

	GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS	Código	FO-SB- 12/v0
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN	Página	1/1

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): MARCO JOSE APELLIDOS: DUARTE MARQUEZ

NOMBRE(S): LEOPOLDO APELLIDOS: VALERO JAIMES

FACULTAD: INGENIERIA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): ALBERTO APELLIDOS: FALLA ARIAS

CODIRECTOR:

NOMBRE(S): _____ APELLIDOS: _____

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): MODELAMIENTO MATEMATICO, SIMULACIÓN DEL PERFIL AERODINAMICO Y DISEÑO DEL ALABE DE UN AEROGENERADOR BAJO LAS CONDICIONES DE LA CIUDAD DE CÚCUTA

RESUMEN

En este proyecto se realizó el modelamiento matemático, simulación y optimización del perfil aerodinámico con el objetivo de diseñar el álabe de un aerogenerador bajo las condiciones de la ciudad de Cúcuta. Para ello, se realizó una investigación bajo el enfoque cuantitativo como un estudio de tipo de investigación experimental y aplicada apoyada por el grupo de investigación de fluidos y térmicas (FLUTER). Como recurso de validación de los resultados aerodinámicos del perfil SG6043, el cual fue seleccionado mediante una nueva metodología y por presentar mejores condiciones aerodinámicas, se utilizaron estudios experimentales realizados en el Laboratorio de Aerodinámica Subsónica del Departamento de Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica de la Universidad de Illinois Urbana-Champaign. El método numérico de paneles de vórtices de intensidad lineal, junto a un algoritmo de optimización basado en gradientes y el modelo de turbulencia $k-k\ell-\omega$, fueron utilizados para desarrollar el modelamiento matemático, la optimización y simulación del perfil aerodinámico, respectivamente, para posteriormente desarrollar el diseño del álabe del aerogenerador por medio del método BEMT, arrojando resultados satisfactorios y en concordancia con los resultados experimentales. Como material de apoyo computacional se utilizaron herramientas como MATLAB para el modelamiento y optimización, y ANSYS FLUENT para la simulación del perfil aerodinámico.

PALABRAS CLAVE: modelamiento matematico, simulación del perfil aerodinamico.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 361 PLANOS: _____ ILUSTRACIONES: _____ CD ROOM: 1

Elaboró		Revisó		Aprobó	
Equipo Operativo del Proceso		Comité de Calidad		Comité de Calidad	
Fecha	24/10/2014	Fecha	05/12/2014	Fecha	05/12/2014

COPIA NO CONTROLADA

MODELAMIENTO MATEMATICO, SIMULACIÓN DEL PERFIL AERODINAMICO Y
DISEÑO DEL ALABE DE UN AEROGENERADOR BAJO LAS CONDICIONES DE LA
CIUDAD DE CÚCUTA

MARCO JOSE DUARTE MARQUEZ

LEOPOLDO VALERO JAIMES

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

MODELAMIENTO MATEMATICO, SIMULACIÓN DEL PERFIL AERODINAMICO Y
DISEÑO DEL ALABE DE UN AEROGENERADOR BAJO LAS CONDICIONES DE LA
CIUDAD DE CÚCUTA

MARCO JOSE DUARTE MARQUEZ

LEOPOLDO VALERO JAIMES

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

ALBERTO FALLA ARIAS

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: CÚCUTA, 18 DE DICIEMBRE DEL 2019

HORA: 8 :00 AM

LUGAR: FU-306

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA MECANICA

TÍTULO DE LA TESIS: MODELAMIENTO MATEMÁTICO, SIMULACIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO Y DISEÑO DEL ALABE DE UN AEROGENERADOR BAJO LAS CONDICIONES DE LA CIUDAD DE CÚCUTA.

Jurados:

Ing. VERA DUARTE LUIS EMILIO
Ing. MORENO GAMBOA FAUSTINO
Eps. JUAN CARLOS RAMIREZ

Director: ING. FALLA ARIAS ALBERTO

Nombre de los estudiantes	Código	Calificación	
		Letra	Número
MARCO JOSÉ DUARTE MARQUEZ	1121443	cinco, cero	5.0
LEOPOLDO VALERO JAIMES	1121433	cinco, cero	5.0

LAUREADO

Ing. VERA DUARTE LUIS EMILIO

Ing. MORENO GAMBOA FAUSTINO

Ing. JUAN CARLOS RAMIREZ

Vo. Bo GONZALO DE LA CRUZ ROMERO G.
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Mecánica

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a mi señora madre y mi señor padre por haberme enseñado el significado de humildad, trabajo y lucha constante, por ser además mi mayor motivo de orgullo, sacrificio e inspiración personal en todo este recorrido; a mis hermanas, sobrino y familia por estar siempre presentes.

A los compañeros de estudio y amigos más cercanos, Hermanos de otra madre, Maestros de Ingeniería Mecánica y todas esas personas que de alguna u otra manera contribuyeron a que este sueño fuera posible.

Marco Duarte

A la energía superior que me bendice, a mi madre Susana Jaimes por ser mi orgullo, motivación y arquetipo, a mi hermosa abuela, a mi padre Tulio Valero, a Martha Atuesta, mis hermanos y familia. A todos eso amigos y personas que se han convertido en familia, que me han dado su apoyo y amor en este tiempo.

Leopoldo Valero

Contenido

	pág.
Introducción	24
1. Problema	28
1.1 Título	28
1.2 Planteamiento del Problema	28
1.3 Formulación del Problema	29
1.4 Objetivos	29
1.4.1 Objetivo general	29
1.4.2 Objetivos específicos	29
1.5 Justificación del Problema	30
1.6 Delimitaciones	31
1.6.1 Delimitación espacial	31
1.6.2 Delimitación temporal	31
1.6.3 Delimitación conceptual	31
2. Marco Referencial	32
2.1 Estado del Arte	32
2.2 Marco Conceptual	37
2.3 Marco Contextual	40
2.4 Marco Legal	40
2.5 Marco Teórico	42
2.5.1 Aerogeneradores	42
2.5.2 Perfiles aerodinámicos	43
2.5.2.1 Terminología	43

2.5.2.2 Historia	45
2.5.2.3 Características de un perfil naca de 4 dígitos	47
2.5.3 Teoría aerodinámica básica en turbinas de viento	49
2.5.3.1 Fuerzas y momentos aerodinámicos	49
2.5.3.2 Momento de cabeceo	52
2.5.3.3 Centro aerodinámico	53
2.5.3.4 Tipos de arrastre	56
2.5.3.5 Capa límite y gradientes de presión	57
2.5.3.6 Distribución de presión sobre un perfil aerodinámico	59
2.5.4 Métodos de diseño de perfiles aerodinámicos	61
2.5.5 Teoría Aerodinámica necesaria para la solución del modelo matemático	62
2.5.5.1 Cinemática del flujo invíscido e incompresible	63
2.5.5.2 Flujo vórtice	76
2.5.5.3 Dinámica del campo de flujo	78
2.5.5.4 Ecuaciones gobernantes, condiciones de contorno, superposición de flujos, y condición de kutta	81
2.5.5.5 Singularidad: definición, tipos y grados polinómicos	88
2.5.6 Fenómeno del flujo a bajo reynolds en superficies aerodinámicas	89
2.5.6.1 Burbuja de separación laminar	90
2.5.6.2 Efectos aerodinámicos	93
2.5.7 Parametrización del perfil aerodinámico	97
2.5.7.1 Familia de perfiles PARSEC	100
2.5.8 Optimización en problemas de diseño aerodinámico	110
2.5.8.1 Definición e inconvenientes	110

2.5.8.2 Tipos	110
2.5.8.3 Optimización aplicada a turbinas de viento	113
2.5.8.4 Planteamiento del problema de optimización	115
2.5.8.5 Método del gradiente	119
2.5.9 Diseño aerodinámico del rotor	127
2.5.9.1 Teoría de momento lineal y límite de betz	128
2.5.9.2 Turbina eólica de eje horizontal ideal con rotación de estela	135
2.5.9.3 Teoría de momento de álabe	141
2.5.9.4 Teoría de momento de elemento de álabe (BEMT)	144
2.5.10 Diseño geométrico del rotor	150
2.5.11 Simulación CFD	153
2.5.11.1 Descripción general	153
2.5.11.2 Ecuaciones gobernantes	154
2.5.11.3 Métodos de discretización	155
2.5.11.4 Modelos de turbulencia	156
2.5.11.5 Condiciones límite y condiciones iniciales	158
2.5.11.6 Enmallado	160
3. Diseño Metodológico	161
3.1 Tipo de Investigación	161
3.2 Instrumentos para la Recolección de Información	161
3.2.1 Fuentes primarias	161
3.2.2 Fuentes secundarias	161
3.3 Metodología	162
4. Desarrollo del Proyecto	164

4.1	Análisis de Datos Suministrados por la Estación Meteorológica	165
4.2	Implementación del Modelo Matemático	165
4.2.1	Enunciado del problema de flujo potencial sobre perfiles aerodinámicos	165
4.2.2	Solución numérica del campo de flujo en perfiles aerodinámicos	166
4.2.2.1	Método de paneles	166
4.2.3	Aplicación en matlab del método de panel de intensidad lineal	178
4.3	Xfoil	183
4.3.1	Descripción general	183
4.4	Pre-Selección de Perfiles Aerodinámicos	185
4.5	Resultados del Algoritmo de Optimización	201
4.5.1	Análisis de resultados del algoritmo de optimización	214
4.6	Resultados y Análisis de las Polares Obtenidas	218
4.6.1	Perfil E387 (E)	222
4.6.1.1	Coefficiente de sustentación vs alpha (α)	223
4.6.1.2	Coefficiente de Arrastre vs Alpha (α)	227
4.6.1.3	Eficiencia (Cl/Cd) vs Alpha (α)	230
4.6.1.4	Coefficiente de sustentación (Cl) vs coeficiente de arrastre (Cd)	233
4.6.2	Perfil SG6043	235
4.6.2.1	Coefficiente de sustentación vs alpha (α)	236
4.6.2.2	Coefficiente de arrastre vs alpha (α)	239
4.6.2.3	Eficiencia (Cl/Cd) vs alpha (α)	242
4.6.2.4	Coefficiente de sustentación (Cl) vs coeficiente de arrastre (Cd)	245
4.7	Simulación en Ansys Fluent	250
4.7.1	Resultados y análisis finales del perfil seleccionado	257

4.7.1.1 Coeficiente de sustentación vs alpha (α)	259
4.7.1.2 Coeficiente de arrastre vs alpha (α)	266
4.7.1.3 Eficiencia (Cl/Cd) vs alpha (α)	272
4.7.1.4 Coeficiente de sustentación (Cl) vs coeficiente de arrastre (Cd)	277
4.8 Distribución de Presión Sobre el Perfil Seleccionado	282
4.8.1 XFLR5 (xfoil)	283
4.8.2 Ansys fluent	286
4.9 Contornos de Presión y Velocidad Sobre el Perfil Seleccionado	291
4.9.1 Contorno de coeficientes de presión	291
4.9.2 Contorno de velocidad y vector magnitud de la velocidad	293
4.10 Procedimiento de Diseño del Rotor del Aerogenerador	295
5. Conclusiones	307
6. Proyecciones a Futuro	312
Referencias Bibliográficas	313
Anexos	324