

**MODELO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LA INTERACCIÓN FLUIDO
ESTRUCTURA (FSI) PARA EL DISEÑO DE LOS ÁLABES DE UNA
TURBINA EÓLICA HAWT**

**DANIEL ALEJANDRO ORTEGA ALONSO
KEVIN ANDREY MOLINA CUADROS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

**MODELO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LA INTERACCIÓN FLUIDO
ESTRUCTURA (FSI) PARA EL DISEÑO DE LOS ÁLABES DE UNA TURBINA
EÓLICA HAWT**

**DANIEL ALEJANDRO ORTEGA ALONSO
KEVIN ANDREY MOLINA CUADROS**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

**MANUEL DE JESÚS MARTÍNEZ
Ingeniero Mecánico, Ph. D**

Codirector

**OCTAVIO ANDRÉS GONZÁLEZ ESTRADA
Ingeniero Mecánico, Ph. D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	19
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	22
3.1 LA ENERGÍA EÓLICA	22
3.1.1 Ventajas y desventajas.	22
3.2 GEOMETRÍA DEL ÁLABE	23
3.3 CARGAS.....	25
3.4 ÁLABES Y CARACTERÍSTICAS.....	26
3.4.1 Tipos de perfiles.....	27
3.4.2 Perfiles aerodinámicos.....	27
3.4.3 Geometría estructural	29
3.5 ANSYS.....	31
3.5.1 Mallado	31
3.5.2 Interacción Fluido Estructura (FSI)	33
4. DISEÑO DEL ÁLABE.....	35
4.1 CONTEXTUALIZACIÓN	35
4.2 ESTRUCTURA	36
4.2.1 Selección de perfiles aerodinámicos.....	37
4.2.2 BEM	38

4.3 OPTIMIZACIÓN DE PERFILES.....	51
4.3.1 Adjoint Solver.....	52
4.4 MODELADO CAD.....	53
5. INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA DEL ÁLABE (FSI)	55
5.1 ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO.....	55
5.1.1 Verificación y validación de las cargas aerodinámicas	57
5.1.2 Malla e independencia de malla.....	57
5.1.3 Resultados fluidodinámicos.	62
5.2 DEFINICIÓN DEL MATERIAL	66
5.2.1 ACP	67
6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	71
6.1 CRITERIO DE FALLA.....	72
7. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	77
8. CONCLUSIONES	79
9. RECOMENDACIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXOS.....	85

LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1. Parque eólico de turbinas HAWT	22
Figura 2. Características geométricas del álabe	24
Figura 3. Guiñada, cabeceo y alabeo	26
Figura 4. Parámetros del perfil aerodinámico	27
Figura 5. Fuerzas producidas sobre un perfil alar	29
Figura 6. Análisis de cantidad de movimiento de un aerogenerador	30
Figura 7. Acoplamiento numérico contra el físico	34
Figura 8: Secciones de un álabe.....	36
Figura 9: Modelo de Rankine-Froude	39
Figura 10. Velocidades tangenciales de la hélice y el viento	44
Figura 11. Descomposición de las velocidades del viento sobre el perfil	44
Figura 12. Fuerzas sobre el perfil	45
Figura 13. Rendimiento de hélices de molinos y turbinas de viento	48
Figura 14: Álabes resultantes. (a) Perfiles seleccionados (morados) y optimizados (azules) y (b) estructura de los álabes	50
Figura 15: Malla tipo <i>C-mesh</i>	51
Figura 16: Campo de flujo y fronteras.....	56
Figura 17. Gráfica de independencia de malla.....	60
Figura 18. Mallado final.....	61
Figura 19. Contorno de presiones con modelo k-omega SST	62
Figura 20. Velocidad del aire a lo largo del álabe	63
Figura 21. Líneas de flujo	64
Figura 22. Contorno de presión en el álabe borde de entrada y de salida respectivamente.....	65

Figura 23. Variación de presión a lo largo del eje de rotación.	66
Figura 24. División detallada del álabe.	67
Figura 25: Distribución de espesores.....	70
Figura 26. Cargas sobre el álabe.....	72
Figura 27. Ángulo de deformación angular en un perfil.	74
Figura 28. Deformación angular a lo largo del álabe.	74
Figura 29. Deformación total.....	75
Figura 30. Criterio Tsai-Wu.....	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Perfiles seleccionados.	37
Tabla 2. Caracterización del álabe con perfiles seleccionados.....	49
Tabla 3: Velocidades y ángulos de ataque del viento sobre los perfiles de cada sección.....	53
Tabla 4. Parámetros de refinamiento.....	58
Tabla 5. Independencia de malla.	59
Tabla 6. Propiedades de los materiales.	68
Tabla 7. Espesores y distribución de las láminas.	69
Tabla 8. Desplazamientos en el borde de ataque y salida.....	73
Tabla 9. Torque inducido en un álabe.....	78

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Código BEM	85
Anexo B. Coordenadas generadas	95
Anexo C. Catalogo y especificaciones técnicas turbina NORDEX-N60.....	107
Anexo D. Análisis modal	108
Anexo E. XI Congreso Colombiano de Métodos Numéricos.....	113
Anexo F. International Week of Research, Development and Innovation- SIIDI 2017.	114
Anexo G. Conferencia Internacional de Energía Sostenible & Workshop de Materiales para Nuevas Tecnologías de Energía.....	115
Anexo H. 20th International Conference on Composite Materials and renewable Energy Engineering.....	116

DEDICATORIA

A mi familia por su incondicional apoyo, confianza y cariño a lo largo de mi vida académica y personal, a mi padre por su ejemplo de persistencia, a mi madre por su paciencia y comprensión, a mi hermana por su cariño y apoyo. A mis amigos de la universidad con los cuales compartimos momentos memorables.

Daniel Alejandro Ortega Alonso

DEDICATORIA

*A mis abuelos por su amor, comprensión y esfuerzo para guiarme
A mi madre por sus buenos consejos y apoyo incondicional
A mi familia por las enseñanzas que me han dado
A Lina Caro por su compañía, apoyo y amor a lo largo de mi carrera.*

Kevin Andrey Molina Cuadros

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Manuel de Jesús Martínez por su apoyo y orientación en el desarrollo del proyecto.

Al profesor Octavio Andrés González Estrada por su dedicación, apoyo, orientación del proyecto.

Al semillero de investigación en turbomaquinaria y aerodinámica SITA por el apoyo y el compartir de conocimientos.

RESUMEN

TÍTULO: MODELO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LA INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA (FSI) PARA EL DISEÑO DE LOS ÁLABES DE UNA TURBINA EÓLICA HAWT*

AUTORES: Daniel Alejandro Ortega Alonso
Kevin Andrey Molina Cuadros**

PALABRAS CLAVE: Álabes, BEM, Diseño de perfiles, FSI, Turbina eólica, HAWT.

DESCRIPCIÓN: La investigación en energías renovables es un tema de interés prioritario en la actualidad. En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico del álabes de una turbina eólica, analizando el impacto del diseño del álabes en la cantidad de energía generada, y su respuesta estructural en función de las fuerzas inducidas por el flujo de aire. Para estudiar la relación entre las fuerzas del flujo, las deformaciones y esfuerzos provocados en la estructura, se utilizó un modelo de interacción fluido estructura (FSI), que relaciona la mecánica de fluidos computacional (CFD) y el análisis de elementos finitos (FEA).

La estructura del álabes se realiza por medio de la teoría del momento y el elemento de pala (BEM), tomando como puntos de partida constantes referentes al viento (velocidad, densidad, Reynolds) y la selección de un perfil recomendado por la NACA, RISO, DU o NREL. Posteriormente, se efectúa el mismo procedimiento para un perfil diseñado mediante teorías de desempeño. Teniendo los resultados de estos dos tipos de álabes, se realiza una comparación de los esfuerzos y deformaciones debidos a las variaciones entre el perfil diseñado y el perfil seleccionado, estudiando cómo esta variación afecta la energía generada de la turbina y su integridad estructural.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel de Jesús Martínez, Ingeniero mecánico.

ABSTRACT

TITLE: MODELING THE FLUID INTERACTION STRUCTURE (FSI) FOR THE DESIGN OF A WIND TURBINE BLADE HAWT*

AUTHORS: Daniel Alejandro Ortega Alonso
Kevin Andrey Molina Cuadros**

KEYWORDS: Blade, BEM, FSI, HAWT, Profile design, Wind turbine.

DESCRIPTION Nowadays, research in renewable energy is a subject of priority interest. In this work the mechanical behavior of the blade of a wind turbine is studied, analyzing the impact of the design of the blade on the amount of energy generated, and its structural response as a function of the forces induced by the air flow. In order to study the relationship between flow forces, deformations and forces induced in the structure, a Fluid Structure Interaction (FSI) model was used, which relates Computational Fluid Mechanics (CFD) and Finite Element Analysis (FEA).

The blade structure is made using blade element momentum theory (BEM), taking constant properties related to the wind (speed, density, Reynolds), and the selection of a profile recommended by NACA, RISO, DU or NREL. Then, the same procedure is used for a profile designed using performance theories. Having these results for both types of blades, a comparison of the stresses and deformations due to the variations between the designed profile and the selected profile was made, analyzing the effects on the generated energy and the structural integrity of the turbine.

* Bachelor Thesis

** Physicomechanical Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Manuel de Jesús Martínez, PhD. Mechanical Engineering.

INTRODUCCIÓN

La demanda energética se ha incrementado dramáticamente en el último siglo¹; en la actualidad las energías renovables como la solar, la mareomotriz y la del viento han tomado fuerza al igual que el estudio sobre ellas debido en mayor parte al cuidado del medio ambiente y otros factores como la escasez de recursos fósiles.

La energía del viento ha sido utilizada desde hace 3000 años², desde la antigüedad han existido diseños históricos para hacerlo, uno de ellos era el de los molinos para bombear agua construidos de madera, estos diseños en su mayoría eran pesados e ineficientes, pero fueron reemplazados en el siglo IXX con la aparición de los motores de combustión y la implementación de una red eléctrica extendida, sin embargo a mitad del siglo XX con el desarrollo y gran avance en el estudio de materiales compuestos, y otros avances científicos se han vuelto a popularizar³.

El desarrollo de la energía eólica es dependiente de varios aspectos como algunas de las ramas de la ingeniería: la aerodinámica, resistencia de materiales, mecánica de fluidos y la conversión de energía mecánica a eléctrica, soportada por estudios de viento y otras condiciones ambientales, y finalmente la parte de la manufactura y materiales de todos los elementos presentes.

¹ GASCH, Robert y TWELE, Jochen. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, 2 ed. USA: Springer, 2011. p.1 ISBN 978-3-642-22937-4.

² BURTON, Tony, *et al.* Wind Energy Handbook, 1 ed. England: John Wiley y Sons, LTD, 2001. p. ISBN 978-8-578-11079-6.

³ PETER, Schubel y RICHARD, Crossley. Wind Turbine Blade Design. En: Energies. Abril, 2012. vol. 5, no.12, p. 3425-3449.

La parte más representativa de este tipo de los aerogeneradores son sus álabes, cuya función es capturar la mayor cantidad de energía que el viento posee. El diseño de los perfiles de estos álabes en su principio fue de forma experimental en los molinos para bombear agua o moler maíz, con el tiempo se llegó a un punto en el que se pudo entender matemáticamente el comportamiento del fluido, pero su complejidad era elevada, todos estos estudios y avances se lograron gracias al desarrollo de la industria aeronáutica.

Al plantearse el estudio para el diseño del álabe de una turbina eólica en algunas partes es similar, pero de mayor complejidad que en las alas de un avión, de hecho, los perfiles usados en cada uno de ellos poseen las mismas convenciones realizadas por la NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), no obstante, la geometría a lo largo del álabe debe ser óptima y esta es de una forma muy irregular y compleja. En su construcción se debe trabajar simultáneamente el diseño mecánico y el aerodinámico, ya que estas turbinas en ocasiones llegan a tener una envergadura de hasta 70 metros y las cargas a la que es sometida son variantes y considerables.

El diseño de los álabes es diferente para cada una de las condiciones ambientales dadas, en la mayoría de los sitios donde se implementan se realiza primero estudios de viento y luego se diseña. El uso de herramientas computacionales se hace muy eficiente en este tipo de proyectos ya que la manufactura de estos elementos es complicada y costosa para realizar prototipos que demuestren su comportamiento real, haciéndose así necesario su estudio en detalle.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los desarrollos de energías renovables en la mayoría de los casos dependen del desarrollo tecnológico y científico de punta, en el caso de la energía eólica este se encuentra relacionado con las técnicas de fabricación de sus principales componentes, materiales, geometrías optimas y demás características presentes. La forma como se ha logrado el desarrollo de todos estos aspectos en la parte de optimización y diseño dependen también de matemática muy compleja donde esta es dependiente del sitio (patrones de viento) donde funcionará determinada turbina eólica. Una característica visual de los álabes de una turbina es su gran complejidad y se hace muy difícil predecir su comportamiento, rendimiento, resistencia y el efecto que tiene el viento sobre ellos.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

En el campo de las energías renovables, específicamente en la parte de autogeneración uno de los procesos primordiales y en los que se invierte mucho tiempo, estudio y dinero es el modelado de los perfiles de los álabes. Este estudio involucra el comportamiento del viento con los álabes y a su vez los esfuerzos y deformaciones generadas tanto en los álabes como en los elementos inmediatos tales como el mismo eje, buje, multiplicador y demás elementos mecánicos necesarios para la transformación de esta energía limpia.

Las actuales herramientas computacionales de simulación evitan un porcentaje importante en los gastos de la realización de modelos físicos (prototipos), que en ocasiones son un despilfarre de capital o poco viables como en el caso de las turbinas aerogeneradores. Estos estudios permiten la selección y/o diseño del perfil(es) del álabe para determinado patrón de viento, esto debido a que cada patrón de viento tiene una relación profunda con el perfil del álabe.

En el desarrollo del proyecto se tratan temas relacionados a la programación, aerodinámica, métodos numéricos, modelado y el manejo de softwares poco vistos en la vida académica del estudiante UIS, se tocan en ocasiones en materias electivas no obstante en la actualidad esta rama de la ingeniería mecánica ha tomado gran fuerza debido a sus ventajas e implementación a casi todas sus ramas, en este caso un modelado de sistemas multi-físico, encaminando el proyecto a la misión de la Escuela de desarrollo e investigación de nuevas tecnologías.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el modelo y análisis computacional de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de los álabes de una turbina eólica HAWT y contrastar el análisis con una turbina estándar.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar los perfiles, recomendados por la NACA, RISO, DU o NREL para las turbinas eólicas dependiendo de las condiciones de viento de la región de donde se dispongan.
- Realizar el modelo computacional en ANSYS de los perfiles.
- Diseñar y proponer un perfil generado mediante teorías de desempeño.
- Desarrollar un código para la realización de la geometría tridimensional de los álabes por medio de la teoría BEM.
- Realizar el modelo computacional en ANSYS de los álabes.
- Desarrollar el modelo computacional de la interacción fluido estructura.
- Analizar los esfuerzos inducidos por el fluido y las deformaciones producidas en los álabes.
- Comparar los resultados del modelo propuesto con el estándar.

3. DISEÑO METODOLÓGICO.

3.1 LA ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es una fuente de energía renovable, su explotación es técnica y económicamente viable en condiciones de producción y coste competitivas con fuentes de energía tradicionales como la hidráulica y térmica las cuales son la fuente principal del consumo en Colombia.

Figura 1. Parque eólico de turbinas HAWT



Fuente: <http://elblogverde.com/energia-eolica>.

3.1.1 Ventajas y desventajas. Las principales ventajas de la energía eólica son:

- No existe emisión de gases contaminantes, afluentes líquidos gaseosos, residuos sólidos y tampoco se utiliza agua.
- Es fuente de energía renovable.
- Su uso y posibles incidentes no implican riesgos ambientales como la nuclear.

Las principales desventajas en la energía eólica son:

- El viento no es un suministro constante como el que tendría una termoeléctrica (carbón, aire, agua), sino que es fluctuante y con gran variabilidad tanto en velocidad como dirección, por lo que no todos los lugares son adecuados para la explotación de energía eólica.
- El ruido que producen los aerogeneradores en ocasiones puede ser demasiado alto algunos sitios.
- Tienen un impacto visual elevado.
- Tienen un impacto en la fauna especialmente para las aves.
- Los parques eólicos ocupan una gran cantidad de terreno.
- Los generadores eléctricos inducen campos electromagnéticos que logran causar interferencias con señales como la de los celulares, radios y televisores.

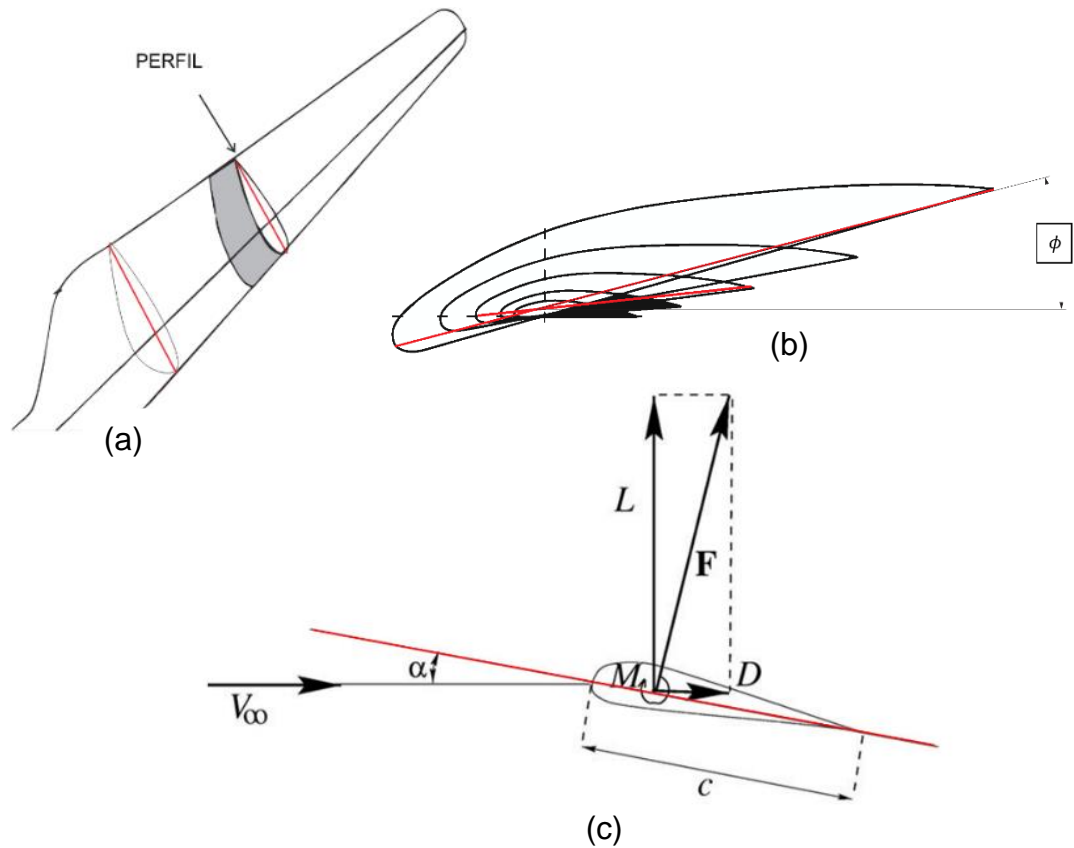
A pesar de lo mencionado la energía eólica tiene gran aceptación social frente a otras formas de generación como la nuclear y la térmica de carbón.

3.2 GEOMETRÍA DEL ÁLABE

El álabe consta de secciones transversales llamadas perfiles aerodinámicos, los cuales van cambiando de forma y tamaño a lo largo del álabe, estos perfiles tienen como línea de referencia su cuerda c la cual se muestra en la Figura 2; esta línea va desde el borde de ataque al borde de salida del perfil, el ángulo de la inclinación de los perfiles a medida que se aleja del eje de rotación de la turbina se llama ángulo de paso Φ figura 2.

Las características geométricas de un perfil como tal se muestran en la figura 2, el ángulo que forma la velocidad del viento relativo con respecto a la cuerda c se denomina ángulo de ataque, al igual se pueden ver las direcciones de las fuerzas aerodinámicas de sustentación (L) y arrastre (D).

Figura 2. Características geométricas del álabe.



Fuente: Elaboración propia.

3.3 CARGAS.

Las cargas producidas sobre los alabes⁴ se pueden definir como:

- Cargas gravitacionales e inerciales.
- Cargas aerodinámicas.
- Cargas de actuación.
- Otras (nieve, polvo, etc.).

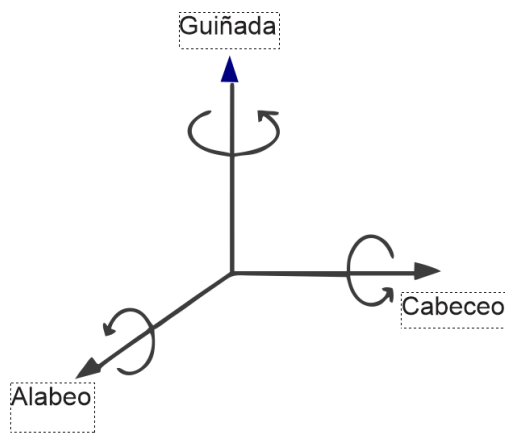
Las cargas gravitacionales e inerciales pueden ser estáticas o dinámicas, que son producto de la gravedad, vibraciones, rotación o actividad sísmica.

Las cargas aerodinámicas son cargas estáticas y dinámicas, las cuales son producidas por el flujo del aire y su interacción con partes móviles (rotor) y estáticas (torre). Este flujo de aire depende de la velocidad promedio del viento y la turbulencia a través de la superficie del álabe, la velocidad de rotación del rotor, la densidad del aire, los contornos aerodinámicos de la turbina, componentes y sus efectos de interacción, incluyendo efectos aero-elásticos.

Por otro lado, las cargas de actuación son el resultado de la operación y el control de las turbinas. Ellas se encuentran en varias categorías incluyendo control de torque de generador a inversor, cargas de freno, control de la guiñada y el cabeceo. En cada caso, es importante el cálculo de cada una de las cargas que recibe el actuador.

⁴ W. Timmer y R. van Rooij. Design of Airfoils for Wind Turbine Blades. En: Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils. Mayo, 2004. p. 1.

Figura 3. Guiñada, cabeceo y alabeo.



Fuente: Elaboración propia

Otro tipo de cargas a considerar son tales como las de arranque, impacto, cargas de hielo etc. que pueden ser considerables en ocasiones.

3.4 ÁLABES Y CARACTERÍSTICAS.

El álabe es una de las partes más importantes de un aerogenerador⁵, ya que esta es la que obtiene la energía proveniente del viento, y la convierte en energía mecánica, para conseguir la energía eléctrica. El principio de funcionamiento es semejante al funcionamiento de las alas de algunos aviones en el que, gracias a la sustentación producida se eleva, en este caso por el movimiento del aire a través del álabe, produciendo su rotación.

⁵ Antonio Lecuona Neumann. La Energía Eólica: Principios básicos y tecnología. Version 4. España: Universidad Carlos III de Madrid, 2002. 81 p.

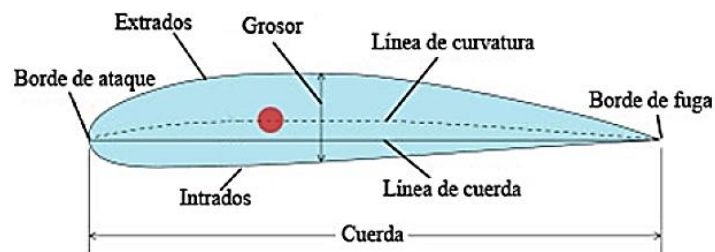
Su estructura consta de dos superficies sustentadoras principales, una de alta y otra de baja presión, además de otras meramente estructurales como sus largueros y su raíz, construidas generalmente de materiales compuestos como la fibra de vidrio y la fibra de carbono⁶. Al ser elementos aerodinámicos dependen de factores no solo climáticos como la velocidad del viento y sus cambios de presión, sino también de su geometría, siendo esta última una de las partes más esenciales.

3.4.1 Tipos de perfiles. En el campo de la aeronáutica y otras ramas se generaron diferentes tipos de identidades y asociaciones, específicamente para turbinas tipo HAWT que mejoraban la generación de energía eléctrica. Las más destacadas son:

- Perfiles NACA (Investigados por la *National Advisory Committee for Aeronautics*).
- Perfiles RISO (Investigados por la *Technical University of Denmark*).
- Perfiles DU (Investigados por la *Delft University of Technology*).
- Perfiles NREL (Investigados por la *National Renewable Energy Laboratory and Airfoils Incorporated*).

3.4.2 Perfiles aerodinámicos

Figura 4. Parámetros del perfil aerodinámico.



Fuente: ANIBAL, Graterol y GERALD, Mayoral. Diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 1 KW de potencia. En: Universidad Simón Bolívar. Diciembre, 2006. p. 32.

⁶ GASCH. *Op.cit.*

Un perfil aerodinámico se divide en dos superficies, la superior (extradós) e inferior (intradós), de esta dependen las presiones altas y bajas que producen la sustentación del perfil. Otra zona es el borde que hace frente a la corriente de aire llamado borde de ataque, que afecta el comportamiento del aire sobre el ala, además de un borde de salida, que actúa sobre el aire al final del perfil disminuyendo o aumentando el arrastre, la cuerda que es una línea de referencia que pasa por el borde de ataque y el borde de salida y define la curvatura máxima del perfil, y por último su espesor. Para la energía eólica se muestran recomendaciones⁷ de cada una de estas características:

- A. Borde de ataque:** debe tener una forma redonda, lisa y suave permitiendo mantener su rendimiento en un mayor rango de ángulos de ataque.
- B. Borde de salida:** debe tener una forma afilada para que el flujo no permanezca en el perfil, por el contrario, se desprenda y disminuya su arrastre.
- C. Curvatura máxima:** debido a estudios⁸ se conoce que para turbinas eólicas el rango de la curvatura máxima acostumbra a ser de 0-15% de la cuerda, además debe ser una curva ligera.
- D. Espesor:** por estudios⁹ se conoce que el rango de espesor máximo acostumbra a ser de 25-35%, su elección depende del mínimo arrastre (aerodinámica) que se pueda tener sin disminuir la resistencia estructural del álabe (resistencia mecánica).

⁷ ANTONIO. Op. cit

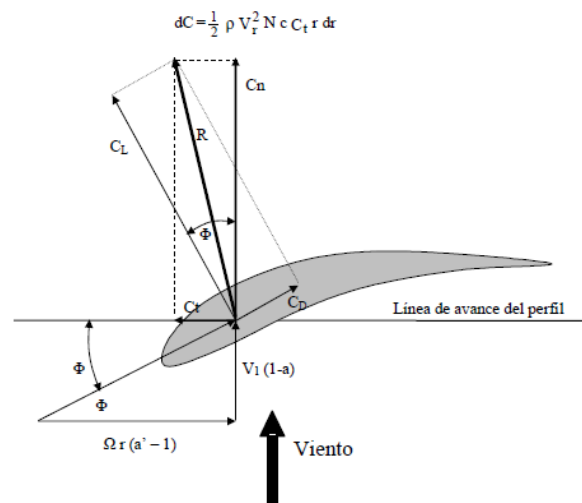
⁸ *Ibíd.*, p. 47.

⁹ *Ibíd.*, p. 47.

3.4.3 Geometría estructural. Para hallar la geometría estructural del álabe se hace uso de una relación entre las ecuaciones de cantidad de movimiento y la teoría del elemento de pala llamado teoría del momento del elemento de pala (BEM)^{10 11}, donde de manera iterativa se puede obtener la geometría del álabe a partir de especificaciones y parámetros de diseño como la potencia a generar, características de viento (velocidad, densidad y turbulencia) y coeficientes aerodinámicos promedio de sus perfiles.

3.4.3.1 BEM (*Blade Element Momentum*): Como ya se mencionó el BEM relaciona la teoría del elemento de pala, el cual descompone la estructura tridimensional del álabe, y hace uso de su parte bidimensional (perfiles aerodinámicos) para realizar el estudio y cálculo de sus fuerzas aerodinámicas, las cuales se muestran en la figura 5.

Figura 5. Fuerzas producidas sobre un perfil alar.



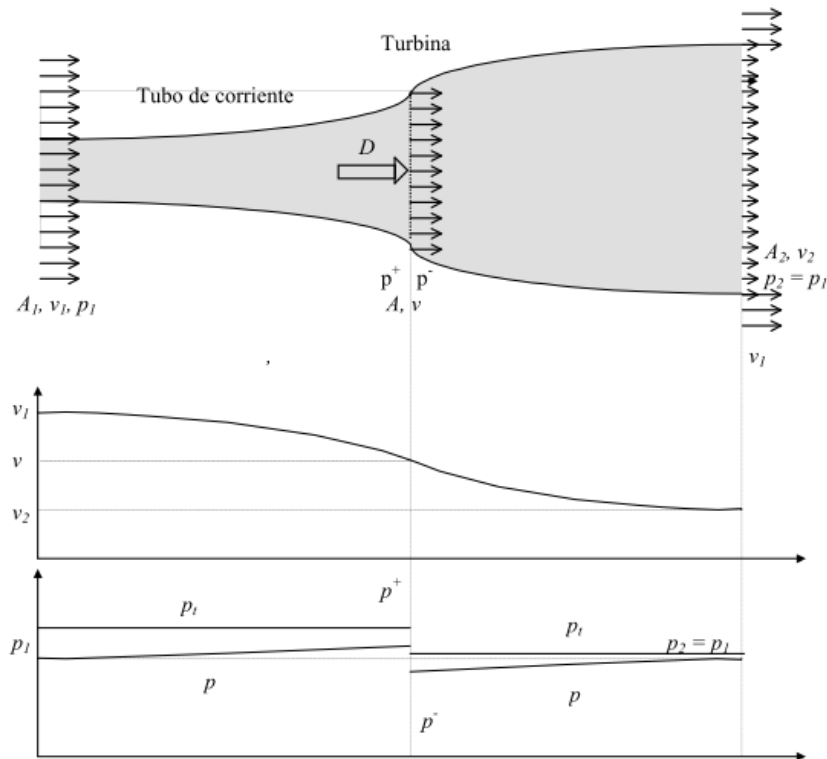
Fuente: RICARDO, A. Bastianon. Cálculo Y Diseño De la Hélice Óptima Para Turbinas Eólicas. 1 ed. Argentina: Jornadas de Energías No Convencionales, 2008. 42 p.

¹⁰ RICARDO, A. Bastianon. Cálculo Y Diseño De la Hélice Óptima Para Turbinas Eólicas. 1 ed. Argentina: Jornadas de Energías No Convencionales, 2008. p. 42.

¹¹ GRANT, Ingram. Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method. Octubre, 2011. vol. 1, no. 1-21 p.1-42.

El otro método llamado cantidad de movimiento analiza el campo de flujo sobre el rotor a través del principio de Bernoulli, donde al igual que la teoría anterior, se calculan las fuerzas aerodinámicas actuantes.

Figura 6. Análisis de cantidad de movimiento de un aerogenerador.



Fuente: RICARDO, A. Bastianon. Cálculo Y Diseño De la Hélice Óptima Para Turbinas Eólicas. 1 ed. Argentina: Jornadas de Energías No Convencionales, 2008. 42 p.

3.5 ANSYS*

ANSYS es un software de simulación en ingeniería, abarca toda la gama de las físicas, utilizado para predecir el funcionamiento del diseño de diferentes tipos de productos, desde lo más convencional como lo es una simple silla, llegando hasta la maquinaria más sofisticada, como aerogeneradores.

Este programa se divide en distintos módulos, en los que se encuentran divididas diferentes disciplinas desde el estudio de fluidos, hasta la mecánica estructural, además se compone de módulos de parametrización y optimización de datos, que van desde la geometría de las piezas hasta los materiales de estas.

En los procesos de simulación en los que se produce una interacción entre un fluido y un sólido, como en el análisis del comportamiento de los álabes de un aerogenerador, es común realizar simulación de tipo FSI, que no es más que el enlace de los módulos *static structural* (ANSYS) y *Fluid Flow* (CFX).

3.5.1 Mallado. Una parte importante en el proceso de simulación de fenómenos físicos por medio del método de elementos finitos es el mallado¹² ya que de este depende la exactitud, por lo que es importante definir algunos aspectos esenciales de este, como el tipo de malla, el tamaño de los elementos o su refinamiento, estos factores definen la calidad de un mallado, teniendo así, calidades de mallado altos en las que se utiliza el refinamiento de mallas y tamaños de elementos muy pequeños.

*ANSYS, Inc Realese 16.2

¹² ANDRES, Rodríguez. Análisis CFD de un álabe del último paso de una turbina de vapor. En: Universidad Politécnica de Madrid. Febrero, 2016. p. 52-56.

Es importante saber que la calidad de un mallado no solo influye en la exactitud de una simulación, sino también en los tiempos de generación y costos computacionales. Por este motivo se debe saber en qué tipos de fenómenos y hasta en qué partes de las geometrías se deben utilizar en mayor o menor medida las diferentes características de las mallas.

Para saber cuándo utilizarlas, se deben tener en cuenta varios factores como los tipos de geometría de las piezas para la simulación, así como los fenómenos físicos que ocurrirán sobre esta.

En la simulación de las fuerzas y esfuerzos que interactúan sobre una pieza es importante saber qué puntos de la geometría se comportan como concentradores de esfuerzos, como las chavetas en un eje; en espacios como estos se deben realizar refinamientos de mallas para saber de manera más exacta y más clara como se extienden estos esfuerzos, y buscar así maneras para aliviarlos. Otro uso importante sobre el refinamiento de mallas es cuando se tienen geometrías demasiado grandes en relación con sus concentradores de esfuerzo, en estos casos el refinamiento es utilizado cerca a dichos concentradores y las demás partes de la pieza son malladas estructuralmente ya que los esfuerzos sobre estas no son tan críticos, ahorrando así los costos computacionales y los tiempos de mallado.

Para geometrías complejas es difícil realizar mallados estructurales con elementos hexaédricos, debido a las difíciles geometrías de las piezas, en estos casos es fácil cometer el error de producir mallas con elementos tetraédricos, en las que para realizar estas geometrías se necesitan demasiados elementos para que se acomoden a ella, teniendo un gasto computacional innecesario. En estos casos son muy utilizadas las mallas mixtas con ambos elementos, que suelen acoplarse mejor a las geometrías, necesitando una menor cantidad de elementos.

Otro aspecto importante es el tipo de fenómeno que se produzca sobre la pieza, en fenómenos que contengan flujos, es esencial tener en cuenta el comportamiento de la capa límite sobre la estructura de la pieza, una de las soluciones es realizar un refinamiento sobre esta, con el fin de que la simulación de la capa límite tenga la mayor exactitud.

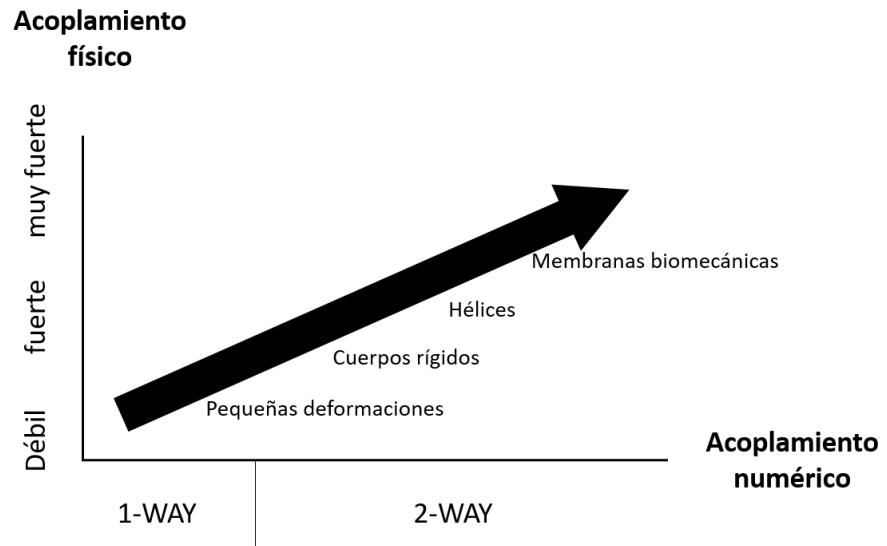
3.5.2 Interacción Fluido Estructura (FSI). Por sus siglas en inglés *fluid structure interaction*¹³, ocurre cuando un fluido interactúa con una estructura sólida o un cuerpo, este flujo puede ejercer presión y/o cargas térmicas que pueden causar deformaciones estructurales lo suficientemente considerables para cambiar la dirección del flujo en sí misma.

En el caso donde estas deformaciones son considerables se suele utilizar una simulación de dos vías (*2-ways interaction*), esto debido a que estas deformaciones afectan los resultados y se hace necesario un tipo de retroalimentación para llegar a una solución mucho más exacta. En el caso opuesto cuando las deformaciones son de alguna manera despreciables se usa por comodidad y ahorro computacional la simulación de una vía (*1- way*).

En la Figura 7 se muestra el acoplamiento recomendado y el método de solución según diferentes fenómenos.

¹³ SEBASTIEN, Lachance-Barrett y EDWIN Corona. ANSYS - Wind Turbine Blade FSI. [En línea]. Tutorial in the wind power class. Italy: Cornell University (Recuperado en junio de 2017.) Disponible en <https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=262012971>.

Figura 7. Acoplamiento numérico contra el físico.



Fuente: Elaboración propia

4. DISEÑO DEL ÁLABE

4.1 CONTEXTUALIZACIÓN

Al comenzar un trabajo de diseño se hace necesario saber el entorno donde se desempeñará el dispositivo, para el diseño del álabe se tomó como referencia el sitio donde se encuentra la mayor densidad de energía eólica en Colombia¹⁴. Ubicado en el departamento de la Guajira en las localidades del Cabo de la Vela y Puerto Bolívar, allí se encuentra situado el único proyecto piloto de energía eólica en Colombia, que consiste en un parque eólico de 15 aerogeneradores con una envergadura de 30 metros que generan una potencia máxima de 1300 [Kw].

En esta región se generan vientos con fuerza y dirección constante durante gran parte del año y con velocidades promedio de entre 7.4 y 11.6 [m/s] ¹⁵, por lo que para las turbinas ubicadas en Jepírachi se tiene una generación de potencia promedio de 376 [Kw] por turbina a la velocidad de 8 [m/s].

Estos parámetros iniciales fueron utilizados tanto para el diseño como para la posterior validación de los resultados.

¹⁴ SEBASTIEN, Lachance-Barrett y EDWIN Corona. ANSYS - Wind Turbine Blade FSI. [En línea]. Tutorial in the wind power class. Italy: Cornell University (Recuperado en junio de 2017.) Disponible en <https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=262012971>

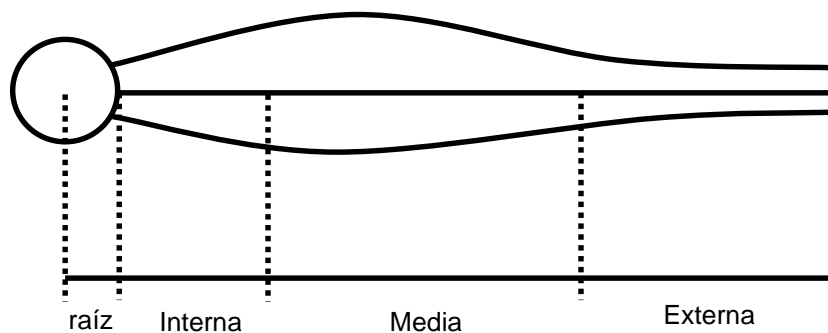
¹⁵ IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Visor Atlas de Viento. [En línea]. Atlas Interactivo - Vientos – IDEAM (Recuperado en julio 2017). Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

4.2 ESTRUCTURA

El diseño del álabe se inicia, sabiendo que su estructura se divide en diferentes secciones¹⁶ y que cada división cumple una función específica, por lo que sus secciones transversales o perfiles varían en tamaño, forma y posición.

Se dividió el álabe en 4 secciones, con una longitud en función de la envergadura (longitud de la envergadura %): raíz (12%), sección interna (25%), sección media (50%) y sección externa (25%).

Figura 8: Secciones de un álabe.



Fuente: Elaboración propia

La raíz tiene las funciones de unir el cubo del rotor con sus álabes y soportar altas cargas estructurales, por lo que tiene una función estructural y su perfil es circular, a diferencia de las demás secciones, que al tener que producir la fuerza de sustentación para hacer mover el rotor, es necesario el uso de perfiles aerodinámicos para sacar mayor provecho a la energía del viento, por lo que para iniciar el proceso de diseño es necesario seleccionar los perfiles aerodinámicos que

¹⁶ ANTONIO. *Op. cit.*

se utilizarán en cada sección, los cuales varían debido a que estos están expuestos a diferentes velocidades de viento y ángulos de incidencia, aumentando a medida que se alejan del eje de rotación; este comportamiento será explicado adelante con ayuda del BEM.

4.2.1 Selección de perfiles aerodinámicos. Para la selección de los perfiles aerodinámicos se partió de perfiles NACA de 6 dígitos recomendados para aerogeneradores de eje horizontal por la NREL¹⁷:

Tabla 1. Perfiles seleccionados.

NACA 63-215	NACA 63-218
NACA 63-221	NACA 63-415
NACA 63-418	NACA 63-421
NACA 64-415	NACA 64-421
NACA 65-415	NACA 65-421

Fuente: Elaboración propia

Como se hablaba anteriormente esta selección se lleva acabo según la función que cumple cada sección del álabe, para la sección interna se utilizan perfiles con altos coeficientes aerodinámicos a bajas velocidades de viento (9 [m/s]), también por estar tan cerca de la raíz del rotor actúan cargas importantes, por lo que deben tener grosores considerables.

¹⁷ FRANCK, Bertagnolio; NIELS, Sorensen; JEPPE, Johansen y PETER, Fuglsang. Wind Turbine Airfoil Catalogue. 2 ed. Inglaterra: Risø-R-1280, 2001. 152 p. ISBN 87-550-2911-6.

La sección media se caracteriza por generar la mayor cantidad de energía y ser la sección más larga, por lo que sus perfiles deben tener altos coeficientes aerodinámicos en un amplio rango de velocidades (13 – 45 [m/s]).

Por último, la sección externa debe producir energía, pero disminuir las pérdidas producidas en la punta de la pala, por lo que sus perfiles deben tener altas relaciones de C_l/C_d , a altas velocidades (55 [m/s]).

Teniendo en cuenta estas consideraciones y las características de los perfiles recomendados se seleccionó: el perfil NACA 64-421 para la sección interna, el NACA 63-421 para la sección media y el NACA 63-221 para la sección externa.

4.2.2 BEM. Teniendo la velocidad de viento de 8 [m/s], la potencia a generar de 376 [Kw] y los perfiles aerodinámicos seleccionados, se inició el desarrollo del BEM¹⁸.

4.2.2.1 Teoría de momento (hipótesis simplificadora) : Primero se planteó la teoría de momento mediante el modelo de Rankine-Froude^{19 20}. Esta toma la hélice como un disco infinitamente delgado, y divide el campo de flujo en 4 secciones mostradas en la Figura 9. La primera en la que el viento entra con velocidad V_1 , presión P_1 y en estado laminar, a medida que avanza hacia la sección 2 este pierde velocidad hasta alcanzar V_2 , en este punto atraviesa la hélice hasta la sección 3 y no se produce un cambio significativo en la velocidad por lo que $V_2 = V_3 = V$, pero si se produce una variación de presión debido a la energía obtenida por la hélice

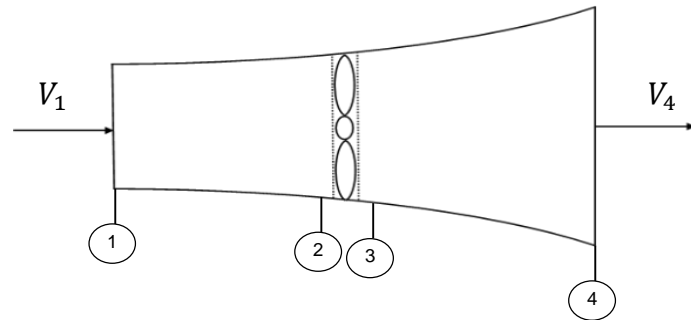
¹⁸ GRANT. *Op. cit.*

¹⁹ Congreso Nacional de ingeniería electromecánica y de sistemas. (13: 19-23, OCTUBRE, México D.F) Memorias. Artículo No: MEC-33, D. Almazo; M. Toledo; M. Vega del Carmen; J. Abugaber; O. Jose Pineda y A. Reyes. Selección y diseño de hélices., 2015. p. 1- 6.

²⁰ P. J. Moriarty y A. C. Hansen. AeroDyn Theory Manual. En: Renewable Energy, 2005, XV, 35 <<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.001255>>.

$P_2 \neq P_3$. Este continúa avanzando hasta salir por la sección 4 con una velocidad V_4 , aquí las presiones se igualan con la presión de entrada $P_1 = P_4$.

Figura 9: Modelo de Rankine-Froude.



Fuente. Elaboración propia

Se utiliza el teorema de Bernoulli para analizar el modelo, esto no se puede realizar a lo largo del campo de flujo debido al salto de presión producido por la hélice, así que se realiza entre las secciones 1-2 y 3-4, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) = (P_2 - P_1) \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_4^2) = (P_4 - P_3) \quad (2)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire.

Sumando las ecuaciones (1) y (2), y teniendo en cuenta las condiciones $V_2 = V_3$ y $P_1 = P_4$, se obtiene:

$$\Delta P = P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (3)$$

Teniendo las diferencias de presión en la hélice se logra hallar la fuerza de empuje ejercida sobre esta:

$$dF_x = \Delta P dA = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) dA \quad (4)$$

Además, por la ecuación de cantidad de movimiento axial y de continuidad:

$$F_x = \int_A V \rho (V dA)$$

$$F_x = V_4 \rho V_4 A_4 - V_1 \rho V_1 A_1$$

$$\text{flujo másico} = \rho V_4 A_4 = \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A$$

Se obtiene la ecuación:

$$dF_x = \rho V_2 (V_1 - V_4) dA \quad (5)$$

Y con ayuda de las ecuaciones (4) y (5) se obtiene:

$$V_2 = \frac{V_1 + V_4}{2} \quad (6)$$

Y al incluir un factor de inducción axial a :

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

$$V_2 = V_1(1 - a) \quad (7)$$

Se logra la ecuación (8) en donde la variable V_4 se encuentra en función de un valor conocido y del factor de inducción axial, dando lugar una ecuación (9), en la que la fuerza de empuje está definida por valores ya definidos.

$$V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (8)$$

$$dF_x = \pi \rho V_1^2 [4a(1 - a)] r dr \quad (9)$$

Ahora se analiza la cantidad de momento angular para la hélice, con el fin de hallar el torque generado sobre esta.

$$T = \frac{dL}{dt}; \quad \frac{dL}{dt} = \frac{dI}{dt} \omega; \quad \frac{dI}{dt} = \frac{dm}{dt} r^2$$

Siendo:

T : torque

L : momento de inercia

I : momento angular

ω : velocidad angular inducida por la hélice sobre el viento

m : masa

Así que:

$$T = \frac{dm}{dt} r^2 \omega; \quad \frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho A V_2$$

$$dT = \rho V_2 r^2 \omega dA = 2\pi \rho V_2 \omega r^3 dr \quad (10)$$

Al igual que en las fuerzas de empuje se introduce un factor de inducción radial (a'), a la ecuación (10) para eliminar la variable ω .

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (11)$$

Dónde Ω : Velocidad angular de la hélice

Recordando la ecuación (7) para eliminar V_2 :

$$dT = 4\pi \rho \Omega V a'(1 - a) r^3 dr \quad (12)$$

Teniendo así las ecuaciones que gobiernan las fuerzas de empuje (9) y los torques (12), por medio de la teoría de momento.

Antes de seguir con la teoría de elemento de pala se debe agregar a estas ecuaciones un coeficiente de corrección de pérdidas Q , debido que las fuerzas axiales y de torque son afectadas por los vórtices creados por las diferencias de presión en las puntas. Este coeficiente es estudiado por diferentes autores y en este caso se escoge el planteamiento de Prandtl:

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{\frac{B}{2}(1-\frac{r}{R})}{r \operatorname{sen}(\phi)}} \right) \quad (13)$$

Donde:

B: número de álabes.

R: Envergadura del álabe.

ϕ : Ángulo de incidencia.

El cual se multiplica por las ecuaciones planteadas anteriormente:

$$dF_x = \pi \rho Q V_1^2 [4a(1 - a)] r dr \quad (14)$$

$$dT = 4\pi Q \rho \Omega V a'(1 - a) r^3 dr \quad (15)$$

4.2.2.2 Teoría del elemento de pala: Como se decía, la teoría del elemento de pala analiza el álabe en secciones bidimensionales dividiéndolo en elementos diferenciales para hallar las fuerzas ejercidas sobre cada uno, sin tener en cuenta los efectos de las secciones contiguas.

Por lo general, el álabe es dividido en 10 a 20 elementos, cada uno de estos asociado a una velocidad de flujo Ωr , cuerda c y ángulo de incidencia ϕ diferente con el fin de aprovechar mejor la energía del viento.

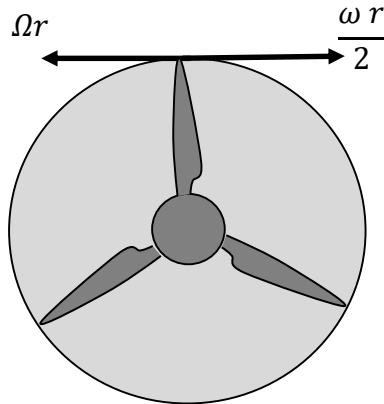
El análisis comienza definiendo los ángulos de incidencia de cada sección, para esto es necesario recordar que sobre la velocidad del aire se genera una velocidad angular ω , producida por Ω y en dirección contraria a esta, como se muestra en la Figura 10. Así que al analizar las velocidades tangenciales del viento que golpean el perfil se produce una velocidad relativa V_{tr} , mostrada en la Figura 11. junto con la velocidad axial del viento que definen ϕ en la ecuación (16).

$$\tan(\phi) = \frac{V_1 (1 - a)}{\Omega r (1 + a')} \quad (16)$$

Un factor importante en el diseño de álabes es la relación de velocidades locales de punta λ_r , que resulta de la ecuación anterior.

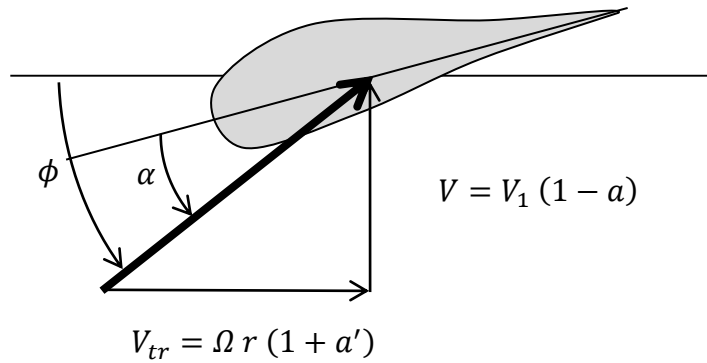
$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_1}$$

Figura 10. Velocidades tangenciales de la hélice y el viento.



Fuente. Elaboración propia

Figura 11. Descomposición de las velocidades del viento sobre el perfil.



Fuente. Elaboración propia

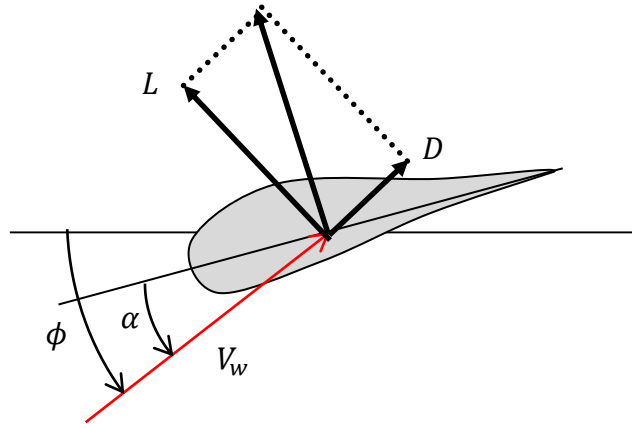
Ahora se procede a definir las fuerzas que actúan sobre el perfil, como se puede ver en la Figura 12. Están asociadas a la dirección con la que el viento incide sobre el perfil (la fuerza de sustentación L , es perpendicular y la de arrastre D , paralela).

Descomponiéndolas tangencial y axialmente:

$$dF_{\theta} = dL \text{sen}(\phi) - dD \text{cos}(\phi) \quad (17)$$

$$dF_x = dL \cos(\phi) + dD \sin(\phi) \quad (18)$$

Figura 12. Fuerzas sobre el perfil.



Fuente. Elaboración propia.

Las fuerzas L y D se definen por sus coeficientes C_l y C_d :

$$dL = C_l \frac{1}{2} \rho V_w^2 c \, dr$$

$$dD = C_d \frac{1}{2} \rho V_w^2 c \, dr$$

Remplazando dL y dD , y agregando el número de álabes B en las ecuaciones (17)

y (18), se obtiene:

$$dF_\theta = B \frac{1}{2} \rho V_w^2 c (C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \, dr \quad (19)$$

$$dF_x = B \frac{1}{2} \rho V_w^2 c (C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)) \, dr \quad (20)$$

Y al multiplicar la fuerza tangencial por el radio se obtiene el torque generado dT :

$$dT = B \frac{1}{2} \rho V_w^2 c (C_l \text{sen}(\phi) - C_d \text{cos}(\phi)) r dr$$

reemplazando V_w^2 en dT y dF_x se tienen las ecuaciones que gobiernan las fuerzas de empuje y las fuerzas radiales, por medio de la teoría del elemento de pala:

$$dF_x = \sigma' \pi \rho \frac{V_1^2 (1-a)^2}{\text{sen}^2(\phi)} (C_l \text{cos}(\phi) + C_d \text{sen}(\phi)) r dr \quad (21)$$

$$dT = \sigma' \pi \rho \frac{V_1^2 (1-a)^2}{\text{sen}^2(\phi)} (C_l \text{sen}(\phi) - C_d \text{cos}(\phi)) r^2 dr \quad (22)$$

siendo σ' la solidez local.

$$\sigma' = \frac{B c}{2\pi r}$$

4.2.2.3 Relación: El método BEM relaciona dichas teorías dividiendo entre sí las ecuaciones de fuerza axial y de torques (ecuaciones (14) entre (21) y (15) entre (22)) con el fin de despejar $\frac{a}{1-a}$ de las axiales y $\frac{a'}{1-a}$ de las tangenciales y tener las ecuaciones que defina los factores de induccion axial y tangencial, con los cuales se hallará la cuerda y ángulo de incidencia en cada sección:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma' (C_l \text{cos}(\phi) + C_d \text{sen}(\phi))}{4Q \text{sen}^2(\phi)}$$

$$\frac{a'}{1-a} = \frac{\sigma' (C_l \text{sen}(\phi) - C_d \text{cos}(\phi))}{4Q \lambda_r \text{sen}^2(\phi)}$$

4.2.2.4 Desarrollo de la geometría: Con ayuda de las ecuaciones planteadas por el método BEM, se comienza con el desarrollo del álabe, como se decía es un proceso iterativo en el que se supone un valor para los factores de inducción axial a y tangencial a' , posteriormente se desarrolla el método para el radio inicial de la sección interna del álabe y se halla c y ϕ , con estos se recalcula a y a' , se comparan estos con sus valores anteriores, si su porcentaje de error son altos se realiza nuevamente la iteración con los nuevos valores, por el contrario si estos son bajos se realiza el procedimiento para el siguiente radio.

Antes de comenzar a hallar a y a' , se tendrá que definir algunos parámetros referentes a la geometría y el funcionamiento del generador (la envergadura de este R , el número de palas B y su velocidad de rotación ω).

Como explica Ingram²¹, la envergadura depende de la cantidad de potencia a generar y está dada por la siguiente ecuación:

$$P = C_p \eta \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3$$

En donde:

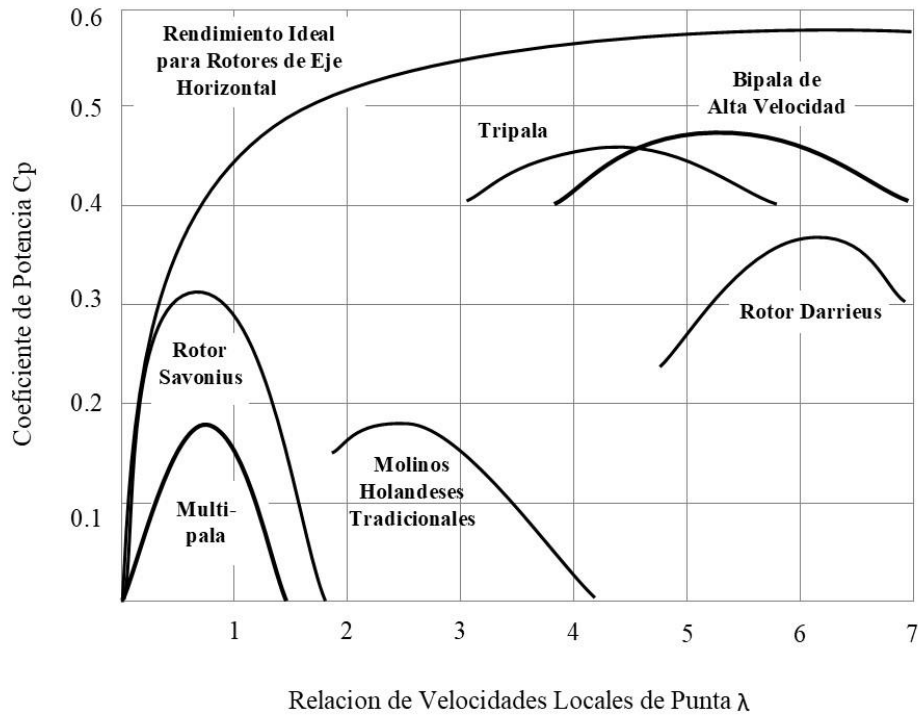
- C_p : Coeficiente de potencia esperado (0.424)²².
- η : eficiencia mecánica y eléctrica (0.9) ver Anexo C.
- R : envergadura del álabe.
- V_1 : velocidad del viento.

De aquí obtenemos la envergadura del álabe.

²¹ GRANT. *Op. cit.*

²² RICARDO. *Op. cit.*

Figura 13. Rendimiento de hélices de molinos y turbinas de viento.



Fuente. RICARDO, A. Bastianon. Cálculo Y Diseño De la Hélice Óptima Para Turbinas Eólicas. 1 ed. Argentina: Jornadas de Energías No Convencionales, 2008. 44 p.

El número de álabes es escogido de acuerdo a la Figura 13, que está basada en prácticas experimentales, teniendo C_p y sabiendo que la turbina es tipo HAWT, la gráfica indica que el número de álabes es 2 ó 3, aunque las turbinas de dos son más económicas se escoge una de tres debido a que esta presenta mayor estabilidad, además es posible hallar la relación de velocidades con la que podemos hallar Ω :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_1}$$

Para hallar un valor inicial de a y a' , Ingram ²³ recomienda el uso de las siguientes ecuaciones:

²³ GRANT. *Op. cit*

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_r}\right); a = \left(1 + \frac{4 \sin^2(\phi)}{\sigma' C_l \cos(\phi)}\right)^{-1}; a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1}$$

Además, para el cálculo de la cuerda recomienda la fórmula:

$$C = \frac{8\pi r \sin(\phi)}{3B \lambda_r}$$

Se realizó un código en el entorno de trabajo de Matlab para el desarrollo de estas ecuaciones y la serie de iteraciones que se presenta en el Anexo A, a partir de este código se obtuvieron los valores de cuerda, ángulo de paso y velocidad de incidencia del viento en función del radio y se puede apreciar en la Tabla 2, además se obtuvieron las coordenadas de los perfiles necesarios para el desarrollo CAD.

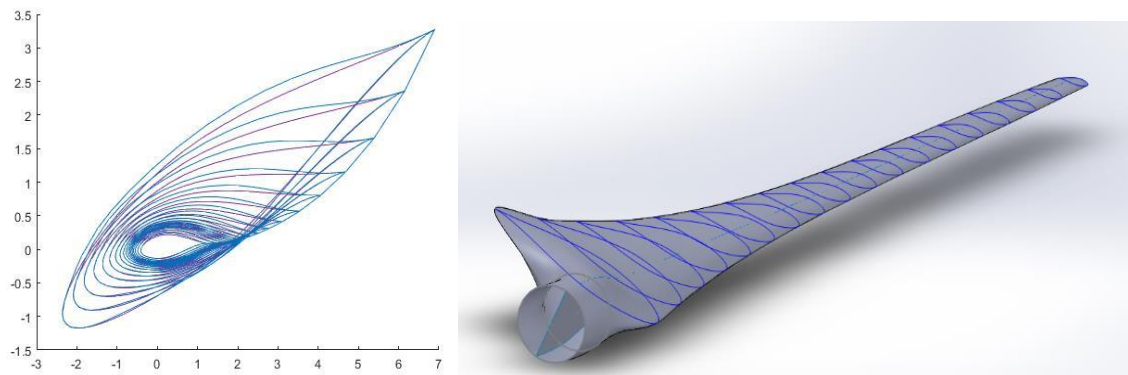
Tabla 2. Caracterización del álabo con perfiles seleccionados.

Envergadura [m]	Cuerda [m]	Angulo de paso [°]	Velocidad tangencial [m/s]
3.8343	5.4524	29.6493	10.5477
5.4319	4.6368	24.4755	13.1427
7.0295	3.9443	20.3823	15.9154
8.6272	3.3640	17.3003	18.8105
10.2248	2.8847	14.9591	21.7857
11.8224	2.4956	12.8186	24.8117
13.4200	2.1856	11.4166	27.8791
15.0177	1.9438	10.2811	30.9727
16.6153	1.7592	9.3451	34.0855
18.2129	1.6209	8.5611	37.2127

Envergadura [m]	Cuerda [m]	Angulo de paso [°]	Velocidad tangencial [m/s]
19.8105	1.5177	7.8951	40.3512
21.4081	1.4388	7.3212	43.4984
23.0058	1.3732	6.8187	46.6524
24.6034	1.3099	6.3681	49.8115
26.2010	1.2379	6.4122	52.9989
27.7986	1.1462	5.9582	56.1614
29.3963	1.0239	5.4197	59.3192
30.9939	0.8599	4.4233	62.4415

Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Álabes resultantes. (a) Perfiles seleccionados (morados) y optimizados (azules) y (b) estructura de los álabes.



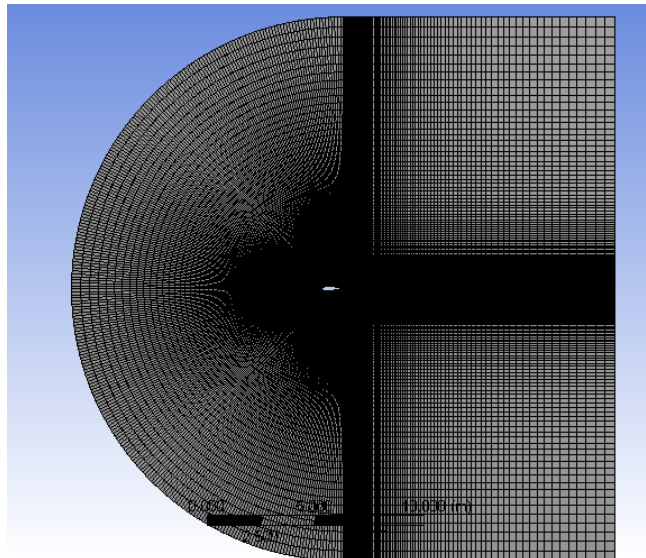
Fuente. Elaboración propia.

4.3 OPTIMIZACIÓN DE PERFILES

Con el fin de obtener un álabe con mejores características aerodinámicas y que genere una mayor cantidad de potencia, se realizó un proceso de optimización de análisis de sensibilidad, en el cual se relacionan las fuerzas aerodinámicas con la geometría, haciéndola variar con el fin de aumentar o disminuir dichas fuerzas, esta optimización se desarrolló con ayuda de los valores hallados en el BEM como las coordenadas, la velocidad del viento y el ángulo de incidencia de los perfiles utilizados.

Para el proceso de optimización se realizó el modelado del campo de flujo sobre cada uno de los 3 perfiles seleccionados, para este se tomó una malla *C-mesh* utilizada en este tipo de análisis la cual se muestra en la Figura 15; como se aprecia el campo de flujo tiene diferentes fronteras, la frontera *Inlet* hace referencia a la entrada del fluido en el cual se tomó como velocidad de entrada las halladas mediante el BEM con su respectivo ángulo de incidencia, la frontera *Outlet* es la salida del fluido en el cual se tomó una presión de salida de 1 Atm y la frontera *Airfoil* es el perfil aerodinámico, el cual se tomó como tipo muro.

Figura 15: Malla tipo *C-mesh*.



Fuente: Elaboración propia.

Al simular el campo de flujo con estas condiciones y con un proceso de independencia de malla mostrado, se obtuvieron coeficientes aerodinámicos similares a valores reales hallados experimentalmente. Para la optimización de los perfiles se empleó *Adjoint solver* explicando su proceso a continuación.

4.3.1 Adjoint Solver. Las funciones de este son:

- Dar información específica de un sistema fluido.
- Puede dar la derivada de una variable del sistema en función a cada una de las entradas del sistema, por ejemplo:
 - ✓ Derivada de la sustentación producida con respecto a la forma de un cuerpo sólido.
 - ✓ Derivada del cambio de presión con respecto a la forma del conducto por donde circula un fluido

Todo comienza definiendo las entradas como lo es el mallado interior, exterior, propiedades de los materiales y condiciones de entrada como la velocidad y su ángulo de incidencia, y salidas como graficas XY, vectores de velocidad y valores escalares. En el proceso de optimización se realiza una retroalimentación desde parámetros escalares, en este caso se hace con el coeficiente de sustentación, variando las entradas mencionadas en este caso la distribución de la malla, debido a que se varia su forma.

Cada uno de los 3 perfiles se simulan con las velocidades y ángulos de incidencia mostrados en la Tabla 3, después se seleccionan las variables a optimizar, en este caso se tomó la fuerza tangencial (*Lift*), posteriormente se inicia un proceso de sensibilidad respecto a la forma del perfil y dicha fuerza.

Tabla 3: Velocidades y ángulos de ataque del viento sobre los perfiles de cada sección.

Perfil	Velocidad [m/s]	Ángulo [°]
NACA 64-421	10	5
NACA 63-421	30	5
NACA 63-221	60	5

Fuente: Elaboración propia.

La sensibilidad de la forma se muestra en la siguiente ecuación:

$$\delta_{(Lift)} = \sum_{mesh} w^n \cdot \delta x^n$$

En donde W^n representa los coeficientes de sensibilidad, los cuales son un campo de vectores sobre los nodos que forman el contorno del perfil y δx^n es el desplazamiento de estos.

En el contorno del perfil se genera un campo de vectores en donde cada uno representa su sensibilidad que es el impacto que tendrá sobre la variable *Lift*, previamente definida para cada perfil. Se realizaron 20 iteraciones modificando los perfiles iniciales y aumentando la fuerza de sustentación con una mejora del 3% y una disminución a su vez del coeficiente de arrastre.

4.4 MODELADO CAD

El modelo CAD del álabe con perfiles seleccionados se realizó a partir de las coordenadas entregadas por el código del BEM, por otro lado, para los perfiles

optimizados primero se importaron las coordenadas generadas por *Adjoint-Solver* al código, con el fin de recalcular el modelo del BEM y obtener la nueva distribución, dichas coordenadas se encuentran en el Anexo B. Teniendo estas geometrías cargadas en el modelo CAD mediante un proceso de barrido se generó la superficie del álabe, con el número de perfiles generados.

Para la sección de la raíz se utilizó una figura cilíndrica ubicada a una distancia de 0.30 veces de la cuerda de los perfiles a partir del borde de ataque, debido a que en dicho punto (línea de presión)²⁴ inciden las fuerzas aerodinámicas, también se implementó un larguero de soporte a lo largo del álabe a la misma distancia del borde de ataque, los álabes resultantes para los perfiles seleccionados y optimizados son mostrados en la Figura 14.

²⁴ Gasch, Maurer, and Heilmann. *Op. cit*

5. INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA DEL ÁLABE (FSI)

Este análisis se realizó de la misma manera para los dos álabes, este se divide en dos módulos principales, el de dinámica de fluidos computacional CFD y el estructural.

CFD es la primera etapa en la que se simuló el campo de flujo sobre el álabe con el fin de hallar el campo de presiones sobre este y poder exportarlos al módulo estructural, otros valores que se pueden hallar son: las velocidades y los torques generados sobre el álabe, estos datos son utilizados para validar el modelo. La siguiente etapa es la simulación estructural donde se hallaron las deflexiones y esfuerzos producidos.

5.1 ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO

El campo de flujo se tomó como un cono truncado siendo la entrada de fluido la de menor diámetro, con el fin de disminuir los tiempos de simulación y aprovechando su simetría se utilizó un tercio de la turbina, esto no afecta los resultados debido a que los 3 alabes están expuestos a la misma interacción con el fluido, con el fin de recrear el movimiento rotacional del álabe, el campo de flujo gira alrededor del eje de rotación del aerogenerador a la misma velocidad de 2 [rad/seg] en este volumen se encuentra la geometría del álabe, la Figura 16 muestra el campo de flujo el cual tiene un radio menor de 120 [m], el mayor de 240 [m] y una altura de 270 [m], el álabe se localiza a una distancia de 90 [m] desde la cara frontal.

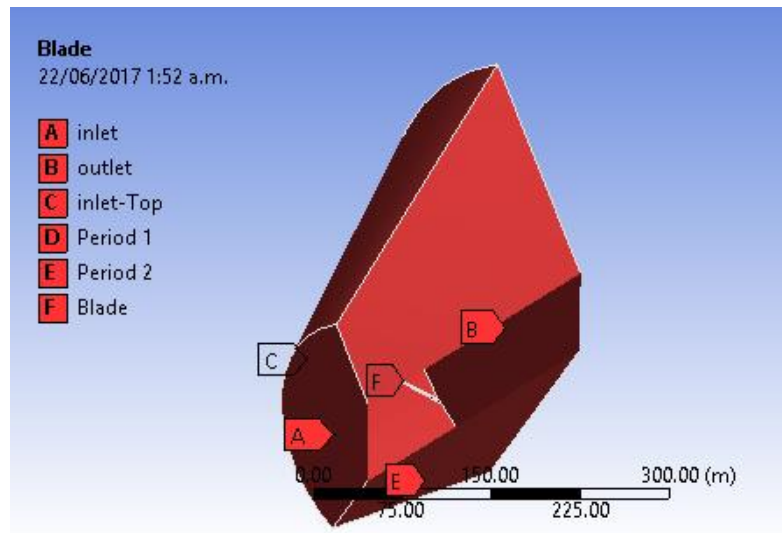
Se definió el nombre de las fronteras, las cuales sirven para realizar el refinamiento localizado de la malla y definir las condiciones de contorno.

- Superficie del álabe (*Blade*)
- Entrada de flujo (*Inlet*)

- Salida de flujo (*Outlet*)
- Superficies periódicas (*period-1* y *period-2*)

Dichas superficies con sus respectivos nombres son mostradas en la Figura 16.

Figura 16: Campo de flujo y fronteras.



Fuente: Elaboración propia

Se procedió a seleccionar los modelos de turbulencia del flujo y aplicar las condiciones de contorno sobre el fluido, para elegir el modelo se analizaron diferentes tipos debido a que estos son composiciones matemáticas con diferentes ecuaciones, aunque unos son mejores en ejercicios donde los ángulos de ataque y velocidades son altas, sin embargo se realizó la simulación con los dos más conocidos y adecuados para una turbina eólica: (k-épsilon, k-omega SST)²⁵ estos dos modelos de turbulencia fueron usados en el campo de flujo del álabes con perfiles optimizados para luego ser comparados. Existe un amplio estudio en estos

²⁵ M. O.L. Hansen, *et al.* State of the Art in Wind Turbine Aerodynamics and Aeroelasticity. En: Progress in Aerospace Sciences, diciembre, 2006, vol.42, p. 285–330.

modelos de turbulencia, el que ha dado mejores resultados en condiciones de ángulos de ataque grades es el k-omega SST este es una combinación de los modelos K-épsilon y el K-omega, en la región cercana al álabe el modelo K-omega es usado y en las regiones completamente turbulentas el K-épsilon. Sin embargo, se probaron los dos modelos de flujo mencionados.

Seguido de la elección del modelo de flujo se imponen las condiciones de contorno, se tomó la velocidad de entrada de 8 [m/s], que actúan sobre las superficies *inlet* e *inletTop*, el contorno de salida outlet es tipo *outlet-pressure*, la superficie en contacto con el álabe *blade* es tipo *Wall*, y por último las zonas de interfaz o de simetría son de tipo *interface periodic*, la condición de periodicidad es una condición de contorno que se usa cuando el flujo a través de dos planos opuestos (*period-1* y *period-2*) en el modelo computacional se consideran idénticos dichos contornos se muestran en la Figura 16.

5.1.1 Verificación y validación de las cargas aerodinámicas

- Flujos máscicos a través de las fronteras:

Para verificar la simulación se vieron diferentes aspectos como el flujo máscico en las entradas, *inlet* e *inlet-top* el cual debería ser el mismo que el de la salida outlet dando como diferencia 0.007 [Kg/s].

5.1.2 Malla e independencia de malla. Para el mallado del fluido se utilizó una malla mixta y cuatro métodos de refinamiento sobre la superficie y el volumen inmediato al álabe:

- *Face sizing*, en la superficie del álabe. Tamaño de elemento.
- *Inflation*, alrededores del álabe. Rata de transición, capas, rata de crecimiento.
- *Body sizing*, esfera de influencia. Radio esfera, tamaño de elemento.
- *Leading Edge*, borde de ataque. Número de divisiones, comportamiento.

Además, se usó un *match control* con el que se logra que se traslapen los elementos de las fronteras periódicas.

Para validar los resultados se variaron los 4 diferentes parámetros de mallado mencionados, con ello se logra la variación del número total de elementos en el fluido, se realizaron 9 simulaciones debido al gasto computacional y el tiempo, estas variaciones se hicieron de la siguiente manera y se tomó como resultado el torque producido por un álabe en el eje de rotación de este.

Tabla 4. Parámetros de refinamiento.

FACE SIZING		INFLATION	
Tamaño ele. [m]	Rata de transición	Capas	Rata de crecimiento
0.50	0.100	6	1.6
0.42	0.085	7	1.5
0.34	0.071	8	1.5
0.27	0.056	9	1.4
0.23	0.049	10	1.3
0.19	0.042	10	1.3
0.15	0.035	11	1.3
0.11	0.027	11	1.2
0.07	0.020	12	1.2
BODY SIZING		ENGE SIZING	
Radio esfera [m]	Tamaño ele. [m]	Divisiones	Comportamiento
19	1.2	700	HARD
21	1.09	810	HARD
23	0.98	920	HARD
25	0.87	1030	HARD
26	0.82	1085	HARD
27	0.76	1140	HARD
28	0.71	1195	HARD
29	0.65	1250	HARD
30	0.60	1305	HARD

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Independencia de malla.

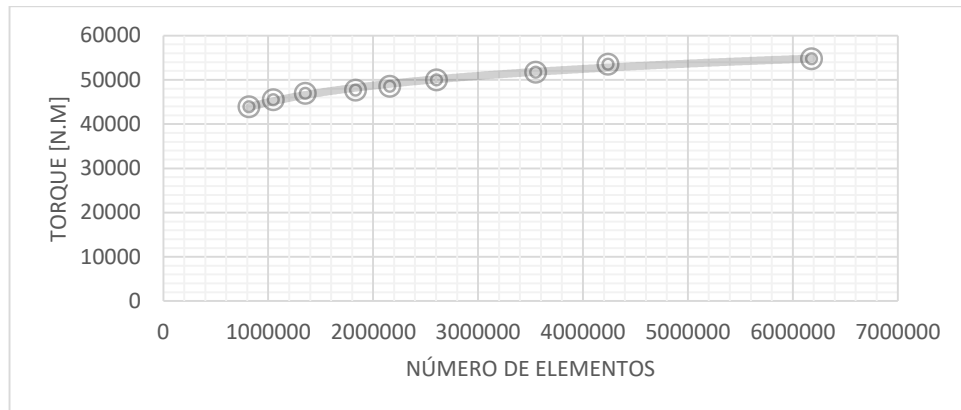
ITERACIÓN	RESULTADOS	
	ELEMENTOS	TORQUE [N.m]
1	818628	43923.446
2	1050185	45500.996
3	1354038	46958.125
4	1833761	47621.878
5	2159193	48518.943
6	2604843	49972.635
7	3550328	51721.849
8	4238208	53504.93
9	6179307	54769.165

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realiza una gráfica de torque en [N.m] contra número total de elementos figura 17, en donde el torque es independiente de la calidad del mallado es decir el número de elementos, presentando un comportamiento asintótico en los mallados con mayor número de elementos.

La independencia de malla se realizó sobre el álabe con perfiles no optimizados debido a que se tenía un valor conocido de torque para una turbina real NORDEX, posteriormente se realizó un mallado aún más fino para el álabe con perfiles optimizados ya que se da por sentado que este álabe vario muy poco en su forma y no se justifica realizar una independencia de malla para el mismo.

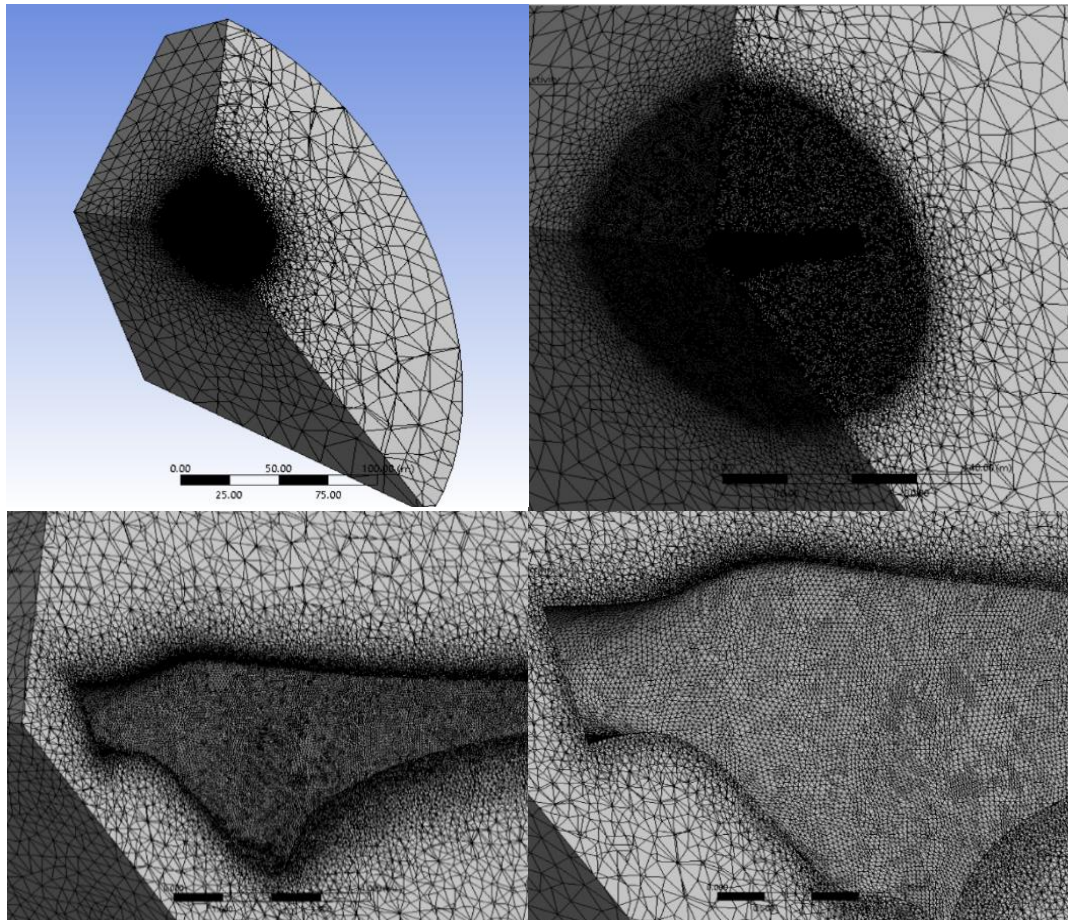
Figura 17. Gráfica de independencia de malla.



Fuente: Elaboración propia.

La malla con el mayor número de elementos del álabe con perfiles optimizados se muestra en la Figura 18, la cual tiene 8'429.773 elementos y 1'851.165 nodos.

Figura 18. Mallado final.



Fuente: Elaboración propia.

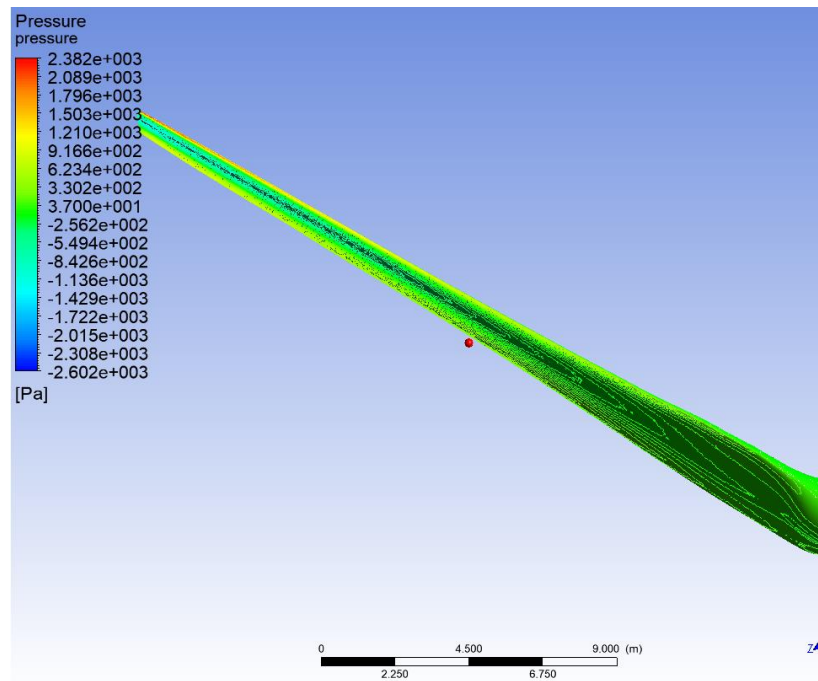
Se tomaron en cuenta dos criterios de mallado principales, el de oblicuidad (*skewness*) y la calidad ortogonal (*orthogonal quality*) recomendados por ANSYS en donde la oblicuidad se considera perfecta de 0 a 0.25, muy buena en 0.25 a 0.5 y suficiente de 0.80 a 0.95. La calidad ortogonal perfecta de 0.95 a 1.00 muy buena de 0.70 a 0.95 y suficiente de 0.15 a 20.

Ambos criterios fueron tomados en cuenta. Verificando la calidad del mallado se observa que la oblicuidad de casi la totalidad de los elementos de la malla se encuentra entre 0.25 y 0.5 estando en calidad Muy Buena con un promedio de

0.2168, y que la calidad ortogonal se encuentra desde 0.63 una pequeña cantidad de elementos en calidad Buena y la mayor cantidad de elementos en calidad Muy Buena con un promedio de 0.79101, así se comprueba que la calidad de malla es adecuada.

5.1.3 Resultados fluidodinámicos. Al realizar la prueba para cada uno de los dos modelos de flujo (k-epsilon, k-omega SST) se realizó una comparación entre los mismos para elegir que cargas posteriormente se usarían para el análisis estructural, la diferencia fue poca pero el modelo con k-epsilon arrojó resultados de torque mayor, debido a esto se eligió trabajar con estas cargas de presión para ser más conservadores.

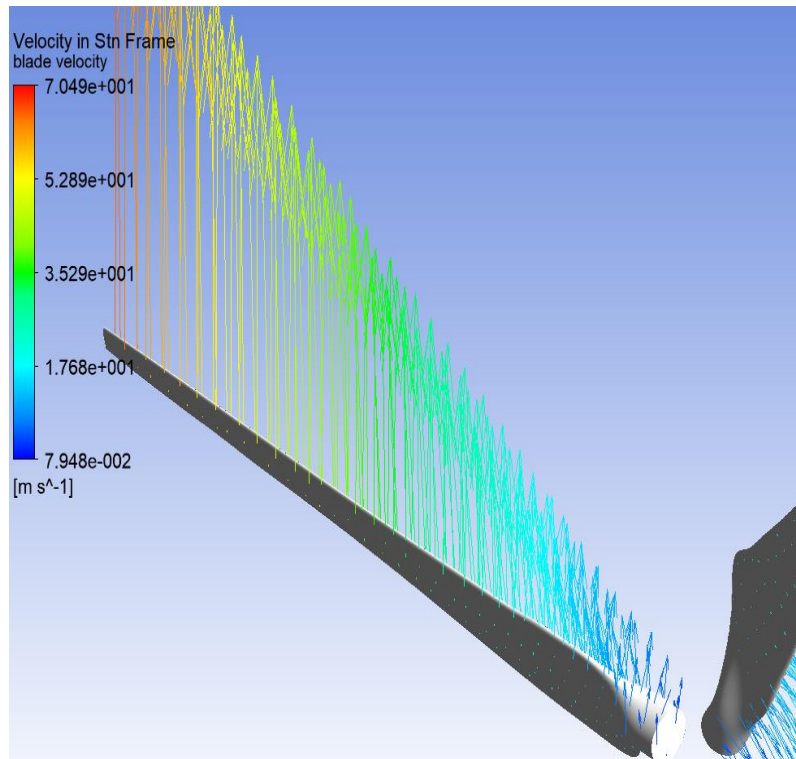
Figura 19. Contorno de presiones con modelo k-omega SST.



Fuente: Elaboración propia.

- Velocidad del aire a lo largo del álabe.

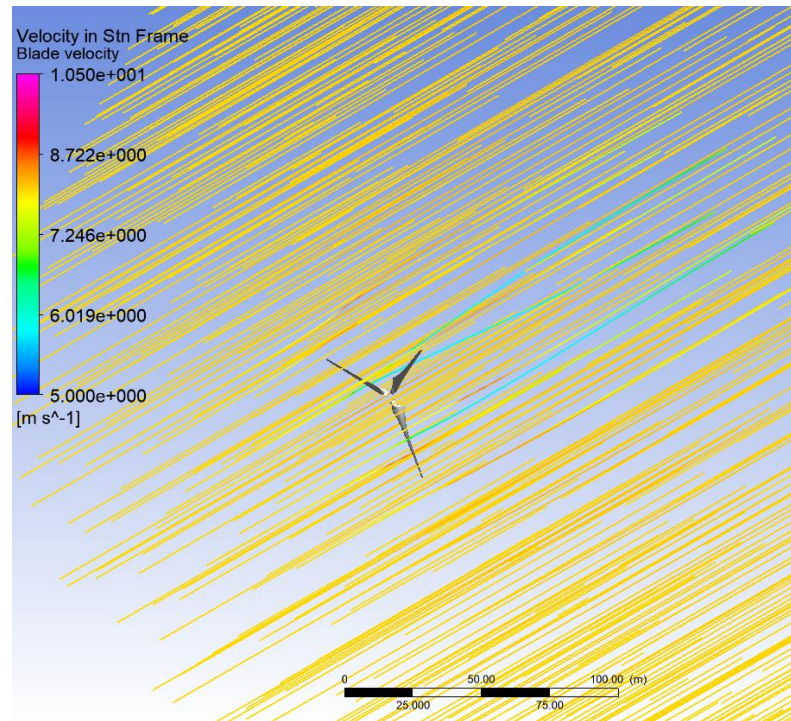
Figura 20. Velocidad del aire a lo largo del álabe.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 20 muestra la solución de las velocidades tangenciales del álabe de los perfiles seleccionados, teniendo una velocidad en [m/s] máxima de 63 y mínima de 9.7, que concuerdan con la velocidad obtenida por el método BEM de 62 y 10 respectivamente, de donde se obtiene un error relativo del 1.6% y del 3% que permiten validar el mallado y las condiciones de contorno evaluadas anteriormente.

Figura 21. Líneas de flujo.

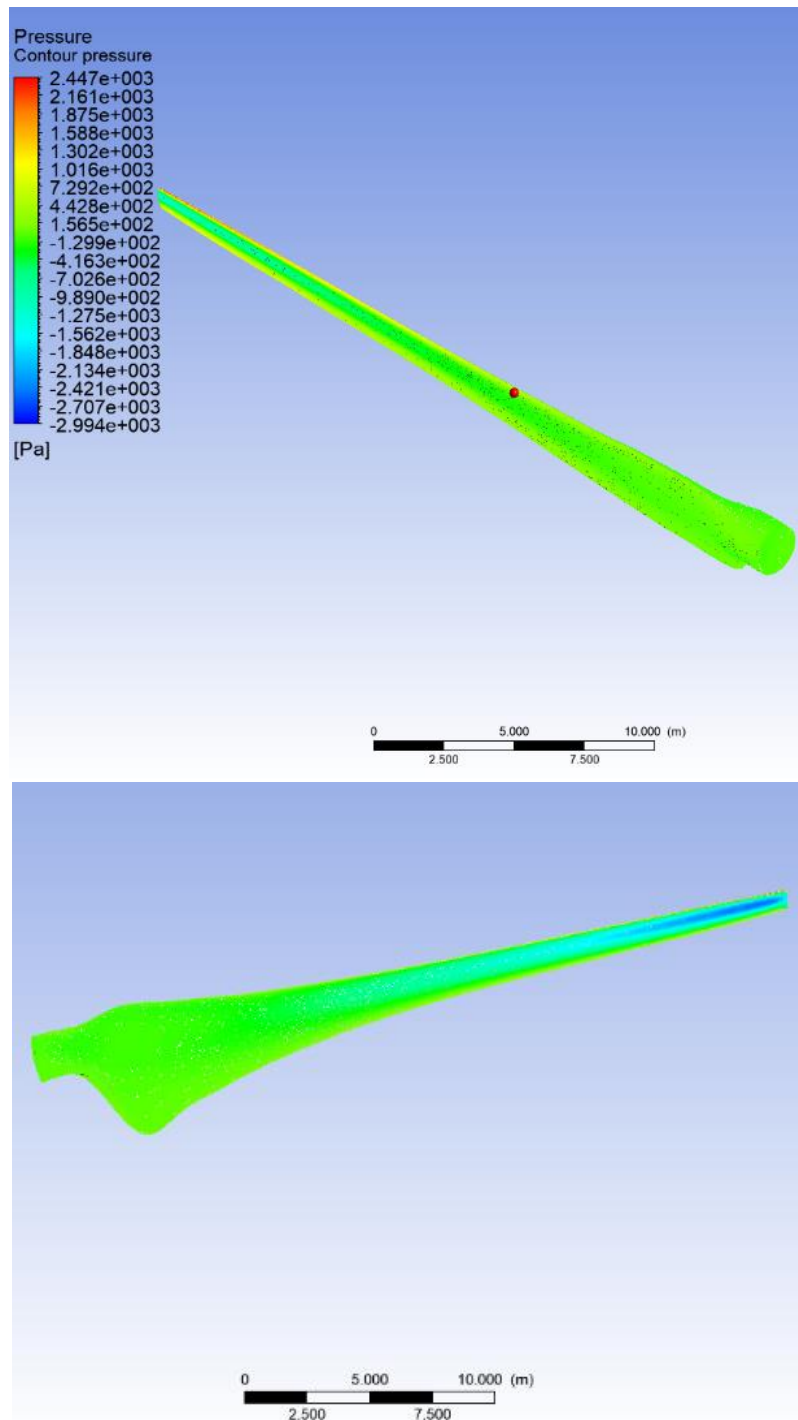


Fuente: Elaboración propia.

- Contorno de presión en el álabe

En la Figura 22 se encuentra el contorno de presiones sobre el álabe en el borde de entrada y salida, respectivamente. En la parte frontal se encuentran las presiones mayores y en la trasera las menores, esta diferencia de presión es la que produce la fuerza de sustentación que apunta a la parte trasera del álabe.

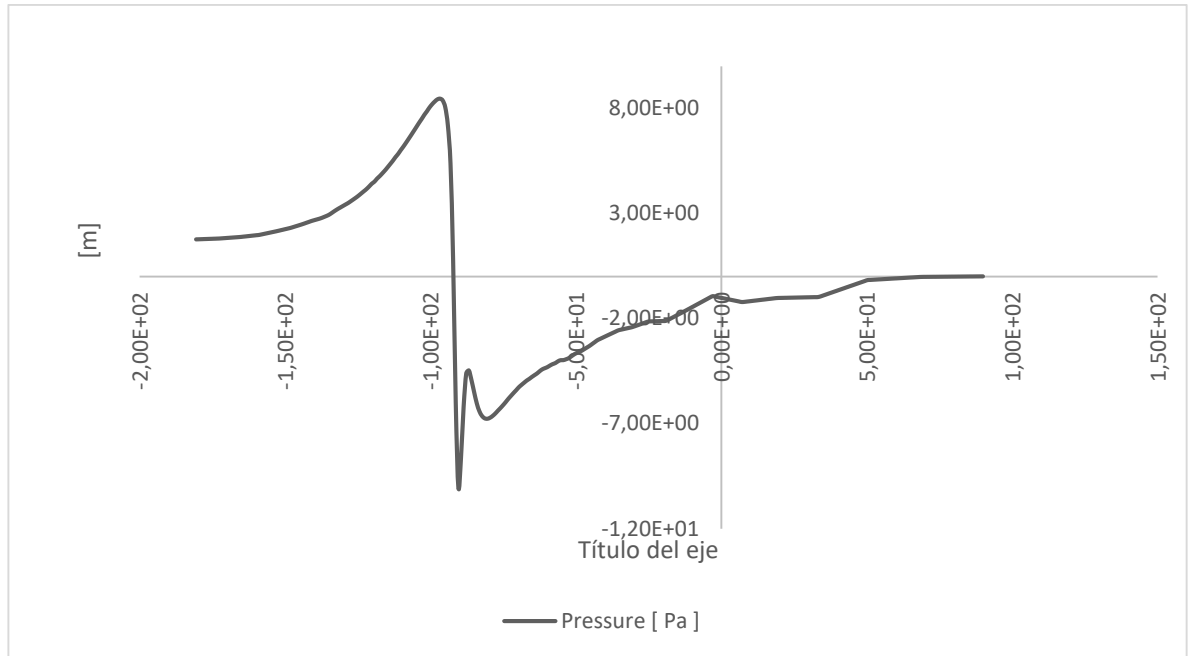
Figura 22. Contorno de presión en el álabe borde de entrada y de salida respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

- Variación de presión en el viento en el eje de rotación.

Figura 23. Variación de presión a lo largo del eje de rotación.



Fuente: Elaboración propia.

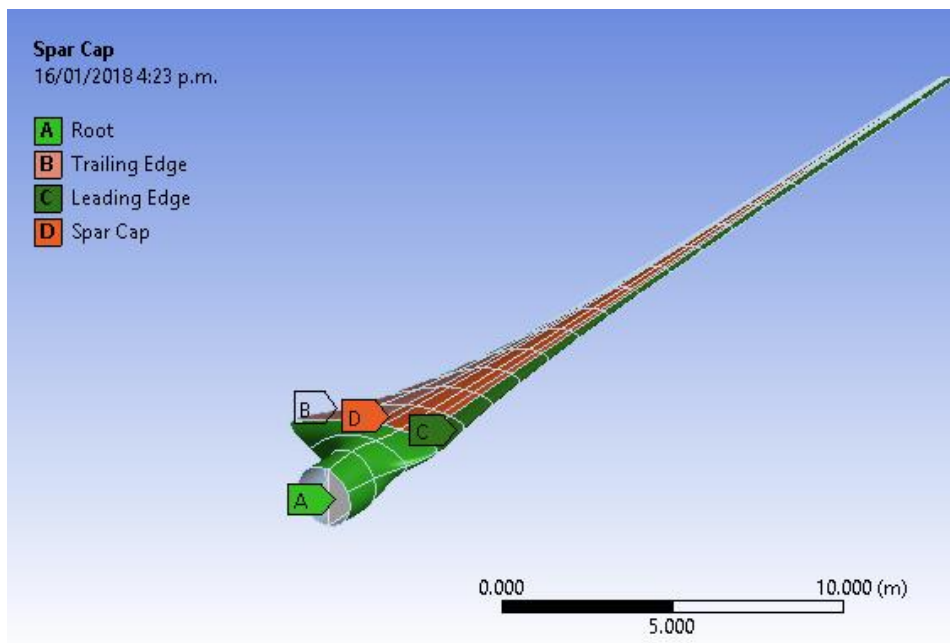
5.2 DEFINICIÓN DEL MATERIAL

Primero se procede a definir el material, actualmente los álabes son construidos de materiales compuestos como la fibra de vidrio (GRP) y fibra de carbono con otros materiales adicionales en su composición como la balsa. Se decide emplear GRP debido a que es el más usado y, cabe aclarar que la fibra de carbono, aunque es tres 3 veces más resistente que la fibra de vidrio, su precio y manufactura son mayores²⁶.

²⁶ GASCH. *Op. cit*

5.2.1 ACP. Se utilizó el módulo ACP para definir la composición y distribución de las láminas según su requerimiento mecánico a lo largo del álabe. Para comenzar con el desarrollo del material fue necesario dividir el álabe de una manera más detallada, con el fin de utilizar materiales que se adecuen a las cargas actuantes en cada sección, esta división está compuesta por el borde de entrada (*Leading edge*), el borde de salida (*Trailing edge*), la raíz (*Root*), el larguero (*Spar web*) y casquete de protección (*Spar cap*) y sus respectivas subsecciones, mostrados en la Figura 24.

Figura 24. División detallada del álabe.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Propiedades de los materiales.

Propiedades		Material de la lámina		
		A130 (0's)	DB120 (±45's)	Balsa
$E_L=E_x$	GPa	31.7	26.2	0.187
	Msi	4.6	3.8	0.0271
$E_T=E_y$	GPa	7.58	6.55	0.061
	Msi	1.1	0.95	0.00885
$E_z=E_z$	GPa	7.58	6.55	4.07
	Msi	1.1	0.95	0.590
$V_{LT}=V_{xy}$		0.32	0.39	0.67
$V_{TZ}=V_{yz}$		0.32	0.35	0.01
$V_{LZ}=V_{xz}$		0.32	0.32	0.02
$G_{LT}=G_{xy}$	GPa	3.45	4.14	0.0203
	Ksi	500	600	2.95
$G_{TZ}=G_{yz}$	GPa	3.10	3.72	0.150
	Ksi	450	540	21.8
$G_{LZ}=G_{xz}$	GPa	3.10	3.72	0.220
	Ksi	450	540	31.9
ρ	g/cc	1.714	1.714	0.153
	Lb/in ³	0.0619	0.0619	0.00551
t	mm	0.571	0.203	9.53
	in	0.0225	0.008	0.375
$\epsilon_L = \epsilon_x$ (%)	Tensión	2.53	2.49	-
	Compresión	-0.92	-2.08	-
$\epsilon_T = \epsilon_y$ (%)	Tensión	0.39	0.33	-
	Compresión	-1.05	-1.21	-

Fuente: Elaboración propia.

Habiendo definido estas divisiones, se especificaron los materiales a utilizar con sus propiedades y distribución a lo largo del álabe dentro del módulo de ACP, sus propiedades²⁷ se muestran en la Tabla 6.

Para la distribución se tomó como consideración los valores de espesor desarrollados mediante la *toolbox* de Matlab BLADE, donde con ayuda de la geometría de la turbina simulada anteriormente se obtuvo una distribución de espesores.

A partir de estos espesores, se utilizaron las distribuciones comunes²⁸ para llegar hasta el espesor requerido, estas distribuciones son del $[\pm 45_x/0_y/\pm 45_x/0_y/\pm 45_x]_s$ y $[\pm 45_x/0_y/\pm 45_x]_s$, donde las láminas a 45 son de E-Glass DB120 y las láminas a 0 de E-Glass A130, y los valores de X y Y son la cantidad de láminas apiladas, además, en algunas configuraciones se utilizaron capas de balsa para disminuir el peso sin dejar de lado la parte estructural del álabe, la distribución se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Espesores y distribución de las láminas.

Sección	Localización	Distribución de láminas	Espesor [m]
Root	0 – 1.27	$[\pm 45_{13}/0_{52}/\pm 45_{13}/0_{52}/\pm 45_{13}]_s$	0,150436
	1.27 – 2.54	$[\pm 45_{12}/0_{50}/\pm 45_{12}/0_{50}/\pm 45_{12}]_s$	0,143432
	2.54 – 3.83	$[\pm 45_{11}/0_{40}/\pm 45_{11}/0_{40}/\pm 45_{11}]_s$	0,116532
LE	3.83 – 7.03	$[\pm 45_8/0_{32}/\pm 45_8]_s$	0,049536
	7.03 – 10.23	$[\pm 45_8/0_{32}/\pm 45_8]_s$	0,049536
	10.23 – 13.43	$[\pm 45_5/0_{20}/\pm 45_5]_s$	0,03096
	13.43 – 16.63	$[\pm 45_5/0_{20}/\pm 45_5]_s$	0,03096
	16.63 – 19.83	$[\pm 45_5/0_{20}/\pm 45_5]_s$	0,03096
	19.83 – 23.03	$[\pm 45_5/0_{20}/\pm 45_5]_s$	0,03096

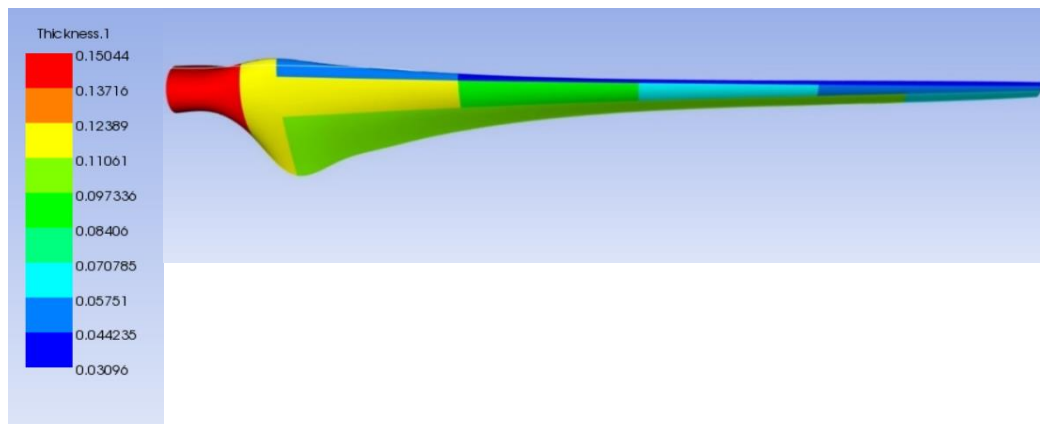
²⁷ LADEAN, R Mckittrick; DOUGLAS, S. Cairns; JOHN, Mandell; DAVID, C. Combs; DONALD, A. Rabern y R. DANIEL, Van Luchene. Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15 / 50 Wind Turbine Using a Finite Element Model. Sandia National Laboratories, Mayo, 2001. p. 1.

²⁸ MALAK, Yaaqoubi. Guidelines for an Optimum Blade Lay-Up Schedule. En: Universidad de Alakhawayn, April 2017, p 21–26.

Sección	Localización	Distribución de láminas	Espesor [m]
	23.03 – 26.23	$[\pm 45_5/0_{20}/\pm 45_5]_s$	0,03096
	26.23 – 30.99	$[\pm 45_5/0_{20}/\pm 45_5]_s$	0,03096
TE	3.83 – 7.03	$[\pm 45_8/0_{15}/balsa_3/0_{15}/\pm 45_8]_s$	0,104432
	7.03 – 10.23	$[\pm 45_8/0_{15}/balsa_3/0_{15}/\pm 45_8]_s$	0,104432
	10.23 – 13.43	$[\pm 45_8/0_{15}/balsa_3/0_{15}/\pm 45_8]_s$	0,104432
	13.43 – 16.63	$[\pm 45_8/0_{15}/balsa_3/0_{15}/\pm 45_8]_s$	0,104432
	16.63 – 19.83	$[\pm 45_8/0_{15}/balsa_3/0_{15}/\pm 45_8]_s$	0,104432
	19.83 – 23.03	$[\pm 45_8/0_{15}/balsa_3/0_{15}/\pm 45_8]_s$	0,104432
	23.03 – 26.23	$[\pm 45_8/0_{15}/balsa_3/0_{15}/\pm 45_8]_s$	0,104432
	26.23 – 30.99	$[\pm 45_8/0_{16}/balsa_1/0_{16}/\pm 45_8]_s$	0,068596
SC	3.83 – 7.03	$[\pm 45_{10}/0_{40}/45_{10}/0_{40}/45_{10}]_s$	0,11572
	7.03 – 10.23	$[\pm 45_{10}/0_{40}/45_{10}/0_{40}/45_{10}]_s$	0,11572
	10.23 – 13.43	$[\pm 45_8/0_{32}/45_8/0_{32}/45_8]_s$	0,092576
	13.43 – 16.63	$[\pm 45_8/0_{32}/45_8/0_{32}/45_8]_s$	0,092576
	16.63 – 19.83	$[\pm 45_6/0_{24}/45_6/0_{24}/45_6]_s$	0,069432
	19.83 – 23.03	$[\pm 45_6/0_{24}/45_6/0_{24}/45_6]_s$	0,069432
	23.03 – 26.23	$[\pm 45_4/0_{16}/45_4/0_{16}/45_4]_s$	0,046288
	26.23 – 30.99	$[\pm 45_4/0_{16}/45_4/0_{16}/45_4]_s$	0,046288
Spar	0 – 30.99	$[\pm 45_8/0_{32}/\pm 45_8]_s$	0,049536

Fuente: Elaboración propia

Figura 25: Distribución de espesores.



Fuente: Elaboración propia.

6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los principales aspectos de diseño estructural²⁹ para los álabes son las cargas máximas, estas se dan en condiciones extremas, las cargas de fatiga y la rigidez de los componentes en vibración y deflexión.

Se analizaron las deformaciones angulares y totales producidas por las cargas en condiciones de servicio a velocidad promedio en estado estable al igual que el respectivo análisis modal del álabe, se deja para posteriores trabajos la comprobación de los demás aspectos mencionados debido a su extensión.

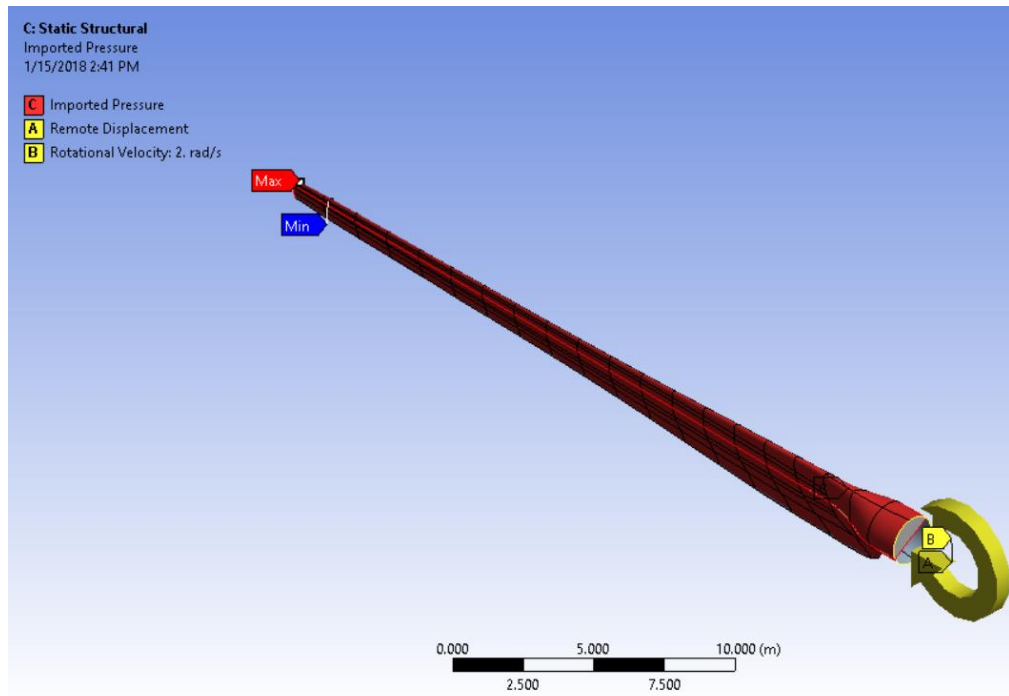
Las cargas a las que el álabe está sometido se muestran en la Figura 26, las cargas de presión (C) del módulo CFD se importan al módulo mecánico para determinar los esfuerzos y deformaciones sobre el álabe, en esta transferencia se realiza una interpolación ya que la malla de CFD es diferente a la malla del módulo estructural, se valida mediante la comparación de las presiones en cada uno de los módulos.

Adicional a las cargas inducidas por el viento se tienen cargas de tipo gravitacional, para ello en el módulo estructural se incluye una fuerza que varía a lo largo del álabe la cual es la fuerza centrípeta (B), dicha fuerza depende de la velocidad de rotación de cada elemento multiplicada por su masa y el radio del centroide de cada uno de los elementos.

Otra condición de contorno es el empotramiento en la raíz del álabe (A), para ello se utilizó un *remote displacement* en el origen, punto en el cual se localiza el eje de rotación de la turbina.

²⁹ STEPHAN, Matthiesen y MEIK, Schacknies. Wind Turbines – Components and Design Basics. Paris. Octubre, 2009. p. 18-23.

Figura 26. Cargas sobre el álabe.



Fuente: Elaboración propia.

6.1 CRITERIO DE FALLA

En el caso de laminados de materiales compuestos de comportamiento ortótropo algunas de las teorías de falla comúnmente utilizadas son³⁰:

- Deformación máxima
- Esfuerzo máximo
- Tsai-Wu
- Tsai-Hill

³⁰ BRIAN, Morales y REYNEL, Barrera. Diseño óptimo de un eje de transmisión para vehículos fabricado con materiales compuestos. En: Universidad Industrial de Santander, 2016, p 46-49.

- Hoffman

Dentro de los criterios de falla para un aerogenerador se encuentra como principal la capacidad de producción de energía, esta capacidad está relacionada principalmente por el ángulo de ataque en cada uno de los perfiles del álabe, el cual puede verse alterado por las cargas presentes, como criterio de falla al igual que Dal Monte Andrea³¹ en donde toma una deformación angular máxima de 1.2 [°], se analizó la deformación angular a lo largo de todo el álabe φ , este procedimiento se hizo de tal manera que solo se tuviera en cuenta los desplazamientos en el eje Y y Z de los bordes tanto de ataque como de salida en 9 secciones del álabe como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Desplazamientos en el borde de ataque y salida.

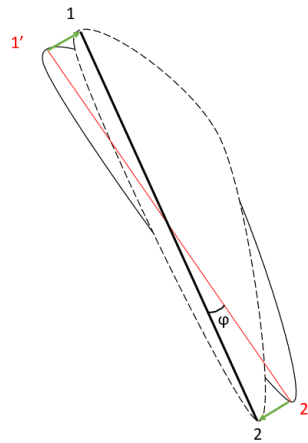
	Borde de ataque		Borde de salida	
	Desplazamiento en Y [m]	Desplazamiento en Z [m]	Desplazamiento en Y [m]	Desplazamiento en Z [m]
1	0.04430	(0.32647)	0.04427	(0.32754)
2	0.03733	(0.25513)	0.03731	(0.25645)
3	0.03026	(0.18657)	0.03030	(0.18785)
4	0.02351	(0.12766)	0.02359	(0.12871)
5	0.01729	(0.08081)	0.01736	(0.08149)
6	0.01200	(0.04660)	0.01205	(0.04684)
7	0.07460	(0.02324)	0.00746	(0.02317)
8	0.00361	(0.00869)	0.00358	(0.08378)
9	0.00097	(0.00169)	0.00092	(0.00116)

Fuente: Elaboración propia.

³¹ ANDREA, Dal Monte; STEFANO, de Betta; MARCO, Raciti y ERNESTO, Benini. Proposal for a Coupled Aerodynamic–structural Wind Turbine Blade Optimization. En: Composite Structures. Septiembre, 2017, vol.159., p. 144–56.

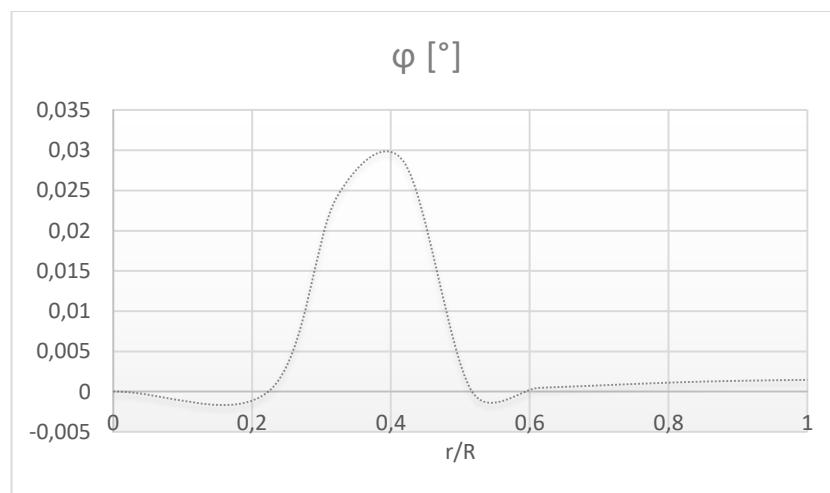
Al obtener estos desplazamientos y la cuerda en cada una de las 9 secciones se usó ley de cosenos para obtener el ángulo de deformación angular Figura 27 y se graficó esta deformación en contra de la distancia radial del álabe y se observa en la Tabla 28.

Figura 27. Ángulo de deformación angular en un perfil.



Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Deformación angular a lo largo del álabe.

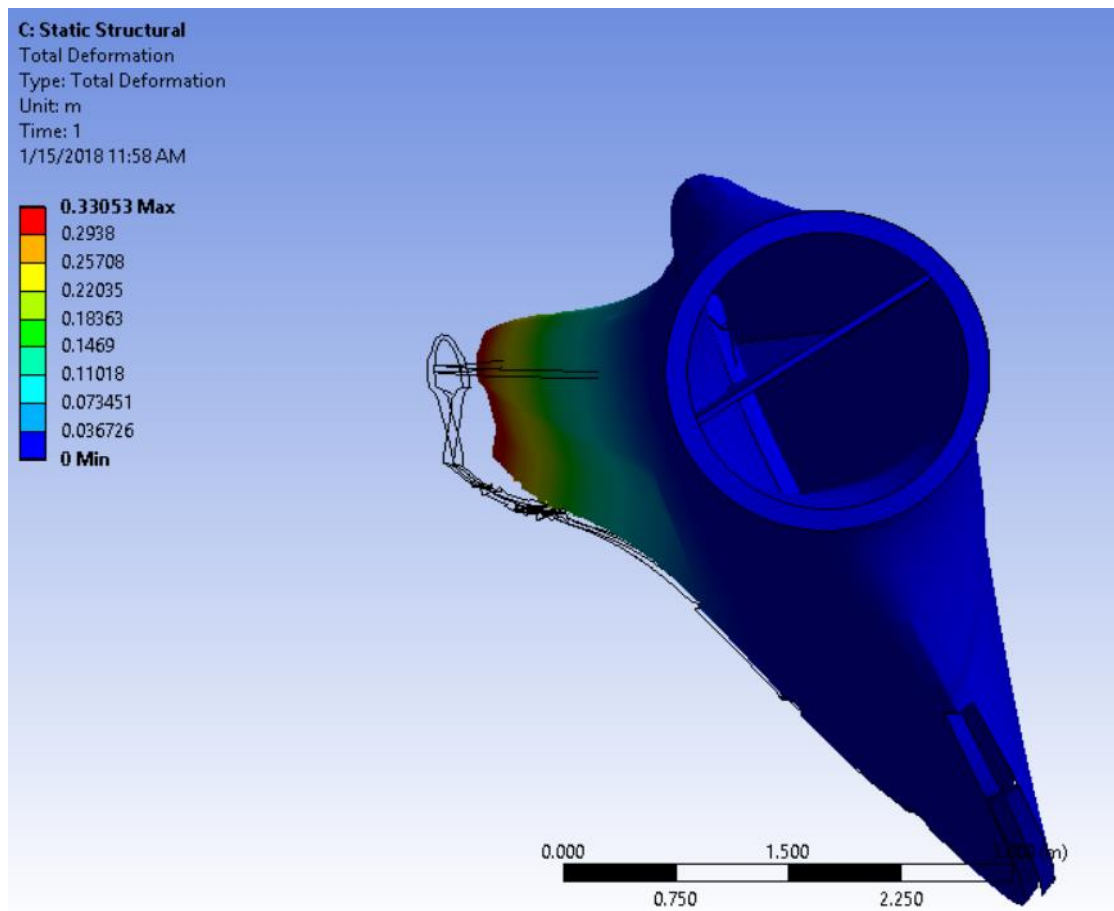


Fuente: Elaboración propia.

La mayor deformación angular se da a los 14 [m] desde el eje de rotación de la turbina y esta es de 0.03 [°]. Este ángulo de deformación angular es despreciable ya que afectaría muy poco el comportamiento aerodinámico y por consiguiente la producción de potencia. Se asume que el álabe no fallaría por este criterio de rigidez.

Por otro lado, la deformación máxima total se localiza como es supuesto en la punta del álabe y esta es de 0.33053 [m] desplazado mayormente en la dirección del viento (eje z).

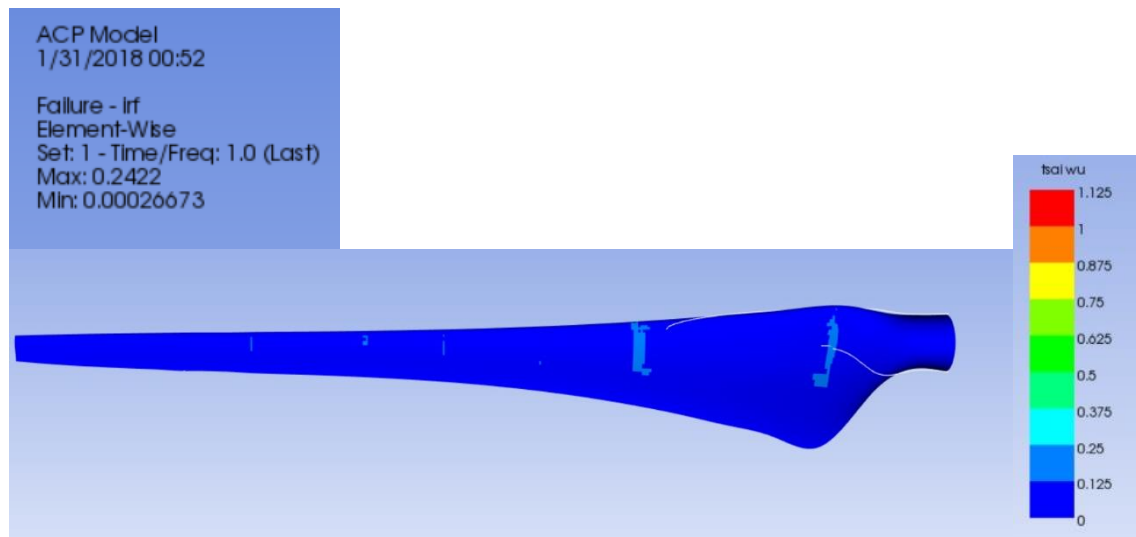
Figura 29. Deformación total.



Fuente: Elaboración propia.

Como criterio de esfuerzos se encuentra que el criterio de falla más adecuado³² es el criterio de Tsai-Wu³³ el cual consta de constantes que representan los esfuerzos últimos unidireccionales del material y uno mediante ensayos con cargas bidireccionales. Estas propiedades tanto para las fibras de vidrio y la balsa fueron tomadas de la biblioteca de materiales disponibles en ANSYS. Este criterio va de 0 a 1 siendo 1 el valor máximo y 0 el mínimo, representando 1 como una falla estos valores se pueden ver en la Figura 30. Teniendo como máximo un factor de 0.2422, adicionalmente se realizó un análisis modal del álabe en condición libre-libre y empotrado Anexo D.

Figura 30. Criterio Tsai-Wu.



Fuente: Elaboración propia.

³² BRIAN. *Op. cit.*

³³ STEPHEN, W. Tsai and EDWARD, M. Wu. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. *Journal of Composite Materials*. Enero, 1971, vol.5., p. 58–80.

7. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

El objetivo principal de este trabajo es una propuesta de diseño de la geometría externa respecto a la producción de energía del álabe de una turbina de eje horizontal para las condiciones de viento promedio del parque Jepírachi. Se generaron dos álabes, uno con perfiles recomendados y otro con perfiles optimizados en el proceso.

Se tomó como base el mismo tipo de turbina instalada en este sitio, de referencia NORDEX-N60 de 1300 [Kw] (ver catalogo y especificaciones Anexo 3) a una velocidad de viento promedio de 8 [m/s], a las mismas condiciones esta turbina produce una potencia de 376 [Kw], la cual fue comparada con la turbina con perfiles recomendados con un resultado 328.7 [Kw] obteniendo un porcentaje de error del 12.6 %.

Al obtener los resultados de la turbina con perfiles optimizados se encontró el torque para un álabe con un respectivo modelo de flujo, dichos torques se muestran en la tabla 9, la potencia se obtuvo de la ecuación:

$$P [Kw] = \omega (B T) = 2 (3T) \quad (23)$$

Se multiplicó por 3 debido a que este torque corresponde a solo un álabe. Las potencias halladas según el modelo de flujo son mostradas en la Tabla 9

Tabla 9. Torque inducido en un álabe.

Modelo de flujo	Torque [N.m]	Potencia [Kw]
<i>k-epsilon</i>	66846.2	401.1
<i>k-omega SST</i>	64948.7	389.7

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar hay un aumento de entre 72 y 61 [Kw] en la potencia generada de la turbina, debido a la optimización de la geometría dando fundamento al proceso de optimización y cumpliendo el objetivo principal del proyecto.

8. CONCLUSIONES

- Se definió la geometría del álabe por medio del método BEM, validándolo con la geometría de una turbina NORDEX-N60 de 1300 KW, teniendo una diferencia mínima entre los principales parámetros como la longitud del álabe y velocidad de rotación.
- A las mismas condiciones de viento se comparó la producción de energía producida con un álabe comercial y se obtuvo un incremento de potencia del 3,6 % comparado con el álabe diseñado en las condiciones del parque Jepirachi en la Guajira, Colombia.
- A partir de la selección de los perfiles para cada sección del álabe y mediante un proceso de optimización de sensibilidad con respecto a la geometría, se obtuvo un álabe con un torque mayor al álabe inicial, logrando obtener mayor potencia a partir del cambio geométrico de los perfiles.
- Se desarrolló un modelo de simulación numérica de la interacción fluido estructura del álabe y el campo de flujo alrededor de él, obteniendo el torque necesario para la validación del álabe optimizado y además las deformaciones angulares y el criterio de falla de Tsai Wu.
- Se termina con una propuesta inicial de diseño para un posible crecimiento en el estudio e implementación de la energía eólica en Colombia debido a su viabilidad en nuestro país.

9. RECOMENDACIONES

- Para posteriores trabajos tener en cuenta la influencia que tiene el cubo en el análisis fluidodinámico.
- Optimizar el uso de material (número de laminillas) a lo largo del álabe al igual que su análisis de fatiga.
- Analizar la forma óptima de la punta del álabe debido a sus pérdidas producidas por los grandes cambios de presión en la misma.
- Realizar mejores estudios de viento a diferentes alturas en el sitio donde sea instalada la turbina, ya que los que son proporcionados por el IDEAM no son exactos.
- En el análisis modal tener en cuenta los elementos inmediatos al álabe, debido a su importante influencia en este análisis.

BIBLIOGRAFÍA

ANIBAL, Graterol y GERALD, Mayoral. Diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 1 KW de potencia. En: Universidad Simón Bolívar. Diciembre, 2006. p. 32.

ANDREA, Dal Monte; STEFANO, de Betta; MARCO, Raciti y ERNESTO, Benini. Proposal for a Coupled Aerodynamic–structural Wind Turbine Blade Optimization. En: Composite Structures. Septiembre, 2017, vol.159., p. 144–56.

ANDRES, Rodríguez. Análisis CFD de un álabe del último paso de una turbina de vapor. En: Universidad Politécnica de Madrid. Febrero, 2016. p. 52-56.

ANTONIO, Lecuona Neumann. La Energía Eólica: Principios básicos y tecnología. vol. 4. España: Universidad Carlos III de Madrid, 2002. 81 p.

BRIAN, Morales y REYNEL, Barrera. Diseño óptimo de un eje de transmisión para vehículos fabricado con materiales compuestos. En: Universidad Industrial de Santander, 2016, p 46-49.

BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick y BOSSANYI, Ervin. Wind Energy Handbook, 1 ed. England: John Wiley y Sons, LTD, 2001. p. ISBN 978-8-578-11079-6.

Congreso Nacional de ingeniería electromecánica y de sistemas. (13: 19-23, OCTUBRE, México D.F) Memorias. Artículo No: MEC-33, D. Almazo; M. Toledo; M. Vega del Carmen; J. Abugaber; O. José Pineda y A. Reyes. Selección y diseño de hélices., 2015. p. 1- 6.

FRANCK, Bertagnolio; NIELS, Sorensen; JEPPE, Johansen y PETER, Fuglsang. Wind Turbine Airfoil Catalogue. 2 ed. Inglaterra: Risø-R-1280, 2001. 152 p. ISBN 87-550-2911-6.

GRANT, Ingram. Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method. Octubre, 2011. vol. 1, no. 1-21 p.1-42.

GASCH, Robert y TWELE, Jochen. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, 2 ed. USA: Springer, 2011. p.1 ISBN 978-3-642-22937-4.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Visor Atlas de Viento. [En línea]. Atlas Interactivo - Vientos – IDEAM (Recuperado en julio 2017). Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

LADDEAN, R Mckittrick; DOUGLAS, S. Cairns; JOHN, Mandell; DAVID, C. Combs; DONALD, A. Rabern y R. DANIEL, Van Luchene. Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15 / 50 Wind Turbine Using a Finite Element Model. Sandia National Laboratories, Mayo, 2001. p. 1

MALAK, Yaaqoubi. Guidelines for an Optimum Blade Lay-Up Schedule. En: Universidad de Alakhawayn, April 2017, p 21–26.

MARIO, Pérez Rincón. Parque eólico Jepirachi, Colombia. [En línea]. EJAtlas. Colombia (Recupera en octubre de 2017). Disponible en: <https://ejatlas.org/conflict/parque-eolico-jepirachi-colombia#>

M. O.L. Hansen; J. N. Sorensen; S. Voutsinas; N. Sorensen y H. Aa. Madsen. State of the Art in Wind Turbine Aerodynamics and Aeroelasticity. En: Progress in Aerospace Sciences, Diciembre, 2006, vol.42, p. 285–330.

PETER, Schubel y RICHARD, Crossley. Wind Turbine Blade Design. En: Energies. Abril, 2012. vol. 5, no.12, p. 3425-3449.

P. J. Moriarty y A. C. Hansen. AeroDyn Theory Manual. En: Renewable Energy, 2005, XV, 35. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.001255>.

RICARDO, A. Bastianon. Cálculo Y Diseño De la Hélice Óptima Para Turbinas Eólicas. 1 ed. Argentina: Jornadas de Energías No Convencionales, 2008. 42 p.

SEBASTIEN, Lachance-Barrett y EDWIN Corona. ANSYS - Wind Turbine Blade FSI. [En línea]. Tutorial in the wind power class. Italy: Cornell University (Recuperado en junio de 2017.) Disponible en <https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=262012971>

STEPHAN, Matthiesen y MEIK, Schacknies. Wind Turbines – Components and Design Basics. Paris. Octubre, 2009. p. 18-23.

STEPHEN, W. Tsai and EDWARD, M. Wu. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. Journal of Composite Materials. Enero, 1971, vol.5., p. 58–80

W. Timmer y R. van Rooij. Design of Airfoils for Wind Turbine Blades. En: Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils. Mayo, 2004. p. 1.

ANEXOS

Anexo A. Código BEM

El código BEM está desarrollado en lenguaje de cálculo del entorno de trabajo de MatLab, este está dividido en 7 secciones:

- Datos del aerogenerador
- Definición de la geometría del rotor
- Variación del dr
- Definición de las coordenadas de los perfiles
- Transformación de las coordenadas de los perfiles
- Adquisición de las nuevas coordenadas de los perfiles
- Representación de álabes

a) Datos del aerogenerador

Aquí se definen los datos primordiales para el desarrollo del BEM, entre estos se encuentra la potencia a generar (P), el coeficiente de potencia (C_p), la eficiencia del aerogenerador (e), la densidad del aire (ρ) y la velocidad promedio del viento (V_1).

b) Definición de la geometría del rotor

Teniendo estos datos del generador se logra obtener la envergadura del rotor y con el número de álabes se encuentra definida la geometría, además de esto se obtiene su velocidad de rotación.

c) Variación de r

En este punto se analiza un diferencial del álabe (perfil aerodinámico), el cual varía un porcentaje dr en cada posición desde 0,12 veces el radio del rotor a 1. Esta se divide en subsecciones que definen cada sección transversal del álabe desde su raíz hasta su punta:

- Suposición de ϕ , a y a'

En esta se suponen los valores del ángulo de paso y factores de inducción, además se definen los coeficientes aerodinámicos de cada perfil.

- Cálculo de a , a' , ϕ y la cuerda

Con ayuda de las suposiciones se recalculan y comparan los valores del ángulo de paso y los factores de inducción, teniendo un valor de convergencia por la diferencia entre estos datos y los calculados anteriormente, obteniendo así los valores finales.

d) Definición de las coordenadas de los perfiles

Se importan los archivos con las coordenadas de los perfiles a utilizar, dichas coordenadas están definidas como un porcentaje de la cuerda.

e) Transformación de las coordenadas de los perfiles

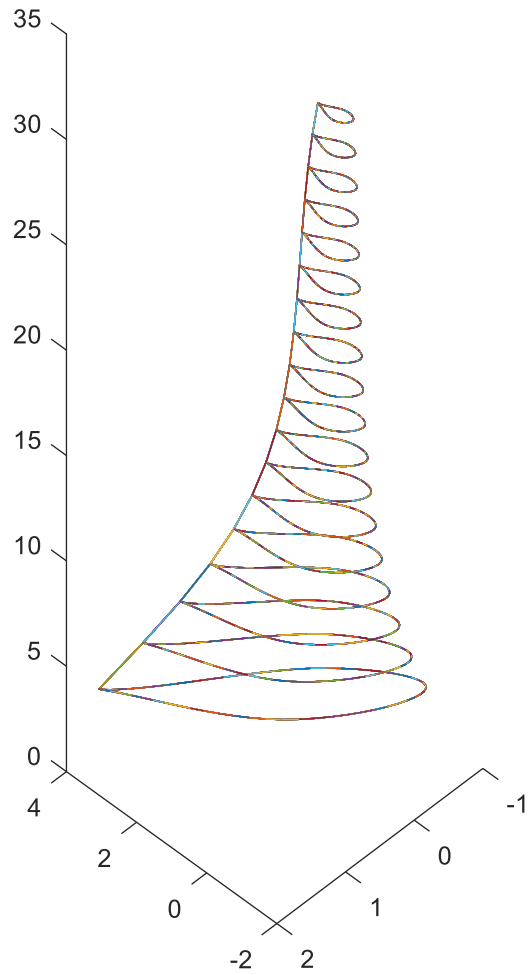
Teniendo las coordenadas de los perfiles y la sección en la que se encuentra cada uno de ellos se procede a redimensionar y rotar en función de la cuerda y el ángulo de paso hallados en el punto anterior mediante el BEM.

f) Adquisición de las nuevas coordenadas de los perfiles

Después de transformar las coordenadas según los datos de BEM, se escriben dichas coordenadas en archivos de texto para su posterior utilización en el desarrollo del álabe en un programa CAD.

g) Representación del álabe

Con ayuda de las coordenadas se grafica la geometría del álabe en MatLab para ver una imagen preliminar de este.



El código se muestra a continuación:

```
clear all
```

```
%% datos del aerogenerador
```

```
P=376; %%Kw
```

```
Cp=0.424;
```

```

eta=0.9;
ro=1.2; %%kg/m^3
V1=8;    %%m/s

%% definicion de la geometria del rotor

R=sqrt((P*2*1000)/(Cp*eta*ro*pi*V1^3));
lambda=8;B=3;
Omega=lambda*V1/R; %%rad/s
n=0;

%% variacion r para hallar la cuerda y el angulo fi

dr=0.05

for porc=0.12:dr:1

    n=n+1;
    r=R*porc;
    lambdar=Omega*r/V1;

    %% suposicion phi

    phi=(2/3)*atan(1/lambdar);
    phideg=phi*180/pi;

    if porc<=0.35
        Cl = 0.861;
        Cd = 0.023;
    elseif 0.35<porc && porc<=0.8
        Cl = 0.9115;
        Cd = 0.019;
    else
        Cl = 0.7498;
        Cd = 0.0166;
    end
end

```

```

End

c=(8*pi*r*(sin(phi)))/(3*lambda*r*B);
c2=c;
sigmap=(B*c)/(2*pi*r);

%% supocision a, ap

a=(1+((4*sin(phi)^2)/(sigmap*Cl*cos(phi))))^-1;
ap=(1-3*a)/(4*a-1);
abe=54;
apbe=54;
Q=2/pi*acos(exp(-(B/2*(1-r/R))/(r/R*sin(phi))));
diferencia=0.000000001;
i=1;

%% calculo: a, ap, phi, cuerda

while i==1
    sigmap=(B*c)/(2*pi*r);
    phi=atan(((1-a)/(lambda*(1+ap))));
    phideg=phi*180/pi;
    Q=2/pi*acos(exp(-(B/2*(1-r/R))/(r/R*sin(phi))));

a=((Cl*cos(phi)+Cd*sin(phi))*sigmap)/((Cl*cos(phi)+Cd*sin(phi))*sigmap+(4
*Q*(sin(phi)^2)));

ap=(1-a)*sigmap*(Cl*sin(phi)-Cd*cos(phi))/(4*Q*lambda*(sin(phi))^2);

    c=(8*pi*r*(sin(phi)))/(3*lambda*r*B);

    if abs(a-abe)*100/abs(abe)<diferencia && abs(ap-apbe)*100/abs
(apbe)<diferencia

        X(n,1)=(porc);
    end
end

```

```

        X(n,2)=(a);
        X(n,3)=(ap);
        X(n,4)=(phideg);
        X(n,5)=(c);
        X(n,6)=(V1*(1-a))/sin(phi);
        X(n,7)=(lambdar);
        X(n,8)=(R*porc);
        i=2;

    end

    abe=a;
    apbe=ap;
end
end

for n=1:1:18

    X(n,5)=-0.0018302609*n^3 + 0.0725256414*n^2 - 1.0203540195*n +
6.4020958209;

end

%% definicion de las cordenadas
%% perfil parte interna

intProfil='NACA64421';
prompt = 'direccion de la carpeta entre '' ** '' ';
fileD = input(prompt);
filename=strcat(fileD,'\',intProfil,'fluent.csv');
XYint=importfile2(filename);
coorXint=XYint(:,1);
coorYint=XYint(:,2);

```

```

%% perfil parte media

midProfil='NACA63421';
%prompt = 'direccion de la carpeta entre ' ' ** ' ' ';
%fileD = input(prompt);
filename=strcat(fileD,'\ ',midProfil,'fluent.csv');
XYmid=importfile2(filename);
coorXmid=XYmid(:,1);
coorYmid=XYmid(:,2);

%% perfil parte externa

extProfil='NACA63221';
%prompt = 'direccion de la carpeta entre ' ' ** ' ' ';
%fileD = input(prompt);
filename=strcat(fileD,'\ ',extProfil,'fluent.csv');
XYext=importfile2(filename);
coorXext=XYext(:,1);
coorYext=XYext(:,2);
coorZ=X(:,1)*R;
Chord=X(:,5);

%% transformacion de las coordenas

for part=1:1:3
    if part==1

        for intchord=1:1:3
            Coordenadas(:,(intchord-1)*3+1)=coorXint*Chord(intchord);
            Coordenadas(:,(intchord-1)*3+2)=coorYint*Chord(intchord);
            Coordenadas(:,intchord*3)=coorZ(intchord);
        End

    elseif part==2

```

```

        for midchord=1:1:10
            Coordenadas(:,9+(midchord-
1)*3+1)=coorXmid*Chord(intchord+midchord);
            Coordenadas(:,9+(midchord-
1)*3+2)=coorYmid*Chord(intchord+midchord);
            Coordenadas(:,9+midchord*3)=coorZ(intchord+midchord);
        end

        elseif part==3

            for extchord=1:1:5
                Coordenadas(:,39+(extchord-
1)*3+1)=coorXmid*Chord(intchord+midchord+extchord);
                Coordenadas(:,39+(extchord-
1)*3+2)=coorYmid*Chord(intchord+midchord+extchord);

                Coordenadas(:,39+extchord*3)=coorZ(intchord+midchord+extchord);

            end
        end
    end

    for i=1:1:18
        for ic=1:1:61
            trfor(ic+(i-1)*61,1)=Coordenadas(ic,3*(i-1)+1);
            trfor(ic+(i-1)*61,2)=Coordenadas(ic,3*(i-1)+2);
            trfor(ic+(i-1)*61,3)=Coordenadas(ic,3*(i-1)+3);

            alfa =0.000407*i^4 - 0.025951*i^3 + 0.603873*i^2 - 6.542680*i +
35.446922;

```

```

        trfor(ic+(i-1)*61,1)=      (trfor(ic+(i-1)*61,1)-0.25      *X(i,5)
)*cos(alfa*pi/180)+ trfor(ic+(i-1)*61,2)*(-sin(alfa*pi/180));
        trfor(ic+(i-1)*61,2)=      (trfor(ic+(i-1)*61,1)-0
*X(i,5))*sin(alfa*pi/180)+ trfor(ic+(i-1)*61,2)*(cos(alfa*pi/180));

    end
end

```

```

%% adquisicion de las coordenadas

```

```

    prompt = 'direccion de la carpeta entre '' ** '' ';
    fileD = input(prompt);

for i=1:1:18
    for ic=1:1:61
        solid(ic,1)=trfor(ic+(i-1)*61,1);
        solid(ic,2)=trfor(ic+(i-1)*61,2);
        solid(ic,3)=trfor(ic+(i-1)*61,3);

    end

    numeral=num2str(i);
    datos=[solid(:,1),solid(:,2),solid(:,3)];
    fid=fopen(strcat(fileD,'\ ',numeral,'.txt'),'wt');
    formato='%6.6f  %6.6f  %6.6f\n' ;

    for idat=1:size(datos,1);
        fprintf(fid,formato,datos(idat,:));
    end

    fclose(fid);

```

```
end

%% Plot Alabe

for i=1:1:18

    Xcoord=trfor(:,1);
    Ycoord=trfor(:,2);
    Zcoord=trfor(:,3);
    hold on
    plot3(Xcoord,Ycoord,Zcoord);

end
```

Anexo B. Coordenadas generadas

Z = 3.8343	
x	y
-1.286744	-0.578521
-1.312025	-0.530017
-1.310623	-0.477549
-1.292884	-0.42299
-1.262828	-0.366672
-1.218439	-0.303248
-1.156555	-0.232024
-1.077304	-0.155428
-0.975249	-0.069555
-0.847033	0.02643
-0.697852	0.128642
-0.524893	0.240846
-0.317237	0.371149
-0.085403	0.510665
0.176926	0.658634
0.484629	0.816856
0.807424	0.957263
1.145059	1.074949
1.474673	1.177487
1.775585	1.263961
2.049332	1.338672
2.281452	1.400251
2.486229	1.454005
2.670526	1.502464
2.828886	1.544527
2.965748	1.581435
3.088881	1.615243
3.1963	1.645319
3.28731	1.6713
3.369315	1.695151
3.442105	1.716712

Z = 5.4319	
x	y
-1.137919	-0.424608
-1.154529	-0.37737
-1.148314	-0.328785
-1.128154	-0.279685
-1.097466	-0.23003
-1.054039	-0.17503
-0.995147	-0.114317
-0.92113	-0.050136
-0.82704	0.020665
-0.709973	0.098565
-0.574673	0.180415
-0.418413	0.269463
-0.231228	0.372281
-0.022822	0.481538
0.212048	0.595978
0.486071	0.715969
0.771078	0.818104
1.066387	0.897849
1.353495	0.964232
1.614918	1.01821
1.852361	1.063642
2.053528	1.100522
2.230943	1.132527
2.390622	1.161407
2.527869	1.186616
2.646537	1.208918
2.75336	1.229541
2.846606	1.248074
2.925656	1.264239
2.996927	1.279214
3.060227	1.292869

Z = 7.0229	
x	y
-0.992948	-0.306532
-1.003618	-0.262869
-0.994883	-0.219518
-0.974316	-0.176633
-0.944804	-0.133951
-0.904132	-0.087305
-0.849971	-0.036545
-0.782767	0.016329
-0.69811	0.073827
-0.593508	0.136187
-0.473201	0.200887
-0.334648	0.270672
-0.168951	0.350796
0.015158	0.435305
0.222024	0.522715
0.462405	0.612513
0.710801	0.685492
0.966309	0.737614
1.213923	0.778246
1.438923	0.809419
1.643026	0.834494
1.815831	0.854287
1.968196	0.871274
2.105334	0.88663
2.223235	0.900176
2.325212	0.912344
2.417049	0.923791
2.497252	0.934261
2.565277	0.943545
2.626636	0.952277
2.681158	0.960352

Z = 3.8343	
x	y
3.50578	1.735899
3.544835	1.74768
3.559782	1.751978
3.461362	1.712915
3.379695	1.67369
3.285506	1.62481
3.176902	1.56354
3.079864	1.505469
2.974452	1.439896
2.859748	1.365945
2.575792	1.173412
2.412806	1.058434
2.220314	0.920299
1.769806	0.598005
1.510661	0.420778
1.239971	0.248995
0.953504	0.095121
0.41307	-0.157943
0.183502	-0.255135
-0.018886	-0.335497
-0.205738	-0.405149
-0.508522	-0.507971
-0.641132	-0.548474
-0.752348	-0.578695
-0.853575	-0.601821
-1.025528	-0.628993
-1.09962	-0.634014
-1.169337	-0.62935
-1.232953	-0.611009
-1.286744	-0.578521

Z = 5.4319	
x	y
3.11563	1.305116
3.149613	1.312639
3.1626	1.315323
3.076061	1.287661
3.003598	1.258384
2.919677	1.221238
2.822439	1.17385
2.735238	1.128421
2.640274	1.076759
2.536688	1.018132
2.279348	0.864212
2.13121	0.771718
1.956029	0.660304
1.546133	0.400477
1.311133	0.258599
1.066944	0.122782
0.811203	0.00497
0.332307	-0.182728
0.129869	-0.252891
-0.04809	-0.309807
-0.211953	-0.358138
-0.47652	-0.427129
-0.591957	-0.45314
-0.688411	-0.471475
-0.775781	-0.484098
-0.923033	-0.494294
-0.98584	-0.492479
-1.044038	-0.482057
-1.095789	-0.45947
-1.137919	-0.424608

Z = 7.0229	
x	y
2.7289	0.967685
2.758185	0.972194
2.769362	0.973745
2.694179	0.954603
2.630788	0.933067
2.557141	0.905208
2.471497	0.869011
2.394483	0.833909
2.310455	0.793711
2.218637	0.747813
1.989939	0.626338
1.85801	0.552906
1.701852	0.464237
1.336527	0.257542
1.127588	0.145423
0.91131	0.039378
0.686548	-0.049678
0.268019	-0.18679
0.091756	-0.236481
-0.062852	-0.275871
-0.204921	-0.308469
-0.433654	-0.352957
-0.533164	-0.368681
-0.616066	-0.378759
-0.690875	-0.384297
-0.816165	-0.383651
-0.869163	-0.377824
-0.917646	-0.36455
-0.959806	-0.340748
-0.992948	-0.306532

Z = 8.6271	
x	y
-0.808827	-0.217559
-0.805931	-0.181888
-0.79196	-0.147109
-0.770162	-0.110455
-0.74218	-0.072829
-0.705062	-0.030417
-0.658624	0.015536
-0.604231	0.063085
-0.535608	0.116043
-0.453375	0.172002
-0.359133	0.229172
-0.240259	0.292996
-0.101107	0.357211
0.057092	0.418204
0.255148	0.479553
0.462736	0.530108
0.678307	0.570827
0.890642	0.600684
1.093705	0.621903
1.284823	0.637175
1.444815	0.647663
1.59122	0.656272
1.720964	0.663695
1.830676	0.670202
1.930894	0.676599
2.018811	0.682755
2.093849	0.688538
2.162271	0.694325
2.22167	0.699808
2.271861	0.704812
2.316074	0.709507
2.367144	0.714949
2.407758	0.719276

Z = 10.2248	
x	y
-0.70153	-0.158784
-0.697561	-0.127536
-0.68415	-0.097518
-0.663958	-0.066165
-0.638432	-0.034206
-0.604884	0.001594
-0.56321	0.040133
-0.514659	0.079755
-0.453699	0.123562
-0.380962	0.16946
-0.297894	0.21594
-0.193461	0.26728
-0.07165	0.31815
0.066332	0.365421
0.238452	0.411403
0.418281	0.447512
0.604534	0.47465
0.787563	0.492369
0.962295	0.502864
1.126551	0.508611
1.263961	0.511402
1.38966	0.513087
1.501046	0.514399
1.595243	0.515711
1.681308	0.517308
1.756833	0.519187
1.821315	0.521255
1.880133	0.523593
1.931215	0.526027
1.974393	0.52841
2.01244	0.530761
2.056389	0.533493
2.091341	0.535665

Z = 11.8224	
x	y
-0.611441	-0.117771
-0.607007	-0.090406
-0.594451	-0.064418
-0.575992	-0.037468
-0.552902	-0.010151
-0.522757	0.020293
-0.485499	0.052894
-0.442263	0.086233
-0.388167	0.122865
-0.323826	0.160969
-0.250536	0.199263
-0.158623	0.241165
-0.051707	0.28211
0.069071	0.319384
0.219313	0.354458
0.375902	0.380606
0.537754	0.398662
0.696517	0.408533
0.847877	0.412308
0.99003	0.412234
1.108885	0.410398
1.217582	0.407954
1.313896	0.40563
1.395353	0.403841
1.469792	0.402558
1.535129	0.401853
1.590928	0.401659
1.641841	0.401878
1.686069	0.402424
1.723465	0.403171
1.756425	0.404051
1.794499	0.405082
1.824777	0.405902

Z = 8.6271	
x	y
2.199916	0.663531
2.05623	0.608905
1.982826	0.578125
1.897099	0.540235
1.801425	0.495917
1.698611	0.446403
1.574495	0.384662
1.289341	0.239098
1.116883	0.152109
0.936861	0.065211
0.751211	-0.017738
0.563074	-0.092779
0.373209	-0.158505
0.209178	-0.206979
0.05698	-0.24487
-0.079878	-0.27295
-0.195128	-0.292073
-0.301541	-0.305824
-0.392846	-0.313881
-0.472112	-0.317419
-0.54444	-0.317376
-0.603702	-0.314446
-0.655856	-0.308247
-0.700821	-0.298876
-0.737063	-0.28743
-0.76958	-0.271437
-0.795779	-0.249282
-0.808827	-0.217559

Z = 10.2248	
x	y
1.911076	0.495004
1.785785	0.452748
1.721658	0.428634
1.646684	0.398764
1.562927	0.363642
1.472839	0.324238
1.364005	0.274939
1.113804	0.15841
0.962529	0.088855
0.804783	0.019683
0.642383	-0.04579
0.478185	-0.10421
0.312894	-0.15437
0.170442	-0.190399
0.038561	-0.217598
-0.079777	-0.236788
-0.179242	-0.24897
-0.270918	-0.256783
-0.349422	-0.260198
-0.417431	-0.260122
-0.47935	-0.257178
-0.529963	-0.252219
-0.574354	-0.244673
-0.612459	-0.234626
-0.643008	-0.223105
-0.670179	-0.207736
-0.691683	-0.187202
-0.70153	-0.158784

Z = 11.8224	
x	y
1.667667	0.375762
1.558019	0.342503
1.501818	0.323293
1.436057	0.299359
1.362537	0.271078
1.283407	0.239229
1.187757	0.19926
0.967762	0.104565
0.834779	0.048103
0.696215	-0.00782
0.553747	-0.060344
0.409952	-0.106607
0.265479	-0.145569
0.141198	-0.172814
0.026338	-0.192622
-0.076559	-0.205807
-0.162919	-0.213417
-0.242407	-0.217427
-0.310368	-0.217979
-0.369147	-0.215789
-0.422569	-0.211265
-0.466156	-0.205322
-0.504281	-0.197297
-0.536892	-0.187269
-0.562926	-0.17618
-0.585916	-0.161812
-0.603843	-0.143077
-0.611441	-0.117771

Z = 13.42	
x	y
-0.538132	-0.089509
-0.533574	-0.065379
-0.52194	-0.042666
-0.505116	-0.019243
-0.484229	0.004392
-0.457088	0.030627
-0.423669	0.0586
-0.384997	0.087081
-0.336739	0.118217
-0.279476	0.150408
-0.214375	0.182551
-0.132884	0.217438
-0.038283	0.251115
0.068361	0.281205
0.200742	0.308634
0.338457	0.328002
0.480579	0.340077
0.619795	0.344976
0.75238	0.344657
0.87681	0.34115
0.980803	0.336647
1.075889	0.331851
1.160139	0.327461
1.231398	0.323906
1.296526	0.320968
1.3537	0.318761
1.402539	0.317239
1.44711	0.316201
1.485839	0.315613
1.518591	0.31537
1.547464	0.315352
1.580817	0.315343
1.607341	0.315336

Z = 15.0176	
x	y
-0.480166	-0.070138
-0.475653	-0.048599
-0.464877	-0.028461
-0.449471	-0.007784
-0.43045	0.013006
-0.405819	0.03601
-0.375573	0.060453
-0.340647	0.085254
-0.297146	0.112254
-0.24562	0.140031
-0.187125	0.167618
-0.114005	0.197358
-0.029253	0.225767
0.066139	0.250737
0.184363	0.272838
0.307176	0.287617
0.433769	0.295777
0.557641	0.29756
0.675518	0.29479
0.786084	0.289316
0.878459	0.283332
0.96291	0.277254
1.037735	0.271741
1.101024	0.26722
1.158874	0.263367
1.209666	0.260318
1.25306	0.258039
1.292669	0.256274
1.327092	0.255022
1.356208	0.254191
1.381879	0.253634
1.411533	0.253001
1.435116	0.252498

Z = 16.6153	
x	y
-0.43553	-0.056831
-0.431129	-0.037299
-0.42108	-0.019133
-0.406835	-0.000545
-0.389317	0.018095
-0.366689	0.038666
-0.338959	0.060466
-0.306989	0.082523
-0.267228	0.106456
-0.220192	0.13098
-0.166855	0.155228
-0.100251	0.181224
-0.02314	0.205839
0.063547	0.22717
0.170852	0.24556
0.282202	0.25722
0.396875	0.262802
0.508991	0.262623
0.615615	0.258388
0.715584	0.2518
0.799085	0.245012
0.875414	0.238253
0.94304	0.232149
1.000243	0.227115
1.052534	0.222768
1.09845	0.219255
1.137684	0.21655
1.173499	0.214369
1.204629	0.212729
1.230964	0.211549
1.254185	0.210669
1.281009	0.209662
1.302342	0.208861

Z = 13.42	
x	y
1.469071	0.292445
1.372269	0.265641
1.322599	0.249988
1.264444	0.23038
1.199389	0.207112
1.129336	0.180819
1.044621	0.147734
0.849708	0.069188
0.731906	0.022399
0.609231	-0.023778
0.483225	-0.06685
0.356211	-0.104344
0.228783	-0.135356
0.119322	-0.156479
0.01829	-0.171242
-0.072106	-0.180429
-0.147889	-0.185079
-0.217567	-0.186707
-0.27707	-0.185551
-0.328467	-0.182188
-0.375118	-0.176888
-0.413124	-0.17057
-0.446297	-0.162539
-0.474596	-0.152868
-0.49711	-0.142416
-0.516879	-0.129134
-0.532108	-0.112106
-0.538132	-0.089509

Z = 15.0176	
x	y
1.311742	0.234573
1.225163	0.212365
1.180703	0.199266
1.128623	0.182783
1.070338	0.163149
1.007552	0.140897
0.9316	0.112833
0.756804	0.04609
0.651173	0.006364
0.541222	-0.032722
0.428367	-0.068962
0.314723	-0.100186
0.200835	-0.125592
0.103109	-0.142472
0.012999	-0.15381
-0.067549	-0.160351
-0.135017	-0.163098
-0.196999	-0.163252
-0.249882	-0.161101
-0.295516	-0.157125
-0.336893	-0.151501
-0.370564	-0.145127
-0.399906	-0.137308
-0.424882	-0.128111
-0.444701	-0.118323
-0.462024	-0.106048
-0.47524	-0.090503
-0.480166	-0.070138

Z = 16.6153	
x	y
1.190438	0.194346
1.111766	0.175399
1.071341	0.164128
1.023972	0.149889
0.970941	0.132872
0.913799	0.11354
0.844657	0.089111
0.685502	0.030927
0.589332	-0.003681
0.489262	-0.037644
0.386607	-0.068976
0.283311	-0.095731
0.17988	-0.117191
0.0912	-0.131127
0.009494	-0.140133
-0.063489	-0.144912
-0.124581	-0.146431
-0.18067	-0.145669
-0.228491	-0.142943
-0.269726	-0.138662
-0.307084	-0.132943
-0.337459	-0.126653
-0.363895	-0.119113
-0.38636	-0.110382
-0.404149	-0.101187
-0.419644	-0.089768
-0.431373	-0.075432
-0.43553	-0.056831

Z = 18.2129	
x	y
-0.401892	-0.047571
-0.397612	-0.029558
-0.388144	-0.012873
-0.374805	0.004155
-0.35845	0.021193
-0.337366	0.039959
-0.311567	0.059803
-0.281859	0.079835
-0.244951	0.101514
-0.201335	0.123656
-0.151917	0.145471
-0.090256	0.168749
-0.018933	0.190631
0.061175	0.209366
0.160244	0.225145
0.262961	0.234653
0.368668	0.238502
0.471954	0.237053
0.570132	0.231915
0.662153	0.224677
0.739	0.217443
0.80924	0.210318
0.87147	0.203899
0.92411	0.198588
0.972233	0.193968
1.014493	0.190194
1.050605	0.187243
1.083575	0.184815
1.112235	0.182942
1.136482	0.18155
1.157865	0.180469
1.182565	0.179231
1.202208	0.178246

Z = 19.8105	
x	y
-0.376743	-0.040932
-0.372566	-0.024057
-0.363545	-0.008478
-0.350895	0.007387
-0.335422	0.023234
-0.315504	0.040659
-0.291162	0.059052
-0.263157	0.077587
-0.228397	0.0976
-0.187351	0.117986
-0.140875	0.138011
-0.082923	0.159296
-0.015936	0.17918
0.059246	0.196027
0.152153	0.209922
0.248418	0.217895
0.347429	0.220527
0.444123	0.218205
0.536	0.212468
0.622092	0.204815
0.693977	0.197308
0.759677	0.189964
0.817883	0.183358
0.867121	0.177881
0.912135	0.173096
0.951668	0.169159
0.985453	0.166053
1.0163	0.163466
1.043117	0.161441
1.065807	0.159907
1.085818	0.158694
1.108933	0.157302
1.127316	0.156194

Z = 21.4081	
x	y
-0.357476	-0.035897
-0.35338	-0.019896
-0.344703	-0.005165
-0.332585	0.009808
-0.317789	0.024742
-0.298767	0.04114
-0.275543	0.058423
-0.248847	0.075811
-0.215734	0.09455
-0.176659	0.113593
-0.13244	0.13225
-0.077332	0.152013
-0.01367	0.170373
0.057737	0.185783
0.145923	0.198246
0.237244	0.205057
0.331127	0.20677
0.422772	0.203795
0.509825	0.197614
0.591377	0.189658
0.659463	0.181954
0.721686	0.174454
0.776812	0.167714
0.823445	0.162119
0.86608	0.157215
0.903525	0.15316
0.935527	0.14994
0.964749	0.147237
0.990155	0.145099
1.011652	0.143462
1.030612	0.14215
1.052514	0.140643
1.069932	0.139445

Z = 18.2129	
x	y
1.098948	0.166104
1.026252	0.149482
0.98888	0.139521
0.945075	0.126895
0.896024	0.111765
0.843157	0.09454
0.779177	0.072739
0.63188	0.020752
0.542882	-0.010153
0.450298	-0.040417
0.355364	-0.068218
0.259892	-0.09178
0.164357	-0.110442
0.082499	-0.122315
0.007122	-0.129708
-0.060169	-0.133292
-0.116467	-0.133997
-0.168131	-0.13265
-0.212155	-0.129581
-0.250093	-0.125149
-0.284443	-0.119433
-0.312353	-0.113268
-0.33662	-0.105992
-0.357215	-0.09766
-0.373497	-0.088953
-0.387639	-0.078214
-0.398278	-0.064821
-0.401892	-0.047571

Z = 19.8105	
x	y
1.030518	0.145753
0.962296	0.130821
0.92721	0.121815
0.886077	0.110367
0.840007	0.096615
0.790346	0.080933
0.730235	0.061056
0.591831	0.01361
0.508211	-0.014583
0.42124	-0.04214
0.33209	-0.067362
0.242478	-0.088599
0.152852	-0.105234
0.076095	-0.115622
0.00545	-0.121863
-0.057589	-0.124603
-0.110309	-0.124741
-0.158669	-0.122996
-0.199861	-0.119705
-0.235341	-0.11519
-0.26745	-0.109503
-0.293524	-0.103455
-0.316177	-0.096397
-0.335382	-0.088381
-0.350545	-0.080054
-0.363686	-0.069839
-0.373522	-0.057164
-0.376743	-0.040932

Z = 21.4081	
x	y
0.978085	0.130294
0.913292	0.116649
0.879959	0.108371
0.840874	0.09782
0.79709	0.085121
0.749885	0.070615
0.692742	0.052207
0.561157	0.008227
0.48166	-0.017896
0.398991	-0.043387
0.314276	-0.066644
0.229155	-0.086109
0.144058	-0.101202
0.07121	-0.110462
0.004189	-0.11583
-0.055593	-0.117932
-0.105572	-0.117645
-0.151403	-0.115602
-0.190425	-0.112148
-0.224024	-0.107576
-0.254417	-0.101917
-0.279086	-0.095963
-0.300504	-0.089077
-0.318646	-0.081308
-0.332954	-0.073276
-0.345329	-0.063465
-0.354552	-0.051344
-0.357476	-0.035897

Z = 23.0058	
x	y
-0.341426	-0.031728
-0.337401	-0.016458
-0.329012	-0.002435
-0.317337	0.011795
-0.303106	0.025967
-0.284833	0.041509
-0.262542	0.057867
-0.236937	0.0743
-0.205198	0.091978
-0.167767	0.109903
-0.125428	0.127422
-0.07269	0.14592
-0.011799	0.163014
0.056463	0.17723
0.140716	0.188508
0.22792	0.194357
0.317531	0.195313
0.404973	0.191803
0.488008	0.185259
0.565781	0.17706
0.630703	0.169198
0.690032	0.161575
0.742594	0.154729
0.787057	0.149041
0.827711	0.144041
0.863418	0.139892
0.893936	0.13658
0.921805	0.133783
0.946036	0.131555
0.96654	0.129833
0.984625	0.128441
1.005517	0.126841
1.022131	0.125569

Z = 24.6034	
x	y
-0.3259	-0.027898
-0.321951	-0.013335
-0.313849	0.000005
-0.302611	0.01352
-0.288936	0.026962
-0.271395	0.041684
-0.250016	0.057156
-0.225475	0.072678
-0.195074	0.089345
-0.159242	0.106209
-0.118732	0.122649
-0.068295	0.139951
-0.01009	0.155854
0.055123	0.168955
0.135569	0.179133
0.218792	0.184104
0.304275	0.184383
0.387658	0.180409
0.466815	0.173568
0.540941	0.165181
0.602812	0.157209
0.659349	0.149504
0.709436	0.14259
0.751808	0.136839
0.79055	0.131774
0.82458	0.127555
0.853666	0.124174
0.880229	0.121304
0.903327	0.119003
0.922872	0.117213
0.940113	0.115754
0.96003	0.114077
0.975868	0.112743

Z = 26.2010	
x	y
-0.308179	-0.024047
-0.304341	-0.01029
-0.296587	0.00228
-0.285868	0.014992
-0.272848	0.027618
-0.256164	0.041427
-0.235848	0.055918
-0.212543	0.070433
-0.183692	0.085991
-0.149708	0.101695
-0.111307	0.116964
-0.063517	0.132977
-0.008399	0.147609
0.053323	0.159538
0.12942	0.16859
0.208101	0.172692
0.288884	0.172336
0.367652	0.16797
0.442405	0.16092
0.512393	0.152444
0.570803	0.144448
0.624174	0.136744
0.671456	0.129837
0.711455	0.124085
0.748029	0.119009
0.780157	0.11477
0.807619	0.111358
0.8327	0.108449
0.85451	0.106103
0.872968	0.104266
0.88925	0.102761
0.908059	0.101029
0.923016	0.099651

Z = 23.0058	
x	y
0.934408	0.117485
0.872472	0.104908
0.840599	0.097235
0.80322	0.08743
0.761341	0.075604
0.716184	0.062076
0.661514	0.04489
0.535611	0.00379
0.45955	-0.020611
0.380467	-0.044386
0.299448	-0.066009
0.218068	-0.084004
0.136743	-0.097818
0.067152	-0.106144
0.00315	-0.11079
-0.05392	-0.112366
-0.101616	-0.111728
-0.14534	-0.109442
-0.182557	-0.105855
-0.214589	-0.10124
-0.243554	-0.095607
-0.267054	-0.089735
-0.287444	-0.082995
-0.304701	-0.075434
-0.318297	-0.067649
-0.330036	-0.058179
-0.338749	-0.046521
-0.341426	-0.031728

Z = 24.6034	
x	y
0.892135	0.105641
0.832966	0.094062
0.80251	0.086956
0.766785	0.077851
0.726754	0.066848
0.683584	0.054241
0.631313	0.038206
0.510926	-0.000175
0.4382	-0.022953
0.362596	-0.045111
0.28516	-0.065198
0.207407	-0.081817
0.129736	-0.094441
0.063296	-0.101903
0.002214	-0.105889
-0.052234	-0.106991
-0.097725	-0.106043
-0.139416	-0.103548
-0.17489	-0.099857
-0.205411	-0.09522
-0.232999	-0.089633
-0.255373	-0.083855
-0.274775	-0.077269
-0.291181	-0.069922
-0.304094	-0.062387
-0.315224	-0.053254
-0.323452	-0.042053
-0.3259	-0.027898

Z = 26.2010	
x	y
0.843837	0.093535
0.787838	0.083003
0.759005	0.076497
0.725178	0.068137
0.687269	0.058012
0.646381	0.04639
0.596869	0.03159
0.482823	-0.003869
0.413931	-0.024904
0.342324	-0.045332
0.269001	-0.063786
0.195402	-0.078954
0.121911	-0.090341
0.059071	-0.096923
0.001319	-0.100254
-0.050142	-0.100902
-0.093123	-0.099675
-0.132503	-0.097011
-0.165999	-0.09326
-0.194808	-0.088649
-0.220838	-0.08316
-0.241939	-0.077528
-0.260225	-0.071153
-0.275676	-0.06408
-0.287824	-0.056853
-0.298274	-0.048126
-0.305968	-0.037464
-0.308179	-0.024047

Z = 27.7986	
x	y
-0.285528	-0.019975
-0.28187	-0.007244
-0.274595	0.004355
-0.264574	0.016065
-0.252422	0.027676
-0.236869	0.040358
-0.217948	0.053645
-0.19626	0.066931
-0.169429	0.081143
-0.137844	0.095451
-0.102171	0.109323
-0.057801	0.123814
-0.006655	0.136969
0.050584	0.147566
0.121111	0.155387
0.193994	0.158598
0.268789	0.157657
0.341687	0.153012
0.410849	0.145909
0.475586	0.137519
0.529608	0.129662
0.578966	0.122113
0.622692	0.115349
0.659684	0.109713
0.69351	0.104729
0.723225	0.100554
0.748627	0.097182
0.771827	0.094294
0.792003	0.091954
0.80908	0.090111
0.824144	0.088591
0.841546	0.086843
0.855385	0.085453

Z = 29.3962	
x	y
-0.255201	-0.015648
-0.251834	-0.004286
-0.245245	0.006036
-0.236202	0.016435
-0.225257	0.026729
-0.211265	0.037955
-0.19426	0.049696
-0.174784	0.061415
-0.150706	0.073921
-0.12238	0.086477
-0.090408	0.098611
-0.050661	0.111231
-0.004873	0.122603
0.046339	0.131639
0.109397	0.138087
0.174524	0.140392
0.241327	0.138968
0.306406	0.134244
0.368128	0.127349
0.425889	0.119338
0.474081	0.111887
0.518111	0.104749
0.557116	0.098356
0.590115	0.093025
0.62029	0.088302
0.6468	0.084335
0.669463	0.081121
0.690164	0.078356
0.708168	0.076104
0.723407	0.074323
0.736851	0.072846
0.752381	0.071146
0.764732	0.069794

Z = 30.9939	
x	y
-0.214445	-0.011194
-0.211529	-0.001662
-0.205916	0.006969
-0.198241	0.015647
-0.188969	0.024222
-0.177132	0.033556
-0.16276	0.043301
-0.146312	0.053009
-0.125994	0.063343
-0.102108	0.073686
-0.075163	0.083646
-0.041685	0.093955
-0.003143	0.103167
0.039936	0.110373
0.092944	0.11531
0.147657	0.116747
0.203749	0.115033
0.258367	0.110558
0.31015	0.104282
0.358596	0.097098
0.399012	0.090459
0.435934	0.084114
0.468642	0.078436
0.496314	0.073697
0.521619	0.069491
0.543852	0.06595
0.56286	0.063071
0.580224	0.060586
0.595327	0.058553
0.608111	0.056937
0.61939	0.055591
0.63242	0.054041
0.642782	0.052809

Z = 27.7986	
x	y
0.782025	0.080378
0.730095	0.071033
0.703349	0.065216
0.671966	0.057718
0.636788	0.048613
0.598842	0.038143
0.552885	0.02479
0.44702	-0.007236
0.383073	-0.026226
0.316616	-0.044631
0.248585	-0.061193
0.180325	-0.074705
0.112192	-0.084711
0.053958	-0.090341
0.00046	-0.092994
-0.047193	-0.093206
-0.086981	-0.091743
-0.123423	-0.088975
-0.154408	-0.085243
-0.181047	-0.080749
-0.205107	-0.075461
-0.224602	-0.070078
-0.241485	-0.064028
-0.255737	-0.05735
-0.26693	-0.050556
-0.27654	-0.042383
-0.283583	-0.032436
-0.285528	-0.019975

Z = 29.3962	
x	y
0.699165	0.065825
0.652706	0.057868
0.62877	0.052872
0.600678	0.046408
0.569184	0.038535
0.535208	0.029463
0.494053	0.017874
0.399239	-0.009957
0.34197	-0.026449
0.282465	-0.042399
0.221567	-0.056688
0.160488	-0.068246
0.099552	-0.076668
0.047491	-0.081252
-0.000317	-0.083209
-0.042884	-0.083027
-0.078413	-0.081408
-0.110942	-0.078648
-0.13859	-0.075067
-0.16235	-0.070838
-0.1838	-0.06592
-0.201172	-0.060952
-0.216205	-0.055407
-0.228883	-0.049321
-0.238828	-0.043155
-0.247348	-0.035768
-0.253561	-0.026812
-0.255201	-0.015648

Z = 30.9939	
x	y
0.587686	0.049976
0.548607	0.043641
0.528466	0.039623
0.504824	0.034403
0.478314	0.028023
0.449709	0.020655
0.415057	0.011223
0.335214	-0.011455
0.286991	-0.024886
0.236893	-0.037844
0.185639	-0.049393
0.134254	-0.058644
0.083012	-0.065259
0.039255	-0.068713
-0.00091	-0.06999
-0.036658	-0.069509
-0.066483	-0.067873
-0.093781	-0.0653
-0.116973	-0.062075
-0.136894	-0.058335
-0.15487	-0.054032
-0.169421	-0.049719
-0.182003	-0.044938
-0.192604	-0.039722
-0.200908	-0.034458
-0.208006	-0.028178
-0.213155	-0.020597
-0.214445	-0.011194

Anexo C. Catalogo y especificaciones técnicas turbina NORDEX-N60

FACTS AND FIGURES.

N60/1300 kW		N60/1300 kW	
Rotor		Yaw system	
Number of blades	3	Yaw bearing	Ball bearing
Rotor speed	12.8/19.2 rpm	Brake	Disc brake
Rotor diameter	60 m	Yaw drive	Three asynchronous motors with built-in brakes
Swept area	2,828 m ²	Speed	< 0.6 °/s
Power regulation	Stall	Control system	
Cut-in wind speed	Approx. 3–4 m/s	Type	PLC, Remote Field Controller (RFC)
Cut-out wind speed	25 m/s	Grid connection	Thyristor controlled
Rated power at	Approx. 15 m/s	Scope of monitoring	Remote monitoring of more than 300 different parameters, e. g. temperature sensors, hydraulic sensors, wind sensor set
Survival wind speed	70 m/s – IEC	Recording	Production data, event lists with filter function, long and short-term trends
Brake	Pivotable blade trips	Visualisation	Panel PC in control cabinet, web-based
Weight	Approx. 21,500 kg	Brakes	
Blades		Design	Two independent systems, fail-safe, various brake sequences, soft-braking function
Blade length	29 m	Aerodynamic	Pivotable blade tips
Material	GRP	Mechanical	Hydraulic disc brake
Weight	Approx. 5,000 kg	Tower	
Gearbox		Type	Modular steel tower, cylindrical, upper segment conical
Type	Combined 3-stage gearbox	Hub heights	Tubular tower 46 m, certificate IEC 1a, Tubular tower 60 m, certificate DIBt 3, IEC 1a Tubular tower 69 m, certificate DIBt 3
Gear ratio	50 Hz: 1 : 78.3 / 60 Hz: 1 : 94.4		
Weight	Approx. 10,900 kg		
Oil quantity	280 l		
Oil change	Semi-annual check, change as required		
Main shaft bearing	Cylindrical roller bearing		
Generator			
Power	250/1,300 kW		
Voltage	690 V		
Type	Asynchronous, 6/4 pole, liquid-cooled		
Speed	50 Hz: 1,000/1,500 rpm, 60 Hz: 1,200/1,800 rpm		
Insulation class	IP 54		
Weight	Approx. 5,500 kg		

POWERCURVE N60/1300 KW

Windspeed [m/s]	Power [kW]	Cp
4	29	0.262
5	73	0.337
6	131	0.350
7	241	0.404
8	376	0.424
9	536	0.424
10	704	0.406
11	871	0.378
12	1016	0.339
13	1124	0.295
14	1247	0.262
15	1301	0.223
16	1344	0.189
17	1364	0.160
18	1322	0.131
19	1319	0.111
20	1314	0.095
21	1312	0.082
22	1307	0.071
23	1299	0.062
24	1292	0.054
25	1292	0.048

Rounded values based on measurements of DEWI (April 1999) and aerodynamical calculations

Anexo D. Análisis modal

Este análisis busca evitar la resonancia que pudiera presentarse en el desempeño del álabe, se debe considerar la rigidez de los componentes y también la interacción entre la estructura como tal y el sitio donde se instala, la base donde son instaladas son de gran rigidez esto para evitar los efectos que podría tener la resonancia para evitar esto la frecuencia natural del sistema completo (álabes, torre, estructura y anclaje) no debe encontrarse en el rango de la frecuencia de trabajo de la turbina, se realizó el análisis modal de un solo álabe con el empotramiento teniendo los siguientes modos de vibración.

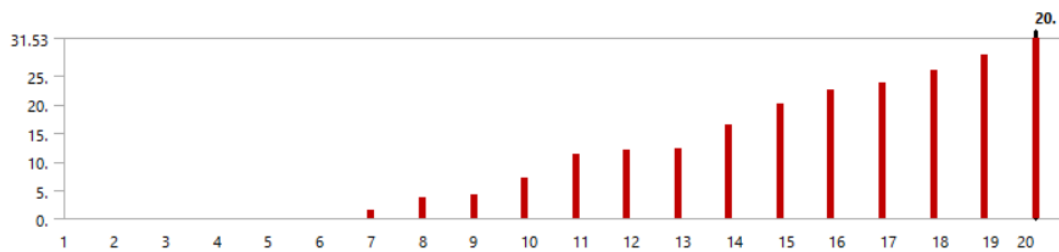
Modos de vibración empotrado.

Modo	Frecuencia [Hz]
1	0
2	9.25E-04
3	2.83E-03
4	1.70E-02

5	3.07E-02
6	6.96E-02
7	1.3539
8	3.6601
9	4.2388
10	7.1343

Fuente: Elaboración propia.

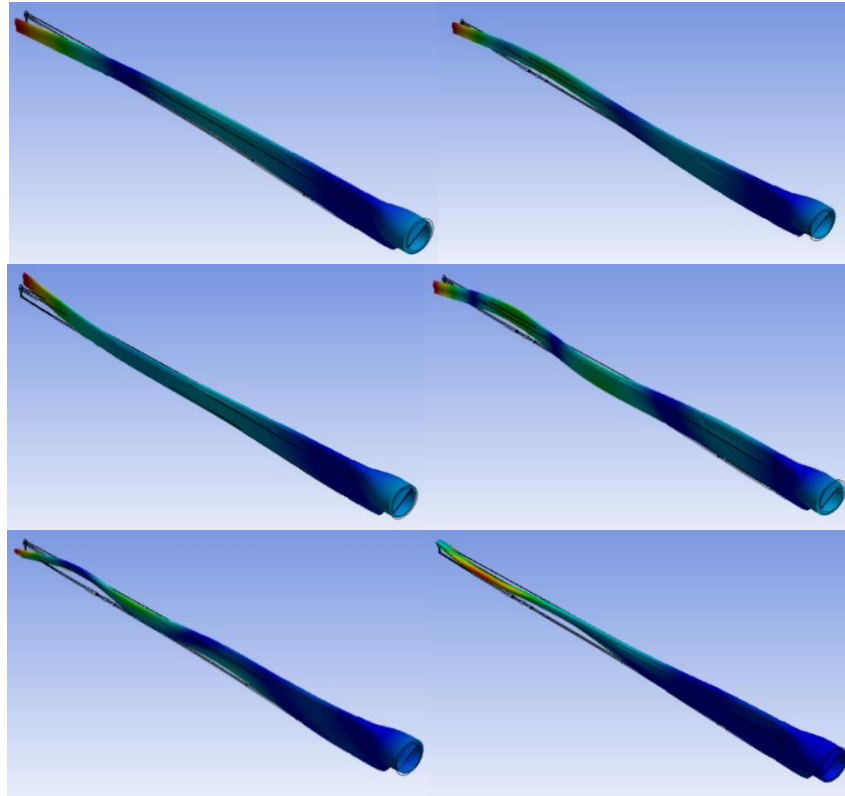
Modos de vibración empotrado.



Fuente: Elaboración propia.

Los primeros 6 modos de vibración se encuentran a frecuencias muy bajas y son consideradas frecuencias de sólido rígido desde las número 7 se asume como el primer modo a 1.35 [Hz] y el segundo más cercano a 3.7 [Hz].

Deformación modos de vibración empotrado del 7 a 12



Fuente: Elaboración propia.

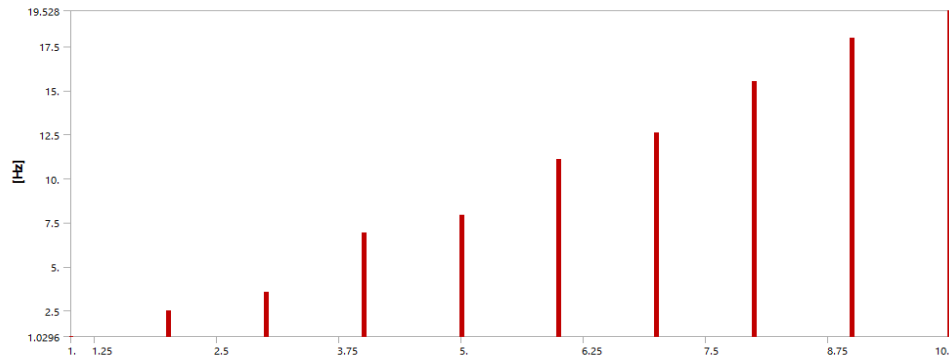
Modos de vibración libre-libre

<i>Modo</i>	Frecuencia [Hz]
1	1.0296
2	2.4973
3	3.5412
4	6.892
5	7.918
6	11.081
7	12.601
8	15.513
9	17.988
10	19.528

Fuente: Elaboración propia.

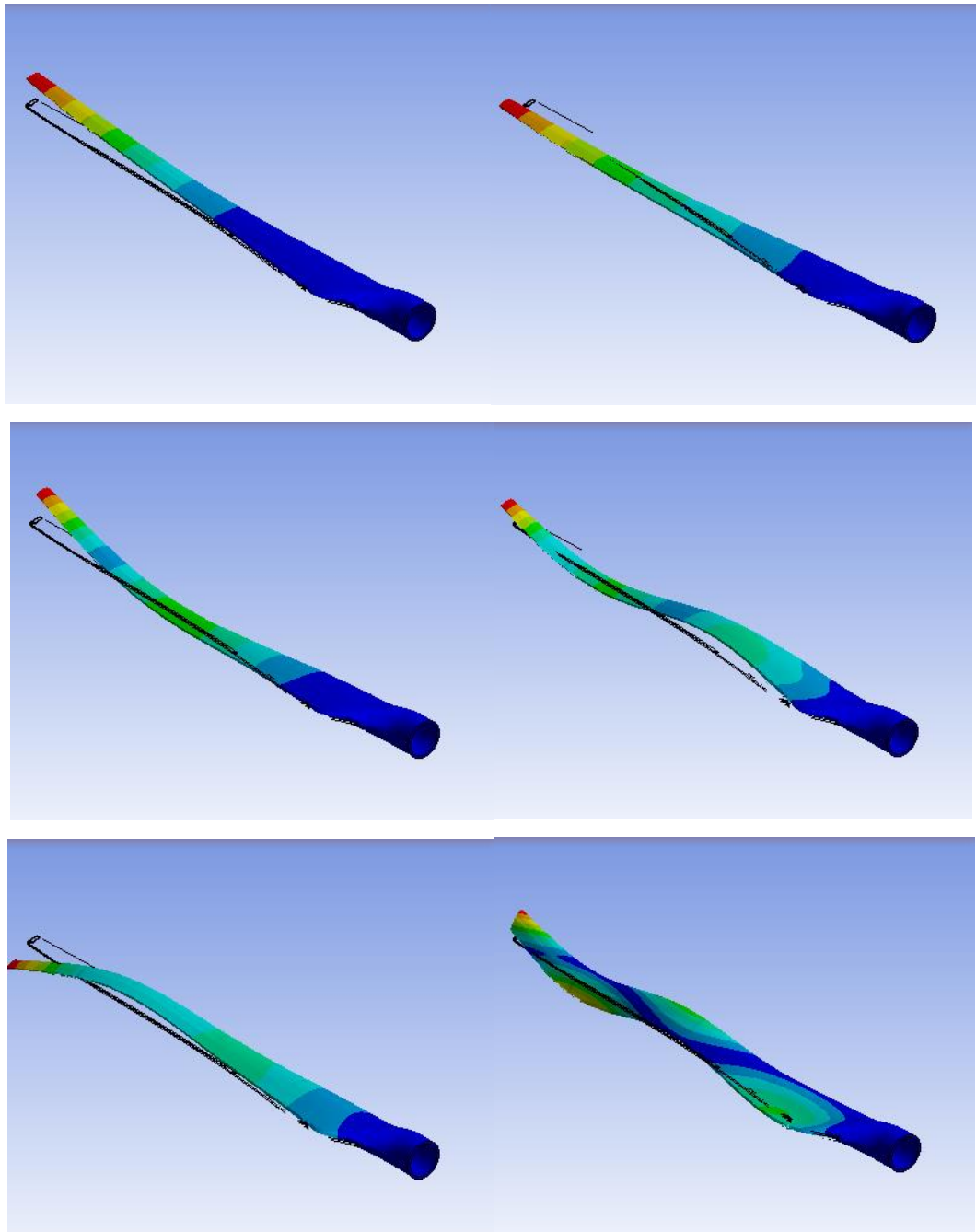
Se analizó los modos de vibración del álabe cuando se encuentra en condición libre-libre:

Modos de vibración libre-libre.



Fuente: Elaboración propia.

Deformación modos de vibración libre-libre del 1 a 6.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo E. XI Congreso Colombiano de Métodos Numéricos.



Bucaramanga, 26 de mayo de 2017.

Estimado(s) investigador(es),

En nombre del comité científico del XI Congreso Colombiano de Métodos Numéricos, tengo el gusto de comunicarle que su trabajo titulado: "Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT." con autores: Kevin Molina, Daniel Ortega, Manuel Martínez, Octavio González-Estrada, ha sido aceptado bajo la modalidad de Ponencia oral para ser presentado en la agenda del evento que se llevará a cabo los días 16, 17 y 18 de agosto de 2017 en la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Le informo que el trabajo en extenso será publicado en las memorias del evento con registro ISBN.

Con la seguridad de encontrarnos en Bucaramanga, les saluda,
Atentamente,

Ricardo Alfredo Cruz Hernández
Director del XI Congreso Colombiano de Métodos Numéricos
Universidad Industrial de Santander



Organiza:



Anexo F. International Week of Research, Development and Innovation- SIIDI 2017.



Bucaramanga, September 12/2017

To whom it may concern

On behalf of the organizing committee, I hereby certify that the author(s) "Kevin Andrey Molina Cuadros; Daniel Alejandro Ortega Alonso; Manuel del Jesús Martínez; Octavio Andrés González-Estrada" sent the contribution entitled "Optimization of a HAWT wind turbine by modeling fluid structure interaction (FSI)" for presentation at the *International Week of Research, Development and Innovation – SIIDI 2017*, to be held October 2-6 at Bucaramanga, Colombia. According to initial assessment of the Scientific Committee, the abstract has been selected to be presented in the "Oral" sessions, thematic area "Renewable Energy And Thermal Science".

Respectfully submitted,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sandra P. Cuervo A.', written in a cursive style.

Dr. Sandra P. Cuervo A.
CIIMCA 2017 & CICTS 2017
Scientific Committee Secretary
ciimca2017.bga@upb.edu.co
<http://ciimca.upbbga.edu.co>

Anexo G. Conferencia Internacional de Energía Sostenible & Workshop de Materiales para Nuevas Tecnologías de Energía.



Conferencia Internacional
de Energía Sostenible &
Workshop Materiales para
Nuevas Tecnologías
de Energía

17-20 de octubre de 2017
Bucaramanga, Colombia
Campus central UIS

Bucaramanga, 7 de octubre de 2017

Asunto: Aceptación Resumen para partición COIES 2017

Referencia de Resumen No: COIES 4-14

Estimado Autor:
DANIEL ALEJANDRO ORTEGA ALONSO

En nombre del Comité Organizador de la "Conferencia Internacional de Energía Sostenible & Workshop de Materiales para Nuevas Tecnologías de Energía", la cual se realizará del 17 al 20 de octubre del 2017 en la ciudad de Bucaramanga, Colombia; le informamos que su trabajo titulado "OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA DE UNA TURBINA EÓLICA TIPO HAWT A PARTIR DE LA GEOMETRÍA DE SU ÁLABE", ha sido aceptado como ponencia oral. El número de referencia de su resumen es el <COIES 4-14>. Este número debe ser citado en cualquier correspondencia futura con respecto a su artículo.

Así mismo, queremos confirmarle que las memorias del evento tienen registro ISBN y que contendrán todos los trabajos aceptados tanto en modalidad oral como poster. Le recordamos que los trabajos presentados en el evento pueden ser seleccionados para ser publicados en las revistas asociadas, una vez finalice el evento.

Agradecemos la atención prestada y esperamos contar con su contribución al desarrollo del COIES 2017. Usted puede ahora registrar sus datos para generar recibo de pago de acuerdo a su categoría en: https://www.uis.edu.co/ventas_web/indexUIS.jsp

Atentamente,

Viatcheslav Kafarov
Presidente
Conferencia Internacional de Energía Sostenible & Workshop
de Materiales para Nuevas Tecnologías de Energía COIES 2017

www.coies2017.com

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Correo electrónico: coies2017@uis.edu.co
decliq3@uis.edu.co
Tel.: (+57-7) 634 4000
Ext.:1332, 2436, 2424

Organiza

Facultad
de Ingenierías
Físico Químicas



Universidad
Industrial de
Santander

Apoya



COLCIENCIAS

Anexo H. 20th International Conference on Composite Materials and renewable Energy Engineering.



ACCEPTANCE LETTER

January 31, 2018

Bachelor Degrees Kevin Andrey Molina Cuadros
Industrial University of Santander
Colombia

Herewith, the international scientific committee is happy to inform you that the peer-reviewed draft paper code 18FR030413 entitled (Sensitivity Analysis Optimization of a Horizontal Axis Wind Turbine from Its Aerodynamic Profiles by Kevin Molina, Daniel Ortega, Manuel Martinez, Andres Gonzalez-Estrada, Javier Rugeles) has been accepted for oral presentation as well as inclusion in the conference proceedings of the ICCMREE 2018 : 20th International Conference on Composite Materials and Renewable Energy Engineering to be held in Paris, France during March, 15-16, 2018. The high-impact conference papers will also be considered for publication in the special journal issues at <http://waset.org/Publications>.

Conference Registration and Writing Formatted Paper:

1. Conference registration documents should be submitted to:
<http://waset.org/apply/2018/03/paris/ICCMREE?step=2>
2. Word Template File should be Downloaded at
<http://waset.org/downloads/template.docx>
3. Latex Style File should be Downloaded at <http://waset.org/downloads/latex.zip>
4. Copyright Transfer Statement Document should be Downloaded at
waset.org/publications/copyright?paperCode=18FR030413

Letter of Invitation and Visa Requirements:

If you need an invitation letter to get an entrance Visa, please fill in the online form to get a letter at <http://waset.org/apply/2018/03/paris/ICCMREE?step=1>.

We look forward to your participation in the ICCMREE 2018 : 20th International Conference on Composite Materials and Renewable Energy Engineering.

Sincerely,
International Scientific Committee
ICCMREE 2018 Paris, France
<http://waset.org/conference/2018/03/paris/ICCMREE>

WORLD ACADEMY OF SCIENCE,
ENGINEERING AND TECHNOLOGY