducción de emisiones por capacidad instalada. Se estima que la energía que generará sería suficiente para abastecer a una población de medio millón de habitantes, reduciendo el equivalente a 600 mil toneladas de dióxido de carbono por año, aproximadamente el 25% de las emisiones totales generadas por una comunidad como la mencionada. Las Centrales CE Oaxaca II, III y IV Figura 3, están en operación comercial desde el primer trimestre del año 2012 y cuentan con 68 aerogeneradores. Estos tienen una capacidad de producción individual de 1.5 MW, conformando un total de 306 MW.



FIGURA 3. Vista aérea de la central Oaxaca I, II y III.

El presente trabajo propone la comparación de herramientas de diseño para aerogeneradores eólicos de baja velocidad de viento con las cuales se obtienen las características aerodinámicas pertinentes para el desarrollo de perfiles usados en el diseño de palas con el fin de aplicarse a turbinas eólicas que funcione a bajas velocidades de viento entre 4 y 5 m/s, lo anterior para aplicaciones de uso doméstico. Esto será posible mediante el análisis de las palas de las turbinas eólicas, ya que como se mencionó anteriormente son éstas las que convierten la energía cinética del aire en energía eléctrica, y son parte fundamental de estas máquinas.

En este proyecto se usó como elemento base de comparación el perfil NACA 4412 debido a que es un perfil muy usado para desarrollar palas de aerogeneradores, el cual ha sido sometido a análisis rigurosos en túneles de viento y se conocen con mucha exactitud sus características aerodinámicas como su coeficiente de sustentación C_L , su coeficiente de potencia C_D , su ángulo de ataque óptimo α , entre otros. Este perfil permitió conocer el grado de exactitud del simulador que se usó como túnel de viento (JavaFoil), el cual tuvo un grado de error de aproximadamente 4%, lo cual es hasta cierto punto aceptable para el objetivo de este trabajo.

Con el estudio de la mecánica de fluidos en donde se presenta el comportamiento dinámico del fluido, en este caso el viento, se obtienen las ecuaciones que rigen dicho comportamiento entre las que destacan las ecuaciones de la fuerza sobre objetos fijos o sobre objetos que se mueven con el fluido. Otro factor importante en el estudio de los perfiles aerodinámicos es el número de Reynolds, el cual permite saber cuándo el fluido se comporta de manera laminar y cuando es turbulento. Las ecuaciones de Navier-Stokes describen a detalle el movimiento del fluido sobre superficies sólidas, sin embargo, estas ecuaciones son muy complicadas de resolver, introduciendo la teoría de la capa límite a las ecuaciones antes mencionadas, se obtienen simplificaciones importantes de éstas.

De acuerdo a lo antes mencionado, esta investigación se basa en el estudio de los parámetros de los perfiles aerodinámicos que permitan el desarrollo de un perfil para pala de aerogenerador que funcione a bajas velocidades y que pueda usarse para el desarrollo de un aerogenerador de uso doméstico, el cual pueda funcionar también a bajas alturas y generar por lo menos el 50% de la energía eléctrica que consume una familia, así mismo, proporciona una metodología que permite obtener los parámetros de perfiles aerodinámicos sin la necesidad de un túnel de viento, usando un software de simulación tanto para el túnel de viento como para el comportamiento de perfil deseado. Para este proyecto de investigación se presentan los siguientes capítulos:

En el capítulo I se presenta una introducción del trabajo a desarrollar, el objetivo general así como los objetivos específicos, las metas intermedias, la hipótesis de investigación, la hipótesis de trabajo, los antecedentes del proyecto, el enunciado del problema y los resultados obtenidos de esta tesis.

El capítulo II trata sobre los antecedentes de máquinas eólicas tanto para generadores de gran escala como para mediana escala, se menciona la aerodinámica de las turbinas en donde se menciona, entre otras cosas, el límite de Betz, el arrastre y sustentación en superficies de diferentes formas, las polares en los perfiles aerodinámicos, la teoría de ala así como la velocidad específica del rotor (TSR).

El capítulo III trata sobre la mecánica de fluidos que es la base teórica para el diseño del perfil eólico al que se quiere llegar. Entre otros temas se aborda el número de Reynolds, fuerzas desarrolladas sobre fluidos en movimiento, la teoría de capa límite y el análisis de elemento finito en una y dos dimensiones, el cual se ocupa para la simulación del perfil en segunda dimensión.

El capítulo IV habla sobre el análisis de resultados, destacando la aprobación de la metodología propuesta para obtener un perfil aerodinámico que cumpla con las especificaciones deseadas, se analiza un perfil NACA (4412) para validar los resultados obtenidos con el software de simulación, tomando en cuenta que dicho perfil tiene bien definidas sus polares y por lo tanto sus características. Después se realiza el análisis de un perfil propuesto al cual se le obtienen sus polares y se realiza su simulación con el fin de observar su comportamiento en el fluido, obteniendo una tabla que muestra los valores característicos de varios perfiles y se selecciona aquél que presenta la mayor fineza, la cual determina rendimiento del perfil.

El capítulo V trata sobre las conclusiones a las que se llegaron en esta tesis y se mencionan trabajos futuros para implementar el perfil en un rotor de un aerogenerador doméstico.

1.2 Enunciado del Problema

En años recientes el cambio climático en el mundo ha obligado a los gobiernos mundiales a replantear la manera de generar energía de todo tipo por medios diferentes a los usados comúnmente como es la quema de combustibles fósiles.

La humanidad depende en gran medida de la energía eléctrica, en México se han llevado a cabo acciones para obtener energía eléctrica por medios limpios tal es el caso de los parques eólicos antes mencionados, sin embargo, éstos están formados por turbinas eólicas de gran envergadura las cuales fueron adquiridas en el extranjero y colocadas por éstas empresas y son administradas por el gobierno federal.

Se han realizado estudios sobre perfiles aerodinámicos que aprovechan las fuerzas del viento para aplicarlos en aerogeneradores de velocidades medias y altas, sin embargo, no todos los estados de la república cuentan con las velocidades de vientos que se requieren para éstos perfiles, de ahí la importancia de proponer un perfil que pueda ser aprovechado para generar energía eléctrica que coadyuve a detener el cambio climático. Por lo anterior, se pretende proponer un perfil aerodinámico que funcione a bajas velocidades de viento y que pueda tener una eficiencia adecuada para generar por lo menos el 50% de la energía eléctrica que se consume diariamente en los hogares, contribuyendo a la economía de las familias mexicanas y al cuidado del medio ambiente, protegiendo la salud de los seres vivos en el planeta.

1.3 Formulación del Problema

Frente a esta realidad, ¿es necesario desarrollar una investigación sobre perfiles de baja velocidad que puedan aprovechar los vientos en la mayor parte de la República Mexicana?

- ¿Qué están haciendo las universidades para contribuir al desarrollo de perfiles aerodinámicos de bajas velocidades?
- ¿Se requiere verdaderamente que las familias y empresas autogeneren su propia energía eléctrica sin necesidad de comprarla al estado?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Comparar las herramientas SolidWorks, FlowSimulation y DesingFoil para el diseño de álabes de aerogeneradores eólicos de baja velocidad de viento y proponer el mejor Perfil Aerodinámico que permita reducir el consumo de energía eléctrica en los hogares e industrias mexicanas que geográficamente no cuentan con la suficiente velocidad de viento.

1.4.2 Objetivos Específicos.

1. Estudiar la teoría de Elemento Finito y las herramientas computacionales que lo implementan.
2. Determinar el modelo matemático para álabes de aerogeneradores en base a la teoría de la dinámica de fluidos.
3. Estudiar las herramientas de diseño específicas para álabes de aerogeneradores.
4. Definir un perfil aerodinámico para bajas velocidades de viento en base a sus curvas características y pruebas de simulación.
5. Comparar herramientas de software de diseño y simulación de álabes de aerogeneradores eólicos para proponer uno que aproveche bajas velocidades de viento.

1.5 Metas

1. Estudio de la dinámica de fluidos del viento.
2. Estudio de la teoría de turbinas eólicas con diseños aerodinámicos que basen su funcionamiento en la fuerza de sustentación.
3. Buscar herramientas de análisis para turbinas eólicas
4. Seleccionar las herramientas adecuadas para el análisis y diseño de perfiles aerodinámicos.
5. Comparar las características de las herramientas de diseño.
6. Proponer una metodología de comparación y aplicación de herramientas de diseño con el fin de obtener parámetros necesarios para la construcción de palas para aerogeneradores de baja velocidad.

1.6 Hipótesis de la Investigación

Es necesario el desarrollo de tecnologías alternas al petróleo que satisfagan las necesidades energéticas de regiones específicas en el país, con el fin de economizar en el gasto de energía y al mismo tiempo, participar en el cuidado del medio ambiente.

1.6.1 Hipótesis de Trabajo

Los perfiles aerodinámicos de baja velocidad son necesarios para aprovechar los vientos de baja velocidad que hay en la mayor parte de los estados de la república mexicana.

Capítulo 1

Fundamentos Teóricos

2.1 Generadores

2.1.1 Introducción

La energía eólica ha sido aprovechada como fuerza motriz en la navegación y para generar energía mecánica en molinos de granos y bombas de agua desde tiempos muy remotos. Solo desde el siglo pasado se comenzó a aprovechar para generar energía eléctrica. Durante el siglo XVII la tecnología de molinos estaba ya bastante desarrollada, siendo los holandeses los más avanzados, se estima que para entonces existían unos 10,000 molinos de viento entre 10 y 20 HP cada uno (unos 110 MW) en Inglaterra y unos 12,000 en los países bajos (unos 125 MW). A finales del Siglo XIX, los daneses habían conquistado el liderazgo tecnológico del recurso eólico y se estima que tenían instalados unos 10,000 molinos de viento (aproximadamente 1,000 MW) [5].

En México (1983) se publicó el Atlas Eólico Preliminar de América Latina y el Caribe [6], en el cual se presenta el mapa del potencial eólico en W/m^2 para la República Mexicana. En este mapa se anotan la velocidad media anual en m/s y el factor de forma k de la función de probabilidad (f.d.p) de Weibull para cada una de las estaciones consideradas. En 1987, se elaboró un trabajo sobre el potencial eólico en México a partir de información de velocidad y dirección de viento en la red de observatorios del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) observada de 1971 a 1979 [3]. En este trabajo se presentan como resultado mapas con la regionalización del potencial energético del viento para su aprovechamiento en el bombeo de agua y la generación eléctrica y los listados con el potencial eólico estimado e información climatológica de cada observatorio. En 1989 se realizó un estudio de los patrones estacionales de la velocidad y dirección del viento a nivel nacional a partir de información de la red de observatorios del Servicio Meteorológico Nacional recabada entre 1971 y 1979 [6]. Esta información permitió conocer los meses de mayor intensidad del viento en las diferentes regiones geográficas del país. En 1998 se publicó un mapa con las regiones con posibilidades en México para la construcción de centrales eolieléctricas y se realizó una comparación del potencial eólico de la zona de La Ventosa, Oax. Con otros sitios con velocidades de viento intensas a nivel mundial. En la figura 2.1. Se muestra este mapa con las regiones aptas para la construcción de centrales eolieléctricas.

En el caso particular del Estado de Hidalgo, a través del Plan Estatal de Desarrollo 2011-2016, contempla como uno de los ejes para el desarrollo económico de la Entidad, la promoción de nuevas fuentes de energía para el desarrollo industrial, siendo sustentables y responsables con el medio ambiente y teniendo como objetivo principal la búsqueda de energías renovables y limpias.

La ley de Fomento y Desarrollo Económico del Estado de Hidalgo, incentiva la vinculación entre el uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente y la

innovación tecnológica en los diversos sectores y ramas productivas del Estado. Esta ley establece los mecanismos mediante los cuales se apoyará a la investigación, desarrollo, innovación técnica y tecnológica para la aplicación generalizada de la eficiencia energética y las energías renovables en la Entidad, contemplando para tales efectos la creación de un Fondo anual operado por la Comisión Estatal de Fomento y Ahorro de Energía (CEFAEN), cuyo objeto es fomentar la generación de energía, a través de fuentes alternas que incluyen la energía Eólica, Solar, energía de la biomasa, entre otras.

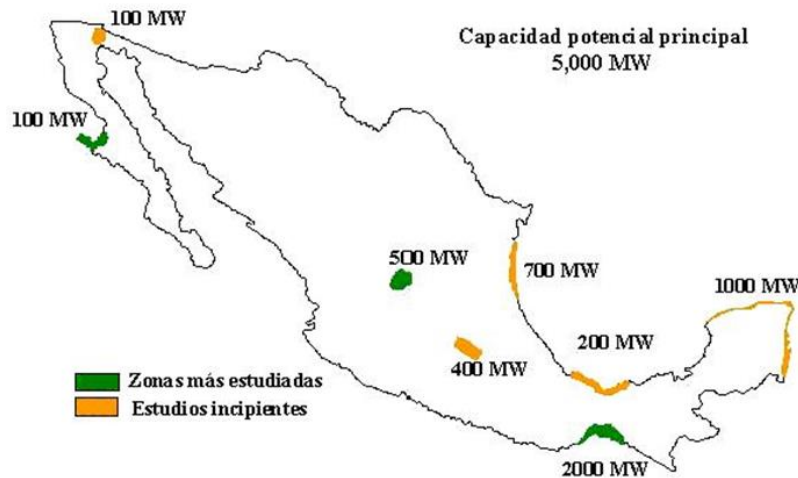


FIGURA 2. 1 Mapa con posibilidades de construcción de centrales eolieléctricas [6].

2.1.2 Generadores

Un *aerogenerador* o *turbina eólica* transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica sin usar combustible, pasando por el estado intermedio de conversión a energía mecánica de rotación a través de las palas [7].

Los aerogeneradores pueden ser de “*sustentación*” o de “*arrastre*” en función de cuál de las fuerzas generadas por el viento se use como “*fuerza motriz*”. Para entender el principio de funcionamiento de un aerogenerador nos referiremos a las turbinas de uso más extendido en la actualidad, es decir, las de “*sustentación*”; en ellas, a diferencia de las de “*arrastre*”, el viento circula por ambas caras de la pala, las cuales tienen perfiles geométricos distintos, creando de esta forma un área de depresión en la cara superior respecto a la presión en la cara inferior. Esta diferencia de presiones produce una fuerza llamada *sustentación aerodinámica* (figura 2.2.) sobre la superficie de la pala, de forma parecida a lo que sucede en las alas de los aviones [7].

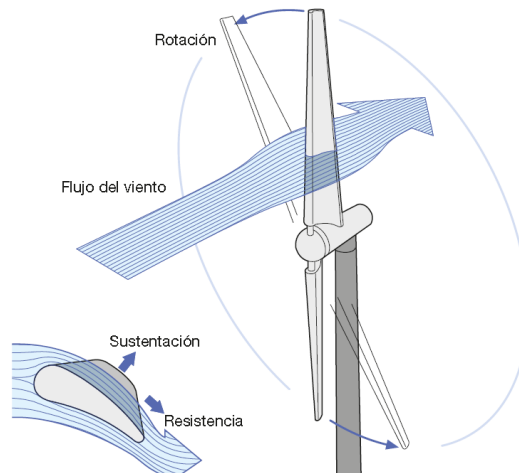


FIGURA 2. 2 Muestra la sustentación aerodinámica. [7].

La sustentación en las alas de un avión es capaz de levantarlo del suelo y mantenerlo volando, mientras que en un aerogenerador, dado que las palas son solidarias con el terreno, provoca su rotación alrededor del eje del buje. Al mismo tiempo se genera una *fuerza de resistencia* que se opone al movimiento y es perpendicular a la sustentación [8]. En los aerogeneradores diseñados correctamente, la relación sustentación/resistencia es grande dentro del rango normal de operación.

Una central eólica es una instalación en donde la energía cinética del viento se puede transformar en energía mecánica de rotación. Para ello se instala una torre en cuya parte superior existe un rotor con múltiples palas, orientadas en la dirección del viento. Las palas o hélices giran alrededor de un eje horizontal que actúa sobre un generador de electricidad. A pesar de que aproximadamente un 1% de la energía solar que recibe la Tierra se transforma en movimiento atmosférico, esta energía no se distribuye uniformemente, lo que limita su aprovechamiento. Existen además limitaciones tecnológicas para alcanzar potencias superiores a un megavatio, lo cual hace que su utilidad esté muy restringida. Una central eólica no es más que un conjunto de aerogeneradores.

Las principales ventajas de las centrales eólicas son, en resumen:

- Generación distribuida.
- Conversión eficiente de la energía eólica en energía eléctrica (rendimiento teórico del 59%).
- Ausencia de emisiones contaminantes.

- Ahorro de combustibles fósiles.
- Reducción de los costes de servicio (no hay costes de abastecimiento de combustible) y de mantenimiento;
- Fácil desmantelamiento de los aerogeneradores al final de su vida útil (20/25 años);
- La capacidad de generación de los aerogeneradores va desde los pocos centenares de W hasta algunos Mega Watts, ajustándose a las exigencias tanto de las viviendas aisladas como de las aplicaciones industriales o de la inyección en la red (a través de parques eólicos).[8].

2.1.2.1 Tipos de Aerogeneradores

En función de la tecnología de construcción, los aerogeneradores pueden dividirse en dos grandes familias:

- *Aerogeneradores de eje vertical* – VAWT (Vertical Axis Wind Turbine);
- *Aerogeneradores de eje horizontal* – HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine).

A su vez los aerogeneradores VAWT, que representan el 1% del total, se subdividen en:

- *Aerogeneradores del tipo Savonius*;
- *Aerogeneradores del tipo Darrieus*;
- *Aerogeneradores híbridos Darrieus-Savonius*.

Los aerogeneradores HAWT, que representan el 99% del total, se subdividen en:

- *Aerogeneradores a barlovento (upwind)*;
- *Aerogeneradores a sotavento (downwind)*.

De entre los aerogeneradores de eje horizontal, un 99% son de tres palas, mientras que un 1% son de dos palas. [9]

2.1.3 Aerogeneradores de Eje Vertical Tipo Savonius

Es el modelo más simple de aerogenerador y consta de dos (o cuatro) chapas verticales, sin perfil de ala y curvadas en forma de semicilindro. También se denomina "*aerogenerador de resistencia*" ya que el par motor sobre el eje está generado por la diferencia de resistencia (fricción) que las superficies verticales dispuestas simétricamente respecto al eje ofrecen al viento, este tipo de rotor se muestra en la figura 2.3

Las principales características del aerogenerador Savonius son:

- Aerogenerador “lento”;
- Poca eficiencia;
- Utilizable con vientos de poca intensidad y en un rango limitado;
- Necesidad de un control de velocidad adecuado para mantener la eficiencia dentro de unos valores aceptables;
- Imposibilidad de reducir la superficie aerodinámica en caso de velocidad superior a la nominal debido a sus palas fijas;
- Necesidad de un dispositivo mecánico para el paro del aerogenerador;
- Necesidad de una estructura robusta que resista los vientos extremos (debido a la elevada superficie expuesta de las palas);
- Válido solo para aplicaciones de poca potencia;
- Poco ruidoso. [9]

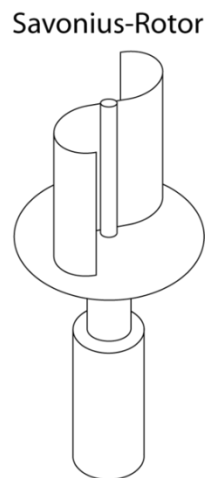


FIGURA 2. 3 Rotor Tipo Savonius

2.1.4 Aerogeneradores de Eje Vertical Tipo Darrieus

Son aerogeneradores de eje vertical y de "*sustentación*", ya que las superficies expuestas al viento presentan un perfil de ala capaz de generar una distribución de la presión a lo largo de la pala y, por tanto, un par en el eje de rotación.

Con relación a los aerogeneradores de "*resistencia*" Savonius, los de tipo Darrieus (y todos los aerogeneradores de "*sustentación*") proporcionan una mayor eficiencia al tener menos pérdidas por fricción, figura 2.4. No obstante, un aerogenerador Darrieus es incapaz de arrancar por sí solo dado que, independientemente de la velocidad del viento, el par de arranque es nulo: como consecuencia, este aerogenerador necesita un dispositivo auxiliar. En el aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius Figura 2.5, el par de arranque lo aporta el aerogenerador coaxial Savonius situado en el interior del aerogenerador Darrieus. [10]

Las principales características del aerogenerador Darrieus son:

- Aerogenerador "rápido";
- Eficiencia menor que los aerogeneradores de eje horizontal, debido también a que una gran parte de la superficie de las palas gira en las proximidades del eje a poca velocidad;
- Adaptación a los cambios de dirección del viento;
- Eficiente para vientos con una notable componente vertical de la velocidad (emplazamientos con pendientes o instalaciones en el tejado de edificios, "efecto esquina");
- Utilizable con vientos de poca intensidad y en un rango limitado;
- Necesidad de un control de velocidad adecuado para mantener la eficiencia dentro de unos valores aceptables;
- Imposibilidad de reducir la superficie aerodinámica en caso de velocidad superior a la nominal debido a sus palas fijas;
- Necesidad de un dispositivo mecánico para el paro del aerogenerador;
- Necesidad de una estructura no especialmente robusta para resistir los vientos extremos (debido a la poca superficie de las palas expuesta al viento en comparación con el aerogenerador Savonius);
- Utilizable para aplicaciones de gran potencia;
- Poco ruidoso y con vibraciones que se limitan a la cimentación (apto por tanto para instalaciones sobre edificios);
- Capaz de funcionar incluso con vientos turbulentos;

- El multiplicador y el generador eléctrico pueden ubicarse al nivel del suelo;
- Elevadas fluctuaciones del par mecánico motor. [10]

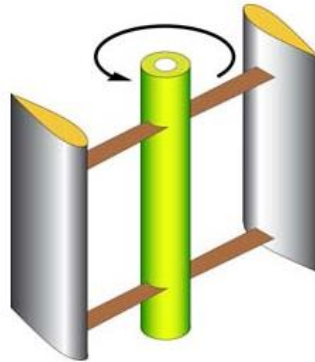


FIGURA 2. 4 Rotor Tipo Darrieus

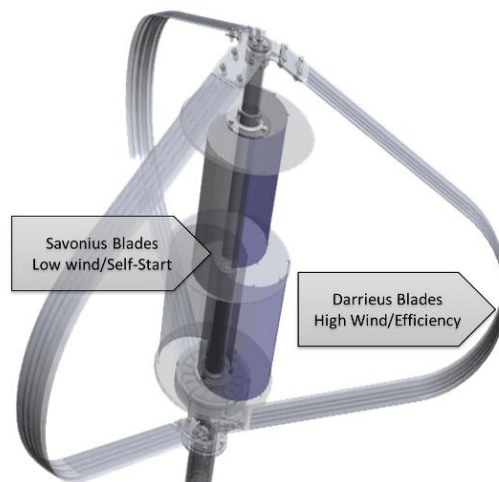


FIGURA 2. 5 Aerogenerador híbrido
Darrieus-Savonius

2.1.5 Aerogeneradores de Eje Horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal a barlovento, llamados así porque el viento encuentra antes el rotor que la torre, tienen una mayor eficiencia que los aerogeneradores a sotavento, ya que no presentan interferencias aerodinámicas con la torre. En cambio, tienen el inconveniente de no alinearse autónomamente con relación al viento, por lo que necesitan una aleta direccional o un sistema de orientación. [11]

Los aerogeneradores de eje horizontal a sotavento acusan los efectos negativos de la interacción torre-rotor, pero se alinean automáticamente y pueden utilizar un rotor flexible para resistir los vientos fuertes figura 2.6.

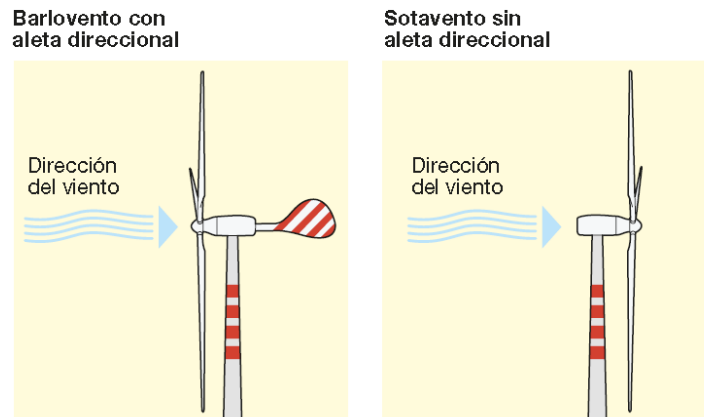


FIGURA 2. 6 Generadores de eje horizontal [11]

El aerogenerador de eje horizontal de tres palas es el modelo más generalizado, aunque existen modelos de dos palas, de una sola pala dotada de contrapeso que ya no se usan en la actualidad y multipala, usado sobre todo en micro eólica.

Dado que la velocidad de rotación disminuye al crecer el número de palas (mientras que el par aumenta), los rotores de 2 palas giran más rápidamente que los de 3 (40 rpm de media frente a 30 rpm de los tripala), de manera que el ruido aerodinámico es mayor. [11] Además, un rotor de dos palas está sometido a desequilibrios debidos a la variación del viento con la altura; a efectos giroscópicos, cuando la góndola se orienta tiene un momento de inercia inferior cuando las palas están en posición vertical que cuando están horizontales. Para solucionar este problema generalmente incorporan un buje basculante que les permite equilibrar el empuje asimétrico en el rotor. En cualquier caso, el rotor de dos palas es más liviano, por lo que todas las estructuras de soporte pueden ser menos masivas, con la consiguiente reducción de costes. Además el impacto visual y el ruido son menos importantes en las instalaciones marinas u *offshore*, lo cual, junto al menor coste, hace que los aerogeneradores de dos palas sean más atractivos para estas aplicaciones. En la tabla 2.1 se confrontan las principales características de los aerogeneradores de dos y de tres palas.

TABLA 2. 1 Características de los aerogeneradores de dos y tres palas [11]

2 palas	3 palas
Menor coste del rotor (menor peso)	Mayor compensación de las fuerzas aerodinámicas
Más ruidoso (velocidad periférica mayor)	Mayor estabilidad mecánica (fuerzas giroscópicas equilibradas)
Instalación más simple (ensamblaje en tierra de la torre)	Par motor más uniforme
Mayor complejidad de diseño (necesita un buje basculante)	Menor impacto visual

2.1.6 Características de los Aerogeneradores

Atendiendo a la potencia de los aerogeneradores, las instalaciones eólicas pueden clasificarse de la siguiente manera:

- *Microeólicas* para potencias inferiores a 20 kW y por instalaciones destinadas principalmente al suministro doméstico;
- *Minieólicas* para potencias entre 20 y 200 kW con instalaciones principalmente destinadas a la producción y venta de electricidad;
- *Eólicas* para potencias superiores a 200 kW y constituidas principalmente por parques eólicos para la inyección de la energía producida en la red. [12]

El funcionamiento de un aerogenerador viene determinado por valores específicos de velocidad del viento, relacionados con diferentes velocidades de viento:

- *Velocidad de arranque* - el rotor empieza a girar y el alternador genera una tensión, que aumenta con la velocidad del viento;
- *Velocidad de acoplamiento* (2 - 4 m/s) – cuando la tensión es lo suficientemente elevada para la aplicación específica, entonces se empieza a producir energía y se activa todo el circuito, el cual constituirá la carga del aerogenerador;
- *Velocidad nominal* (10 - 14 m/s) - es la velocidad a la cual se genera la potencia nominal;

- *Velocidad de desconexión* (20 - 25 m/s) - es la velocidad del viento por encima de la cual el rotor debe detenerse para evitar daños en la máquina; el sistema de control interviene mediante dispositivos adecuados, activos o pasivos. [12]

Un aerogenerador debe poder soportar durante toda su vida útil la peor tormenta que pueda darse en el emplazamiento donde está instalado. Si el aerogenerador va a utilizarse durante 20 años, se considerará como ráfaga máxima la que se repite de media cada 50 años.

El diseño del aerogenerador también deberá prever su funcionamiento a temperaturas ambiente que van de -10 °C a +40 °C en condiciones normales y de -20 °C a +50 °C en condiciones ambientales extremas.

Las principales opciones en el diseño y construcción de un aerogenerador incluyen:

- El número de palas (habitualmente dos o tres);
- Posición del rotor (barlovento o sotavento);
- Material de construcción, método de construcción y tipo de perfil de las palas;
- Diseño del buje: rígido, basculante o abisagrado;
- Control de la potencia mecánica mediante control aerodinámico (control de la condición de pérdida aerodinámica) o mediante palas de ángulo de ataque variable (control del ángulo de paso);
- Rotor de velocidad fija o variable;
- Orientación libre o mediante control activo;
- Generador síncrono o asíncrono (con rotor de jaula de ardilla o rotor bobinado – generador de inducción doblemente alimentado);
- Con multiplicador o conectado directamente al eje del generador. [13]

En la figura 2.7 se muestran algunos componentes mencionados anteriormente.

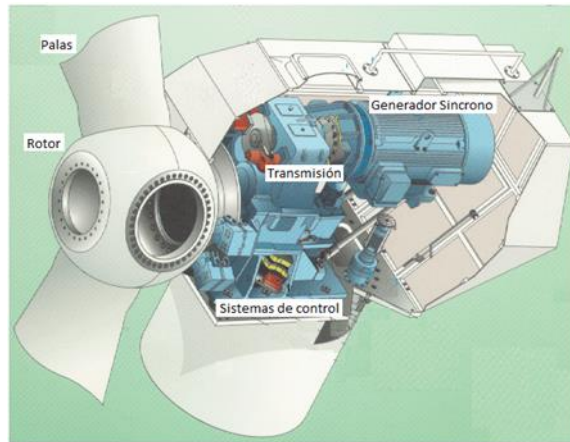


FIGURA 2. 7 Componentes de un Aerogenerador

La tabla 2.2 resume las características generales de un aerogenerador [13].

TABLA 2. 2 Características generales de un aerogenerador

Potencia nominal	1300 KWatts
Número de palas	2 o 3
Diámetro del rotor	62m
Control	inclinación de la pala y velocidad variable
Longitud de la pala	Varía dependiendo del tipo de aerogenerador, para el caso de la potencia que se está trabajando la longitud de la pala es de 20 m
Cuerda máxima de la pala	18 m
Peso de una pala	Varía dependiendo del material con la que se construye.
Peso de la góndola con rotor y palas	Alrededor de 8 toneladas
Peso de la torre (estructura tubular de acero)	Entre 55 y 62 toneladas
Altura de la torre (dependiendo de las	Para este caso es de 7.5 m

condiciones locales del viento)	
Diámetro de la torre en la base	5.5 m
Velocidad de rotación del rotor	15 - 20 rpm
Relación del multiplicador	100:1
Velocidad del viento de arranque del aerogenerador	25 m/s
Velocidad máxima	50 m/s
Velocidad del viento de parada.	25 m/s

2.2 Aerodinámica de la Turbina

2.2.1 Introducción

El componente principal de una turbina de viento es el convertidor de energía que transforma la energía cinética contenida en el aire en movimiento, en energía mecánica. La extracción de la energía mecánica a partir de una corriente de aire en movimiento con la ayuda de un álabe, un convertidor giratorio de la energía eólica sigue sus propias reglas básicas. Aunque la teoría del momento de Betz [19], supone que un convertidor de energía sin pérdidas en un flujo de aire sin fricción, contiene simplificaciones, sus resultados son muy útiles para realizar cálculos aproximados en la ingeniería práctica. Pero su verdadero significado se basa en el hecho de que proporciona una base común física para la comprensión y funcionamiento de los convertidores de energía eólica de diferentes diseños. El mérito de haber reconocido este principio se debe a Albert Betz Between 1922 y 1925, Betz publicó escritos en los que era capaz de demostrar que, mediante la aplicación de leyes físicas elementales, la energía mecánica extraíble de una corriente de aire que pasa a través de un área de sección transversal dada se limita a una cierta proporción fija de la energía potencial contenida en la corriente de aire. Por otra parte, se encontró que la extracción óptima de la energía puede sólo ser realizada en una cierta proporción entre la velocidad del flujo de aire delante convertidor y la velocidad de flujo por detrás del convertidor.

2.2.2 Arrastre y Sustentación.

El arrastre es la fuerza sobre un cuerpo provocado por un fluido que resiste el movimiento en la dirección del recorrido del cuerpo, la fuerza de arrastre debe contrarrestarse por una fuerza propulsora en la dirección opuesta para mantener o incrementar la velocidad de algún vehículo. Puesto que la producción de la fuerza propulsora requiere potencia adicional, es conveniente mantener el arrastre en un valor mínimo.

La sustentación es una fuerza provocada por el fluido en la dirección perpendicular a la dirección del recorrido del cuerpo como se muestra en la figura 2.8, su aplicación más importante es en el desarrollo de superficies sustentadoras como las alas de aviones. [14].

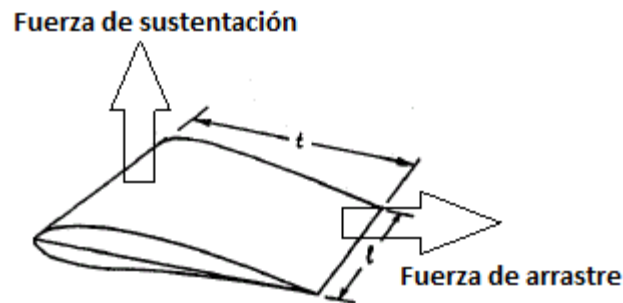


FIGURA 2. 8 Dirección de la fuerza de arrastre y sustentación

Ecuación de la fuerza de arrastre:

$$F_D = \text{arrastre} = C_D \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A \quad (16)$$

El término C_D es el coeficiente de arrastre, un factor adimensional, su magnitud depende de la forma física del objeto y su orientación con relación a la corriente del fluido.

El término $\frac{\rho v^2}{2}$ es la presión dinámica, v Es la velocidad del fluido en relación al cuerpo, A Se refiere a una característica del área del cuerpo, tanto el área de la superficie o la máxima sección transversal perpendicular a la dirección del flujo. La influencia de la presión dinámica $\frac{\rho v^2}{2}$ se puede apreciar en la figura 2.9 en la que se observa una esfera en la corriente del fluido. Las líneas de corriente muestran la trayectoria del fluido conforme éstas se aproximan y fluyen alrededor de la esfera. En el punto s sobre la superficie de la esfera, la corriente del fluido está en reposo o “estancada”.

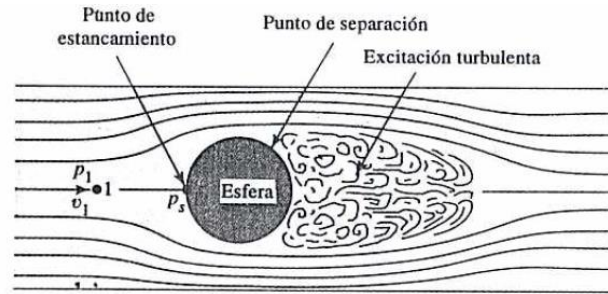


FIGURA 2. 9 Esfera en una corriente de fluido [14].

La relación entre la presión P_s y la correspondiente a la corriente sin disturbios en el punto 1 se puede encontrar usando la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_s}{\gamma}$$

Despejando P_s se tiene:

$$P_s = P_1 + \frac{\gamma v_1^2}{2g}; \quad \text{pero } \rho = \frac{\gamma}{g};$$

Así se tiene que

$$P_s = P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \quad (18)$$

La presión de estancamiento es mayor que la presión estática en la corriente libre por la magnitud de la presión dinámica (correspondiente al término $\rho \frac{v_1^2}{2}$ de la ecuación 18). El incremento de la presión en el punto de estancamiento puede esperarse que produzca una fuerza sobre el cuerpo oponiéndose a su movimiento, esto es, una fuerza de arrastre, la magnitud de esta fuerza depende de la presión de estancamiento y la presión en la parte trasera del cuerpo [14].

El arrastre total se debe a dos componentes:

1. **La presión de arrastre o forma de arrastre:** Es una fuerza que se crea tanto por la presión de excitación (presión que se crea en la parte trasera del cuerpo) y la presión en el punto de estancamiento (presión en la superficie delantera del cuerpo)

Nota: La presión de excitación es significativamente más baja que la presión en el punto de estancamiento.

Si el punto de separación de la capa límite puede hacerse que ocurra más atrás sobre el cuerpo, el tamaño de la excitación puede decrecer y la presión de arrastre será menor. Esta fuerza se calcula con la ecuación (16) en la que A se toma como la sección transversal máxima del cuerpo perpendicular la flujo y C_D es el coeficiente de presión de arrastre, el cual depende como ya se dijo, de la forma del cuerpo, pero también, del número de Reynolds del flujo, la rugosidad de la superficie y la influencia de otros cuerpos en la vecindad [14].

2. **La fricción de arrastre** es debida a los esfuerzos cortantes en la capa límite.

2.2.3 Sustentación y Arrastre en Superficies.

Se define la sustentación como la fuerza que actúa sobre un cuerpo en la dirección perpendicular a la del flujo del fluido. Conforme se mueve el aire en la superficie de sustentación, éste alcanza una gran velocidad en la parte más alta de la superficie (la punta de la superficie) con una correspondiente disminución en la presión. Al mismo tiempo la presión sobre la parte más baja de la superficie se incrementa [15].

El resultado neto es una fuerza hacia arriba llamada **sustentación**. La fuerza de sustentación (F_L) se define como una función del coeficiente de suspensión (C_L).

$$F_L = C_L \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A \quad (19)$$

La figura 2.10 muestra las longitudes de tramo y cuerda de una superficie sustentadora, donde A es el cociente con valor b/c . El parámetro C_L depende de la forma de la superficie de sustentación y del ángulo de ataque α .

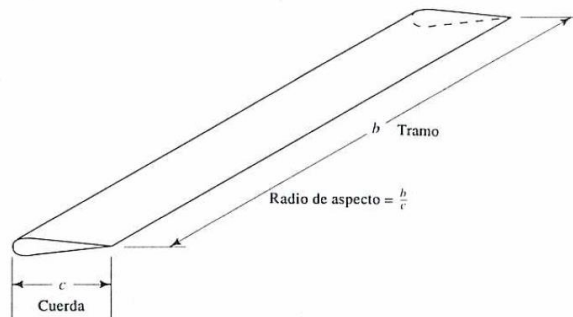


FIGURA 2. 10 Longitudes de tramo y cuerda para una superficie sustentadora [15].

C_L = coeficiente de sustentación, adimensional: [8]

$$C_L = 2\pi \text{sen}(\alpha) \quad (20)$$

donde, α es el ángulo de ataque o ángulo que forma la placa entre su línea de cuerda y la velocidad relativa del fluido.

El ángulo α no deberá exceder de 25° aproximadamente, la figura 2.11 muestra la fuerza neta sobre la superficie de sustentación así como sus componentes vertical y horizontal que son el arrastre inducido y la sustentación respectivamente, también muestra el ángulo de ataque α en relación a la dirección del flujo de aire.

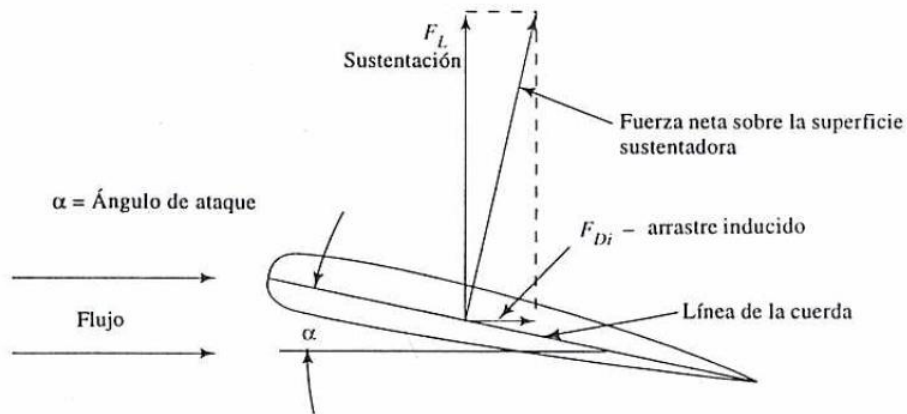


FIGURA 2. 11 Arrastre Inducido. [15]

Otros factores que afectan la sustentación son:

- Rugosidad de la superficie.
- Número de Reynolds.
- La turbulencia de la corriente de aire.
- El coeficiente entre la velocidad de la corriente del fluido y la velocidad del sonido.
- El coeficiente de aspecto b/c , esto porque las características del flujo en las puntas de las palas son diferentes a las características hacia el centro de las mismas.

A un determinado ángulo de ataque, la fuerza resultante neta sobre una superficie sustentadora actúa básicamente perpendicular a la línea de cuerda de la sección. Algunos de los parámetros usados en el modelo de una hélice se observan en la figura 2.12.

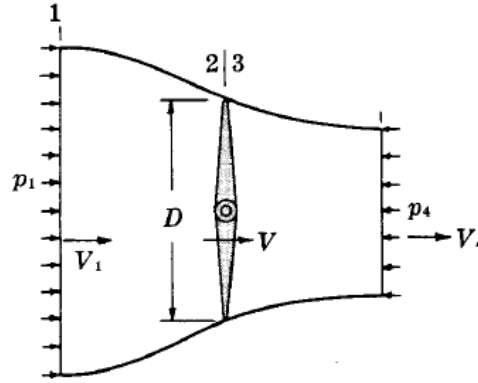


FIGURA 2. 11 Modelo de hélice. [16]

Las ecuaciones para el cálculo de la fuerza de empuje, la potencia de salida de una hélice, la velocidad a través de la misma y su rendimiento son las siguientes: [16]

$$\text{empuje } F = \frac{w}{g} \left(\frac{1}{4} \pi D^2 v \right) (v_4 - v_1) \quad (21)$$

$$P = \text{Empuje} * \text{Velocidad} = \frac{wQ}{g} (v_4 - v_1) v_1 \quad (22)$$

$$V = \frac{(v+v_4)}{2} \quad (23)$$

$$e = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{\left(\frac{wQ}{g} \right) (v_4 - v_1) v}{\frac{1}{2} \left(\frac{wQ}{g} \right) (v_4^2 - v^2)} \quad (24)$$

Donde:

w Es el peso específico del viento en. $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

g Es la variable de la gravedad.

Q Es el caudal del fluido en volumen. $\left[\frac{m^3}{seg} \right]$

e Es el rendimiento de la hélice.

Las componentes de la fuerza de sustentación son:

$$F_{Di} = C_{Di} \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A \quad (25)$$

Donde C_{Di} se relaciona con C_L por medio de la ecuación:

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi \left(\frac{b}{c} \right)} \quad (26)$$

El arrastre total es entonces:

$$F_D = F_{Df} + F_{Dp} + F_{Di}$$

$F_D = \text{Arrastre de fricción} + \text{arrastre de presión} + \text{arrastre inducido}$

$$\text{Coeficiente de arrastre} = C_D = \frac{\text{Arrastre } F_D \text{ en [Kg]}}{\rho N^2 D^4} \quad (27)$$

$$\text{Coeficiente de momento} = C_M = \frac{\text{par } M \text{ en [m} \cdot \text{Kg]}}{\rho N^2 D^5} \quad (28)$$

$$\text{Coeficiente de potencia} = C_P = \frac{\text{potencia } P \left[\frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{seg}} \right]}{\rho N^3 D^5} \quad (29)$$

Donde:

N es la velocidad a la que gira la pala, está dado en revoluciones por segundo, para que los coeficientes queden a dimensionales.

D es el diámetro que barre la pala. [m]

ρ es la densidad del aire. $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Aplicando el principio de la cantidad de movimiento, el arrastre D de la hélice varía la cantidad de movimiento de la masa m del aire. La hélice puede estar fija en un fluido que se

mueve con una velocidad de aproximación v_1 o puede moverse hacia la izquierda, a la velocidad v_1 en el fluido en reposo [17].

Despreciando los vórtices y el rozamiento:

$$\text{Arrastre } D = \frac{wQ}{g} (\Delta v) = \frac{wQ}{g} (v_2 - v_1) \quad (30)$$

Donde w es el peso específico del aire, el cual se ocupa para obtener la fuerza en Kg, si se expresa la fuerza en Newtons, entonces la densidad del fluido se puede expresar como:

$$\frac{w}{g} = \rho$$

$$D = \frac{w}{g} Av (\Delta v) = \frac{w}{g} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) v (v_2 - v_1) \quad (31)$$

La potencia de salida es $P = \text{fuerza} \times \text{velocidad}$

$$P = \frac{wQ}{g} (v_2 - v_1) v_1 \quad (32)$$

El arrastre D también es igual a [17]:

$$\text{Arrastre } D = (P_2 - P_1)A = (P_2 - P_1) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (33)$$

$$(P_2 - P_1) = \frac{w}{g} v' (v_2 - v_1) \quad (34).$$

Al aplicar el principio de trabajo y energía cinética, tomar como unidad 1 m^3 y suponer que no existen pérdidas de carga se tiene que [18],

$$\frac{\text{Energía cinética inicial}}{\text{m}^3} + \frac{\text{trabajo realizado}}{\text{m}^3} = \frac{\text{Energía cinética final}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{w}{g} \right) v_1^2 + (P_2 - P_1) = \frac{1}{2} \left(\frac{w}{g} \right) v_2^2$$

$$P_2 - P_1 = \frac{w}{g} \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) \quad \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\frac{w}{g} v' (v_2 - v_1) = \frac{w}{g} \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) \quad (35)$$

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \text{Velocidad a la altura de las hélices} \quad (36)$$

El caudal del fluido Q puede expresarse en función de v'

$$Q = Av' = \frac{1}{4}\pi D^2 v' = \frac{1}{4}\pi D^2 \left(\frac{v_2 - v_1}{2}\right) \quad (37)$$

El rendimiento de la hélice es [18]:

$$e = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{\frac{wQ}{g}(v_2 - v_1)v_1}{v_2^2 - v_1^2} = \frac{2v_1}{v_2 - v_1} = \frac{v_1}{v'} \quad (38)$$

2.2.4 Límite de Betz

La energía cinética de una masa $m = \frac{w}{g}$ de aire que se mueve a una velocidad v se puede expresar como:

$$E = 1/2mv^2 \quad (39)$$

Teniendo en cuenta una cierta área de sección transversal A , a través de la cual el aire pasa a una velocidad v , el volumen V fluye a través de una unidad durante cierto tiempo, el flujo de volumen es:

$$Q = vA \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (40)$$

Y el flujo de masa con una densidad del aire ρ es:

$$M = \rho vA \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right] \quad (41)$$

Las ecuaciones anteriores expresan la energía cinética del aire en movimiento y el rendimiento de flujo de masa. Una masa de aire de densidad ρ [kg/m³], que se mueve a una velocidad v [m/s], contiene la siguiente potencia por unidad de superficie perpendicular a la dirección del flujo (potencia específica) [19]

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho v^3 \text{ [Watts/m}^2\text{]} \quad (42)$$

donde:

$$\begin{array}{ll} \rho & \text{[Kg/m}^3\text{]} \\ v & \text{[m/s]} \end{array}$$

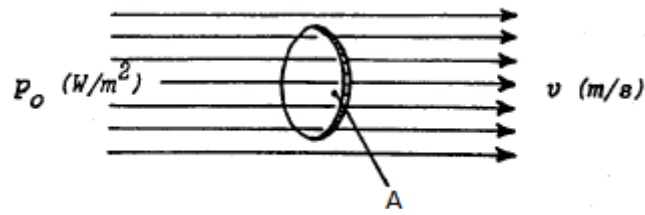


FIGURA 2. 12 Potencia de un caudal de aire (viento). [19]

En una superficie $A \text{ [m}^2\text{]}$ (Fig. 2.13), la potencia es:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ [Watts]} \quad (43)$$

donde

$$A \text{ [m}^2\text{]}$$

Supóngase un rotor eólico ideal (sin pérdidas), que funciona según el principio del arrastre aerodinámico, propulsado por un viento de velocidad constante $v \text{ [m/s]}$. La superficie barrida por las palas del rotor (“pala”) es $A \text{ [m}^2\text{]}$. Ya que el rotor, acoplado a un generador eléctrico o una bomba de agua, le extrae energía al viento, la velocidad de éste detrás del rotor será menor que la del viento corriente arriba. La figura 2.14 muestra esquemáticamente la relación de las velocidades del viento delante, durante su paso por el rotor y detrás del mismo [19].

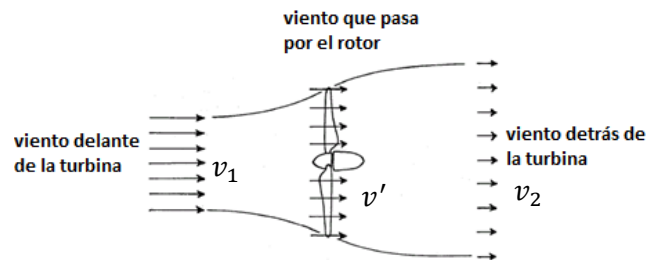


FIGURA 2. 13 Comportamiento de la velocidad del viento en un rotor bajo condiciones ideales. [19]

v_1 Es la velocidad del viento delante del rotor

v' Es la velocidad del viento a la altura del rotor

v_2 Es la velocidad detrás del rotor

$$v_1 > v_2$$

$$v_2 > v'$$

Los resultados que siguen a continuación sólo son válidos bajo condiciones idealizadas, tanto del rotor como del viento, a saber [19]

- a). El rotor no tiene pérdidas mecánicas ni aerodinámicas y un número infinito de palas óptimamente diseñadas.
- b). El aire es incompresible y está exento de fricción
- c). La corriente delante y detrás del rotor es laminar, es decir, las líneas de flujo son paralelas entre sí y perpendiculares al plano del rotor. Esto significa que se asume un rotor que extrae energía del viento sin perturbar su corriente ideal, siendo la presión estática del aire delante y detrás del rotor la misma que la del aire en las inmediaciones del mismo.

Bajo estas condiciones, es válida la siguiente relación de [19]:

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad [\text{m/s}] \quad (44)$$

Es decir, la velocidad del viento a la altura del rotor es la media aritmética de las velocidades delante y detrás del mismo.

Betz denomina la relación:

$$a = \frac{v'}{v_1} \quad [\text{Adimensional}]$$

Llamado **factor de ralentización** (*hacer lenta una actividad o proceso o disminuir su velocidad*) del aire a la altura del rotor, este factor compara la velocidad del aire muy cerca del rotor con la velocidad delante del rotor. Por el teorema de Betz la potencia del viento cedida al rotor se obtiene con la ecuación:

$$P_w = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] P_0 \quad [\text{Watts}] \quad (45)$$

Tomando en cuenta la ecuación 44 y el factor de ralentización se tiene:

$$P_W = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right) + 1 \right] P_0 \quad [\text{Watts}] \quad (46)$$

Esta potencia depende de la corriente de aire delante del rotor v_1 y de la ralentización de su velocidad a la altura del rotor. La máxima potencia obtenible $P_{m\acute{a}x}$ se puede determinar analítica o gráficamente para la ralentización óptima (a_{opt}) [19] Ibíd.

$$P_{W_{max}} = \left(\frac{1}{2} \right) \left[1 - \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{1}{3} \right) \right] P_0 = 0.5926$$

$$P_{W_{max}} = \left(\frac{16}{27} \right) P_0$$

$$a_{opt} = \frac{2}{3} = 0.67$$

$$\frac{P_{W_{Max}}}{P_0} = \text{Coeficiente de potencia}$$

$$C_{P_W} = \frac{P_W}{P_0}$$

$$C_{P_{W_{max}}} = 0.5926$$

La potencia máxima de un rotor eólico es entonces:

$$P_{W_{max}} = C_{P_{W_{Max}}} \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad [\text{Watts}] \quad (47)$$

Bajo condiciones normales (temperatura 25 °C, presión 1 bar), la densidad ρ del aire es de aprox. 1.25 kg/m³. Introduciendo este dato en la ecuación anterior, para la potencia máxima del rotor ideal obtendremos esta sencilla relación:

$$P_{W_{max}} = 0.37 A v^3 \quad [\text{Watts}] \quad (48)$$

Esta importante ecuación se denomina Limite de Betz

A es la superficie [m²] barrida por la longitud aerodinámicamente útil de las palas. El buje de un rotor de eje horizontal, al que están fijadas las palas, no aporta potencia. Sin embargo, teniendo en cuenta que su diámetro es pequeño con respecto al diámetro del rotor D [m], para A podemos introducir la superficie barrida por este último:

$$A = \frac{\pi D^2}{2}$$

Introduciendo esta ecuación a la ecuación 48 se tiene:

$$P_{w_{max}} = 0.29 D^2 v^3 \quad [\text{Watts}] \quad (49)$$

Esta ecuación es sumamente práctica para realizar un cálculo rápido de la potencia máxima que puede suministrar un rotor de eje horizontal de diámetro D.

Si dividimos la ecuación $P_{w_{max}} = 0.37 A v^3$ por la superficie A, obtendremos la máxima potencia específica o potencia por unidad de superficie barrida por el rotor:

$$P_{max} = 0.37 v^3 \quad (\text{Watts/m}^2)$$

La máxima energía que podríamos extraerle a un viento de velocidad v con un rotor ideal se obtiene multiplicando la potencia máxima por unidad de superficie barrida por el tiempo t [h] durante el cual este viento ha soplado:

$$E_{max} = P_{max} \cdot t = 0.37 v^3 \cdot t \quad [\text{Watts h/m}^2] \quad (50)$$

Estrictamente, la ecuación anterior sólo sería aplicable en un túnel de viento, en el que la velocidad del aire puede ser mantenida constante. En la naturaleza, la velocidad del viento varía considerablemente con el tiempo. En este caso, la energía tendría que calcularse del modo siguiente:

$$E_{max} = \frac{0.37}{T} \int_0^T v^3(t) dt \quad [\text{Watts h/m}^2] \quad (51)$$

El límite de Betz según la ecuación (47) sólo contiene la densidad del aire, la superficie del rotor y la velocidad del viento. Según la teoría de Betz, este valor sólo puede ser alcanzado con un rotor ideal. La ecuación (49) muestra que la potencia aumenta con el cuadrado del diámetro del rotor y con el cubo de la velocidad del viento. Si duplicamos el diámetro del rotor, bajo el mismo viento obtendremos cuatro veces más potencia, ¡pero si doblamos la velocidad del viento, la potencia se multiplicará por 8. Esto muestra claramente el interés en

buscar lugares con buenos vientos para reducir el diámetro del rotor y los costes de construcción del aerogenerador.

Otra pregunta interesante que podemos responder con la fórmula de Betz es la siguiente: ¿qué parte de las palas suministran qué porcentaje de la potencia total del rotor? Imaginemos un rotor ideal de diámetro $D = 2R$. Según la ecuación (48), la parte interior de las palas (cerca del buje) suministran la siguiente potencia:

$$\Delta P_w = 0.37 \cdot \Delta A \cdot v^3 \quad (52)$$

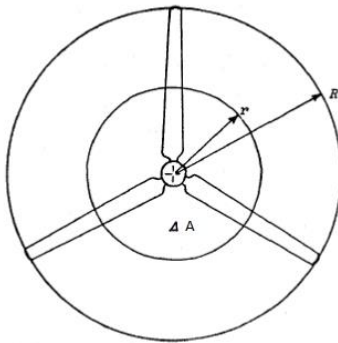


FIGURA 2. 14 Cálculo de la superficie barrida por la zona de las palas cercana al buje del rotor [20].

Según la Fig. 2.15, la superficie ΔA es: $\Delta A = \pi \cdot r^2$

La potencia desarrollada por las palas en esta zona es:

$$\Delta P_w = 0,37 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \quad (53)$$

Mientras, por definición, la potencia de todo el rotor es:

$$P_w = 0,37 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3$$

Dividiendo ambas ecuaciones, obtendremos la siguiente relación:

$$\frac{\Delta P_w}{P_w} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (54)$$

Esta ecuación está representada en la Fig. 2.16. En ella puede verse claramente que la parte exterior de las palas aporta la mayor parte de la potencia del rotor. Por ejemplo, la mitad interior de las palas ($r/R = 0,5$) sólo aporta un 25%.

Consecuencia importante: es importante que la mitad exterior de las palas sea diseñada del modo más óptimo posible.

La potencia de un rotor eólico puede ser aumentada considerablemente incrementado ligeramente la longitud de las palas. Por ejemplo, si prolongamos las palas en un 20%, según la ecuación (11) la nueva potencia del rotor será de: [20]

$$P'_w = 0,29 \cdot (1,2 \cdot D)^2 \cdot v^3 = 1,44 \cdot P_w \quad (55)$$

Es decir, bajo un mismo viento obtendremos un 44% más de potencia.

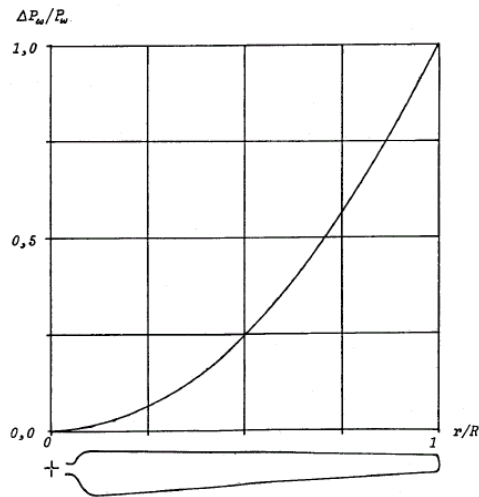


FIGURA 2. 15 La aportación de la zona de las palas entre el eje y el radio r a la potencia total del rotor. [20]

2.3. Rotor Eólico Real

2.3.1 Rendimiento

Como toda máquina, un rotor eólico tiene pérdidas. Distinguimos entre pérdidas mecánicas, eléctricas y aerodinámicas.

Pérdidas mecánicas: Los cojinetes del eje de transmisión y del generador eléctrico, los engranajes o las correas de transmisión etc. tienen pérdidas mecánicas (fricción).

Pérdidas eléctricas: El generador eléctrico o alternador, los cables y la(s) batería(s) y otros aparatos eléctricos asociados al aerogenerador tienen un determinado porcentaje de pérdidas. [20]

Pérdidas aerodinámicas:

1. Las palas de un rotor eólico no son ideales: tienen una resistencia aerodinámica, es decir, siempre habrá una fuerza opuesta al sentido de giro del rotor.

2. Pérdidas provocadas por la ralentización no ideal del aire a la altura del rotor: cualquier divergencia de las condiciones aerodinámicas, de la forma y posición óptimas de las palas provocará una ralentización no ideal ($a \neq 2/3$), y, según la ecuación (46), una reducción de la potencia del rotor.
3. Pérdidas causadas por las turbulencias: detrás de los cantos de fuga de las palas se generan torbellinos, muy especialmente en las puntas, que giran a gran velocidad. La energía que generan estas turbulencias reduce la potencia del rotor. Además, detrás del rotor en movimiento, el aire en realidad no circula de forma laminar, sino en forma de “sacacorchos” alrededor del eje de rotación, pero - debido al principio acción-reacción - en sentido opuesto (Fig. 2.17). Esta rotación de la masa de aire representa una pérdida adicional de energía cinética del aire entrante, cuya magnitud aumenta con el par de giro desarrollado por el rotor.

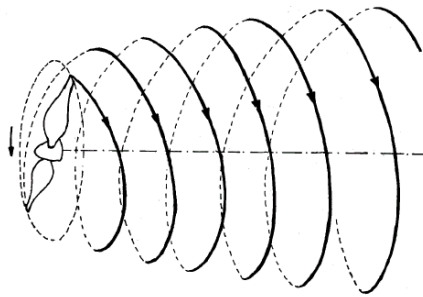


FIGURA 2. 16 Turbulencia de la masa de aire detrás del rotor eólico (representación esquemática) [20].

Todas estas pérdidas hacen que el límite de Betz no sea alcanzado. El rendimiento de un rotor eólico se puede definir de la siguiente manera:

$$\eta_w = \frac{P_w}{P_{wmax}} \quad (56)$$

Donde P_w es la potencia útil disponible en el eje del rotor. En el campo de la energía eólica, en lugar del rendimiento arriba definido, es más usual utilizar el coeficiente de potencia del rotor, que se define con respecto a la potencia del viento sin perturbación:

$$C_{pw} = \frac{P_w}{P_0} \quad (57)$$

Introduciendo la ecuación (47) en (56), obtendremos la siguiente relación entre el coeficiente de potencia y el arriba definido rendimiento del rotor:

$$\eta_w = \frac{C_{pw}}{C_{pw \max}} = 1.6875 \cdot C_{pw} \quad (58)$$

ó

$$C_{pw} = 0.5926 \cdot \eta_w \quad (59)$$

Según se prefiera utilizar el concepto de coeficiente de potencia o el de rendimiento neto según, la potencia útil de un aerogenerador puede calcularse con cualquiera de las fórmulas siguientes:

$$P_w = 0.37 \cdot \eta_w \cdot A \cdot v^3 [W] \quad (60)$$

ó

$$P_w = 0.62 \cdot C_{pw} \cdot A \cdot v^3 [W] \quad (61)$$

2.4 Velocidad Específica del Rotor Eólico (TSR)

Para la descripción del funcionamiento y el cálculo de la forma y posición óptimas de las palas del rotor, la introducción de una relación denominada velocidad específica λ_o ha demostrado ser de gran utilidad [20]. Esta se define

$$\lambda_o = \frac{u_o}{v} \quad (62)$$

donde u_o es la velocidad de las puntas de las palas y v la velocidad del viento delante del rotor (Fig. 2.18).

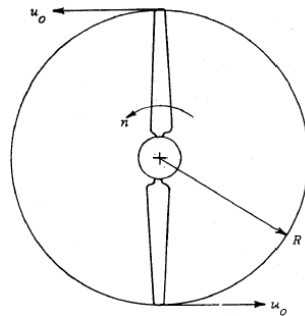


FIGURA 2. 17 Velocidad de las puntas de las palas. [20]

Las palas de un rotor sólo trabajan óptimamente, es decir, desarrollan su máxima potencia bajo una determinada velocidad específica λ_0 para la que fueron diseñadas. Cualquier desviación de este valor tendrá como consecuencia una disminución del rendimiento del rotor. Uno de los motivos es que el aire a la altura de las palas sólo adquiere el factor de ralentización óptimo de Betz ($a = 2/3$) bajo dicha velocidad específica nominal o de diseño λ_d . La ecuación (60) sigue siendo válida, pero η_w ya no puede ser considerada una constante, sino que dependerá de la velocidad específica momentánea del rotor λ_0 , por lo que la potencia del mismo también será una función de la velocidad específica momentánea: [21]

$$P_w(\lambda_0) = 0,37 \cdot \eta(\lambda_0) \cdot A \cdot v^3 [W] \quad (63)$$

En la práctica, existen rotores con $0,9 < \lambda_d < 15$, en casos excepcionales hasta 20. La velocidad específica nominal λ_d permite catalogar los rotores de la siguiente manera: aquellos con λ_d hasta aprox. 3 se llaman “lentos” y los de $\lambda_d > 4$ “rápidos”. Una característica óptica es la distancia entre las palas, que aumenta con la velocidad específica nominal (Fig. 2.19). Los típicos rotores lentos, como las llamadas turbinas americanas, que tanto se utilizaron en la agricultura del siglo XIX y principios del siglo XX para bombear agua, tienen muchas palas (es decir, pequeñas distancias entre las mismas). [21] Los rotores modernos de alta tecnología con $\lambda_d = 15$ o más pueden llegar a tener una sola pala con un contrapeso.

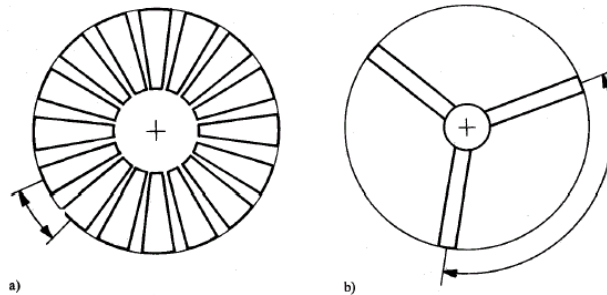


FIGURA 2. 18 a) Rotor “lento”: pequeña distancia entre las palas; b) rotor “rápido”: gran distancia entre las palas [21]

La velocidad específica puede ser calculada a partir de la velocidad de rotación del rotor. Según las leyes de la mecánica, la velocidad de un punto que gira alrededor de un eje es:

$$u_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{60} \cdot n [m/s] \quad (64)$$

Siendo n la velocidad de giro del rotor [r.p.m.] y R el radio [m].

Introduciendo esta relación en la ecuación (62), con $R = D/2$ obtendremos:

$$\lambda_0 = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60v} \quad (65)$$

Conociendo la velocidad del viento, la velocidad de giro y el diámetro del rotor, con la ecuación (65) podemos calcular la respectiva velocidad específica momentánea λ_0 .

2.4.1 Velocidad de giro del rotor

La velocidad de giro en [r.p.m.] se puede calcular con la ecuación:

$$n = \frac{60 \cdot \lambda_0 \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (66)$$

La velocidad de giro óptima, bajo la cual el rotor genera su potencia máxima, es:

$$n_{opt} = \frac{60 \cdot \lambda_d \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (67)$$

Es decir, para cada velocidad del viento v existe una velocidad de giro óptima del rotor, bajo la cual éste generará su máxima potencia bajo dicho viento. [19]

2.4.2 Par de giro del rotor

Según las leyes de la mecánica, un rotor que genera una potencia P_w [W] a la velocidad de giro n [r.p.m.] desarrolla el siguiente par de giro M_w :

$$M_w = \frac{60 \cdot P_w}{2 \cdot \pi \cdot n} [Nm] \quad (68)$$

Introduciendo en esta fórmula las ecuaciones (68) y (66), para $D = 2R$ se obtiene:

$$M_w = \frac{C_{pw}}{\lambda_0} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot RA \cdot v^2 [Nm] \quad (69)$$

ó, expresado de otro modo

$$M_w = C_m \cdot \frac{\rho}{2} \cdot RA \cdot v^2 [Nm] \quad (70)$$

Denominemos el factor

$$C_m = \frac{C_{pw}}{\lambda_0} \quad (71)$$

Coefficiente de par del rotor eólico. Este valor puede determinarse punto por punto a partir de la característica c_{pw}, λ_o . [20].

Para ello, se divide cada valor c_{pw} por su respectivo valor λ_o y a continuación se representa c_m en función de λ_o .

Especialmente interesante es el par de arranque M_o del rotor, es decir, el par de giro que las palas desarrollan cuando el rotor está parado ($\lambda_o = 0$):

$$M_o = C_{m0} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot RA \cdot v^2 [Nm] \quad (72)$$

Sin embargo, el correspondiente coeficiente de par C_{m0} no puede ser calculado analíticamente, ya que para $\lambda_o = 0$ (rotor parado) $C_{pw} = 0$ y la relación $C_{m0} = 0/0$ no tiene solución matemática. Ecuación (71).

Como es lógico, a partir de una velocidad del viento energéticamente interesante, el par de arranque del rotor M_o deberá ser mayor que el par de arranque requerido por el conjunto engranaje-máquina de trabajo acoplado al mismo. Lysen ofrece la siguiente fórmula empírica para calcular el coeficiente de par de arranque del rotor [20]

$$C_{m0} \approx \frac{0,5}{\lambda_d^2} \quad (73)$$

Siendo λ_d la velocidad específica nominal o de diseño del rotor.

2.4.3 Características de potencia y par de giro del rotor

La característica potencia versus velocidad de giro:

Ya se ha mencionado que el coeficiente de potencia del rotor varía con la velocidad específica del mismo, es decir,

$$C_{pw} = C_{pw}(\lambda_o)$$

Por el otro lado, según la ecuación (65), la velocidad específica es una función de la velocidad de giro del rotor y de la velocidad del viento:

$$\lambda_o = \lambda_o(n, v)$$

Por lo tanto, para el coeficiente de potencia podemos escribir:

$$C_{pw} = C_{pw}(n, v)$$

y, según la ecuación : $C_{Pw} = \frac{Pw}{P_o}$ para la potencia:

$$P_w = C_{pw}(n, v) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 = P_w(n, v) \text{ [Watts]}$$

es decir, la potencia desarrollada por un determinado rotor de superficie A [m²] es una función de su velocidad de giro y de la velocidad del viento.

La función $P_w(n, v)$ representa el conjunto de características de potencia del rotor.

Si en esta ecuación introducimos $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ (densidad del aire), obtendremos:

$$P_w(n, v) = 0,625 \cdot C_{pw}(n, v) \cdot A \cdot v^3 \text{ [Watts]} \quad (74)$$

ó, si se prefiere trabajar con el concepto de rendimiento:

$$P_w(n, v) = 0,37 \cdot n_w(n, v) \cdot A \cdot v^3 \text{ [Watts]} \quad (75)$$

2.4.4 La característica par de giro versus velocidad de giro:

Teniendo en cuenta que el coeficiente de potencia C_{pw} depende de la velocidad específica λ_o , debido a la ecuación (71) el coeficiente de par c_m también dependerá de ésta, es decir:

$$C_m(n, v) = \frac{C_{pw}(n, v)}{\lambda_o(n, v)}$$

Según la ecuación (70), para el par de giro podemos escribir:

$$M_w(n, v) = C_m(n, v) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot RA \cdot v^2 \text{ [Nm]}$$

La función $M_w(n, v)$ representa el conjunto de características de par de giro del rotor.

Para $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ obtendremos:

$$M(n, v) = 0,625 \cdot C_m(n, v) \cdot RA \cdot v^2 \text{ [Nm]} \quad (76)$$

El par de giro de arranque ($n = 0$) es

$$M_0(v) = 0,625 \cdot C_{m0} \cdot RA \cdot v^2 \text{ [Nm]} \quad (77)$$

y puede ser calculado introduciendo para C_{m0} el valor empírico expresado por la ecuación (73). En el campo de la energía eólica es habitual representar P_w y M_w en función de la velocidad de giro, con la velocidad del viento como parámetro. [21]

2.5 Teoría de Pala

2.5.1 Nociones Generales

Una pala no es otra cosa que una construcción mecánica (o biológica), sobre la cual actúan fuerzas cuando está sometida a una corriente de aire. Una hoja de papel, que de repente “despega” de nuestro escritorio, en este instante se comporta como un ala, aunque rudimentaria. Las fuerzas que la levantan y la hacen volar por los aires son fuerzas aerodinámicas [19].

Dándole al ala una forma especial (perfil) y colocándola en una posición apropiada con respecto a la corriente de aire, estas fuerzas aerodinámicas pueden ser influenciadas y aprovechadas para volar o generar energía.

En la actualidad, el avión es una de las aplicaciones más extendidas del ala. Los motores impulsan el avión hacia delante, creando un movimiento relativo con respecto a la masa de aire. Al “cortar” el aire, en las alas se crea una fuerza que las “empuja” hacia arriba (fuerza de sustentación). Si esta fuerza es superior al peso del avión, éste “vuela”.

2.5.2 Fuerzas aerodinámicas de la pala

Veamos el ala de un avión, cuya forma (perfil) a todos nos es más o menos familiar (Fig. 2.20). Supongamos que el avión avanza a una velocidad v con respecto a la masa de aire quieta, o, lo que es lo mismo, imaginemos que el ala está quieta y el aire la “ataca” a la velocidad v .

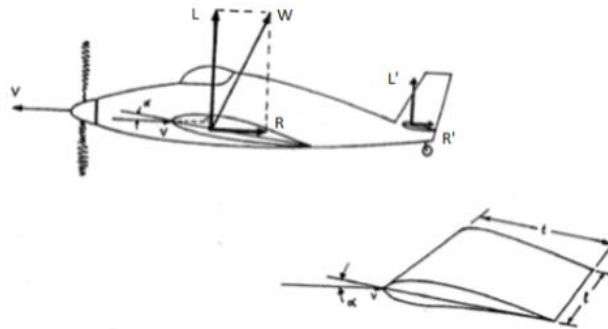


FIGURA 2. 19 Las fuerzas aerodinámicas en un ala de avión [19]

Definiciones

\overline{AB} : Cuerda del perfil (anchura del ala): línea imaginaria que une entre sí los puntos del perfil más alejados

α : ángulo de ataque: ángulo que forma la cuerda del perfil con la dirección (horizontal) del aire

t : longitud (cuerda) del perfil = anchura del ala

El canto anterior del perfil se llama borde de ataque, el canto posterior borde de fuga. La parte inferior del perfil se llama intradós y la parte superior extradós. En un punto del perfil llamado centro dinámico –de momento no definido- se crea una fuerza W , que se puede descomponer en una componente vertical L (sustentación) y en una componente horizontal R (resistencia) (Fig. 2.21). La fuerza L “empuja” el avión hacia arriba, es decir, lo sustenta en el aire, mientras la fuerza R “tira” hacia atrás, es decir, actúa en sentido opuesto al de avance del avión, cuyos motores tendrán que cubrir esta pérdida con más consumo de combustible.

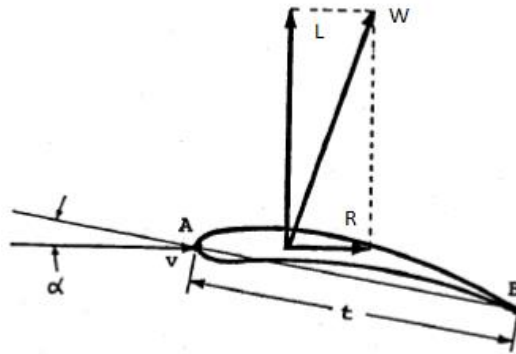


FIGURA 2. 20 Descomposición de la fuerza aerodinámica que actúa sobre el ala en las componentes de sustentación y de resistencia [19].

En la mayoría de las aplicaciones nos interesaremos sobre todo por la fuerza útil L e intentaremos minimizar la resistencia R . No obstante, hay fuerzas eólicas que aprovechan la resistencia, pero su rendimiento es considerablemente inferior a las que utilizan la sustentación como fuerza motriz.

El perfil de la Fig. 2.18 es asimétrico con respecto a su cuerda. Estos perfiles se sustentan incluso cuando el ángulo de ataque es igual a cero, es decir, cuando la cuerda del perfil es paralela a la corriente de aire, cosa que no ocurre con los perfiles simétricos, que por regla general también tienen una menor sustentación que los asimétricos.

2.5.3 Fuerzas de sustentación y resistencia

Como se mencionó en el apartado 2.2.2, las fuerzas aerodinámicas de sustentación y arrastre se suelen expresar con las siguientes fórmulas:

$$L = C_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2 [N] \quad (78)$$

$$R = C_R \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2 [N] \quad (79)$$

Siendo ρ la densidad del aire [kg/m^3], A la superficie del ala [m^2] y v la velocidad del aire (o del avión) [m/s]. Los factores adimensionales C_L y C_R se llaman, respectivamente, coeficiente de sustentación y coeficiente de resistencia del respectivo perfil. Estos factores dependen de la forma del perfil, del ángulo de ataque, de la relación longitud / anchura del ala (llamada alargamiento del ala) y de la estructura de la superficie de la misma (lisa o rugosa). [19] *Ibíd.*

2.6 Polares de un Perfil

Los coeficientes de sustentación y resistencia no pueden ser calculados teóricamente. Se determinan en túneles de viento con la ayuda de modelos a una velocidad constante del aire y un determinado ángulo de ataque, se miden las fuerzas L y R que actúan sobre el modelo de ala y a continuación se calculan ambos coeficientes con las ecuaciones (78) y (79). El resultado se presenta en forma de curva $C_L(C_R)$, con α como parámetro. Esta curva se denomina polar del perfil. A menudo C_L y C_R también se representan por separado en función del ángulo de ataque α . Existen manuales que contienen polares de infinidad de perfiles. Por regla general, los perfiles se designan con un nombre seguido de un número característico, por ejemplo NACA 4412, SCHMITZ 417 etc.

2.7 Acción del viento sobre un elemento de pala

Sobre el elemento de pala que gira alrededor del eje del rotor actúan dos componentes de velocidad: por un lado, la del aire ralentizado v' en dirección del viento principal y por el otro lado la velocidad u' con la que el elemento de pala corta la masa de aire. La componente u' es perpendicular al eje del rotor. Un observador imaginario sobre el elemento de pala no podrá distinguir si el elemento se mueve con respecto a la masa de aire o ésta con respecto a él. Sólo “sentirá” la suma vectorial de las velocidades v' y u' (aparte de la fuerza centrífuga) (Fig. 2.22). [22]

$$\vec{c} = \vec{v}' + \vec{u}' \quad (80)$$

Llamemos la resultante c velocidad local de ataque. Como v' y u' siempre son perpendiculares, la magnitud de esta velocidad c será:

$$c = \sqrt{v'^2 + u'^2} \quad [\text{m/s}] \quad (81)$$

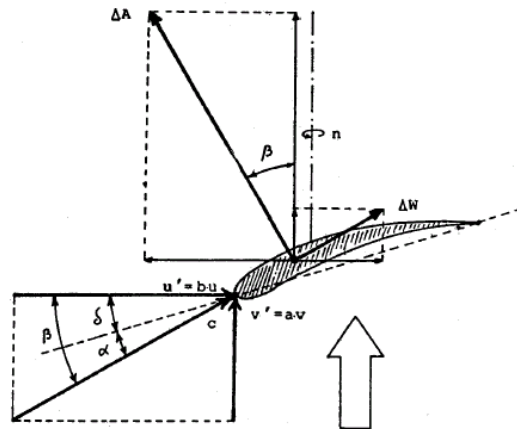


FIGURA 2. 21 Acción del aire sobre el elemento de pala (α ángulo de ataque de la pala, δ ángulo de calado de las palas = posición de las palas con respecto al plano del rotor) [22]

Debido a las turbulencias de la masa de aire que se crean a la altura del rotor, la velocidad u' será mayor que la velocidad tangencial $u(r)$ del elemento de pala, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$u' = b \cdot u(r) = b \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot r \quad (82)$$

Siendo el factor b siempre igual o mayor que 1, es decir $b \geq 1$

Nota: En las eólicas muy lentas ($\lambda_d = 1$) $b = 1,2$ y en las rápidas ($\lambda_d > 3$) $b = 1.02$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (80) y (82) obtendremos:

$$u' = b \cdot \lambda \cdot v \quad (83)$$

La velocidad v' es: $v' = a \cdot v$

Introduciendo estas expresiones en la ecuación (81), finalmente se obtiene la siguiente fórmula:

$$c = v \cdot \sqrt{b^2 \cdot \lambda^2 + a^2} \quad [\text{m/s}] \quad (84)$$

Los valores óptimos de los factores a y b pueden ser calculados mediante la denominada teoría turbillonaria [40]. Para velocidades específicas finitas, la ralentización óptima será mayor que $2/3$. Según la teoría turbillonaria. [40] Entre los factores a y b existe la siguiente relación: [22]

$$b = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4a(1-a)}{\lambda^2}} \right) \quad (85)$$

2.7.1 Coeficiente de potencia de toda la pala.

El coeficiente de potencia de toda la pala no se puede obtener por simple adición de los coeficientes de potencia de los diferentes elementos la misma, sino que deberá ser determinado del siguiente modo:

La pala se divide por ejemplo en 10 elementos de la misma longitud. Sea C_{p1} el coeficiente de potencia del elemento más alejado del eje (punta de la pala) y C_{p10} el del elemento más cercano al mismo. Si prescindimos del buje del rotor, la superficie barrida por el elemento más alejado del eje es (Fig. 2.23): [22]

$$\Delta A_1 = 0,19 \cdot \pi \cdot R^2$$

Donde Δ indica que se toma una porción de la pala y su aportación a la potencia total P de la pala

$$\Delta P_1 = 0,19 \cdot P$$

El segundo elemento aportará

$$\Delta P_2 = 0,17 \cdot P \quad \text{etc.}$$

Por lo tanto, el coeficiente de potencia de toda la pala se calculará del siguiente modo:

$$c_{pA} = 0,19c_{p1} + 0,17c_{p2} + 0,15c_{p3} + \dots + 0,01c_{p10}$$

ó

$$c_{pA} = \sum_{j=1}^{10} (0,21 - 0,02j) \cdot c_{pj} \quad (86)$$

Esta fórmula es válida para 10 elementos de pala. Obviamente, el cálculo será tanto más exacto cuantos más elementos tengamos a disposición.

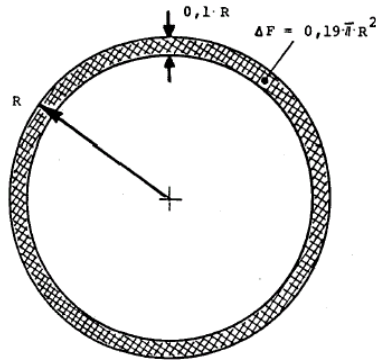


FIGURA 2. 22 Superficie barrida por el elemento de pala [19]

En la pala óptimamente diseñada podremos prescindir de esta laboriosa tarea calculando el C_{pF} correspondiente al llamado radio eficaz r_w

$$r_w = 0,72R \rightarrow \frac{r}{R} = 0,72$$

Que según [41] se aproximará notablemente al coeficiente de potencia máximo de toda la pala, que ahora podremos expresar del siguiente modo: [22]

$$\begin{aligned} c_{pA \max} &= c_p(\lambda = 0,72\lambda_d) \\ &= c'_{p \max}(\lambda = 0,72\lambda_d) \cdot \eta_A(\lambda = 0,72\lambda_d) \end{aligned} \quad (87)$$

2.8 Conclusiones del Capítulo:

La energía eólica es una fuente de fuerza motriz que se puede aprovechar para la generación de energía eléctrica limpia, indispensable para el desarrollo de las regiones que cuenten con características de vientos apropiadas para la instalación de aerogeneradores; este tipo de máquina puede ser de sustentación o de arrastre, siendo los más usados en la actualidad los primeros. La tipología de aerogeneradores más popular son los de eje vertical (VAWT) y los de eje horizontal (HAWT), cada uno cuenta con características propias las cuales permiten usarlos en diferentes regiones con características de vientos particulares. Los componentes

principales de los aerogeneradores son: las palas, rotor, transmisión, generador, sistema de control y sistema de frenado.

Los aerogeneradores de sustentación funcionan con la fuerza de sustentación que es perpendicular a la superficie de la pala, esto para palas construidas con características aerodinámicas.

El límite de Best, permite calcular la potencia máxima que las palas pueden obtener del aire y con esto obtener la eficiencia de las mismas. Los parámetros de diseño de las palas reales, toman en cuenta la turbulencia del aire, la velocidad específica del rotor (TSR) el coeficiente de sustentación (C_L), el coeficiente de arrastre (C_D), el coeficiente de potencia (C_P) y el rendimiento de la máquina (η), estos parámetros se pueden obtener ensayando la pala diseñada en un túnel de viento, en esta tesis se presenta otro método para obtener los parámetros de diseño de las palas el cual se lleva a cabo de manera experimental por medio de software de simulación, la ventaja de este método es que no se requiere tener construida la pala para obtener los parámetros antes mencionados.

Capítulo 2

Fundamentos del comportamiento de los Fluidos

3.1 Introducción

En este capítulo se aborda la parte teórica de la investigación, en la que se inicia con las características principales de los fluidos, la ecuación de continuidad permite entender el comportamiento del flujo de masa que circula a través de un conducto, las ecuaciones de presión y de fuerza en su forma general se indican en esta misma sección, la cual concluye con la ecuación del flujo volumétrico conocido comúnmente como caudal. Posteriormente se toca uno de los postulados fundamentales de la dinámica de fluidos derivado del teorema de trabajo y energía cinética, que se aplica en la ecuación de Bernoulli, aquí se explica cómo se obtiene la ecuación general para este postulado para posteriormente definir lo que es el número de Reynolds que es fundamental para conocer el comportamiento del fluido, es decir, si éste es laminar o turbulento así como para definir la viscosidad del mismo. Se prosigue con la teoría para calcular la fuerza que ejercen los fluidos en movimiento y se incluyen algunos ejemplos de aplicación. Después, se definen dos conceptos básicos para la optimización de los álabes de aerogeneradores que son el arrastre y la sustentación y se explican sus ecuaciones fundamentales. La teoría de la capa límite es sumamente importante para la simplificación de las ecuaciones de Navier- Stokes así que se presenta una explicación de dicha teoría y, finalmente, se aborda la teoría de la fuerza que el fluido provoca a objetos en movimiento así como se incluyen ejemplos ilustrativos de dicha teoría aplicados a objetos que constantemente están en movimiento que es el objeto de estudio de esta tesis.

3.2. Características de los fluidos:

- ✓ **Fluidos estacionarios:** estos se caracterizan porque las variables que los describen como son la presión, densidad y velocidad son constantes, un ejemplo son flujos cuya velocidad es pequeña.
- ✓ **Fluidos no estacionarios:** Como es el caso de flujos turbulentos en los cuales sus velocidades varían aleatoriamente de punto a punto así como de tiempo a tiempo, un ejemplo es el aire.
- ✓ **Flujos incompresibles:** si la densidad ρ de un fluido es constante independientemente de su posición en el espacio o el tiempo, se dice que es un flujo incompresible.
- ✓ **Flujos compresibles**
- ✓ **Flujos viscosos y no viscosos**
- ✓ **Fluidos rotacionales e irrotacionales. [23]**

3.2.1. Ecuación de continuidad:

La ecuación de continuidad sugiere que el flujo de masa que pasa por un punto es igual al flujo de masa que pasa por otro punto, en donde el flujo de masa se define como la masa de un fluido por unidad de tiempo, es decir, [23]

$$M = \rho AVt \quad (3.1)$$

Donde:

ρ Es la densidad del fluido [Kg/m³]

A Es el área de sección transversal por donde pasa el fluido [m]

V Es la velocidad del fluido [m/s]

t Es un intervalo de tiempo [seg]

Si para el análisis se toma un elemento de fluido infinitesimal, tenemos que:

$$\Delta M = \rho AV \Delta t \quad (3.2)$$

La presión se define mediante la ecuación como: $P = F/A$

Donde F es la fuerza y A es el área sobre la cual se aplica la fuerza.

La segunda ley de Newton se utiliza con frecuencia para el concepto de fuerza de manera matemática la cual se expresa de la siguiente manera:

$$F = Ma \quad (3.3)$$

“se requiere de una fuerza externa para provocar un cambio”.

Para Flujo de Fluidos, la ecuación de Newton se escribe:

$$F = Ma = M \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad [Kg \frac{m}{s^2}] = N \quad (3.4)$$

El término $\frac{M}{\Delta t}$ se puede interpretar como la velocidad del flujo de masa, esto es,

$$M = \frac{m}{\Delta t}$$

La velocidad de flujo de volumen Q está relacionada con M de la siguiente manera:

$$M = \rho Q = \frac{Kg \ m^3}{m^3 \ s} = \frac{Kg}{s} \quad (3.5)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, entonces la fuerza se puede expresar por medio de la siguiente ecuación: [24]

$$F = \left(\frac{m}{\Delta t}\right) \Delta v = M \Delta v = \rho Q \Delta v \quad [4] \quad (3.6)$$

Ecuación (3.6), forma general de la ecuación de la fuerza

Donde

$$Q = \rho Av$$

A es el área de sección transversal [m^2]

v es la velocidad promedio del flujo. [$\frac{m}{s}$]

ρ es la densidad del fluido [$\frac{Kg}{m^3}$]

La fuerza expresada en la ecuación 3.6 se puede descomponer en sus componentes vectoriales de la siguiente manera: [18]

$$F_x = \rho Q \Delta v_x = \rho Q (v_{2x} - v_{1x})$$

$$F_y = \rho Q \Delta v_y = \rho Q (v_{2y} - v_{1y})$$

$$F_z = \rho Q \Delta v_z = \rho Q (v_{2z} - v_{1z})$$

La figura 3.1 muestra un tubo de flujo que tiene un área A1 de sección transversal en el punto O y un área A2 en el punto P.

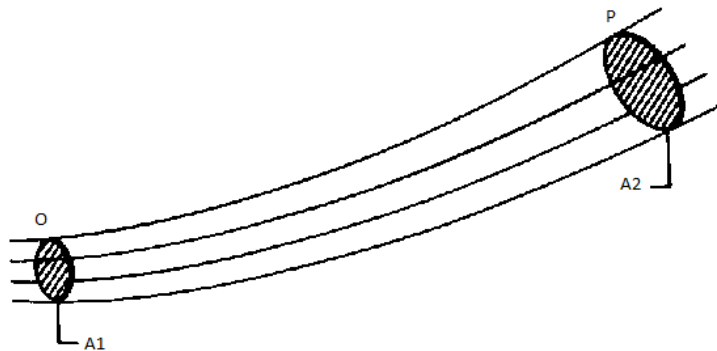


FIGURA 3. 1 Tubo de Flujo de masa [17]

El flujo de masa que entra en el punto O es $\rho_1 A_1 v_1$, mientras que el flujo que sale en el punto P es $\rho_2 A_2 v_2$.

Si se supone que el flujo es estacionario y que el flujo no se desvía por ningún lado, se tiene que el flujo de masa en O debe ser igual al flujo de masa en P.

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (3.7)$$

Nota: “La masa contenida en cualquier volumen debe ser constante.”

La ley de la conservación de la masa en dinámica de fluidos establece que:

$$\rho A v = \text{constante}$$

Si además el flujo es incompresible, entonces $\rho_1 = \rho_2$, por lo que la ecuación 3.2 queda: [18]

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Si se define a Q como flujo de volumétrico A v, entonces: $Q = A * v$ [m³/s]

3.2.2 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es un postulado de la conservación de la energía mecánica en un sistema, derivada del teorema de trabajo-energía cinética para un flujo de fluido. En la figura 3.2 se considera un flujo estacionario, incompresible, no viscoso y no rotatorio a lo largo de toda la tubería o flujo, el cual permite establecer ciertos parámetros que ayudan a desarrollar las ecuaciones de Bernoulli.

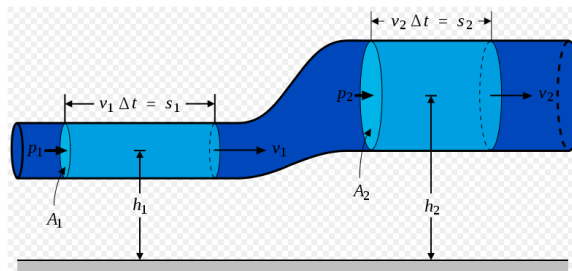


FIGURA3. 2 Movimiento de un flujo de una altura a otra [23]

1. El trabajo efectuado sobre el sistema por la fuerza de presión ($P_1 A_1$) es $P_1 A_1 \Delta s_1$
2. El trabajo efectuado sobre el sistema por la fuerza de presión ($P_2 A_2$) es $- P_2 A_2 \Delta s_2$, el signo negativo es porque la fuerza actúa en dirección opuesta al desplazamiento horizontal.

3. El trabajo efectuado sobre el sistema por la gravedad debido a la elevación desde h_1 a h_2 es: $-\Delta mg (h_2 - h_1)$ El trabajo neto W efectuado sobre el sistema por todas las fuerzas se halla sumando los tres términos anteriores. [25]

$$W = P_1 A_1 \Delta l_1 + P_2 A_2 \Delta l_2 - \Delta mg (h_2 - h_1) \quad (3.8)$$

$A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$ Es el volumen ΔV del elemento de fluido en la parte sombreada el cual puede escribirse como: $\Delta m / \rho$ en donde ρ es la densidad constante del fluido, así que,

$$W = (P_1 - P_2) \left(\frac{\Delta m}{\rho} \right) - \Delta mg (h_2 - h_1) \quad (3.9)$$

El cambio de energía cinética del elemento de fluido es:

$$\Delta K = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 \quad (3.10)$$

El teorema de trabajo – energía dice que: $W = \Delta K$ Entonces:

$$(P_1 - P_2) \left(\frac{\Delta m}{\rho} \right) - \Delta mg (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2$$

Por lo que la ecuación de Bernoulli queda de la siguiente manera:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad [23]$$

Para un flujo estacionario, incompresible, no viscoso y no rotatorio, la ecuación de Bernoulli queda:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{constante} \quad (3.11)$$

Si las alturas son iguales, es decir, $y_1 = y_2$ entonces: [23]

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$(P_2 - P_1) = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (3.12)$$

3.3 Número de Reynolds

Cuando un líquido fluye en un tubo y su velocidad es baja, fluye en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo; a este régimen se le conoce como “flujo laminar”. Conforme aumenta la

velocidad y se alcanza la llamada “velocidad crítica”, el flujo se dispersa hasta que adquiere un movimiento de torbellino en el que se forman corrientes cruzadas y remolinos; a este régimen se le conoce como flujo turbulento. Esto se muestra en la Figura 3.3. El paso de régimen laminar a turbulento no es inmediato, sino que existe un comportamiento intermedio indefinido que se conoce como “régimen de transición”.

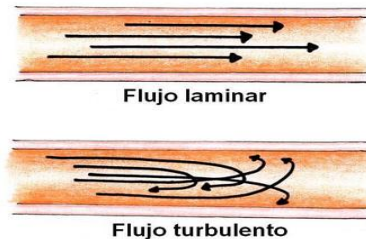


FIGURA3. 3 Flujo laminar y flujo turbulento [16]

Si se inyecta una corriente muy fina de algún líquido colorido en una tubería transparente que contiene otro líquido incoloro, se pueden observar los diversos comportamientos del líquido conforme varía la velocidad esto se muestra en la Figura 5. Cuando el líquido se encuentra dentro del régimen laminar (velocidades bajas), el colorante aparece como una línea perfectamente definida (Figura 3.4), cuando se encuentra dentro de la zona de transición (velocidades medias), el colorante se va dispersando a lo largo de la tubería (Figura 3.5) y cuando se encuentra en el régimen turbulento (velocidades altas) el colorante se difunde a través de toda la corriente (Figura 3.6). [16]

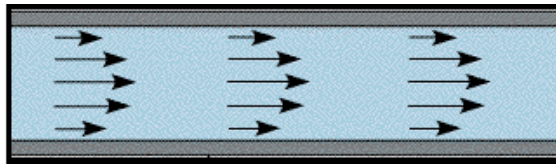


FIGURA 3. 4 Flujo Laminar [16]

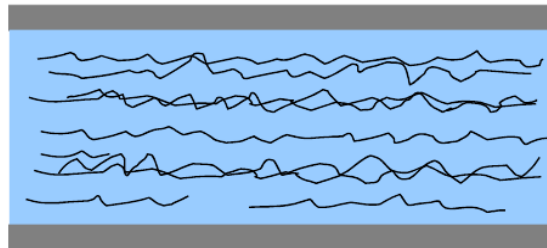


FIGURA 3. 5 Transición de flujo laminar a turbulento [16]

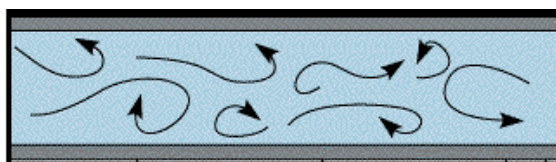


FIGURA 3. 6 Flujo Turbulento [16]

Los diferentes regímenes de flujo y la asignación de valores numéricos de cada uno fueron reportados por primera vez por Osborne Reynolds en 1883. Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluye dentro de una tubería depende de la velocidad del líquido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del fluido. Así, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye y está dado por: [26]

$$R_e = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (3.13)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds [Adimensional]

D = Diámetro del ducto [m]

v = Velocidad promedio del líquido [m/s]

ρ = Densidad del líquido [Kg/m³]

μ = Viscosidad del líquido [$\frac{N \cdot s}{m^2}$]

Cuando el ducto es una tubería, D es el diámetro interno de la tubería. Cuando no se trata de un ducto circular, se emplea el diámetro equivalente (D_e) definido como:

$$D_e = 4 \times \frac{\text{Área Transversal de Flujo}}{\text{Perímetro Mojado}}$$

Generalmente cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2100 se sabe que el flujo es laminar, el intervalo entre 2100 y 4000 se considera como flujo de transición y para valores mayores de 4000 se considera como flujo turbulento. [16]

3.4 Fuerzas Desarrolladas por Fluidos en Movimiento

3.4.1 Principio de impulso- Cantidad de movimiento:

Impulso = variación de la cantidad de movimiento

$$(\sum F).t = M(\Delta V) \quad (3.14)$$

En la dirección x:

Cantidad de movimiento inicial \pm impulso = cantidad de movimiento final

$$MV_{x_1} \pm \sum F_x * t = MV_{x_2} \quad [24] \quad (3.15)$$

En la dirección y:

$$MV_{y_1} \pm \sum F_y * t = MV_{y_2} \quad [24] \quad (3.15.1)$$

Donde:

M = masa cuya cantidad de movimiento varía con el tiempo, entonces:

$$\sum F_x = \rho Q (V_2 - V_1)x \quad (3.15.2)$$

$$\sum F_y = \rho Q (V_2 - V_1)y \quad (3.15.3)$$

$$\sum F_z = \rho Q (V_2 - V_1)z \quad (3.15.4)$$

3.5 Fuerzas Sobre Objetos en Movimiento

Se define una velocidad efectiva que es la diferencia entre la velocidad del fluido y la velocidad a la que se mueve el objeto. [27]

$$v_e = v_1 - v_0 \quad (3.16)$$

Y una velocidad de flujo volumétrica

$$Q_e = A_1 v_e$$

Nota: Es solo la diferencia entre la velocidad del chorro y la velocidad de la paleta lo que efectivamente cuenta en la generación de una fuerza sobre la paleta.

Para una paleta curvada:

La figura 3.7. Muestra un chorro de agua a una velocidad v_1 que está impactando a una paleta que se mueve con una velocidad v_0 para determinar las fuerzas ejercidas por la paleta sobre el agua se tiene:

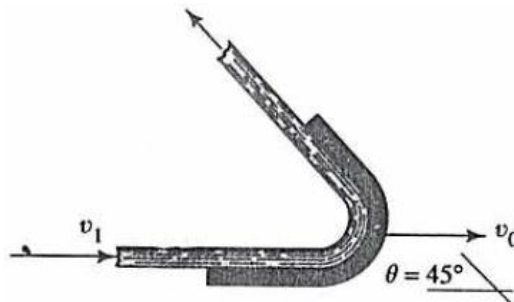


FIGURA 3. 7 Paleta en movimiento [28]

$$R_x = \rho Q_e v_e \cos\theta - (-\rho Q_e v_e) = \rho Q_e v_e (1 - \cos\theta)$$

$$R_y = \rho Q_e v_e \sin\theta - 0 = \rho Q_e v_e \sin\theta$$

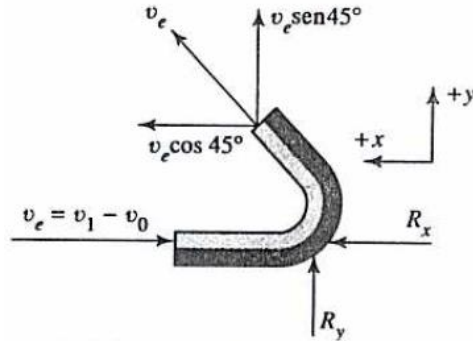


FIGURA 3. 7.1 Paleta Curvada Equivalente [28]

3.5.1 Ecuación general Propuesta

Una ecuación general que permite calcular la fuerza que el fluido ejerce sobre superficies tanto fijas como en movimiento y que se ha probado que es efectiva para solucionar problemas relacionados con la fuerza que el fluido ejerce sobre superficies que presenten cualquier forma ya sea plana o curva y que además es la siguiente:

$$F = \rho A |v_F - v_a| [(v_F - v_s) - v_a]$$

En la cual

v_F Es la velocidad del fluido en movimiento. [m/s]

v_a Es la velocidad en la que se mueve la superficie (alabe). [m/s]

v_s Es la velocidad de salida del fluido. [m/s]

ρ Es la densidad del fluido. [Kg/m³]

A

Es el área de sección transversal de la superficie a estudiar. [m]

Así por ejemplo, si el álabe está fijo, $v_a = 0$ por lo que la ecuación quedará de la siguiente manera:

$$F = \rho A |v_F| [(v_F - v_s)]$$

3.6 Capa Límite

Prandtl en Agosto de 1904 estableció el concepto de capa límite como una zona del fluido en movimiento, adyacente a la superficie sólida en la cual se manifiestan los efectos del esfuerzo cortante, el valor máximo de este se localiza en contacto con la superficie sólida. Prandtl estableció que el flujo alrededor de un cuerpo se puede dividir en dos regiones: [29]

1. Una pequeña capa límite se forma sobre las paredes del sólido como resultado de la fricción viscosa. En esta capa la velocidad varía del valor de la corriente libre hasta cero sobre la pared donde el fluido se adhiere a la frontera. La viscosidad del fluido, aunque es extremadamente pequeña, no puede despreciarse a comparación con el espesor δ de la capa límite.
2. En la región fuera de la capa límite, la viscosidad puede despreciarse y el flujo puede tratarse como no viscoso.

De acuerdo con la hipótesis de Prandtl, los efectos de la fricción del fluido a altos números de Reynolds están limitados únicamente a la capa límite. Esto significa que la presión en la capa límite es la misma que la presión en el flujo no viscoso fuera de la capa límite. La principal importancia de la teoría de Prandtl radica en la simplificación que permite el tratamiento analítico de los flujos viscosos. La presión, por ejemplo, puede obtenerse de experimentos o de la teoría de los flujos no viscosos. [29] De aquí que las únicas incógnitas sean las componentes de velocidad. La figura 3.8 muestra la capa límite sobre una placa plana. El espesor de la capa límite, δ se considera como la dimensión arbitraria desde la superficie donde la velocidad alcanza un 99% de la velocidad del flujo libre.

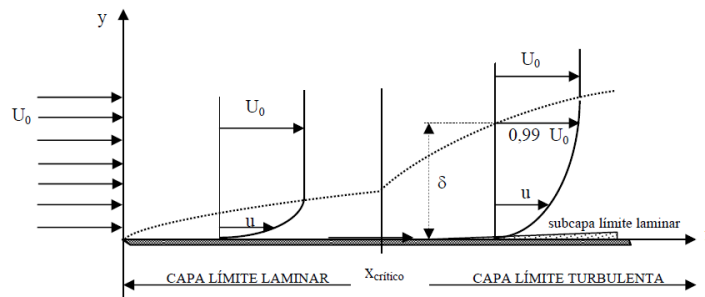


FIGURA3. 8 Capa Límite sobre una placa plana [29]

La figura 3.8 ilustra como el espesor de la capa límite se incrementa con la distancia x desde le borde de ataque. A valores relativamente pequeños de x , el flujo dentro de la capa límite es laminar, lo cual es considerado la región laminar de la capa límite. Finalmente, para ciertos valores de x , la capa límite siempre es turbulenta. En la región en la que la capa límite es turbulenta, existe una muy pequeña capa de fluido llamada *subcapa laminar*, donde el flujo aún es laminar y existen grandes gradientes de velocidad. [30]

El criterio para saber qué tipo de capa límite está presente es el número de Reynolds, basado en la distancia x desde le borde de ataque. Para el flujo sobre una placa plana, datos experimentales muestran que:

- | | |
|--|---|
| a) $R_e < 2 \times 10^5$ | La capa límite es laminar |
| b) $2 \times 10^5 < R_e < 3 \times 10^6$ | La capa limite puede ser laminar o turbulenta |
| c) $3 \times 10^3 < R_e$ | La capa límite es turbulenta |

3.6.1 Ecuación de la Capa Límite

El concepto de una delgada capa límite a altos números de Reynolds conduce a importantes simplificaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes [31]. Para un flujo incompresible, bidimensional sobre una placa plana, las ecuaciones de Navier-Stokes son:

$$\rho \left\{ \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right\} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (3.17)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right\} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \quad (3.18)$$

Donde:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right);$$

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \quad (3.19)$$

$$\sigma_{yy} = -p + 2\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (3.20)$$

El esfuerzo en una capa límite delgada se aproxima de la forma $\mu \frac{\partial v_x}{\partial y}$

Esto puede verse al considerar las magnitudes relativas de $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ y $\frac{\partial v_y}{\partial x}$

De la figura se puede escribir $\frac{v_x|\delta}{v_y|\delta} \approx \Theta \left(\frac{x}{\delta} \right)$ donde Θ significa orden de magnitud.

Entonces:

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} \approx \Theta \left(\frac{v_x \delta}{\delta} \right) \frac{\partial v_y}{\partial x} \approx \Theta \left(\frac{v_y \delta}{x} \right) \quad (3.21)$$

De tal manera que:

$$\frac{\frac{\partial v_x}{\partial y}}{\frac{\partial v_y}{\partial x}} \approx \Theta \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \quad (3.22)$$

Lo cual, para una capa límite relativamente delgada, es un número muy grande, y por lo tanto $\frac{\partial v_x}{\partial y} \gg \frac{\partial v_y}{\partial x}$ El esfuerzo normal a grandes números de Reynolds es aproximadamente cercano al negativo de la presión como:

$$\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \approx \Theta \left(\frac{\mu v_\infty}{x} \right) = \Theta \left(\frac{\rho v_\infty^2}{Re_x} \right)$$

Por lo que $\sigma_{xx} \approx \sigma_{yy} \approx -p$ Cuando se incorporan estas simplificaciones en los esfuerzos, las ecuaciones del flujo sobre una placa plana se convierten en

$$\rho \left\{ \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right\} = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (3.23)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \quad (3.24)$$

Los términos en la segunda ecuación son mucho más pequeños que los de la primera ecuación, y por lo tanto $\frac{\partial p}{\partial y} \approx 0$ mientras que $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx}$ lo cual de acuerdo a la ecuación de Bernoulli es igual a $-\rho v_\infty \frac{dv_\infty}{dx}$

Las ecuaciones 23 se convierten en

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = v_\infty \frac{dv_\infty}{dx} + \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad [29] \quad (3.25)$$

La ecuación anterior y la ecuación de continuidad

$$\boxed{\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0} \quad [29] \quad (3.26)$$

Son conocidas como las ecuaciones de la capa límite.

3.6.2 Espesor de la capa límite.

De la solución numérica de la ecuación de Blasius se obtiene que $\eta = 5$ y $\Phi = 0.99$. Esto indica de acuerdo con la definición de capa límite en el “borde” de la misma se cumple que $\eta = 5$. Si decimos que δ es el espesor de la capa límite, tenemos:

$$\eta = \frac{\delta_H \sqrt{Re_x}}{x} = 5 \quad (3.27)$$

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \quad [29] \quad (3.28)$$

La ecuación 3.28 da el espesor de la capa límite en función de la posición a lo largo de la placa.

3.7 Elemento Finito

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible resolver, de manera aproximada, problemas matemáticos complejos, como ecuaciones diferenciales, integración, diferenciación, encontrar raíces de ecuaciones, etc. A través de operaciones aritméticas simples. Debido a que casi todos los procesos físicos se pueden modelar matemáticamente mediante ecuaciones o algún conjunto de estas, es posible resolver problemas complejos con técnicas numéricas. Dentro de los métodos numéricos existen una gran variedad de estos, dentro de los cuales se encuentra el método de elemento finito. Este método surgió como tal en la década de los sesentas, desde entonces a la fecha ha pasado de ser una herramienta novedosa a necesaria tanto a nivel académico como a nivel industrial [32].

La teoría de elemento finito se ha aplicado en algunos campos del saber con éxito, alcanzando sus mayores aplicaciones en el área de ingeniería, en este método se pueden modelar ecuaciones diferenciales ordinarias y de segundo orden a través de mallas de elemento finito ya sea de una dimensión (los elementos se ubican todos sobre el eje x), dos dimensiones (a través de formas geométricas como triángulos o cuadrados) y en tercera dimensión (formas geométricas más complejas). En este trabajo se utilizará el mallado en dos dimensiones usando elementos triangulares para el mallado del álabe de aerogenerador. El éxito del método también se debe al surgimiento de computadoras más rápidas y con mayor capacidad de almacenamiento y manejo de datos, aunado al desarrollo de programas especializados [32]

El concepto básico del método de elemento finito es el de dividir una función continua en un número finito de elementos (de allí su nombre), es decir, discretizar la función y resolver sobre cada uno de los elementos las ecuaciones del sistema para después ensamblar la solución total. El método fue propuesto primero en 1943, pero no fue sino hasta 1956 que se

presentaron los primeros resultados obtenidos con este método y en 1960 se le llamó con el nombre con que se le conoce hasta hoy [4].

Para construir un modelo matemático se define un número finito de puntos, los cuales podrán estar unidos después por líneas para formar superficies y sólidos y de esta manera la geometría a estudiar. Estos puntos son llamados nodos, éstos se encuentran en las fronteras de los elementos que se generaron por la discretización de la función continua, además son los responsables de mantener unidos a los elementos, el sistema es ahora un conjunto de elementos unidos por nodos [4]

Ahora bien, las ecuaciones aritméticas que reemplazan a las ecuaciones diferenciales que gobiernan al sistema objeto de estudio, se conocen como ecuaciones de interpolación o ecuaciones de discretización. Para llegar a ellas se utilizan diversas técnicas matemáticas, las más comunes son: aproximación directa, método variaciones, método de residuos ponderados, serie de Taylor, y balance de energía, en este trabajo se utilizó el método de residuos ponderados para explicar dicho método y así mismo resolver las ecuaciones diferenciales de gobierno de la estructura del álabe de aerogenerador [4]

3.7.1 Elemento Finito en una Dimensión

Formulación del Método de Galerkin para el análisis del elemento finito de una ecuación diferencial de segundo orden:

Consideremos el elemento finito mostrado en la figura 3.9.

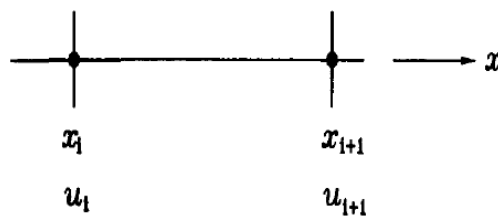


FIGURA 3. 9 Elemento lineal con dos nodos

El elemento tiene dos nodos, uno en cada extremo. A cada nodo le corresponde un valor de coordenada (x_i, x_{i+1}) y se les asigna una variable nodal a cada coordenada (u_i, u_{i+1}).

Se asume la función de prueba desconocida

$$u = C_1x + C_2 \quad (3.29)$$

Se quiere expresar la ecuación (3.29) en términos de variables nodales, en otras palabras, C_1 y C_2 necesitan ser reemplazadas por u_i y u_{i+1} . Por último, se evalúa u para $x = x_i$ y $x = x_{i+1}$, entonces: [32]

$$u(x_i) = C_1x_i + C_2 = u_i$$

$$u(x_{i+1}) = C_1x_{i+1} + C_2 = u_{i+1}$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones para C_1 y C_2 , tenemos:

$$C_1 = \frac{u_{i+1} - u_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (3.30)$$

$$C_2 = \frac{u_i x_{i+1} - u_{i+1} x_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (3.31)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.30) y (3.31) en la ecuación (3.29) tenemos:

$$u = \frac{u_{i+1} - u_i}{x_{i+1} - x_i} + \frac{u_i x_{i+1} - u_{i+1} x_i}{x_{i+1} - x_i}$$

Reagrupando tenemos:

$$u = u_i \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} + u_{i+1} \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}$$

Si decimos que:

$$H_1(x) = \frac{x_{i+1} - x}{h_i} \quad (3.32)$$

$$H_2(x) = \frac{x - x_i}{h_i} \quad (3.33)$$

Donde:

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad (3.34)$$

Entonces:

$$u = H_1(x)u_i + H_2(x)u_{i+1} \quad (3.35)$$

La ecuación (3.35) tiene una expresión para la variable u en términos de variables nodales y las ecuaciones (3.32) y (3.33) son llamadas funciones lineales de interpolación, la figura 3.10 muestra la gráfica de estas funciones [34]

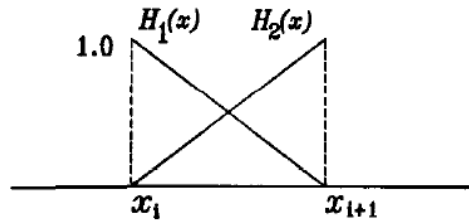


FIGURA3. 10 Función lineal de interpolación [34]

Estas funciones tienen las siguientes propiedades:

1. La función de interpolación asociada con el nodo i tiene un valor unitario para el nodo i y quita los otros nodos, es decir,

$$H_1(x) = 1, H_1(x_{i+1}) = 0, H_2(x_i) = 0, H_2(x_{i+1}) = 1$$

2. La suma de todas las funciones de interpolación es igual a la unidad $\sum_{i=1}^2 H_i(x) = 1$

Estas son propiedades importantes de las funciones de interpolación, la primera propiedad establece el estado que la variable u debe ser igual a la correspondiente variable nodal para cada nodo $u(x_i) = u_i$ y $u(x_{i+1}) = u_{i+1}$. La segunda propiedad dice que la variable u puede representar una solución uniforme dentro del elemento si la solución permanece constante dentro del elemento, $u = u_i = u_{i+1}$ [34]. Sustituyendo esta propiedad en la ecuación (3.35) se tiene:

$$u = H_1(x) + H_2(x)u_i = u_i \quad (3.36)$$

3.7.2 Elemento Finito en Dos Dimensiones (Elemento Triangular)

Los elementos triangulares son ejemplos simples de elementos finitos en dos dimensiones, la figura 3.11 muestra un elemento triangular lineal:

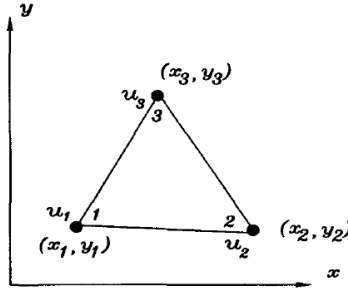


FIGURA3. 11 Elemento triangular lineal [33]

Tenemos tres nodos, uno por cada vértice del triángulo, la variable de interpolación es lineal dentro del elemento tanto en el eje x como en el eje y. Usamos la ecuación de prueba siguiente:

$$U = a_1 + a_2x + a_3y \quad (3.37)$$

Ó en forma matricial:

$$U = (1 \quad x \quad y) \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (3.38)$$

Donde a_i es la constante a determinar.

La función de interpolación (3.37) debe representar las variables nodales para cada uno de los tres nodos. Así, substituyendo los valores de x y y para cada punto nodal tenemos:

$$U = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (3.39)$$

Aquí, x_i y y_i representan las coordenadas de cada nodo en el elemento triangular y u_i es la variable nodal para cada nodo. Invirtiendo la matriz y reescribiendo la ecuación (3.38) se tiene:

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

Donde $n = -1$

Obteniendo la inversa de la matriz y resolviendo para la variable a tenemos:

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} x_2y_3 - x_3y_2 & x_3y_1 - x_1y_3 & x_1y_2 - x_2y_1 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (3.41)$$

La magnitud de A es igual al área del elemento triangular y está dada por:

$$A = \frac{1}{3} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}$$

Sin embargo, este valor es positivo si la numeración del nodo del elemento es hacia la izquierda y negativo en caso contrario. Para el cálculo del elemento finito, la secuencia del elemento nodal debe estar en la misma dirección para cada elemento en el dominio. Sustituyendo la ecuación (3.41) en la ecuación (3.38) tenemos: [33]

$$U = H_1(x, y)u_1 + H_2(x, y)u_2 + H_3(x, y)u_3 \quad (3.42)$$

Donde $H_i(x, y)$ es la función de interpolación para el elemento triangular lineal y están dadas por:

$$H_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (3.43)$$

$$H_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (3.44)$$

$$H_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (3.45)$$

Estas funciones de interpolación satisfacen las siguientes condiciones:

$$H_i(X_i, Y_i) = \delta_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^3 H_i = 1$$

Donde δ_{ij} es la delta de Kronecker, esto es:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Para un elemento triangular como el que se está trabajando la matriz de elementos es calculada de la siguiente manera: [34]

$$[K^e] = \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \cdot d\Omega \quad (3.46)$$

En términos de variables de interpolación la ecuación (3.46) queda de la siguiente manera:

$$\int_{\Omega^e} \begin{Bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial x} \\ \frac{\partial H_2}{\partial x} \\ \frac{\partial H_3}{\partial x} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial x} & \frac{\partial H_2}{\partial x} & \frac{\partial H_3}{\partial x} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial y} \\ \frac{\partial H_2}{\partial y} \\ \frac{\partial H_3}{\partial y} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial y} & \frac{\partial H_2}{\partial y} & \frac{\partial H_3}{\partial y} \end{Bmatrix} d\Omega \quad (3.47)$$

Donde Ω^e es el dominio del elemento. Realizando la integral después de sustituir las funciones de interpolación en la ecuación (3.47) tenemos.

$$[K^e] = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \quad (3.48)$$

Donde

$$k_{11} = \frac{1}{4A} [(x_3 - x_2)^2 + (y_2 - y_3)^2] \quad (3.49)$$

$$k_{12} = \frac{1}{4A} [(x_3 - x_2)(x_1 - x_3) + (y_2 - y_3)(y_3 - y_1)] \quad (3.50)$$

$$k_{13} = \frac{1}{4A} [(x_3 - x_2)(x_2 - x_1) + (y_2 - y_3)(y_1 - y_2)] \quad (3.51)$$

$$k_{21} = k_{12} \quad (3.52)$$

$$k_{22} = \frac{1}{4A} [(x_1 - x_3)^2 + (y_3 - y_1)^2] \quad (3.53)$$

$$k_{23} = \frac{1}{4A} [(x_1 - x_3)(x_2 - x_1) + (y_3 - y_1)(y_1 - y_2)] \quad (3.54)$$

$$k_{31} = k_{13} \quad (3.55)$$

$$k_{32} = k_{23} \quad (3.56)$$

$$k_{33} = \frac{1}{4A} [(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2] \quad [34] \quad (3.57)$$

3.8 Conclusiones del capítulo:

La parte teórica que se abordó en este capítulo corresponde a la teoría de la dinámica de fluidos, en donde se explican los conceptos básicos que rigen el comportamiento de los fluidos que se encuentran sumergidos en una corriente de flujo, sea este laminar o turbulento, compresible o incompresible, viscoso o no viscoso, etc. Las fuerzas que se desarrollan

cuando algunas superficies planas y curvas, en reposo o en movimiento son tratadas de manera importante en este capítulo. En el siguiente capítulo se describen los conceptos necesarios para el diseño de un álabe de aerogenerador, se abordará la teoría de Betz para conocer cuál es la máxima potencia que se puede extraer del viento con una pala de aerogenerador así como las ecuaciones necesarias para el diseño y optimización del álabe propuesto en esta tesis.

Capítulo 3

Resultados

4.1 Introducción

En los capítulos anteriores se trataron los temas relacionados con los conceptos y ecuaciones necesarias para el planteamiento y optimización de un álabe de aerogenerador. Como se mencionó anteriormente las fuerzas de arrastre y sustentación son de vital importancia para el análisis e implementación del álabe, para obtener estos valores se tenía que someter el perfil de la estructura a un estudio dentro de un túnel de viento, ya que se requería calcular los coeficientes de sustentación C_L y los coeficientes de arrastre C_D de acuerdo a un cierto ángulo de ataque (α) óptimo que se obtiene al encontrar la fineza del perfil con la relación C_L/C_D [35], se planteó que a partir de las polares del perfil se podían encontrar los valores antes mencionados, sin embargo, dichas polares sólo se pueden encontrar haciendo pruebas en túneles de vientos. Como no se cuenta con la herramienta para obtener las polares de los perfiles, se utilizaron algunos softwares que han probado su efectividad en la simulación de perfiles aerodinámicos. Se inicia con la simulación de estructuras simples que no presentan características aerodinámicas, tal es el caso de una superficie completamente plana, después, se hace un análisis de una superficie completamente esférica para observar el comportamiento del aire en la misma, así como la distribución de presiones a lo largo de la superficie. Para tal efecto se usó una herramienta de software llamada Ansys Fluent, la cual permite por medio de elemento finito, simular las superficies antes mencionadas para obtener sus respectivas características, una vez concluido el análisis antes mencionado, se hizo el análisis de perfiles aerodinámicos.

Algunos perfiles aerodinámicos ya fueron estudiados y analizados en túneles de vientos a los cuales se les calcularon sus polares tal es el caso de perfiles NACA de los cuales se tomará el perfil NACA 4412 para observar el grado de error que se puede tener analizando y obteniendo las polares de dicho perfil en el análisis por software. Este es el primer paso, el segundo es analizar tres perfiles de diferente forma a los cuales se les obtendrá sus polares y después se llevará a cabo una simulación en 2D para cada perfil con un software llamado SolidWorks el cual cuenta con una herramienta que permite hacer cálculos y simulaciones de este tipo de perfiles usando el método de elemento finito como base para dichos cálculos. En las siguientes páginas se explicará la forma en que dicho software lleva a cabo la simulación y los cálculos para obtener las fuerzas arriba mencionadas que servirán como parámetros para decidir cuál es el mejor perfil para la propuesta de álabe de aerogenerador que se propone en esta tesis.

En el apartado anterior se trataron temas relacionados al cálculo de la fuerza que actúa sobre álabes, primeramente aquellos que tenían forma plana y estacionarios, después aquellos que presentaban cierta forma curva, los cuales podían estar estacionarios o moviéndose junto con el fluido en el análisis antes mencionado se llegó a una ecuación general que permite obtener la fuerza antes mencionada no importando la forma del perfil ni si éste se mueve o se encuentra estacionario, la cual tiene la siguiente forma:

$$F = \rho A |v_F - v_a| [(v_f - v_s) - v_a] \quad (4.1)$$

El siguiente ejemplo de aplicación de la ecuación (4.1) muestra un flujo de agua que circula por un tubo cuyo diámetro es de 10cm, que se mueve a la derecha incidiendo en una placa plana situada normalmente al eje del chorro y a una velocidad de 20 m/s, usando la ecuación anterior y tomado en cuenta que la placa está fija, tenemos que:

$$F = \rho A [v_f]^2 = \left(\frac{1000Kg}{m^3}\right) \left(\frac{\pi * (0.1m)^3}{4}\right) \left(\frac{20m}{s}\right)^2 = 3141.6N$$

La presión que ejerce el fluido sobre la placa plana es de: $P = \frac{F}{A} = \frac{3141.6N}{7.854 \times 10^{-3}} = 400000 \frac{N}{m^2}$

4.2 Simulación con Ansys para perfiles no aerodinámicos.

La paleta plana del apartado anterior se simuló en Ansys Fluent para calibrar el software, se ha usado este software debido a que es una herramienta versátil de análisis por elemento finito y porque se trata de un programa de "Uso general." Se dice que es de uso general debido a que el programa incluye muchas capacidades generales tales como funciones de preprocesador (para generar un modelo), soluciones, posprocesador, gráficos, modelado paramétrico y utilidades para que el programa sea fácil de usar. Con lo anterior se puede decir que Ansys no se trata de un programa especializado para resolver problemas sino que permite satisfacer muchas necesidades complejas de diseño y análisis.

4.2.1 Placa Plana

En la figura 4.1 se observa la placa plana dentro de un rectángulo el cual tiene 10 cm de alto, también se observa el sistema completamente.

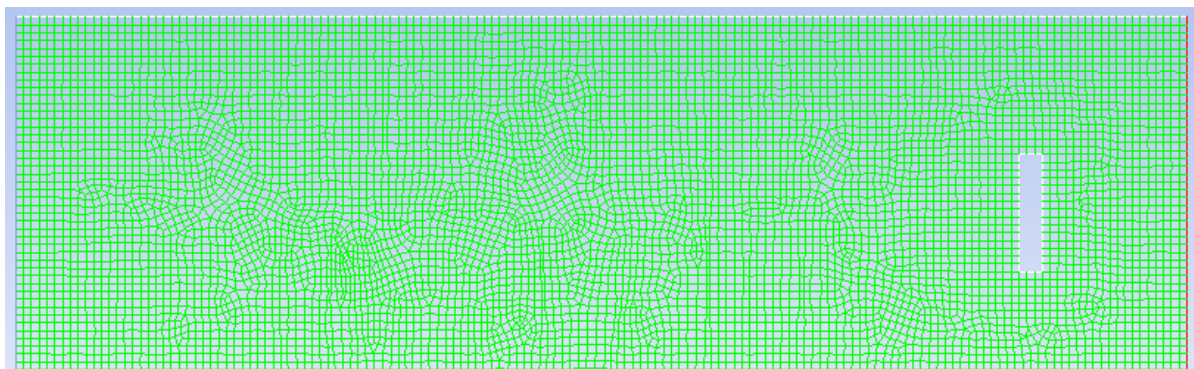


FIGURA 4. 1 Sistema Mallado

La figura 4.2 muestra los contornos de velocidad para la simulación, el color rojo indica la velocidad máxima del aire que en este caso es de 20.3m/s, el color amarillo indica una

disminución para la velocidad de entrada unos centímetros antes de llegar a la placa plana, el color azul claro indica una disminución aún mayor de la velocidad, en la pared de la placa. La figura 4.3 muestra que la velocidad es igual a cero. La figura 4.4 muestra los vectores de velocidad del sistema en donde se puede observar el comportamiento vectorial de la velocidad

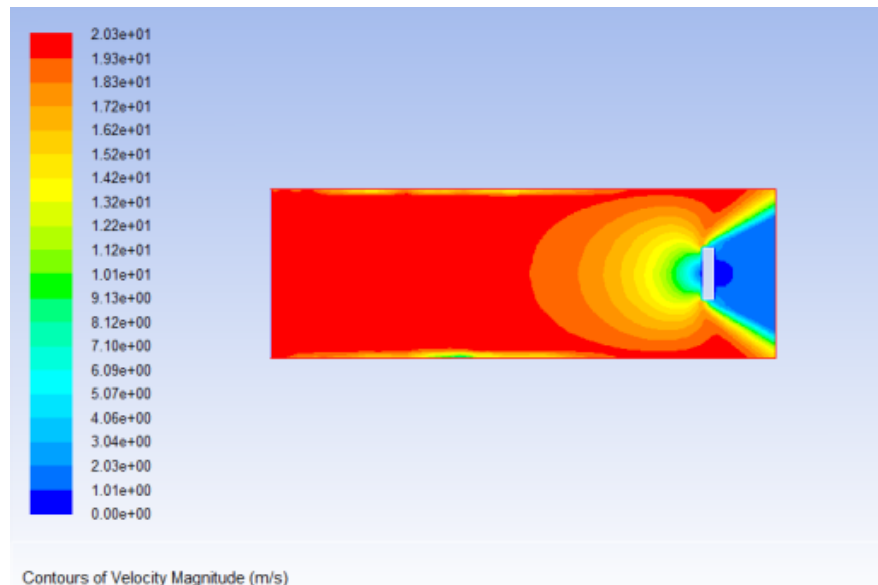


FIGURA 4. 2 Contornos de velocidad en m/s

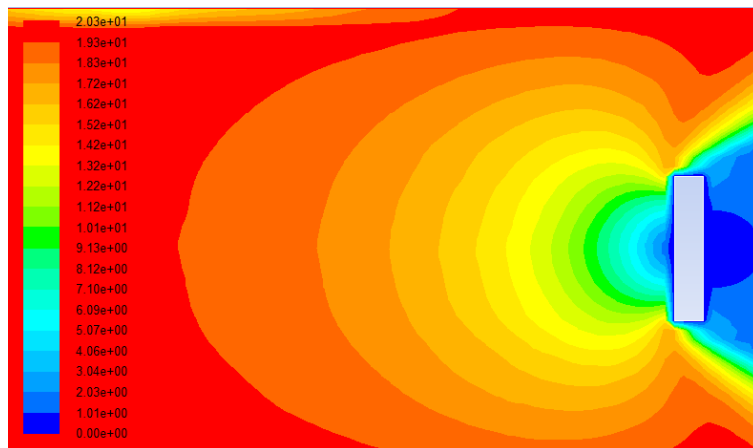


FIGURA 4. 3 Velocidad cero en la pared de la placa plana

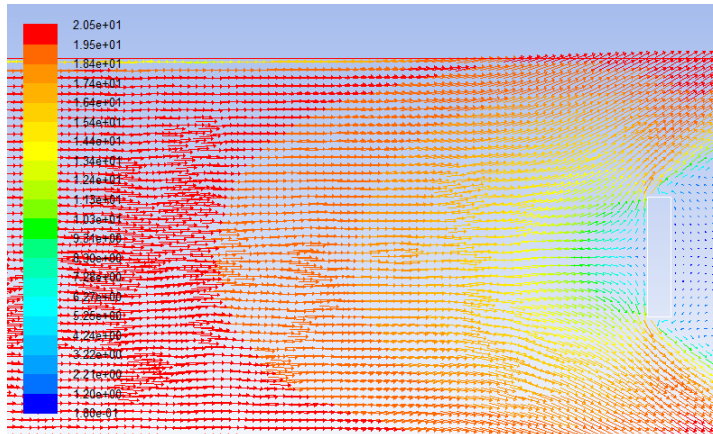


FIGURA 4. 4 Vectores de velocidad

La figura 4.5 muestra los contornos de presión para la placa plana, se observa que la máxima presión se encuentra exactamente en el centro de la placa y que la magnitud de la misma es de 402000 pascales, que es aproximadamente lo que se obtuvo en el cálculo analítico.

La figura 4.6 muestra el comportamiento del sistema en términos de vectores en donde se puede apreciar como es el comportamiento de la presión en el sistema.

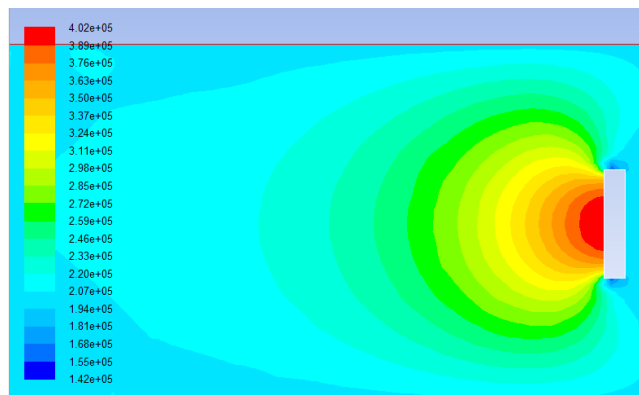


FIGURA 4. 5 Contornos de presión

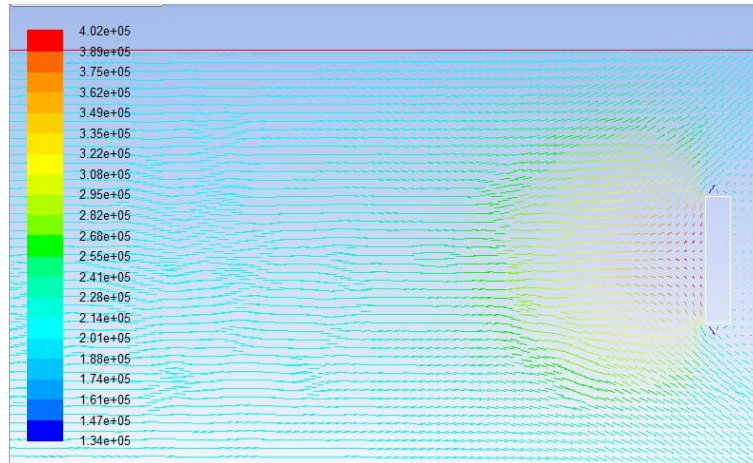


FIGURA 4. 6 Vectores de presión

También se presenta una gráfica en el plano X-Y en el cual se pueden obtener valores puntuales de la magnitud de la presión en la cercanía de la entrada, vemos que la presión es de unos 340Kpa. La presión empieza a crecer hasta llegar a la placa plana en donde toma su valor máximo y posteriormente conforme choca con la placa el valor de la presión decrece cerca de la salida del sistema, esta gráfica se muestra en la figura 4.7.

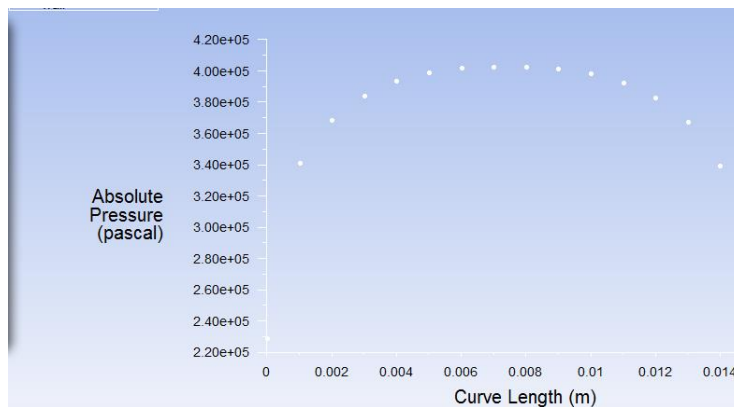


FIGURA 4. 7 Gráfica de la presión total en la placa plana.

4.2.2 Esfera

Se hizo el análisis de un perfil completamente esférico para analizar el comportamiento de la masa de aire en el mismo y compararlo con los perfiles aerodinámicos alargados el ejemplo consiste en una esfera dentro de una corriente de fluido. En la figura 4.8 se muestra dicha esfera en donde las líneas de corriente muestran la trayectoria del fluido conforme éstas se aproximan y fluyen alrededor de la esfera.

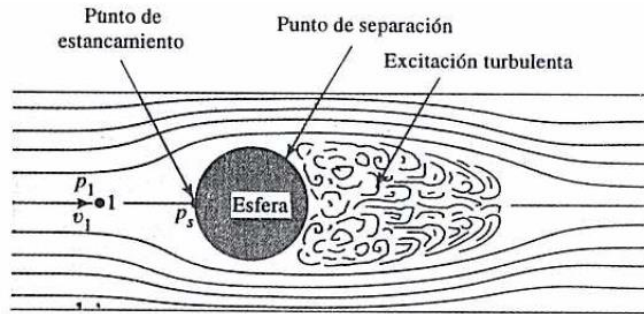


FIGURA 4. 8 Esfera en una corriente de fluido [14]

Como se expuso en el capítulo anterior, la presión en el punto de estancamiento (P_s) está dada por la siguiente función: [36]

$$P_s = P_1 + \left(\frac{1}{2}\rho v_1^2\right) \quad (4.2)$$

Donde:

$$P = 1.225 \text{ Kg/m}^3 \quad P_s = 101000 \text{ Pa} + \frac{(1.22)(400)}{2} = 199 \text{ KPa}$$

$$\eta = 1.789 \times 10^{-5}$$

$$v = 20 \text{ m/s}$$

Para la simulación de este sistema se utilizó aire, con la densidad y viscosidad dados en el problema anterior, la figura 4.9, muestra la magnitud de la velocidad en el sistema y en la frontera de la esfera.

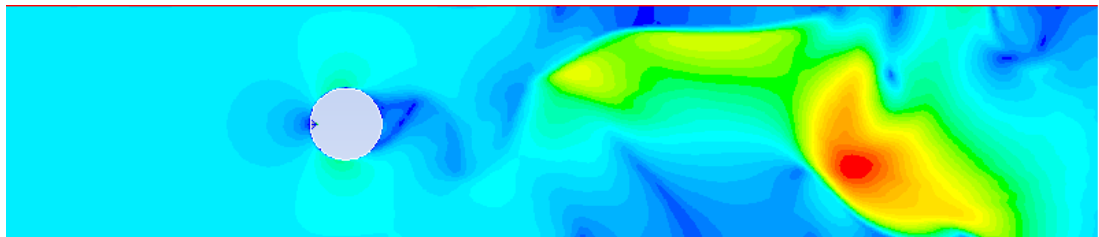


FIGURA 4. 9 Efectos de la velocidad en la esfera

La figura 4.10 muestra que la velocidad en el perímetro de la esfera es cero así como la formación de la capa Límite.

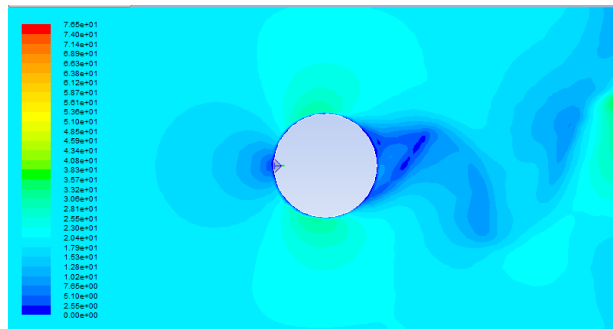


FIGURA 4. 10 Velocidad en el perímetro de la esfera.

La figura 4.11 muestra los vectores de velocidad en el sistema en el cual la velocidad del fluido es de 20m/s hasta unos pocos centímetros antes de llegar a la superficie esférica, en donde la velocidad disminuye drásticamente.

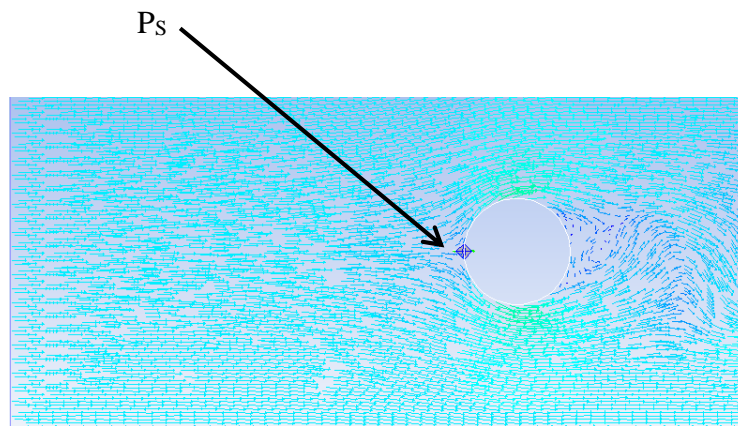


FIGURA 4. 11 Vectores de velocidad

Se creará el punto P_s exactamente en el punto donde se muestra en la figura 4.11 para poder realizar el cálculo de la presión antes mencionada, el punto que se creó se llama point-2 como se observa en la figura 4.12

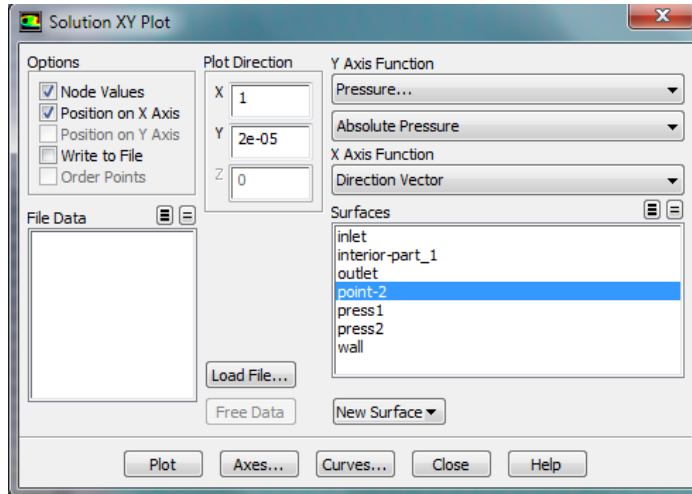


FIGURA 4. 12 Punto creado para la medición.

4.3 Polares de Perfil NACA 4412.

El término polar de un perfil aerodinámico se define como la gráfica que se obtiene al ingresar la estructura (álabes) a un túnel de viento en el cual se obtienen los parámetros aerodinámicos como el coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre, ángulo de ataque, coeficiente de potencia, fineza, entre otros, los cuales no pueden ser calculados teóricamente. Dichos parámetros obtenidos en un túnel de viento se obtienen con la ayuda de modelos matemáticos y mediciones repetidas: a una velocidad constante del aire y un determinado ángulo de ataque, se miden las fuerzas L (fuerza de sustentación) y D (fuerza de arrastre) que actúan sobre el modelo de álabes y a continuación se calculan ambos coeficientes con las siguientes ecuaciones. [37]

$$L = C_L \frac{\rho}{2} A v^2 \quad [N] \quad (4.3)$$

$$D = C_D \frac{\rho}{2} A v^2 \quad [N] \quad (4.4)$$

El resultado se presenta en forma de curva C_L (C_D), con α como parámetro (Fig.4.14). [38]

Donde: C_L es el coeficiente de sustentación; C_D es el coeficiente de arrastre

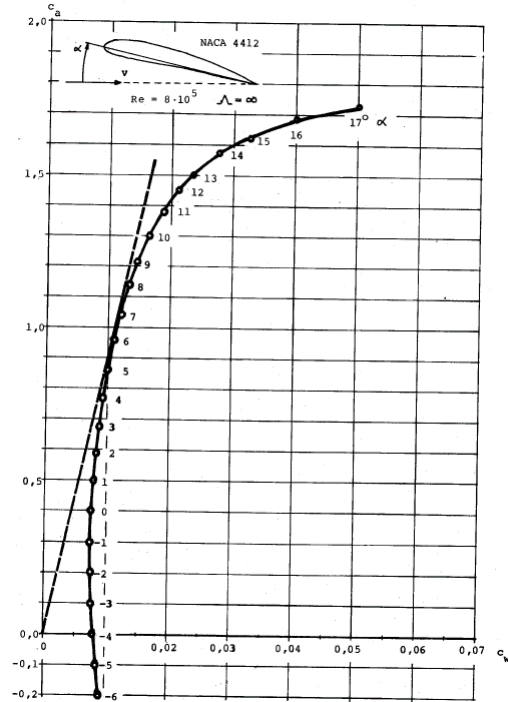


FIGURA 4. 13 Polar del perfil NACA 4412 [38]

En la polar de la figura 4.14, el eje horizontal representa el coeficiente de arrastre (C_w), y en el eje vertical representa el coeficiente de sustentación (C_a), a un costado de la curva se marcó el ángulo de ataque, se traza una línea tangente a la curva para obtener el ángulo de ataque que en este caso como se puede observar, es de seis grados.

La fineza es un indicador de la “calidad” de un perfil. Una fineza elevada significa, que la fuerza de sustentación es mucho más grande que la fuerza de arrastre. [20] El rendimiento del ala será tanto mayor cuanto más grande sea su fineza, de modo que para su ángulo de ataque elegiremos el que corresponde a la máxima fineza. Este ángulo se llama ángulo óptimo de ataque α_{opt} . En la Figura 4.15 se observa que el ángulo óptimo es de aprox. 6° . En la polar (c_L), (c_D), el ángulo α_{opt} es el punto de contacto entre la polar y la tangente a la misma que pasa por el punto cero del sistema de coordenadas. La fineza ϵ_{max} será igual al cociente entre los coeficientes de sustentación y arrastre correspondientes al ángulo α_{opt} . ($\epsilon = c_L / c_D$). [20]

Tomando en cuenta que los coeficientes c_L y c_D dependen del ángulo de ataque (α), la fineza también dependerá de éste. Esta dependencia es fácil de determinar: en la polar del perfil, para cada ángulo de ataque se divide el respectivo coeficiente de sustentación por el de arrastre, representando el resultado en la misma polar, como se mencionó en el párrafo

anterior. A menudo c_a y c_w se representan por separado en función del ángulo de ataque α como se observa en la Figura. 4.15.

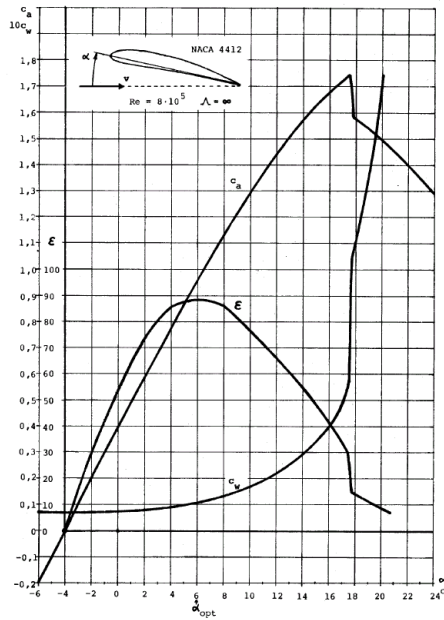


FIGURA 4. 14 Polar del perfil NACA 4412, con sus coeficientes de sustentación, arrastre y la fineza en función del ángulo de ataque [38]

En la curva de la figura 4.15 el eje horizontal representa el ángulo de ataque α , mientras que en el eje vertical se representa el coeficiente de sustentación (C_a), como la fineza (ϵ), se puede observar la curva tanto del coeficiente de sustentación(C_a), coeficiente de arrastre (C_w) y la fineza (ϵ)

Existen manuales que contienen polares de infinidad de perfiles. La forma exacta del respectivo perfil se representa en un dibujo, en el que se indican las coordenadas del lado superior (extradós) y del lado inferior (intradós) con respecto a la cuerda del perfil. Estas coordenadas se expresan en tanto por ciento de la longitud de la cuerda (Fig. 4.16).

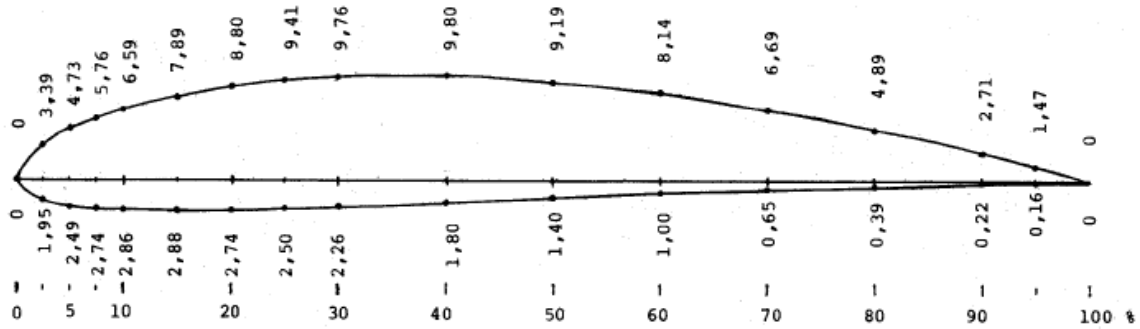


FIGURA 4. 15 Coordenadas del perfil NACA 4412 [38]

4.3.1 Simulación con JavaFoil

Ahora se obtendrán las polares del mismo perfil pero con el software de simulación de túnel de viento llamado JavaFoil, el cual proporciona los siguientes perfiles y datos:

1. Se carga el perfil deseado para su análisis como en la figura 4.17

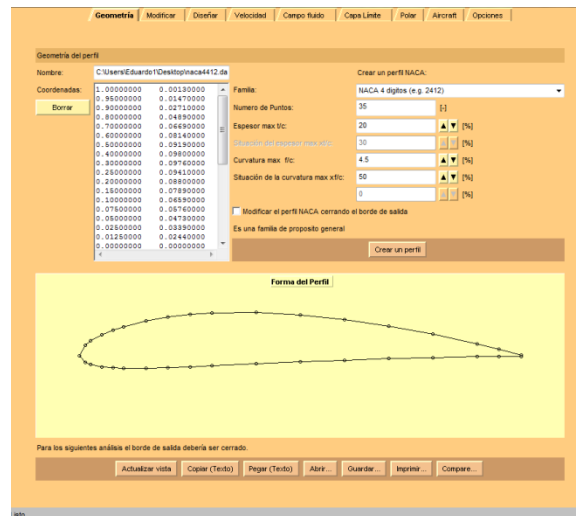


FIGURA 4. 16 Perfil cargado en el sistema

Se calcula el número de Reynolds para el análisis del perfil y se indica el intervalo de ángulos de ataque que se quieren tomar en cuenta para el perfil, aquí, se eligió un intervalo de -3° hasta 20° debido a que después de 20° la solución no converge. En este caso como el perfil ya está calculado, el número de Reynolds para éste fue de 800000 con una velocidad de viento de 11.69 m/s, al obtener el dato, se carga en el software junto con el intervalo de ángulo de ataque.

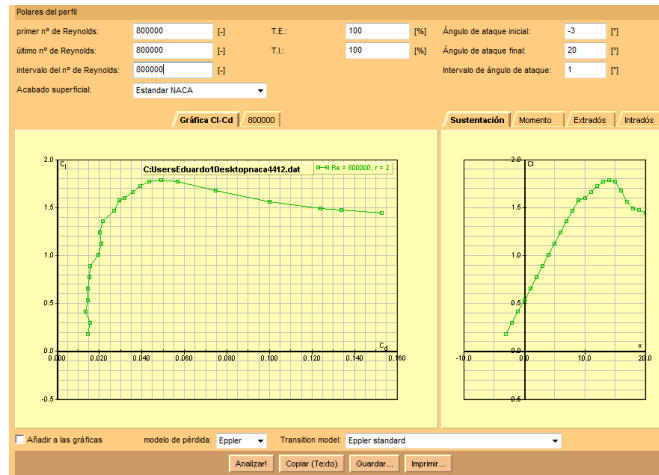


FIGURA 4. 17 Polares del perfil Naca 4412 con el software de simulación JavaFoil

4.3.2. Tabla de Coeficientes.

Como se puede observar en la tabla de datos, los valores que tienen la máxima fineza (ϵ) se encuentran entre dos ángulos de ataque que para este caso son ($\alpha = 6^\circ$) y ($\alpha = 7^\circ$) siendo éste último el que tiene el valor máximo de fineza. Se puede asegurar que tomando en cuenta el análisis hecho por el software de simulación, el ángulo de ataque máximo para este perfil es de 7° grados mientras que en el análisis en el túnel de viento, el ángulo óptimo de ataque fue de 6° grados, un grado de diferencia en términos prácticos es aceptable. Por otro lado, se obtienen los coeficientes de sustentación, de arrastre, de momento y de potencia para el ángulo de ataque óptimo, los cuales se pueden observar en la tabla 4.1 marcada con verde.

TABLA 4. 1 Datos obtenidos en la simulación por software con el JavaFoil.

α	Cl	Cd	Cm 0.25	T.U.	T.L.	S.U.	S.L.	L/D	A.C.	C.P.
[$^\circ$]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
-3	0.179	0.01	-0.105	0.329	0.05	1	0.96	12.2	0.276	0.836
-2	0.298	0.02	-0.108	0.316	0.06	1	0.96	19.1	0.277	0.614
-1	0.416	0.01	-0.112	0.303	0.09	1	0.96	30.5	0.277	0.518

0	0.535	0.01	-0.115	0.273	0.13	1	0.96	37.1	0.275	0.465
1	0.654	0.01	-0.117	0.247	0.17	1	0.96	44.4	0.273	0.43
2	0.773	0.02	-0.12	0.209	0.21	1	0.96	50.3	0.273	0.406
3	0.891	0.02	-0.123	0.175	0.23	1	0.97	57	0.273	0.388
4	1.009	0.02	-0.126	0.103	0.51	1	0.96	51.7	0.273	0.375
5	1.126	0.02	-0.128	0.084	0.53	1	0.96	53.9	0.274	0.364
6	1.241	0.02	-0.131	0.021	0.58	1	0.96	61	0.274	0.356
7	1.354	0.02	-0.134	0.019	0.65	1	0.96	62.5	0.274	0.349
8	1.465	0.03	-0.137	0.018	0.76	1	0.96	54.2	0.275	0.343
9	1.573	0.03	-0.139	0.016	0.84	1	0.96	53.4	0.358	0.339
10	1.602	0.03	-0.151	0.016	0.91	0.92	0.96	50.5	0.495	0.345
11	1.659	0.04	-0.16	0.015	0.92	0.88	0.96	46.7	0.39	0.347
12	1.722	0.04	-0.168	0.015	0.93	0.85	0.96	44	0.404	0.348
13	1.77	0.04	-0.177	0.014	0.96	0.81	0.96	40.7	0.574	0.35
14	1.785	0.05	-0.189	0.014	0.96	0.76	0.96	36.3	8.095	0.356
15	1.773	0.06	-0.202	0.013	0.96	0.7	0.96	31.3	-0.07	0.364
16	1.677	0.07	-0.223	0.01	0.96	0.54	0.96	22.4	0.066	0.383
17	1.563	0.1	-0.241	0.008	0.96	0.35	0.96	15.6	0.112	0.404
18	1.492	0.12	-0.249	0.006	0.95	0.19	0.96	12	0.081	0.417
19	1.476	0.13	-0.255	0.005	0.95	0.17	0.96	11	0.042	0.423
20	1.44	0.15	-0.259	0.005	0.95	0.1	0.96	9.43	0.135	0.43

4.3.3 Simulación con DESING FOIL

Para reafirmar los cálculos obtenidos por el software de simulación antes mencionado se optó por usar otro software el cual se llama DESING FOIL, el cual se encuentra como un demo en la red y se tiene autorización de usarlo durante 5 días, este software lo utilizan los diseñadores de alas de avión ya que también permite realizar simulaciones con perfiles aerodinámicos como si se estuviera en un túnel de viento. Los datos que se obtuvieron fueron muy parecidos a los obtenidos con el JavaFoil, los cuales se muestran en la figura 4.19 y la tabla 4. 2 respectivamente. Este software se usó en su versión DEMO para comprobar los

resultados que se obtuvieron con el Java Foil con el fin de asegurar la repetitividad de los datos obtenidos para el análisis del álabe.

En la figura 4.19 se puede apreciar el procedimiento para obtener el ángulo de ataque óptimo así como los coeficientes de sustentación y arrastre para el perfil analizado, como se observa, se traza una línea tangente desde el origen hacia el perfil, el punto de tangencia marca el lugar en donde se encuentran los coeficientes antes mencionados, a partir de éste punto, se traza una línea recta horizontal que toca a la polar de la derecha y en éste punto, se traza una línea vertical la cuál marca el ángulo de ataque óptimo. Como se puede apreciar, los dos simuladores indican que para el perfil estudiado, el ángulo de ataque óptimo es de 7° con un valor de fineza de 136.46 que es el valor de fineza más grande.

Debido a que el software Desing Foil no es libre a diferencia del JavaFoil, se usará este último para obtener los datos necesarios para el análisis de los perfiles propuestos en esta tesis.

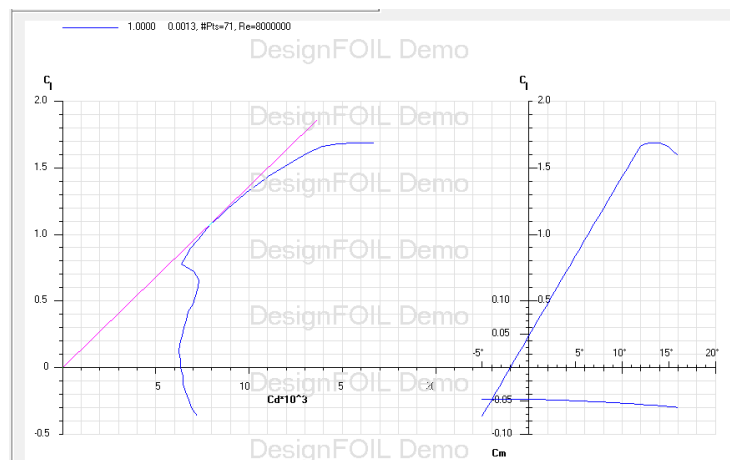


FIGURA 4. 18 Polares del perfil Naca 4412 con el software de simulación DESING FOIL. Se usó la versión de prueba del DESING FOIL

TABLA 4. 2 . Datos obtenidos en la simulación por software con el DESING FOIL.

ReyN =	8000000			
AOA	Cl	Cd	Cm	Cl/Cd
-5	-0.36	0.0072	-0.047	-50
-4.5	-0.301	0.0069	-0.047	-43.6231884
-4	-0.241	0.0068	-0.047	-35.4411765
-3.5	-0.181	0.0066	-0.047	-27.4242424
-3	-0.121	0.0064	-0.047	-18.90625

-2.5	-0.061	0.0065	-0.047	-9.38461538
-2	-0.001	0.0063	-0.047	-0.15873016
-1.5	0.059	0.0063	-0.047	9.36507937
-1	0.119	0.0062	-0.047	19.1935484
-0.5	0.179	0.0063	-0.047	28.4126984
0	0.239	0.0064	-0.047	37.34375
0.5	0.3	0.0065	-0.048	46.1538462
1	0.36	0.0066	-0.048	54.5454545
1.5	0.42	0.0067	-0.048	62.6865672
2	0.48	0.007	-0.048	68.5714286
2.5	0.54	0.0071	-0.048	76.056338
3	0.6	0.0072	-0.049	83.3333333
3.5	0.66	0.0073	-0.049	90.4109589
4	0.72	0.007	-0.049	102.857143
4.5	0.779	0.0064	-0.049	121.71875
5	0.839	0.0066	-0.05	127.121212
5.5	0.899	0.0069	-0.05	130.289855
6	0.959	0.0073	-0.05	131.369863
6.5	1.018	0.0076	-0.051	133.947368
7	1.078	0.0079	-0.051	136.455696
7.5	1.137	0.0084	-0.051	135.357143
8	1.196	0.0089	-0.052	134.382022
8.5	1.256	0.0094	-0.052	133.617021
9	1.315	0.0099	-0.052	132.828283
9.5	1.374	0.0104	-0.053	132.115385
10	1.433	0.011	-0.053	130.272727
10.5	1.491	0.0117	-0.054	127.435897
11	1.55	0.0124	-0.054	125

11.5	1.608	0.0131	-0.055	122.748092
12	1.661	0.0139	-0.055	119.496403
12.5	1.677	0.0148	-0.056	113.310811
13	1.686	0.0157	-0.056	107.388535
13.5	1.688	0.0167	-0.057	101.077844
14	1.683	0.0182	-0.057	92.4725275
14.5	1.671	0.0193	-0.058	86.5803109
15	1.652	0.0206	-0.058	80.1941748
15.5	1.626	0.0218	-0.059	74.587156
16	1.593	0.0232	-0.059	68.6637931

4.4 Procedimiento propuesto para obtener un perfil aerodinámico eficiente para velocidades bajas.

En primer lugar se debe conocer las características geométricas de un perfil aerodinámico, en la figura 4.20, se muestran dichas características, en el diseño de palas es necesario mantener claro una serie de conceptos: [39]

1. La *línea de cuerda* es una línea recta que une el *borde de ataque* y el *borde de fuga* del perfil.
2. La *cuerda* es la longitud de la línea anterior. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
3. La *línea de curvatura media* es la línea media entre el extradós y el intradós.
4. *Curvatura máxima* es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.

5. *Espesor máximo* es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós). La localización del espesor máximo también es importante.
6. *Radio del borde de ataque* es una medida del afilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2 por 100 (de la cuerda) para perfiles más bien achatados.

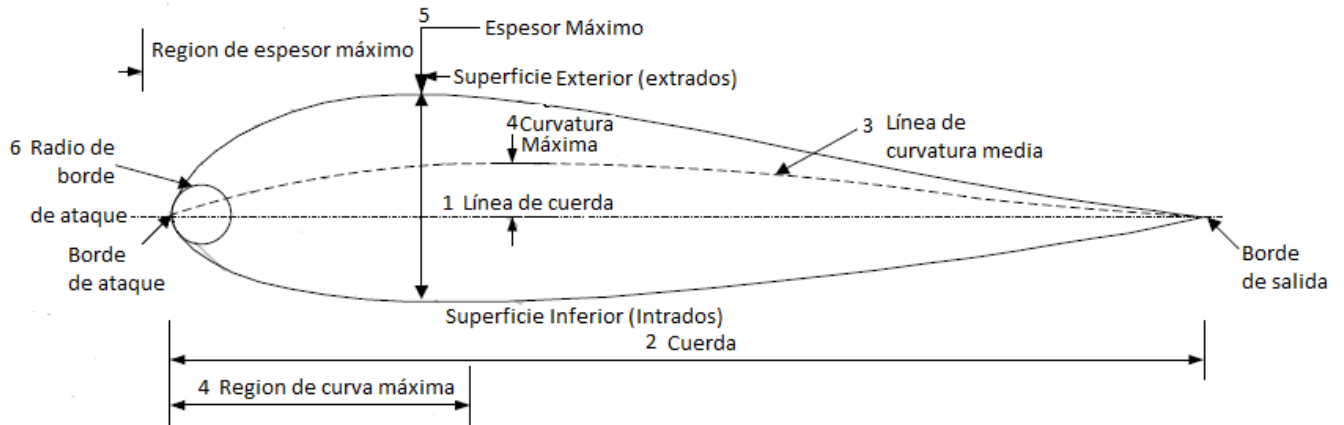


FIGURA 4. 19 Características geométricas de un perfil aerodinámico [39]

Las Variables Geométricas en los Perfiles que se deben tener en cuenta para el diseño de un perfil aerodinámico son:

1. Configuración de la línea de curvatura media. Si esta línea coincide con la línea de cuerda, el perfil es simétrico. En los perfiles simétricos la superficie superior e inferior tiene la misma forma y equidistan de la línea de cuerda.
2. Espesor.
3. Localización del espesor máximo.
4. Radio del borde de ataque.

En segundo lugar se debe calcular el área que el aerogenerador tiene que barrer con el fin de obtener cierta potencia deseada, esto se hace con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{2 P_{\text{útil}}}{\rho v^3 \eta} \quad [m^2] \quad (4.5)$$

Donde:

$P_{\text{útil}}$	Es la potencia en Watts que se quiere obtener de la máquina
v	Velocidad del viento
ρ	Densidad del aire
η	Rendimiento de la máquina.

Es importante destacar que la velocidad del viento para la ecuación (3) debe ser la máxima velocidad a la que el aerogenerador estará sometido, esto con el fin de prever casos en los que la velocidad del viento aumenta en algunos días permitiendo que la máquina tenga un margen de funcionamiento adecuado para su vida útil.

Con el resultado de la ecuación (3) se puede obtener el radio de la pala de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

Como se mencionó en el capítulo anterior, el parámetro de la velocidad de punta (TSR) es importante para el diseño del perfil, para un generador de tres palas suele estar comprendido entre 4 y 12, con este valor se puede calcular las revoluciones por minuto a la que el rotor girará, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$rpm = \frac{TSR v}{0.105 r} \quad (5)$$

Una buena práctica es conseguir que por lo menos a la mitad de la velocidad máxima del viento, el generador de la máquina pueda trabajar correctamente, esto se puede conseguir eligiendo un factor de multiplicación de la caja de engranajes adecuado para que el generador gire de acuerdo a sus especificaciones técnicas.

Una vez que se tienen los parámetros anteriores, el siguiente paso es diseñar o elegir un perfil aerodinámico que cumpla con los criterios geométricos antes mencionados y que pueda convertir la máxima potencia del viento posible de acuerdo con el límite de Betz, en energía mecánica necesaria para generar electricidad. Para llevar a cabo lo anterior, se sugiere que se elija un perfil aerodinámico probado para palas de aerogeneradores tales como los perfiles NACA de cuatro dígitos, esto con el fin de tener un parámetro en el cual basar el perfil que se quiera proponer.

Una vez que se tiene el perfil antes mencionado se dibuja en SolidWorks (SW) o en algún otro software que permita desarrollar este tipo de perfiles, se recomienda que el perfil que se dibuje sea simétrico esto para facilitar su adecuación en el software de las polares del perfil.

Ya que el perfil está dibujado, es necesario discretizar dicho perfil, SW tiene una herramienta para dibujar puntos dentro de la pestaña croquis, se dibujan puntos con coordenadas (x,y) en la periferia del perfil, teniendo en cuenta que en la cercanía del borde de ataque los puntos deben ser mayores que en la cercanías del borde de salida, se recomienda que se discretice el perfil con una cantidad de puntos entre 70 y 110 puntos, esto con el fin de que el diseño tenga un buen número de puntos que lo puedan definir, las coordenadas que se van generado al hacer lo anterior, se deben anotar en un archivo de texto con extensión txt, ya que el software que permite modificar la geometría antes dibujada y a su vez, calcula las características aerodinámicas del perfil actuando como un túnel de viento, requiere que éste sea representado por dichas coordenadas rectangulares, el nombre del software antes mencionado es JavaFoil (JF).

En el JF se pueden modificar las características geométricas del perfil en cuanto a su espesor, curvatura, escala, entre otros parámetros, conforme se van haciendo las modificaciones, el software va generando los puntos del perfil de acuerdo a las modificaciones hechas y también se pueden obtener las polares de los perfiles que estén diseñando para obtener sus características aerodinámicas, una vez que se obtiene el perfil con las características adecuadas, se genera otro archivo de texto con las nuevas coordenadas y se incluye una columna con valores para el eje z que para este caso debe tener un valor de cero.

Cuando ya se tiene el archivo de texto con las coordenadas en (x,y,z) se guarda con un nombre de identificación para posterior mente utilizarlo con el software de simulación.

SW cuenta con una herramienta poderosa para hacer análisis de estructuras que se encuentran dentro de un fluido, la cual por medio del método numérico de Elemento Finito, lleva a cabo una simulación de dichas estructuras y permite observar su comportamiento en segunda y tercera dimensión, la herramienta antes mencionada se llama Fow Simulation (FS). Esta Herramienta permite proporcionar los parámetros en los cuales la estructura estará interactuando con el fluido, para el caso que ocupa a esta tesis el fluido es el aire, FS genera una especie de túnel de viento una vez que se le han ingresado el perfil y las condiciones de frontera con la cuales estará trabajando, posteriormente hace los cálculos que se solicitan y permite obtener gráficos en dos y tres dimensiones del comportamiento del perfil dentro del túnel de viento virtual generado, así como tablas con los valores calculados de los parámetros que se quieran obtener de dicho análisis. El diagrama de flujo de la figura 4.21, muestra la metodología antes descrita.

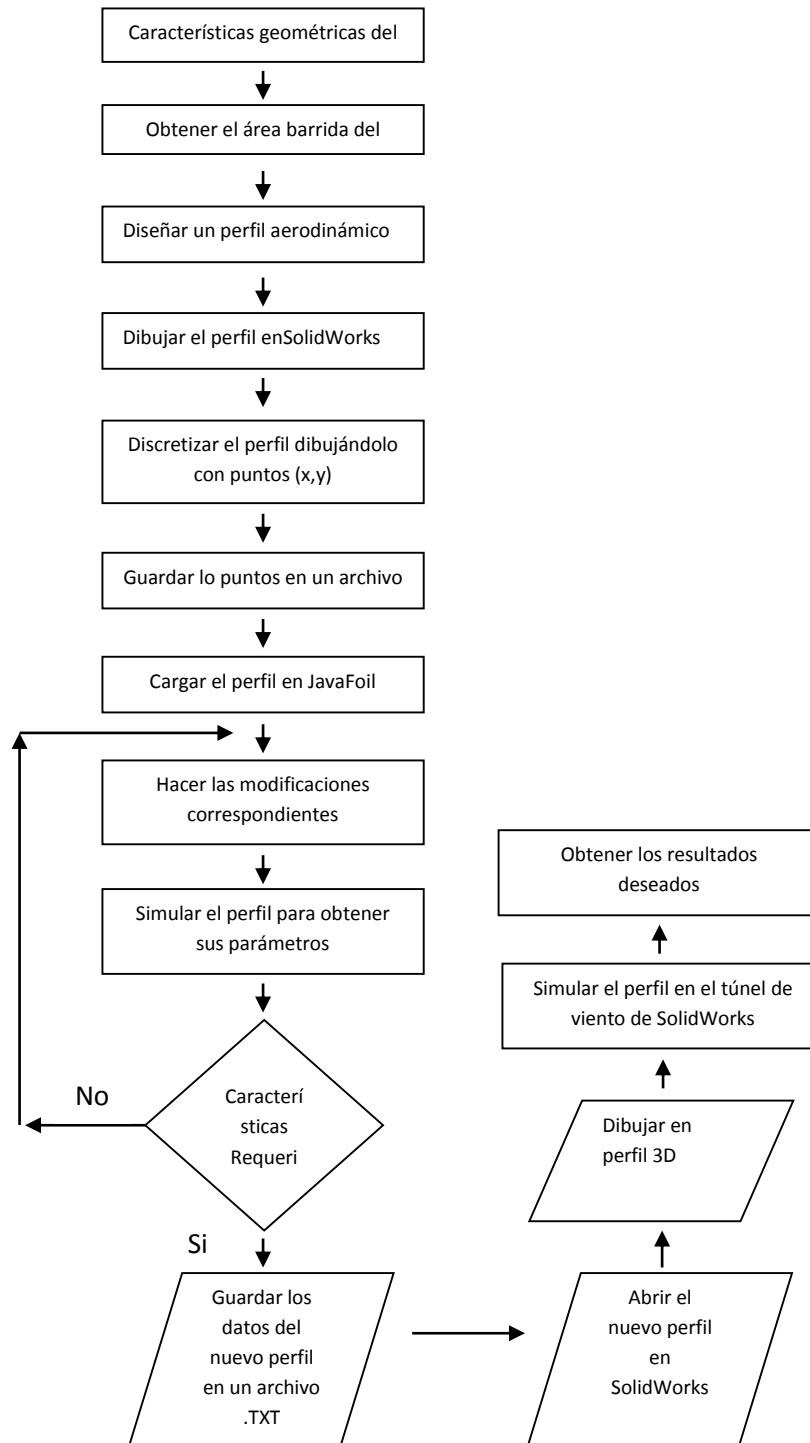


FIGURA 4. 20 . Metodología propuesta para obtener los parámetros necesarios para el diseño y construcción de un álabo de aerogenerador así como su comportamiento aproximado en un túnel de viento.

4.5 Simulación del perfil NACA 4412 con FlowSimulation

Se realizó la simulación del perfil en tercera dimensión en el software SolidWorks, con la herramienta que viene integrada en la misma llamada Flow Simulation la cual a partir del perfil en 3D crea un túnel de viento y permite hacer el análisis de diferentes variables como velocidad, presión, fuerza, entre otras. Las condiciones que se usaron para la simulación son las siguientes:

Para una velocidad de viento de 10m/s, una densidad de aire de 1.21 Kg/m³, un área de sección transversal del perfil de 1m y un C_L de 1.354, la fuerza de sustentación para el perfil estudiado es de 81.92N y la fuerza de arrastre es de 1.21N.

Una vez ingresados los datos anteriores, SolidWorks por medio de la teoría de elemento finito, genera una malla para el túnel de viento y para el perfil la cual utiliza elementos cuadrados que, en tercera dimensión, son elementos cúbicos cuyos nodos tienen la característica de movilidad transversal y longitudinal, la densidad de la malla la calcula el software por default y esto permite obtener los valores de las variables antes mencionadas. Para el estudio del perfil se requiere comprobar la fuerza de sustentación que se obtuvo anteriormente así como la distribución de la presión en el perfil y el viento, los resultados (Tabla 4.3) y las gráficas son las siguientes (4.22, 4.23):

TABLA 4. 3 Resultados obtenidos con Flow Simulation

NACA 4412

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta
SG Av Total Pressure 1	[Pa]	101321.722	101321.26	101289.273	101321.877	32.603938
SG Av Velocity 1	[m/s]	0	0	0	0	0
SG Av X - Component of Velocity 1	[m/s]	0	0	0	0	0
SG Normal Force 1	[N]	0.54562399	1.5105901	0.46960313	78.2395434	77.769940
SG X - Component of Normal Force 1	[N]	0.137296108	0.517279894	0.123900899	30.07817665	29.95427575
SG Y - Component of Normal Force 1	[N]	0.52806753	1.4160215	0.44361524	72.2269302	71.783315

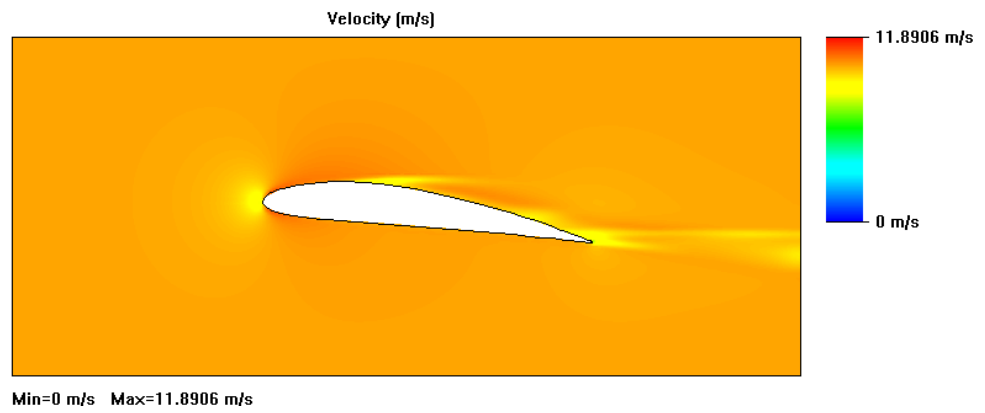


FIGURA 4. 21 Gráfica de la velocidad del viento sobre el perfil

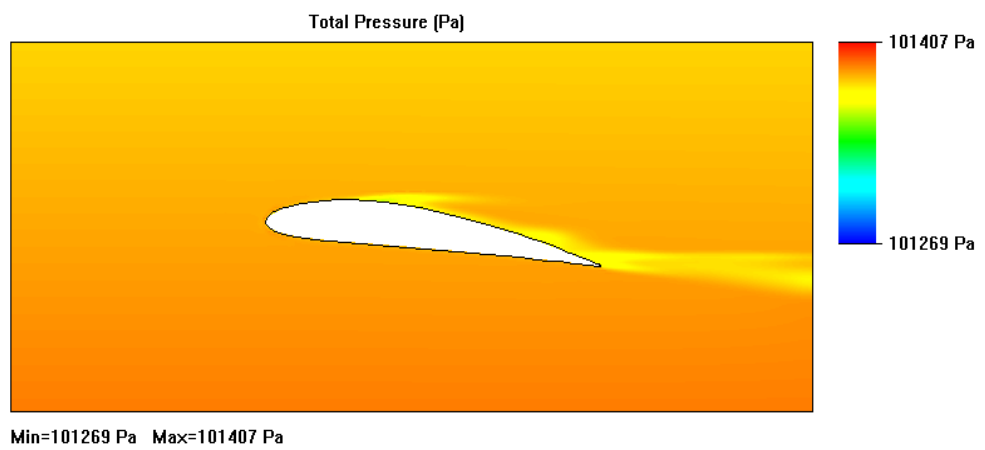


FIGURA 4. 22 Gráfica de la presión total del viento sobre el perfil.

Las figuras 4.24, 4.25 muestran una simulación del perfil estudiado en tercera dimensión las cuales permiten observar el comportamiento de los vectores de presión en el perfil y los vectores de sustentación normales al perfil.

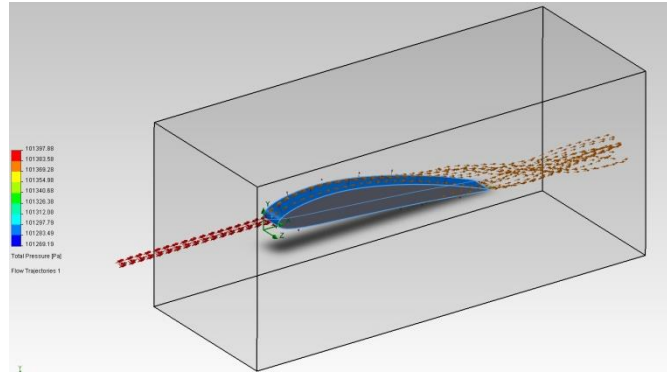


FIGURA 4. 23 Vectores de presión sobre el perfil NACA 4412.

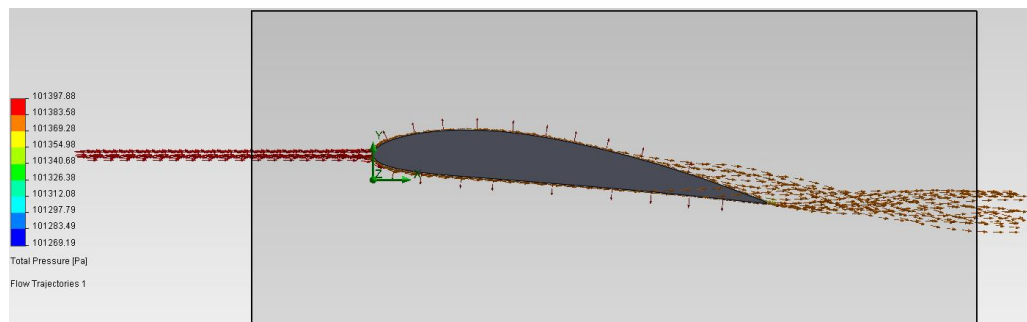


FIGURA 4. 24 Vista frontal de los vectores de presión sobre el perfil NACA 4412.

4.6 Perfil Simétrico Propuesto.

De acuerdo a la metodología que se propone en este trabajo, primero se dibuja un perfil simétrico, en el cual la línea de curvatura máxima tiene un valor igual a cero, posteriormente, se va modificando este valor hasta tener la forma del perfil deseado. Una vez teniendo éste, se obtienen los parámetros aerodinámicos y sus polares se compara de entre varias modificaciones y se elige aquel que tiene una forma aerodinámica adecuada y la máxima fineza posible. Las figuras 4.26, 4.27 y 4.28, muestran los datos y las polares para el perfil simétrico, más abajo, las figuras 4.29 y 4.30 muestran los datos y las polares para el perfil propuesto para esta tesis en donde se pueden observar los datos necesarios para el diseño de la pala de aerogenerador.

Perfil Simétrico:

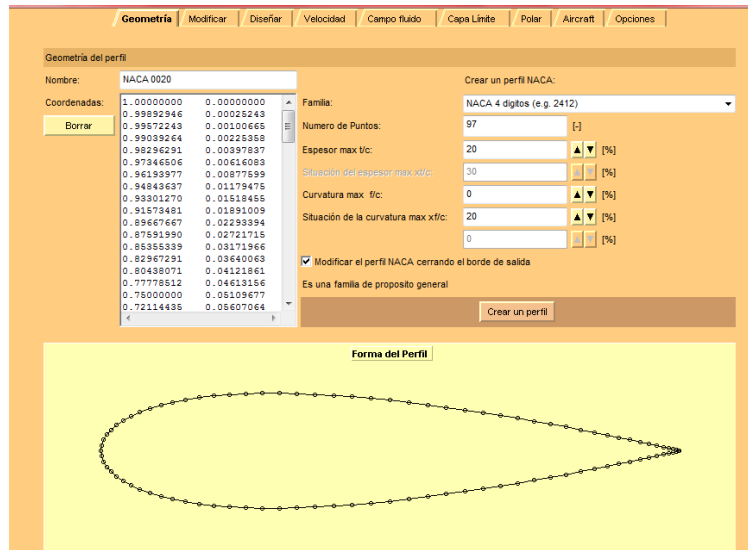


FIGURA 4. 25 Perfil Simétrico y sus parámetros de cálculo.

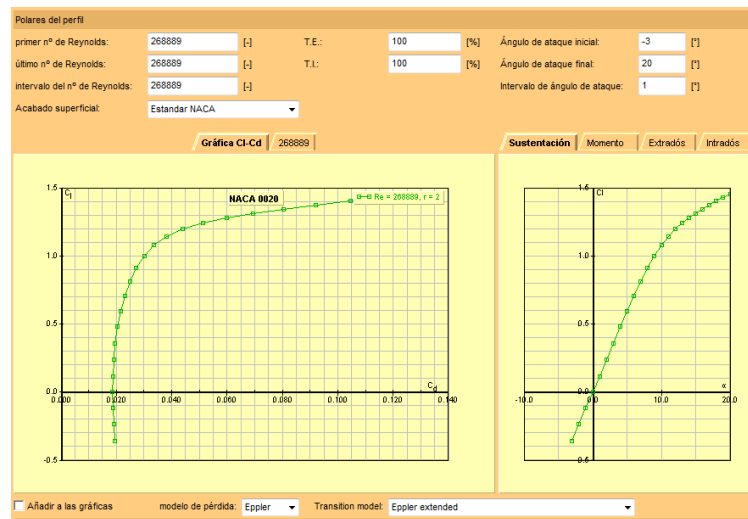


FIGURA 4. 26 Polares del perfil Simétrico.

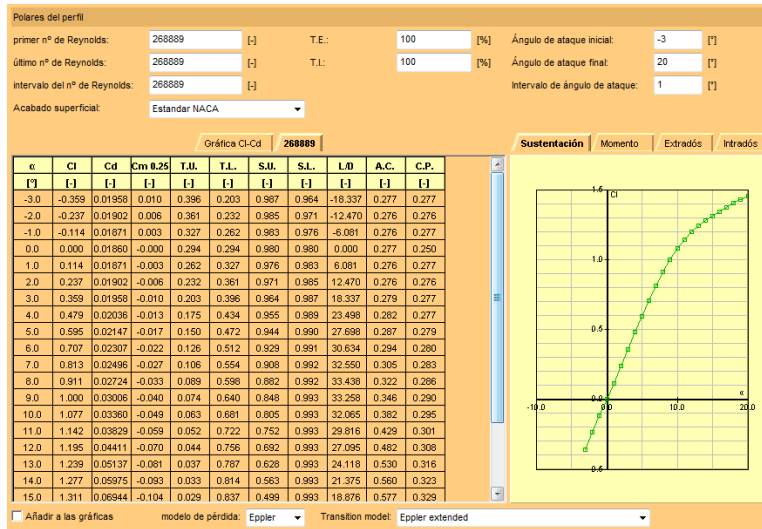


FIGURA 4. 27 Datos para el perfil Simétrico.

4.7. Perfil Final

Este es el perfil que se obtuvo modificando los parámetros del perfil simétrico, a éste se le codificó con el valor 110_2. La modificación se realizó de manera manual cambiando el valor de la curvatura máxima desde cero hasta llegar a un valor en el cual la curvatura le diera al perfil la forma deseada y al mismo tiempo, se obtuviera la máxima fineza posible, esto con el fin de que el alabe extraiga la máxima potencia que pueda obtener del viento.

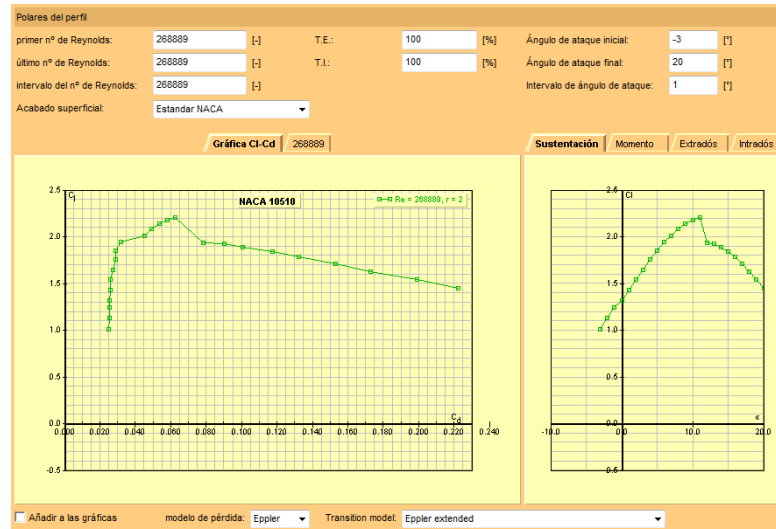


FIGURA 4. 28 Polares para el perfil propuesto

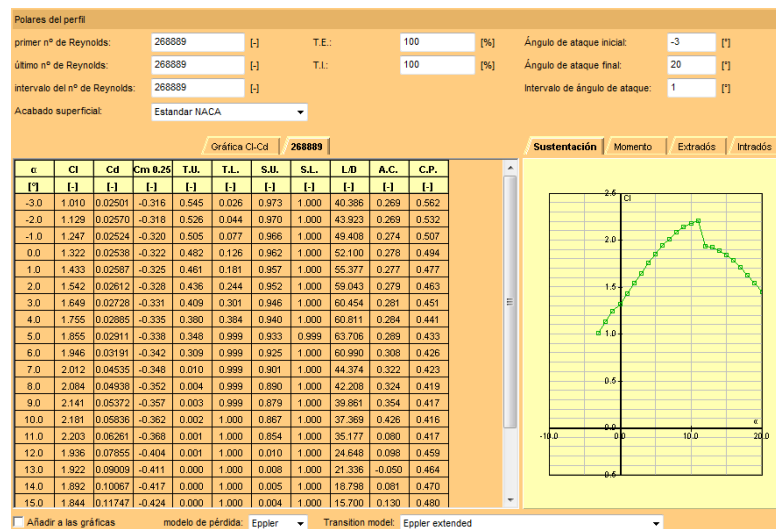


FIGURA 4. 29 Datos para el perfil propuesto.

Como se mencionó anteriormente, el perfil propuesto 110_2 se eligió como óptimo para las condiciones de viento de pachuca debido a las características de espesor, curvatura, ángulo de ataque α y fineza ε , los resultados del análisis en el simulador se muestran en la figura 4.31, en donde se puede apreciar las características de presión total y velocidad total, como era de esperarse, la presión máxima en el perfil se encuentra en el intrados mientras que una presión menor se observa en el extrados, en el caso de la gráfica de la velocidad se puede observar que ésta es casi constante a lo largo del perfil y solo baja un poco en la parte final del perfil, también se puede apreciar el desprendimiento de la capa límite a lo largo del perfil y la turbulencia que se genera cuando el aire termina de recorrer el perfil.

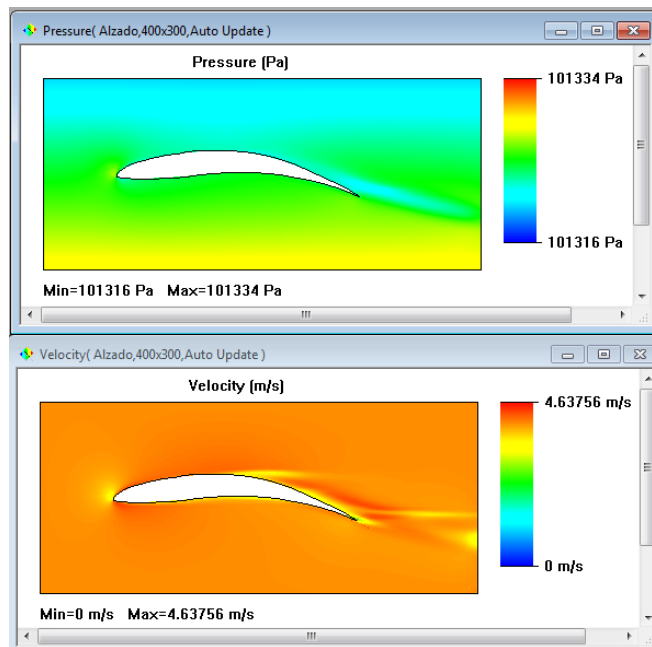


FIGURA 4. 30 Características de presión y velocidad en el perfil propuesto.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados de la simulación para el perfil propuesto en la tesis, se observa que la fuerza de sustentación es de 9.39N,

TABLA 4. 4 Resultados obtenidos con Flow Simulation para el perfil propuesto.

	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta
SG Av Total Pressure 1	[Pa]	101323.7348	101323.7112	101320.9293	101323.8173	2.887975481
SG Av Velocity 1	[m/s]	0	0	0	0	0
SG Normal Force 1	[N]	0.217020392	0.306754998	0.193602957	9.388468398	9.194865442
SG Force 1	[N]	0.218500841	0.308411844	0.195044091	9.396719176	9.201675085
SG X - Component of Force 1	[N]	0.064070231	0.126386768	0.056431582	6.227577503	6.171145921
SG Y - Component of Force 1	[N]	0.208896201	0.275006235	0.186565399	7.036732886	6.850167488

4.8 Tabla de resultados obtenidos.

En la tabla 4.5, se muestran las características de diseño para el alabe propuesto en esta tesis, el cual en primer lugar, se dibujó simétrico para comprobar que perfiles de éste tipo tienen poca eficiencia aerodinámica, después se fueron moviendo los parámetros de espesor y curvatura los cuales arrojaron los datos que se muestran en la tabla, cabe hacer mención que en la primera fila se colocaron los datos del perfil NACA solo para fines comparativos con los expuestos anteriormente, se eligió un TSR de 6 para todos los perfiles ya que para perfiles de mediana velocidad el rango de valores de ésta característica es de 4 a 12 y en la mayoría de diseños se elige un valor como el propuesto ya que ha demostrado ser un valor adecuado para el diseño.

TABLA 4. 5 Características de diseño para el alabe propuesto.

Perfil	C_L	C_D	C_L/C_D	C_P	TSR	α	Espesor Máx. t/c	Curvatura Máx. f/c
NACA 4412	1.3514	0.02	62.5	0.349	6	7°	8	10
PROPUESTO	1.289	0.0261	49.424	0.376	6	6°	8	10

PROPUEST O SIMÉTRICO	0.911	0.027 2	33.43 8	0.286	6	8°	20	0
PROPUEST O 105	1.412	0.032 1	44.04 2	0.390	6	6°	20	5
PROPUEST O 110	1.785	0.035 1	50.89 6	0.451	6	3°	20	10
PROPUEST O 110_1	2.026	0.036 3	55.81 7	0.427	6	6°	15	10
PROPUESTO 110_2	1.934	0.028 3	68.37 8	0.439	6	5°	10	10
PROPUEST O 110_3	1.730	0.025 4	68.11 0	0.411	6	4°	8	10

4.9 Análisis de Fuerza aerodinámicas

Una manera de comprobar la optimización del perfil es en base a las fuerzas que actúan sobre el mismo, el siguiente procedimiento describe cómo se obtuvieron datos que muestran tanto las fuerzas de sustentación como las de arrastre, los cuales se graficaron para llevar a cabo un análisis de los resultados.

1. El perfil analizado anteriormente se exporta a SolidWorks, y se crea una figura en tres dimensiones con el ángulo de ataque obtenido.
2. Se abre la aplicación del mismo software llamada FlowSimulation, se crea un nuevo análisis, proporcionando las condiciones de frontera adecuadas para dicho análisis, una vez hecho esto, se eligen cuáles los parámetros que se quieren obtener con el análisis y se corre el programa.
3. Al término de la ejecución, se le pide al software que muestre los datos en una hoja de cálculo.

En este trabajo se llevó a cabo el análisis de las fuerzas de sustentación y de arrastre con diferentes velocidades de viento empezando desde 5 m/s hasta 0.5m/s en pasos de 0.5 m/s, las gráficas con los resultados de ese procedimiento se muestran en las figuras 4.31 y 4.32.

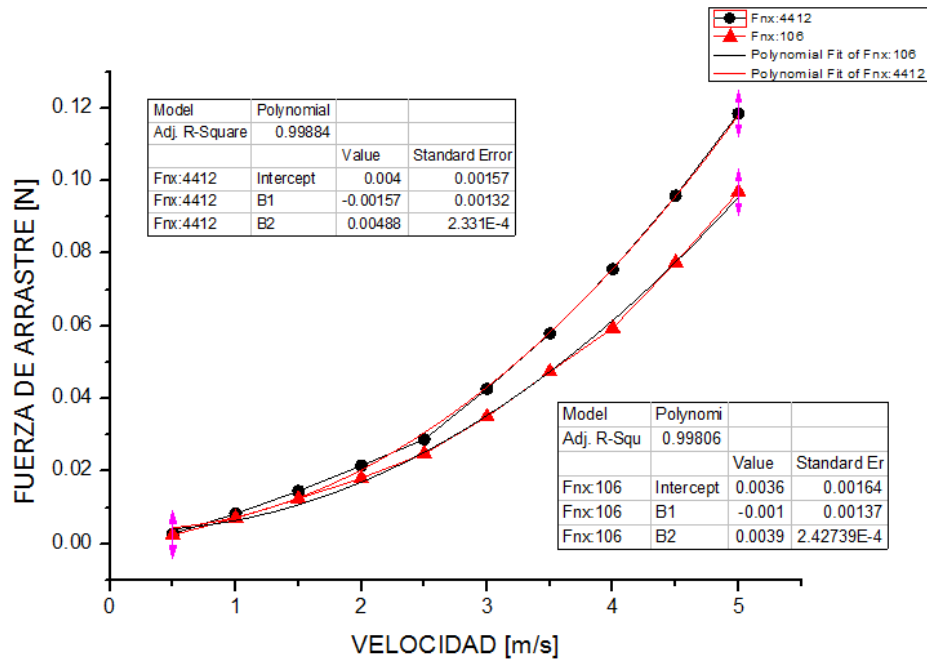


FIGURA 4. 31 Fuerza de arrastre respecto a la velocidad del viento.

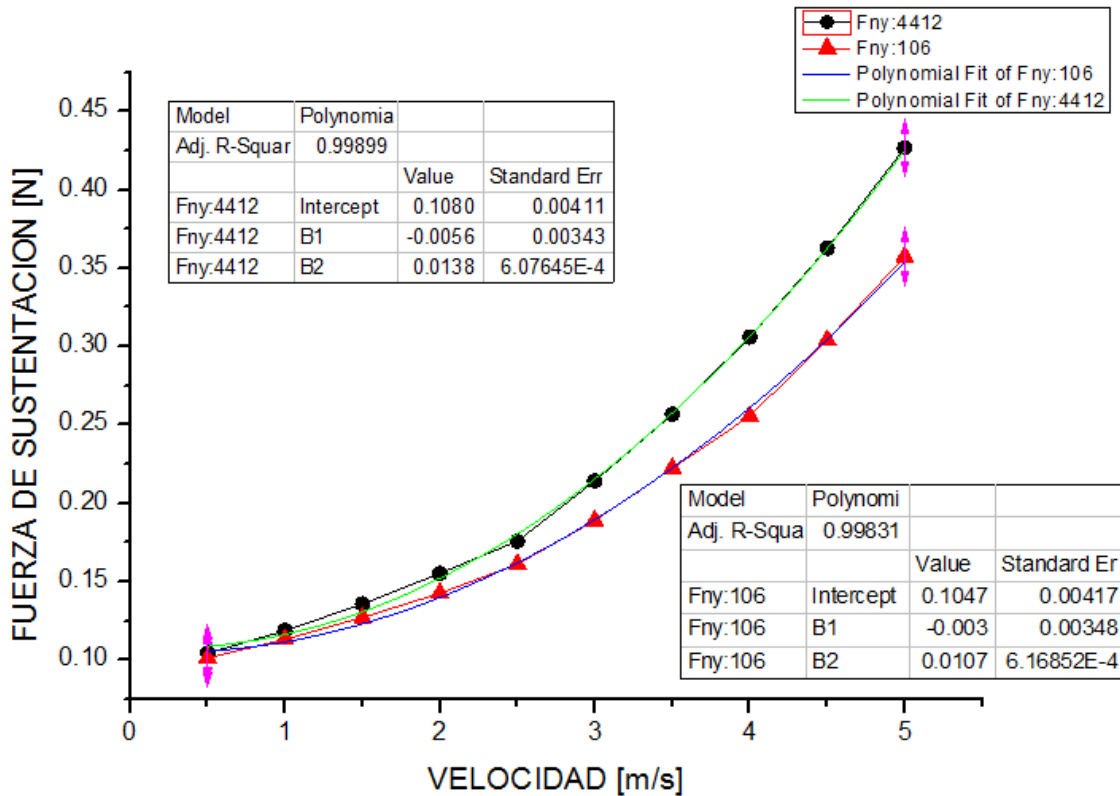


FIGURA 4. 32 Fuerza de Sustentación respecto a la velocidad del viento.

Las gráficas anteriores muestran el comportamiento de la fuerza de arrastre entre el perfil propuesto (110_2) y el perfil de comparación (4412) también se graficó la curva del mejor ajuste con base en un análisis de regresión que permitiera conocer el tipo de curva que se obtuvo y la desviación respecto a la curva de la fuerza. Se observa que el comportamiento del perfil 4412 es lineal a velocidades altas por arriba de los 3 m/s este comportamiento era de esperarse debido a que este perfil está diseñado para trabajar de manera óptima a velocidades arriba de lo 10m/s, como se observa incluso la desviación de la curva de ajuste es prácticamente cero en esta zona, sin embargo, a velocidades bajas, la desviación de la curva del mejor ajuste empieza a aumentar, debido al diseño del perfil. En el caso del perfil (110_2) se puede observar un comportamiento casi lineal alrededor de los 3.7 y hasta los 2.3 m/s incluso la recta del mejor ajuste en esta zona muestra una desviación prácticamente cero, esto debido al diseño del perfil ya que se buscó que su comportamiento fuera el mejor a velocidades por debajo de los 4 m/s, este comportamiento curvo de la fuerza en el intervalo de velocidades antes mencionado, hace que el proceso para manufacturar el perfil sea un tanto más complicado pero se puede llevar a cabo con las técnicas de manufactura avanzada a partir de programación CNC. El comportamiento de la fuerza de sustentación es similar al de la fuera de arrastre aunque se observa en la gráfica correspondiente que a velocidades arriba de los 2.5 m/s su comportamiento aunque es curvo, es un tanto más estable ya que se

puede observar que la curva del mejor ajuste casi está pegada a la curva de la fuerza y solo hay una ligera desviación entre los 3.6 y 4.5 m/s. Esto permite suponer que el comportamiento del perfil a velocidades por abajo de los 4 m/s es estable en cuanto a la fuerza de sustentación que es la que más interesa en este análisis.

4.10 Conclusiones del Capítulo

Una de las piezas más importantes en la construcción de un aerogenerador es la pala que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual es convertida a su vez en energía eléctrica. Para la construcción de palas eficientes, se debe elegir un buen perfil aerodinámico que maximice la fuerza de sustentación y minimice la fuerza de arrastre que actúan sobre la estructura, para esto se planteó en este trabajo el uso de herramientas de diseño de perfiles aerodinámicos que permiten plantear el perfil ya sea a partir de uno ya usado en este tipo de estructuras o se puede hacer uno de acuerdo a la geometría propia de dichas estructuras. Para esto se propuso el diseño de un perfil simétrico en SolidWorks el cual a partir de los cálculos de los ángulos de incidencia β , el ángulo de calado δ y el ángulo de ataque α se pueden realizar las modificaciones pertinentes a la curvatura máxima del perfil cuidando asegurándose que el radio del borde de ataque y éste tengan los valores requeridos para absorber la máxima potencia del viento.

Otro factor que debe tomarse en cuenta cuando se modifica un perfil simétrico es el borde de salida ya que debe tener una forma puntiaguda para que al despegarse la capa límite en la salida del perfil se minimice la turbulencia del viento en esta área y con esto se pueda cumplir con el requisito de minimizar la fuerza de arrastre en la estructura.

Una vez que se tiene planteado el perfil en la herramienta de diseño, éste se debe discretizar en coordenadas cartesianas de dos dimensiones, las cuales se deben guardar en un archivo que posteriormente se abre en la herramienta de análisis JavaFoil, en ésta, se mencionó que permite hacer algunas modificaciones en la geometría del perfil propuesto y también se pueden generar las polares del perfil, esto se llevó a cabo en este trabajo para obtener un perfil que entregara la máxima fineza posible y con esto, obtener una eficiencia considerable en el perfil que se propone en este proyecto.

Una vez obtenidas las polares del perfil se guardan los nuevos puntos que describen el perímetro del perfil propuesto, el cual se vuelve a dibujar en la herramienta de diseño para proyectarlo ahora en tercera dimensión y llevarlo a la herramienta de simulación la cual permite figurar el comportamiento del perfil en un túnel de viento virtual.

El software de simulación el cual es una herramienta de SolidWorks llamada FlowSimulation, crea un túnel virtual a partir de las condiciones de frontera que se plantean en dicha simulación en el cual se genera una malla de elemento finito tanto en el túnel virtual como en el perfil a analizar, el elemento de malla que ocupa para llevar a cabo los cálculos que se le pide al software es un elemento cuadrilátero en tres dimensiones el cual puede tener de ocho a veinte nodos en cada elemento dependiendo del número de variables que se generen a partir de las condiciones de frontera.

Con los datos obtenidos en dicha simulación se obtuvieron dos graficas las cuales mostraron la fuerza de arrastre y sustentación del perfil propuesto y del perfil de comparación, en éstas se observó que el perfil propuesto tiene un comportamiento lineal a velocidades de entre tres y cuatro metros por segundo mientras que el perfil de comparación, su comportamiento lineal era arriba de los tres metros por segundo, con lo cual se concluye que el método que se propone para el diseño de perfiles aerodinámicos sin usar un túnel de viento real, es práctico y cuenta con las herramientas adecuadas para el análisis del comportamiento de la estructura a partir de diferentes velocidades de viento, tomado en cuenta todos los parámetros aerodinámicos necesarios para obtener la mejor eficiencia de la pala y la máxima potencia que puede entregar el viento.

Trabajo a Futuro

A futuro se realizará la construcción de una pala de aerogenerador el cual pueda funcionar a velocidades de viento de entre cuatro y cinco metros por segundo las cuales se consideran velocidades bajas de viento y esta máquina pueda ser usada para uso doméstico y con esto se contribuya la economía de las familias y al cuidado del medio ambiente.

Referencias Bibliográficas

[1] Estrada: 2010 Comisión Nacional para el uso eficiente de la energía, Rio Lerma No. 302 Col. Cuauhtémoc, Delegación Cuauhtémoc C.P. 06500, México D.F. http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_612_energia_eolica?page=9 {Comisión}, 2010.

[2] Francisco Aritio: 2009 Campus Empresarial Alcarreno, 162 Ed. 1° oficina 116 19004 Guadalajara. www.repoweringsolutions.com, {IEEE}, 2009.

[3] IIEEE: 2010 Instituto de Investigaciones Eléctricas, Calle Reforma 113, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. Tel: (777) 3623811 y 3623800, Fax 3623881 difusion@iie.org.m, {IEEE}, 2000.

[4] Bathe.K-J: 1996 Finite Element Procedures. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

[5] Gipe.Paul:2000 Energía eólica practica. Sevilla, España Progensa.

[6] Reyes.O:1987 Atlas eólico preliminar de la República Mexicana, Universidad Veracruzana, Facultad de Física. Tesis de Licenciatura. Xalapa de Enríquez, Ver., México, 1987.

[7] C. G. Justus: 1998 WINDS AND WIND SYSTEM PERFORMANCE Philadelphia: Franklin Institute Press.

[8] J. Park: 1989 THE WIND POWER BOOK (ISBN 0-917352-05-X) Published by Cheshire Books, 514 Bryant Street, Palo Alto, CA 94301 USA.

[9] M.G. Galludo ENERGIA EOLICA (ISBN 84-86505-05-4) Ed Artes Graficas Gala S.L. Avda República Argentina, 1 (41011) Sevilla

[10] Wang Cheng Xu THE OPERATIONAL STUDY OF A DARRIEUS WIND TURBINE GENERATOR FOR APPLICATION DEMONSTRATION (ISBN 0-08-034315-5) Dpto de Ingeniería Eléctrica, Tsinghua Univ. Beijing, China. International Solar Energy

[11] Jasen. W.A.M and Smulders. P.T:1977 Rotor Design for Horizontal Axis windmills S.W.D, Netherlands.

{Hengeveld H.J and Paulissen L.M.M:1978}

[12] Hengeveld H.J and Paulissen L.M.M:1978) Matching of wind rotors to low power electrical generators C.W.D, Netherlands.

[13] Novak P:1995 On The Modelling and Partial-Load Control of Variable-Speed Wind Turbines. Chalmers University of Technology, Göteborg,Sweden, August.

[14] GILES, Ranald V. (1969): Mecánica de los Fluidos e Hidraulica. Libros McGraw-Hill Series de Compendios SHAUM. Bogota.

[15] STREETER, Victor; WYLIE, E. Benjamín y BEDFORD Keith W. (2000): Mecanica de Fluidos. McGraw Hill. Novena Edicion. Bogota.

[16] Putnam, P. C.(1947) : Power from theWind, Van Nostrand Reinold Company, New York,

[17] Robert L. Montt.(1996): Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana. S.A.

[18] Erich Hau, (2005). Wind Turbines. Fundamentals, Technologies Application, Economics. 2nd edition. Ed. Springer

[19] A. Betz (1982). Windenergie Und Ihre AUSNUTZUNG DURICH WINDMUH LEN

[20] Manuel Franquesa V. (2009). Castelldefels. Spain

[21] Lysen, E. H (1983). Introduction to Wind Energy 2. Auflage. Amsterdam: Consultancy Services Wind Energy Developing.

[22] Freris: 1990 Wind Energy Conversion Systems. Prentice Hall Press.

[23] Robert Resnick, David Halliday, Kenneth S. Krane. (2001) Física Volumen 1.

[24] Gerhart, P.; Gross, R.; Hochstein, J. (1995.): “Fundamentos de Mecánica de Fluidos”, Addison-Wesley Iberoamericana.

[25] P. K. Chang. (1983.): *Recent Development in Flow Separation*, Pang Han Pub. Co., Seoul, Korea.

[26] Claudio Mataix. (1986): Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidraulicas. Ediciones del Castillo S. A. Madrid. Segunda Edición, Madrid.

[27] I. G. Currie, (1993): *Fundamental Mechanics of Fluids*, 2d ed., McGraw-Hill, New York,

[28] White, F.M.(2003): “Mecánica de fluidos”, McGraw-Hill,

[29] H. Schlichting. (1979): *Boundary Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill, New York.

[30] S.L.DIXON, B.ENG. , PH.D (1998): Fluid Mechanics. Thermodynamics of Turbomachinery, Senior Fellow at the University of Liverpool, FOURTH EDITION in SI/METRIC UNITS

[31] Frank M. White (1997): Fluid Mechanics. WCB.McGraw-Hill. Fourth Edition. Rhode Island.

[32] Clough R.W:1960 The Finite Element Method in Plane Stress Analysis. Proceedings, American Society of Civil Engineers, Second Conference on Electronic Computation, Pittsburgh.

[33] David V. Hutton (2004). Fundamentals of Finite Element Analysis, Mc. Graw Hill Higher Education

[34] Young W. Kwon, Hyohoong Bang (1996). The Finite Element Method Using Matlab.

[35] GERHART, P; GROSS, R Y HOCHSTEIN, J. (1995): Fundamentos de Mecanica de Fluidos. Addison-Wesley. Segunda Edicion. Mexico.

[36] R. M. Olson and S. J. Wright. (1990): *Essentials of Engineering Fluid Mechanics*, 5th ed., Harper & Row, New York.

[37] P. K. Chang. (1976): *Control of Flow Separation*, McGraw-Hill, New York.

[38] Sergio Esteban Roncero (2009). Departamento de Ingeniería Aeroespacial Y Mecánica de Fluidos. o, sesteban@us.es

[39] Clemente Alvares (2006). Energía Eólica. Madrid, España: Instituto para la diversificación y ahorro de energía; Design Foil, Dreese Code, Software, LLC, <http://www.dreese.com/>

[40] Le Gourières, D (1980). Energíe Eolienne. Théorie, conception et calcul, pratique des installations, Paris, Editions Eyrolles.

[41] Hütte (1955). Theorietische Grundlagen Aufage. Berlin: Verlag Wihelm Ernst & Sohn

Anexos:

JAVAFOIL es un programa, que utiliza varios métodos numéricos para el análisis de perfiles de ala de avión y palas de aerogenerador en flujo subsónico para número de Mach menores que uno.

El propósito principal de JAVAFOIL es determinar las características de sustentación, arrastre y momento de superficies de aerodinámicas. El programa primero calcular la distribución de la velocidad en el extradós de la superficie de sustentación. Para este propósito se utiliza un módulo de análisis de flujo de potencial que se basa en un método de panel de orden superior (distribución de vorticidad VARYING lineal). Esta velocidad local y la presión local se relacionan mediante la ecuación de Bernoulli. Con el fin de encontrar el coeficiente de sustentación y el coeficiente de momento de cabeceo de la distribución de la presión se puede generar a lo largo de la superficie.

Después, JAVAFOIL calculará el comportamiento de la capa de flujo cercana a la superficie aerodinámica (la capa límite). El módulo de análisis de la capa límite (un método llamado integrante) desarrolla un análisis a lo largo de la parte superior y las superficies inferiores de la superficie de sustentación, comenzando en el punto de estancamiento. Se resuelve un sistema de ecuaciones diferenciales para encontrar los diversos parámetros de la capa límite. Los datos obtenidos de la capa límite se puede utilizar para calcular la resistencia de la superficie de sustentación de sus propiedades en el borde de salida.

Ambos análisis se repiten para cada ángulo de ataque, lo que da una polar completa de la superficie de sustentación para un número de Reynolds fijo.

Herramientas adicionales para la creación y modificación de superficies de sustentación se han añadido a la caja de herramientas. Estas herramientas están envueltas en una interfaz gráfica de usuario (GUI), que fue diseñada para ser fácil de usar. En comparación con otros programas similares, JAVAFOIL también puede manejar superficies de sustentación de elementos múltiples y simular el efecto de suelo.

Este software se utilizó para modificar las características geométricas del perfil en cuanto a su espesor, curvatura, escala, entre otros parámetros, obtener las polares de los perfiles que analizaron para obtener sus características aerodinámicas, una vez que se obtuvo el perfil con las características adecuadas, se generó otro archivo con las nuevas coordenadas y se incluyó una columna con valores para el eje z que para este caso debe tener un valor de cero.

ANSYS

Existen en la actualidad numerosos programas de análisis de elemento finito, tales como ABAQUS, COSMOC, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, CAEPIPE, etc.; de entre todos ellos se ha elegido ANSYS por tratarse de una herramienta versátil de análisis por elementos finitos, teniendo en cuenta la relación entre la calidad del producto y su coste. Los criterios que se mostrarán a continuación permitirán a los lectores la realización de muchos tipos de análisis estructurales, térmicos, electromagnéticos, de mecánica de fluidos, debido a que ANSYS se trata de un programa de “Uso General”.

El concepto de “Uso General” quiere decir que, en primer lugar, el programa incluye muchas capacidades generales, tales como funciones de procesador (para generar un modelo), soluciones, postprocesador, gráficos, modelado paramétrico y utilidades para que el programa sea fácil de usar. En resumen, no se trata de un programa especializado para resolver problemas, si no que nos permitirá satisfacer muchas necesidades complejas de diseño y análisis.

Estructura de ANSYS.

ANSYS es un software de Elementos Finitos que permite realizar tareas como:

- Construir o importar modelos de estructuras, productos, componentes o sistemas.
- Aplicar cargas al elemento creado.
- Estudiar las respuestas físicas, tales como niveles de esfuerzo, distribuciones de temperatura o campos electromagnéticos.
- Optimizar diseños existentes.
- Realizar pruebas virtuales sobre componentes en etapa de diseño.

ANSYS ofrece una interfaz gráfica sencilla. Este capítulo se dedicará a estudiar el funcionamiento de dicha interfaz, así como otros aspectos importantes para aprovechar el gran potencial que ofrece el software.

Este software se utilizó para obtener algunos parámetros del campamiento de un perfil plano no aerodinámico y una esfera con el fin de comprobar los resultados de análisis teórico con el obtenido en el sistema ya que este como se menciona usa el método de elemento finito para su análisis, sin embargo, se comprobó después que SolidWorks ofrece una herramienta similar a la de Ansys y los resultados obtenidos con Solid son muy similares a los de Ansys por los que se decidió continuar el análisis con SolidWorks.

SolidWorks:

SolidWorks® es un programa de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft® Windows®, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas. Las principales características que hace de SolidWorks® una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo, variacional y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones. Además utiliza el Gestor de diseño (FeatureManager) que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de croquis de operaciones sin tener que rehacer los diseños ya plasmados en el resto de sus documentos asociados. Junto con las herramientas de diseño de Pieza, Ensamblajes y Dibujo, SolidWorks® incluye Herramientas de Productividad, de Gestión de Proyectos, de Presentación y de Análisis y Simulación que lo hacen uno de los estándares de diseño mecánico más competitivo del mercado.

Características generales de SolidWorks®.

- Módulos incluidos en SolidWorks®. Pieza, Ensamblaje, Dibujo, DWGeditor, Simulación/movimiento, Análisis de interferencia, 2D a 3D, Traductores IDF y CAD, Lista de Materiales, Chapa metálica, Superficies, Estructuras, Soldadura, Moldes, Análisis de Elementos Finitos con COSMOSXpress y MoldFlowXpress, Configuraciones y SmartMates (Tecnología Inteligente).
- Herramientas de productividad y de presentación-colaboración. Toolbox, Utilities, FeatureWorks, DesingChecker, Scan to 3D, Routing, Administrator de tareas, Rhino to SolidWorks®, eDrawing, PhotoWorks, SolidWorks Animator, 3D Instant Website, entre otros.
- Herramientas de validación de diseño: CosmosWorks®, CosmosFloWorks® y CosmosMotion®.
- Sectores y ámbitos de aplicación.

Esta herramienta se utilizó para hacer el análisis de las estructuras que se diseñaron y se ensayaron en este trabajo, usando el método numérico de Elemento Finito, lleva a cabo una simulación de dichas estructuras y permite observar su comportamiento en segunda y tercera dimensión, el software cuenta con la herramienta llamada Flow Simulation (FS). Ésta permite proporcionar los parámetros en los cuales la estructura estará interactuando con el fluido, para el caso que ocupa a esta tesis el fluido es el aire, FS genera una especie de túnel de viento una vez que se le han ingresado el perfil y las condiciones de frontera con las cuales estará trabajando, posteriormente hace los cálculos que se solicitan y permite obtener gráficos en dos y tres dimensiones del comportamiento del perfil dentro del túnel de viento virtual generado, así como tablas con los valores calculados de los parámetros que se quieren obtener de dicho análisis.