

***REDISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PERFIL AERODINÁMICO PARA UN
AEROGENERADOR FLOTANTE QUE SE ADAPTE A LAS CONDICIONES
METEOROLÓGICAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ***

***JOSUE FERNANDO AVILA GARZON
JULIETH PAOLA TORRES GARCIA***

***FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ
2016***

**REDISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PERFIL AERODINÁMICO PARA UN
AEROGENERADOR FLOTANTE QUE SE ADAPTE A LAS CONDICIONES
METEOROLÓGICAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ**

**AUTORES:
JOSUE FERNANDO AVILA GARZON
JULIETH PAOLA TORRES GARCIA**

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero aeronáutico

**DIRECTOR:
EDISSON HERNANDO PAGUATIAN TUTISTAR
ING. MECANICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ
2016**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., 14 de octubre de 2016

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen por guiar cada uno de mis pasos y haberme permitido conocer a personas maravillosas que me hicieron crecer como profesional y como persona.

A mi papá Néstor Fernando Ávila, a mi mamá Martty Liliana Garzón, y a mis hermanos Nicolás y Alexandra que me acompañaron en todo el proceso brindándome compañía, amor y sobre todo siempre con la mano amiga y las palabras sabias para continuar cuando pensaba renunciar.

A mis abuelas que sé que me cuidan con sus oraciones una en el cielo y la otra aquí en la tierra.

A todos mis amigos en especial a Julieth y Karen, personas maravillosas que dejaron huella y fueron parte de mi proceso, a mis profesores por enseñarme que cada día puedo ser mejor.

Y en general a todas las personas que de una u otra manera compartieron este camino conmigo.

A la Fundación Universitaria los libertadores por abrirme las puertas y haber ayudado a mi formación profesional.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir, e iluminarme y guiarme en cada paso que doy, para forjar mi camino y las oportunidades que me ha brindado indicándome por donde debo continuar para cumplir mis sueños y metas.

A mi madre Marina, por darme la vida, acompañarme, apoyarme y guiarme siempre en cada instante de mi vida y por infundirme el ser perseverante, constante, paciente y dedicada, para ser una mejor persona y lograr cumplir mis propósitos en la vida empezando con el ser profesional.

A mis amigos, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora seguimos siendo amigos: Karen Garzón, Leidy Niño, Zaheir Domínguez, Carolina Layton, Brian Rodríguez, Camilo Rodríguez, Diego Gutiérrez y a Josué Ávila por haberme ayudado a realizar este proyecto.

Finalmente a todas aquellas personas, que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario y que nos ayudaron en la solución de todas las inquietudes que se nos presentaron a lo largo de la elaboración de este proyecto de grado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores le agradecen especialmente a los docentes que de una u otra manera contribuyeron para que este proyecto fuese posible ya que sin ayuda de ellos el camino hubiera sido más complejo y no se hubieran obtenido los resultados exitosos que fueron alcanzados.

Al Ingeniero Edison Hernando Paguatian Tutistar, por su entrega, dedicación y compromiso y por habernos permitido pertenecer al proyecto “Cloud Energy” ya que este fue nuestro punto de partida para la elaboración del presente proyecto.

Al Ingeniero Jhon Jairo Vaca Ríos, por el tiempo que nos brindó en cada tutoría y por su valioso aporte ya que de esta manera fue posible afianzar los conocimientos adquiridos.

Al Ingeniero Andreas Werner Gravenhorst, por el apoyo brindado, el tiempo dedicado en cada consulta con respecto a las dudas e inquietudes que se presentaron a lo largo del desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Jairo Víctor Medina Becerra, por su compromiso y constante guía en todo el desarrollo del proyecto, además de su valioso aporte el cual fue de vital importancia para el éxito del proyecto.

Al Ingeniero Francisco Javier Gonzales Cruz, porque gracias a su amplio conocimiento en la materia fue posible hacer un desarrollo óptimo y de esta forma garantizar la buena culminación del proyecto.

Al Ingeniero Claudio Alberto Moreno A., por su apoyo brindado, su tiempo y su guía para la solución de inconvenientes en este proyecto.

Le agradecemos a toda la comunidad Libertadora, familiares y amigos por apoyarnos a lo largo de este proceso de aprendizaje y crecimiento como profesionales.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	22
1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACION.....	30
2. JUSTIFICACIÓN	31
3. OBJETIVOS.....	35
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	35
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	35
4. MARCO REFERENCIAL.....	36
4.1 MARCO TEORICO.....	36
4.2 MARCO CONCEPTUAL.....	45
4.3 MARCO LEGAL.....	56
4.4 MARCO AMBIENTAL.....	63
5. METODOLOGIA.....	66
CAPITULO I TOMA DE VARIABLES REPRESENTATIVAS.....	67
• MODELO ESTADISTICO PARA LA PREDICION DE DATOS.....	70
• OBTENCION DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA.....	76

• ECUACIONES AERODINAMICAS	76
• DETERMINACION DEL REYNOLDS.....	77
CAPITULO II PERFILES UTILIZADOS EN AEROGENERADORES.....	81
CAPITULO III SELECCIÓN DE PERFILES SEGÚN GRAFICAS DE XFLR5.....	84
• ANALISIS DE GRAFICAS DE COEFICIENTES.....	88
CAPITULO IV REDISEÑO Y COMPARACION DE LOS PERFILES AERODINAMICOS.....	92
• SELECCIÓN DEL PERFIL DEFINITIVO.....	98
CAPITULO V SIMULACION DEL PERFIL REDISEÑADO EN ANSYS FLUENT.....	100
• ESPECIFICACION Y ANALISIS DE GRAFICAS DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA.....	105
• PARAMETROS A TENER EN CUENTA PARA DISEÑAR LA PALA.....	108
6. CONCLUSIONES.....	110
7.BIBLIOGRAFÍA.....	1131

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades de vientos por regiones (velocidades en nudos)	42
Tabla 2 Plan de manejo ambiental en manejos físicos.....	65
Tabla 3 Plan de manejo ambiental en aspectos bióticos.....	65
Tabla 4 Tabla de viscosidades.....	80
Tabla 5 perfiles aerodinámicos para aerogeneradores.....	84
Tabla 6 Selección del Ncrit	87
Tabla 7 coeficientes de los perfiles usados	100
Tabla 8 Datasheet perfil rediseño 2	101
Tabla 9. Condiciones de frontera.....	105
Tabla 10. Características del enmallado	105

LISTA DE IMÁGENES

Imagen. 1 Países que hacen uso de energías alternativas a 2014	23
Imagen. 2 Parque Eólico.....	24
Imagen. 3 Aerogenerador flotante de aletas.....	25
Imagen. 4. Aerogenerador flotante de palas.....	25
Imagen. 5 Partes de un perfil aerodinámico y fuerzas que actúan	26
Imagen. 6 Simulación en CFD perfil aerodinámico	28
Imagen. 7 Enmallado en CFD	29
Imagen. 8 Emisiones de CO2 a nivel global en Kilo toneladas	32
Imagen. 9 Zona donde se encontrará el parque eólico.....	44
Imagen. 10 Generadores eólicos.....	46
Imagen. 11 Partes del generador	46
Imagen. 12 Dinamo.....	49
Imagen. 13 Aerodinámica del perfil.....	50
Imagen. 14 Pala	51
Imagen. 15, Reynolds en los perfiles aerodinámicos	79
Imagen. 16 Perfil aerodinámico	83
Imagen. 17 Configuración condiciones de frontera en XFLR5	86
Imagen. 18 características del perfil MH108.....	87
Imagen. 19 Perfil original MH108	94
Imagen. 20 Rediseño y alteración del perfil original	94

Imagen. 21 Rediseño número 2 perfil seleccionado	100
Imagen. 22 Perfil en solid edge.....	102
Imagen. 23 Puntos coordenados del perfil.....	102
Imagen. 24 Superficie del perfil en ansys	103
Imagen. 25 Volumen de control del perfil.....	104
Imagen. 26 Entrada y salida del flujo.....	104
Imagen. 27 Enmallado 1	106
Imagen. 28 Enmallado 2	106
Imagen. 29 Enmallado 3	106
Imagen. 30 Enmallado de la entrada y la salida	106
Imagen. 31 Distribución de presiones en perfil aerodinámico	109

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. calentamiento global – WWM.....	38
Gráfica 2. Países que usan la energía eólica.....	39
Gráfica 3. Países que usan la energía eólica.....	40
Gráfica 4. Potencia instalada en MW a 2015.....	41
Gráfica 5. Gradiente de velocidades.....	45
Gráfica 6. Aerodinámica rotacional.....	55
Gráfica 7 tendencia desde 1980 hasta 2016.....	74
Gráfica 8. Distribución de la temperatura promediada por meses.....	75
Gráfica 9. Predicción de la temperatura en grados Kelvin para los próximos 5 años.....	76
Gráfica 10. análisis de coeficientes del perfil MH108.....	88
Gráfica 11. C_l vs α XFLR5.....	90
Gráfica 12. C_d vs α XFLR5.....	91
Gráfica 13. C_l vs C_d XFLR5.....	91
Gráfica 14. C_l/C_d XFLR5.....	92
Gráfica 15. Coeficiente de Presiones.....	93
Gráfica 16 coeficientes de los perfiles rediseñados.....	95
Gráfica 17 C_l vs α rediseños.....	96
Gráfica 18 C_d vs α rediseños.....	97
Gráfica 19. C_l vs C_d rediseños.....	98
Gráfica 20. C_l/C_d vs ángulo rediseños.....	99
Gráfica 21. Vectores de velocidades en la capa límite del perfil.....	107
Gráfica 22. Vectores de velocidades en la capa límite del perfil.....	108

Gráfica 23. Distribución de presiones en el perfil 109

LISTA DE ANEXOS

ANEXOS 1 118

ANEXOS 2 135

ANEXOS 3 141

GLOSARIO

Inlet : Hace referencia a la toma de aire que va a circular por el sistema, es el primer punto por el que el aire hace contacto con el sistema

Outlet: Hace referencia a la salida del aire que circula por el sistema, es el punto en el cual el aire abandona el sistema

Datasheet: Es básicamente una base de datos en la que se pueden encontrar características, de un componente, sistema, o subsistema.

Condiciones de frontera: las condiciones de frontera son las características del medio en el cual está inmerso un cuerpo.

Capa límite: la capa limite hace referencia al fluido que recorre una superficie, la cual describe un gradiente de velocidades en las áreas más próximas a esta.¹

Flujo laminar: se dice que es un flujo laminar cuando las partículas se desplazan de manera paralela, describiendo un conjunto de capas o laminas ordenadas.²

Flujo turbulento: Se dice que un flujo es turbulento cuando este tiende a la turbulencia, es decir las partículas se desplazan de manera desorganizada en varias direcciones colisionando unas con otras.³

Malla: Es una discretización que se hace de un cuerpo dividiendo la región en pequeños volúmenes de control, después se resuelve para cada uno de ellos los arreglos algebraicos dispuestos para hacer una simulación.⁴

¹ *ATMOSFERIS, capa limite hidrodinamica, 15/septiembre/2016, tomado de: www.atmosferis.com/capa-limite-hidrodinamica-definicion/*

² *FERNÁNDEZ BONO, Juan Fco y MARCO SEGURA, Juan B. Apuntes de Hidráulica Técnica. Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones. 15/septiembre/2016 tomado de <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/flujolaminar/flujolaminar.html>*

³ *SOTELO AVILA, Gilberto. Hidráulica General. Volumen 1. Editorial Limusa. 1980 15/septiembre/2016 fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/flujoturbulento/flujoturbulento.html*

⁴ *ANDERSON, JOHN D. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications. Science/Engineering/Math. McGraw-Hill Science. 15/septiembre/2016*

Malla pave: En CFD hace referencia a una malla no estructurada, se usa generalmente en cuerpos que no tienen una geometría definida.⁵

Túnel de viento: Es una herramienta de investigación usada comúnmente para el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos, de esta manera se pueden simular situaciones que experimentara el objeto de la investigación en una situación real.⁶

Sustentación: Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, es la componente perpendicular a la corriente sobre la superficie de un perfil.⁷

Coeficiente de arrastre: es la fuerza que se genera en contra del sentido de circulación del flujo.⁸

Angulo de ataque: Es el ángulo formado entre la cuerda del perfil y la dirección del viento relativo, es una variable de vital importancia para la sustentación.⁹

Desprendimiento de capa límite: El desprendimiento de la capa limite se da cuando el flujo pasa de ser laminar a turbulento y se desprende del perfil, esto deja como consecuencia la pérdida de sustentación.

Angulo de pérdida: Es el ángulo al que se da el desprendimiento de capa límite y a consecuencia de ello empieza a disminuir la sustentación.

Coeficiente de sustentación máximo: es un valor adimensional que va ligado al ángulo de ataque después de este punto se empieza a disminuir la sustentación o lo que se conoce como pérdida

Resistencia inducida: Es aquella que se crea cuando se produce la sustentación.

⁵ PATANKAR, SUHAS (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science.* Taylor & Francis . 15/septiembre/2016

⁶ DELNERO, J. S; MARAÑÓN DI LEO, J.; BACCHI, F. A.; COLMAN, J. & COLOSQUI, C. E. *Determinación experimental en túnel de capa límite de los coeficientes aerodinámicos de perfiles de bajos Reynolds.* Buenos Aires, Argentina. 15/septiembre/2016

⁷ J GORDON LEISHMAN, *Principles of Helicopter Aerodynamics,* Cambridge University Press, 15/septiembre/2016

⁸ *Ibid.*, p. 7

⁹ MUÑOZ MUGUEL ANGEL, *Principios básicos de aerodinámica, ángulo de ataque,* 15/septiembre/2016 tomado de: <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV17.html>

Twist aerodinámico: Es una torsión que se le dan a las superficies aerodinámicas que ayuda a reducir el arrastre inducido y retrasa la entrada en pérdida.¹⁰

¹⁰ EL GATO VOLANTE. *Torsión alar o washout*, 24/noviembre/2014, tomado de <https://gatovolante.wordpress.com/2014/11/02/torsion-alar-o-washout-retrasar-la-entrada-en-perdida/>

ABREVIATURAS

- $^{\circ}\text{C}$ = *Grados Celsius*
- K = *Kelvin*
- m = *Metros*
- Knott = *Nudos*
- Kg = *Kilogramo*
- S = *Segundo*
- J = *Joule*
- Mw = *Mega wattz*
- V = *Velocidad*
- h = *Altura*
- σ = *Viscosidad dinámica del aire*
- ρ = *Densidad*
- A = *Área*
- Ma = *Numero de Mach*
- Va = *Velocidad del elemento*
- a = *Velocidad del sonido*
- γ = *Coeficiente de dilatación adiabática, para el aire es de 1,4*
- R = *Constante de los gases ideales*
- T = *Temperatura*
- P = *Presión*
- q = *constante dinámica*
- Cl = *Coeficiente de sustentación*
- L = *sustentación*
- Cd = *Coeficiente de arrastre*
- D = *Arrastre*
- Cm = *Coeficiente de momentos*
- M = *Momento*

- C = *Cuerda*
- α = *Angulo de ataque*
- C_p = *Coeficiente de presiones*
- S = *Área superficial*
- Re = *Numero de Reynolds*
- δ = *Espesor*
- μ = *Viscosidad cinemática*
- V_{pp} = *Velocidad de punta de pala*
- θ = *Velocidad angular*
- r = *Radio*
- n = *Numero de años*
- t = *tiempo*
- V_v = *velocidad del viento*
- N_{crit} = *Nivel de perturbación*
- Pa = *pascales*

ABSTRACT

In the present project are recorded the steps that were followed for the redesign of an aerodynamic profile starting from the requirement to have an aerodynamic profile for the rotor of a floating wind turbine. The profile is going to be used for the construction of the blades of a rotor for a floating wind turbine using simulations in design programs, for this reason it is expected that the profile will be efficient in the meteorological conditions of Bogotá surroundings.

The main objective of the project is to redesign an aerodynamic profile starting from a baseline of the profiles commonly used in wind turbines, this redesigned profile should be as efficient as possible based in the weather conditions of the city of Bogota and reduces the losses that could be by the profile in the rotor of the generator of which it will be part.

For the development of the project, several investigations were carried out regarding the world view of renewable energies and floating wind turbines, and a detailed survey was made of the meteorological conditions in Bogota from previous years in order to be able to make a prediction that would be consistent with the information obtained about climate behavior by the World Bank.

When the variables (temperature, density, pressure) were defined for the development of the mathematical model, we used aerodynamic equations in to obtain the necessary data required in a CFD simulation, by using the XFLR5 program The 2D analysis of the baseline profiles with the conditions and variables already established, through a process of iterations in several points and angles of attack of the profile, it was possible to make a comparison between the graphs of profile coefficients and to determine which had better behavior under the given conditions.

Then the redesign is carried out. The redesign consists in changing the geometry of the profile starting from its coordinates to change its aerodynamic characteristics and thus to improve its efficiency, in this way it was possible to determine if it is possible or not to improve the efficiency of the profile.

Already with the redesign established, a 3D CFD simulation was given to support the 2D simulation since this type of analysis allows to see the behavior of the flow with respect to the surface of the profile, with visualizations of the speed vectors And the distribution of pressures on it.

The document includes the necessary procedures for the calculation of the aerodynamic and thermodynamic variables involved in the design and development of the profile, as well as the simulations carried out in the design and simulation programs, XFLR5, Ansys, Fluent, Gambit and Solid edge, for this the document is being supported by meteorological databases of the city of Bogota "Meteorological base SKBO 802220" in this database were taken values of air temperatures and wind speeds from 1980 to thus give way to a prediction that allowed to make an estimate of the behavior of the climate in Bogota for the next 5 years using stadistical tools, for this case was chosen the SARIMA model that allows to make a prediction taking into account the behavior of variables previously taken this way A linear function is established in relation to old data to make new data acquisition.

Also, the University of Illinois databases of aerodynamic profiles were used, as well as primary sources of information in knowledge of thermodynamics and applied aerodynamics.

Key words

- Lift coefficient
- Drag coefficient
- Speed profile
- Pressure distribution
- Attack angle
- Aerodynamic profile

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

- Rediseñar un perfil aerodinámico que sea eficiente que pueda ser implementado en un aerogenerador flotante teniendo en cuenta las diferentes condiciones a las cuales va a estar expuesto.
- Elaborar una simulación en CFD que permitan observar el comportamiento del perfil usando el software Fluent, XFLR5, Ansys y Gambit, para observar el comportamiento del flujo en el perfil aerodinámico.
- Desarrollar simulaciones de perfiles aerodinámicos usados en aerogeneradores, bajo ciertas condiciones de frontera establecidas para las condiciones de la Sabana de Bogotá en XFLR5.
- Realizar un análisis en 3D en Fluent Ansys para poder apoyar los datos obtenidos en la simulación 2D además de observar cómo se comporta el flujo en una superficie con este perfil

Limitaciones

- No se diseñará la pala completa del generador.
- No se diseñará el rotor del generador.
- El modelo en 3D solo es con fines de apoyo a la simulación en 2D, para diseñar la pala hay que usar un método diferente de aerodinámica rotacional.

INTRODUCCIÓN

Con los avances tecnológicos actuales y con la problemática energética en auge alrededor del mundo se han implementado estrategias para el desarrollo de nuevos modelos energéticos que no pongan en riesgo al planeta, los modelos más usados en la actualidad están siendo desarrollados teniendo en cuenta los recursos renovables con los que se cuenta entre los que vale la pena destacar, la energía generada por el viento, la energía generada por corrientes marinas y la energía solar, estos métodos en cierta forma ayudan a mitigar el uso excesivo de recursos naturales y además los efectos secundarios provocados por su sobreexplotación.

Entre los métodos de energías renovables más comunes vale la pena destacar; las hidroeléctricas que aprovechan el poder energético de las corrientes marinas, la energía fotovoltaica o también conocida como energía solar que aprovecha los fotones de la radiación solar, el método CSP conocida como energía solar de concentración que consiste en un sistema de espejos que focalizan la luz sobre un punto pequeño produciendo calor, la energía geotérmica que aprovecha el calor producido en el subsuelo, energía eólica que aprovecha el viento como fuente primaria de energía y la biomasa que consiste en aprovechar los residuos de la materia orgánica.

En su mayoría la implementación de dichos sistemas de obtención de energía se encuentra en países como China, Brasil, EEUU, Canadá, Rusia, Alemania, entre otros, básicamente países que tienen una economía bastante estable, sin embargo; solo algunos países han sido pioneros en el uso de la energía eólica entre los cuales vale la pena destacar China, EEUU, España, Alemania y la India. Hacia el año 2014 estos países tenían la mayor demanda de generadores eólicos ya hoy en día hay más países así como UK y Argentina que se han unido a los países que ya generan energía eléctrica a partir del aprovechamiento del viento.

Dichos países han tenido un interés particular en la energía eólica aprovechando el viento como materia prima de generación de energía debido a que es un sistema eficiente y a la vez amigable con el ambiente.

Imagen. 1 Países que hacen uso de energías alternativas a 2014



Fuente: <http://deltavolt.pe/energia-renovable>

Aerogeneradores flotantes.

La industria energética en el siglo XXI está en constante crecimiento, de una u otra manera el intento desmesurado por la obtención de energía ha puesto al planeta en una condición inestable, debido al uso desmedido de los recursos naturales, uno de los principales problemas que actualmente se presentan, es la emisión de gases de efecto invernadero que a diario son expulsadas por toneladas hacia la atmosfera terrestre, por ello se ha generado un fenómeno conocido como efecto invernadero el cual consiste en el aumento de la temperatura mundial, esto ha traído consigo el deshielo de los casquetes polares aumentando el nivel de los océanos y esto a su vez deja como consecuencia drásticos cambios meteorológicos en el clima global.¹¹

¹¹ ONU, cambio climático, 17/abril/2016, disponible en <https://calentamientoglobalclima.org/tag/onu/>

El acelerado deterioro de los diferentes ecosistemas y en especial de la atmosfera terrestre ha obligado a las grandes potencias y las grandes empresas a buscar soluciones rápidas para contrarrestar los efectos de los gases de efecto invernadero, actualmente la generación de energía eólica mediante generadores eólicos es un tema que está tomando fuerza en el mundo, básicamente un generador eólico es un mecanismo el cual usa la energía cinética del viento para producir energía eléctrica mediante un movimiento rotacional, la energía es transmitida directamente desde el viento, esta se manifiesta como energía mecánica mediante el movimiento de un rotor que es el encargado de mover un dinamo para la generación de energía a partir de un campo magnético.¹²

Imagen. 2 Parque Eólico



Fuente: <http://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/EEOLICA>

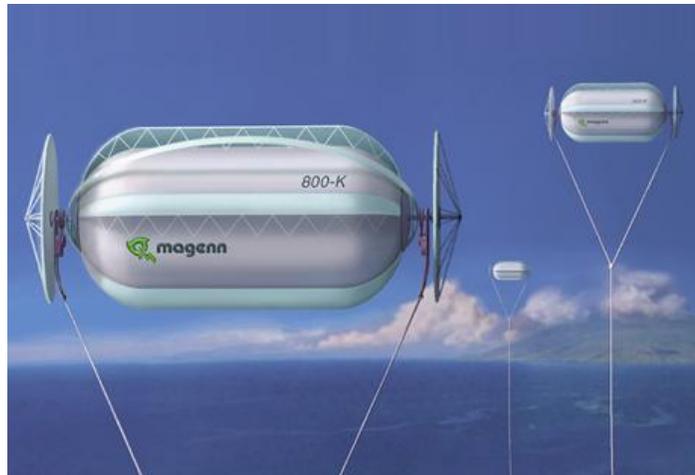
Usualmente estos generadores están ubicados en grandes grupos en zonas conocidas como parques eólicos, allí se posicionan en hileras sobre una torre.

Los aerogeneradores flotantes son un proyecto novedoso que está pensado para ser un método alternativo de los generadores eólicos convencionales estos a diferencia de los aerogeneradores comunes, no están posicionados sobre una torre. El aerogenerador flotante se encuentra sujeto a la parte interior de un globo, de esta manera se busca controlar su altitud para así poder aprovechar las diferentes corrientes de aire. Este dispositivo promete revolucionar la industria de las energías renovables debido a su gran efectividad, sin embargo; a pesar de tener varios prototipos en funcionamiento entre los cuales se pueden encontrar de

¹² UCLM, Curso de física ambiental, tema 6 energía eólica, 10/junio/2016 disponible en <http://www.uclm.es>

palas y de aletas, las investigaciones no cesan en favor de poder mejorar su rendimiento y eficiencia¹³

Imagen. 3 Aerogenerador flotante de aletas



Fuente: <http://www.magenn.com/>

Imagen. 4. Aerogenerador flotante de palas



Fuente: <http://www.energias-renovables.com/articulo/>

¹³ Altaeros energies. 2010. Aerogenerador flotante [en línea], disponible en <www.altaerosenergies.com>

Aunque ya se tienen prototipos como los es el caso del aerogenerador de palas por la compañía estadounidense ALTAEROS, estos modelos de generación de energía aún se consideran modelos experimentales sin embargo por su forma y porque no tiene casi pérdidas mecánicas, son más eficientes los generadores de aletas.

Perfiles aerodinámicos

La velocidad de entrada y salida de la corriente de aire del generador, junto con las diferentes ráfagas de aire variables hay que tener en cuenta al momento de diseñar un perfil aerodinámico que sea capaz de soportar las condiciones a las cuales esté sometida la propelea del generador.

Un perfil aerodinámico es básicamente es la forma de una superficie alar, bien sea un ala una pala, entre otros... vista desde su sección transversal, al ser sometido un perfil aerodinámico a fuerzas externas como lo son las corrientes de aire, conocido como viento relativo, hay una reacción por parte del perfil conocidas como fuerza de arrastre que va en el eje horizontal aguas abajo del perfil y también existe otra fuerza conocida como sustentación que es una fuerza vertical en el perfil¹⁴

Imagen. 5 Partes de un perfil aerodinámico y fuerzas que actúan

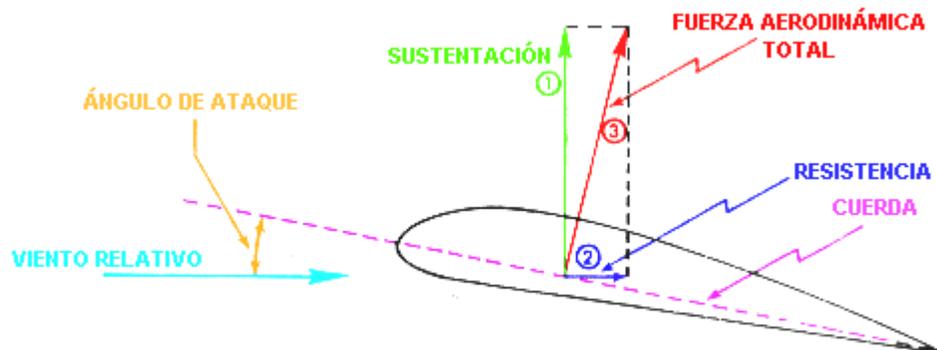


Figura 2.19. FUERZAS ACTUANTES SOBRE UN PLANO AERODINÁMICO

Fuente. <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema10/tema10-5.htm>

¹⁴ MUNSON Bruce. YOUNG Donald. OKIISHI Theodore. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*, México D.F, 2003

El perfil describe un diferencial de presiones entre los extradós y los intradós, este diferencial de presiones hace posible la sustentación ya que en los extradós la velocidad de la partícula de aire es mayor y la presión es menor mientras que en los intradós la velocidad de la partícula de aire es menor y la presión es mucho mayor, esto da como resultado la fuerza vertical de elevación, pero a su vez existe una fuerza que se opone al movimiento del perfil conocida como arrastre.¹⁵

A su vez un factor importante es el ángulo de ataque del perfil, es decir el ángulo que describe este con respecto a la dirección del viento relativo, las condiciones óptimas de un perfil aerodinámico consisten en mantener el flujo laminar a través de este la mayor cantidad de tiempo posible, es decir que la capa límite del fluido se desprenda cerca del borde de fuga de esta manera se garantiza que el perfil se eficiente, sin embargo cuando se aumenta el ángulo de ataque la capa límite del fluido tiende a desprenderse de manera temprana, esto genera que el flujo pase de ser laminar a turbulento lo cual hace que el perfil en cuestión pierda sustentación puesto que el diferencial de presiones existente entre los extradós y los intradós sea mucho más abrupto.¹⁶

Modelamiento, dinámica de fluidos computacional CFD

Dinámica de fluidos computacional, es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza modelos matemáticos y algorítmicos para analizar y resolver problemas de cómo se comporta un fluido en un cuerpo mediante el método de elementos finitos, este método permite hacer un análisis matemático en diferentes condiciones en varios tipos de elementos de prueba entre los que valdría la pena destacar los elementos de geometría compleja o de dimensiones muy grandes, generalmente estos problemas están solucionados por un modelo matemático que en cierta forma sirve como características previas al cálculo, esto es conocido comúnmente como condiciones de frontera.¹⁷

Las condiciones de frontera básicamente es un área en la que va a estar inmerso el cuerpo o elemento de estudio, allí se simulan las condiciones ambientales o condiciones que va a enfrentar el cuerpo como, por ejemplo, presiones, temperaturas, velocidad del flujo entre otros...

El método de elementos finitos es una manera de hacer análisis de estructuras y deformaciones, transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masa entre otros, la parte de CFD se puede realizar tanto en 2D como en 3D básicamente es usado para el análisis de fluidos, en este tipo de simulaciones se pueden obtener

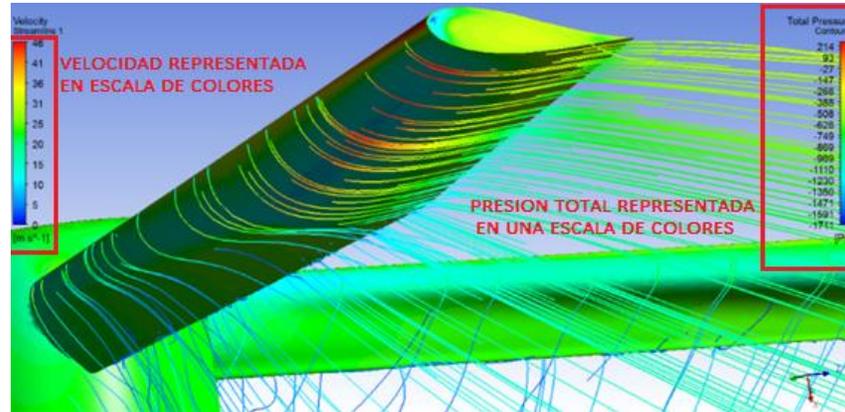
¹⁵ *Ibid.*, p 14.

¹⁶ MUNSON Bruce. YOUNG Donald. OKIISHI Theodore. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*, México D.F, 2003

¹⁷ SOLIDWORKS, *análisis por elementos finitos*, 10/junio/2016, disponible en <http://www.solidworks.es>

resultados visibles mediante una tabla de convenciones de colores, ya sea para analizar presiones, temperaturas, líneas de corriente y velocidades.¹⁸

Imagen. 6 Simulación en CFD perfil aerodinámico

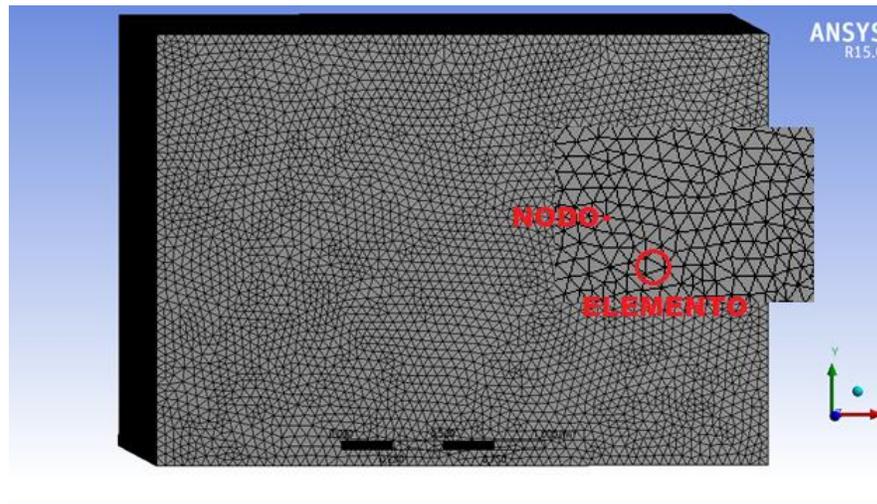


Fuente. <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/tg/node54.htm>

Para ello existen varios softwares que se encargan de la resolución de este tipo de problemas, entre los cuales vale la pena destacar ANSYS Programa usado para el análisis y simulaciones usando métodos numéricos para solución de problemas ingenieriles, FLUENT Programa complemento de Ansys para simulación de fluidos, GAMBIT Programa complemento de Ansys usado para el refinamiento de las mallas , CATIA Programa de diseño, entre otros, debido a que estos nos permiten realizar distintas etapas de la simulación pero no desarrollan la metodología completa individualmente, el éxito de la simulación CFD depende sobre todo del nivel de complejidad que tenga la malla, el grado de complejidad de la malla está definido por el número de nodos y elementos que esta tenga, entre más elaborada y compleja sea la malla se podrán obtener resultados más cercanos a la realidad.

¹⁸ *Ibid.*, p 17

Imagen. 7 Enmallado en CFD



Fuente. Autores

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Fundación Universitaria Los Libertadores el semillero de investigación SIDTFAE (Semillero de ingeniería y tecnología para el desarrollo de fuentes alternas de energía) se encuentra desarrollando un proyecto llamado CLOUD ENERGY, que consiste en el diseño de un aerogenerador flotante que pueda ser usado a diferentes alturas para la generación de energía eléctrica a partir del viento. Sin embargo; debido a la gran cantidad de variaciones geográficas presentes en el país, las corrientes de viento son bastante inestables ocasionando así torbellinos y ráfagas cortantes que pueden hacer que el rotor no sea eficiente

Se hace necesario realizar el diseño de un perfil aerodinámico que sea capaz de soportar dichos efectos meteorológicos, sin alterar de ninguna manera la eficiencia del aerogenerador, puesto que actualmente el proyecto no dispone de un perfil aerodinámico específico para la realización del proyecto a cabalidad que haga viable el proyecto en Colombia.

El desarrollo de las tecnologías modernas y la industrialización han obligado a los grandes empresarios e industrias del sector energético a encontrar nuevas maneras de generación de energía, pero con métodos que no solo sean eficientes, sino que además sean amigables con el ambiente.

Para el desarrollo del generador se va a utilizar como prueba piloto la sabana de la ciudad de Bogotá. La ciudad de Bogotá está localizada en el centro de Colombia

ubicada en la región conocida como el altiplano Cundiboyacence que a su vez está localizada en la cordillera oriental de los andes, ubicada a 2625 metros sobre el nivel del mar, tiene una longitud de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente, limita al oriente con los cerros orientales y al occidente con la sabana del altiplano¹⁹

Las principales fuentes de abastecimiento energético de la ciudad de Bogotá son la hidroeléctrica del Guavio y la hidroeléctrica de Mesitas del Colegio, sin embargo debido a la gran sequía que ha habido ha disminuido de manera notoria el nivel de las aguas que abastecen las hidroeléctricas generando una potencial amenaza de racionamiento de energía, por lo tanto es necesario hacer una nueva búsqueda de recursos que sean renovables y a su vez que sean limpios, para ello el viento sería una muy buena opción de obtención de energía²⁰

1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACION

¿Cómo se debe rediseñar un perfil aerodinámico a través de simulación CFD 2D para que un aerogenerador flotante pueda ser eficiente en las condiciones meteorológicas de la Sabana de Bogotá?

¹⁹ ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA. Bogotá D.C, 28/abril/2016, disponible en <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>

²⁰ SECRETARIA DE HACIENDA, Bogotá en datos, 25/abril/2016, disponible en <http://institutedeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0110/0112-hidro/01121182.htm>

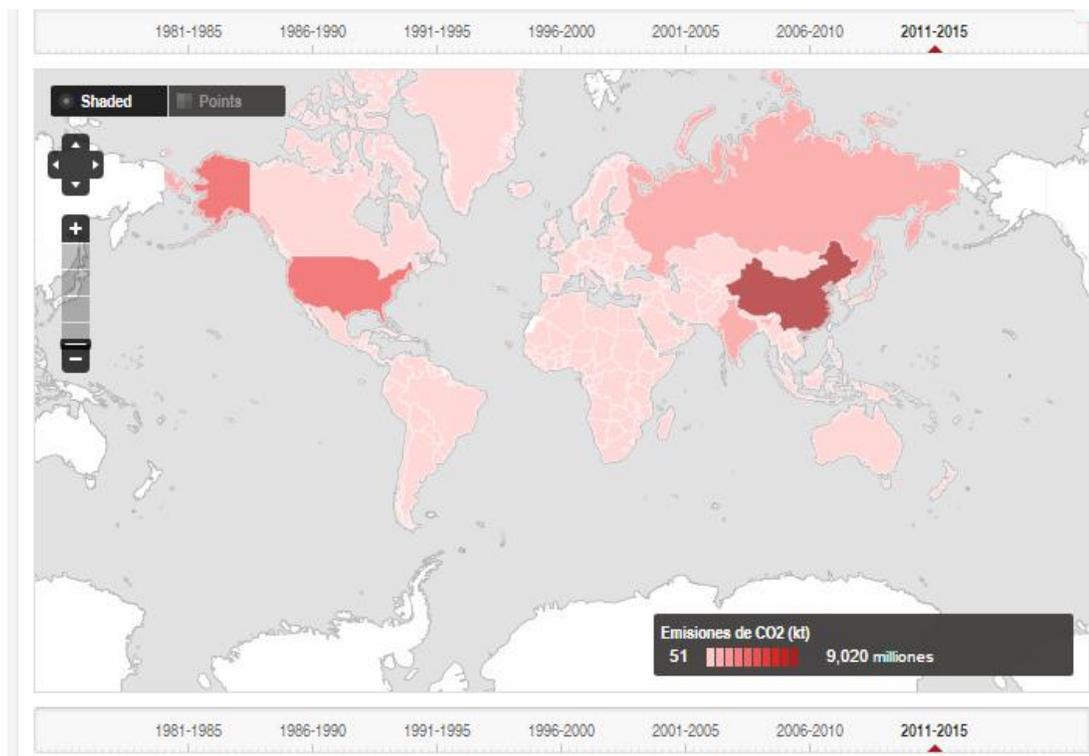
2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en pleno auge del siglo XXI un problema que aqueja la humanidad es el deterioro constante del entorno en el cual vivimos, actualmente los índices de emisiones de gases tóxicos al ambiente se están elevando a niveles críticos, tanto así que de una u otra manera han alterado el curso normal de los factores climáticos a nivel mundial, según datos revelados por el banco mundial, la mayor cantidad de emisiones de gases tóxicos a la atmosfera se dan principalmente por la quema de combustibles fósiles, esto se debe básicamente a actividades como lo son el transporte, actividades de índole industrial, actividades domésticas, y actividades comerciales entre otros.

Dichas cifras reveladas por el Banco Mundial revelan que el CO₂ es el principal componente residual enviado a la atmosfera debido a la quema de combustibles fósiles y a la fabricación de cementos, además de que en grandes cantidades este puede llegar a ser perjudicial para la salud de las personas, en los últimos años estos niveles de contaminación han alcanzado niveles críticos ya que entre los años 2011 y 2015 hubo gran número de naciones en las que la cantidad de gases tóxicos emanados al ambiente llegan a las 9020 millones de Kilo toneladas así como se muestra en la tabla a continuación.²¹

²¹ *BANCO MUNDIAL, Emisiones de CO₂, 09/junio/2016, disponible en <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=map>*

Imagen. 8 Emisiones de CO2 a nivel global en Kilo toneladas



Fuente:

<http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=map>

A raíz de todos estos problemas han surgido varias alternativas que representan el inicio de un desarrollo sostenible que de cierta forma podrían mitigar los efectos de la emisión de gases hacia la atmosfera, es por esto que generación de energías limpias, han tenido gran acogida por las grandes naciones, la energía eólica es un gran representante de esta medida de obtención de energía de manera limpia, grandes exponentes de estos avances tecnológicos han sido las grandes naciones desarrolladas así como China, EEUU la Unión Europea entre otros, estas naciones según los datos revelados por el Banco Mundial son las que presentan una problemática que se está saliendo de control frente al manejo de residuos tóxicos a la atmosfera.²²

Es por eso que para mitigar estos efectos de los gases de invernadero se han instalado grandes parques eólicos, de esta forma hay una gran obtención de energía, pero a su vez de una manera que no deteriora aún más el ambiente.

²² BANCO MUNDIAL, *Emisiones de CO2*, 09/junio/2016, disponible en <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=map>

Por otro lado, países como Colombia cuya población es mucho menor que países como los son China o Estados Unidos también tiene una seria problemática de emisiones de CO₂ a la atmosfera, sin embargo; la cantidad de emisiones registradas entre el año 2011 y 2015 fueron de 72.543 Kilo toneladas según los registros del banco mundial lo cual no representa ni el 1 % de la cantidad de gases enviados a la atmosfera a nivel mundial.²³

Los puntos de gran concentración de emanación de gases en Colombia se dan sobre todo en las grandes ciudades Bogotá y Medellín, por ser centros urbanos de gran desarrollo y movimiento económico, son los puntos en donde se represa la mayoría de emisiones a nivel nacional, en su mayoría estas emisiones se deben al transporte en general que representan la mayor cantidad, también hay emisiones de carácter industrial y comercial.²⁴

La ciudad de Bogotá siendo la capital de la Republica de Colombia es el centro financiero más importante del país y en donde se concentra la mayor parte de la población, se estima que la emisión per cápita de cada habitante de la capital es de aproximadamente 1.89 toneladas de CO₂ al año, las cuales en su mayoría están relacionadas con el transporte en la ciudad.²⁵

En este orden de ideas un proyecto de energías renovables en la capital del país que ayuden a disminuir la emisión de CO₂ tendría gran acogida debido a que se generaría energía de forma que no se vería alterada la atmosfera de la ciudad, es una manera amigable al ambiente, además de ser una de las 16 zonas del país que presentan condiciones meteorológicas de interés energético así como lo demuestra en atlas de vientos diseñado por el IDEAM después de un estudio realizado en todo el país lo cual aporoto como resultado que en las cercanías del aeropuerto el Dorado de la ciudad las corrientes alcanzan los 2,2 nudos de velocidad.²⁶

En la Fundación Universitaria Los Libertadores en cooperación del semillero de investigación SIDTFAE (Semillero de Ingeniería y Tecnología para el Desarrollo de Fuentes Alternas de Energía) se está dando desarrollo a un proyecto conocido

²³ BANCO MUNDIAL, *Emisiones de CO₂*, 09/junio/2016, disponible en <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=map>

²⁴ IDEAM, *El país es muy vulnerable a la variabilidad climática*, 19/abril/2016, disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias>

²⁵ SECRETARIA DE AMBIENTE BOGOTA, *El distrito capital ya cuenta con el inventario de g,e,i*, 09/junio/2016, <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/cambio-climatico>

²⁶ *Ibid.*, p. 24

como Cloud Energy básicamente consiste en un modelo de energía eólica conocido como aerogenerador flotante, el cual es un sistema novedoso y una nueva manera de implementación de los aerogeneradores convencionales²⁷

Con el desarrollo del proyecto se pretende hacer un aporte investigativo, que permita continuar con el avance de CLOUD ENERGY, como respuesta a la adaptación y concientización al cambio climático y la producción de energías más limpias y accesibles. CLOUD ENERGY no cuenta actualmente con un perfil aerodinámico preestablecido que permita obtener la mejor eficiencia del generador aprovechando al máximo la energía cinética del viento.²⁸

Aplicando tecnologías modernas como lo son la simulación CFD se pretende analizar el comportamiento de un perfil aerodinámico que pueda suplir esta necesidad y que se adapte a las condiciones meteorológicas de la Sabana de Bogotá, se realizara un análisis en 2D y un análisis en 3D para evidenciar y apoyar las simulaciones en dos dimensiones.

El rediseño se hace con base a perfiles aerodinámicos ya existentes, sin embargo; el rediseño está pensado para que el perfil seleccionado se adapte de manera correcta a las condiciones meteorológicas de la sabana de Bogotá, así posteriormente el perfil aerodinámico obtenido finalmente deja las puertas abiertas a un nuevo proyecto en el cual el enfoque sea el modelamiento de la superficie aerodinámica completa es decir la pala para finalmente dar paso al rotor.

²⁷ SITDFAE, *Semillero de investigación, 2016, Fundación Universitaria Los Libertadores*

²⁸ *Ibid.*, p. 27

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Rediseñar y simular en CFD un perfil aerodinámico que sea eficiente para un aerogenerador flotante que se adapte a las condiciones meteorológicas de la Sabana de Bogotá, a partir de perfiles aerodinámicos ya existentes.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar la información meteorológica y el comportamiento de los vientos en la Sabana de Bogotá a través de datos históricos de las bases de datos del IDEAM.
- Realizar los cálculos aerodinámicos para el rediseño del perfil a partir de los datos analizados de los factores meteorológicos y el comportamiento de los vientos en la Sabana de Bogotá.
- Desarrollar una simulación en CFD del perfil aerodinámico rediseñado para inter comparar con el perfil existente y demostrar su eficiencia en la Sabana de Bogotá.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO TEORICO

Aerogeneradores flotantes

Un aerogenerador, es un generador eléctrico el cual es accionado por una turbina eólica gracias a la acción del viento, en este caso la energía cinética del viento es tomada y de este modo proporciona energía mecánica a un rotor o hélice a partir de un sistema de transmisión mecánico. Comúnmente lo que transforma la energía mecánica en energía eléctrica es un alternador trifásico posicionado en lo que se conoce como la góndola²⁹

En la actualidad este tipo de obtención de energía, al ser amigable con el ambiente se ha hecho bastante popular alrededor del mundo y debido a que es bastante efectivo, está tomando cada vez más fuerza.

Los generadores eléctricos más comunes que se pueden encontrar hoy en día son básicamente grandes molinos que pueden llegar a ser tan grandes como compleja es su estructura, en su mayoría estos se encuentran suspendidos en torres que superan los 10 metros de altura en regiones en las cuales se puede aprovechar de una manera bastante notoria la energía cinética del viento que vendría siendo la materia prima de funcionamiento, para ello están dispuestos en parques eólicos con múltiples generadores ubicados en hileras ya sea en las grandes llanuras costeras o incluso en medio del océano en la plataforma continental en donde el comportamiento del viento no solo es constante sino además de vital interés energético.³⁰

Uno de los principales inconvenientes que tienen este tipo de generadores es la zona geográfica en la cual estos estén instalados, ya que lo que se pretende con este tipo de generadores es que estén ubicados de forma estratégica que se pueda aprovechar la mayor cantidad de masas de aire para que este sea eficiente y de esta forma la gran inversión que representan pueda ser aprovechada, se podría decir que se está hablando de eficiencia del molino, sin embargo; al rededor del mundo es difícil encontrar puntos en los cuales se pueda hacer la

²⁹ TWINENERGY, *Energía eólica global más barata*, 10/abril/2016, disponible en <http://twenergy.com/energia/energia-eolica>. ☐

³⁰ *Ibid.*, p. 29

instalación de un parque eólico completo, esto debido a la diversidad de accidentes geográficos presentes a todo lo largo y ancho del globo, en estos puntos es difícil aprovechar la energía entregada por el viento ya que se presentan fluctuaciones en las corrientes que en ultimas no son aprovechables³¹

Por otro lado un proyecto que se ha venido implementando sobre todo en la última década especialmente pero que aunque ya ha tenido ciertos prototipos, sigue considerándose de carácter experimental, son los aerogeneradores flotantes, estos, básicamente consisten en una góndola suspendida de un globo el cual puede ser expuesto a las corrientes de viento que están presentes a diferentes alturas, esto representaría una gran ventaja frente a los generadores de torre comunes, se sabe que las corrientes de viento tienen diferentes comportamientos dependiendo de la altura a la cual se encuentre, esta es una forma de contrarrestar el efecto que tiene la geografía en las corrientes de viento ya que se mitigan los cambios del flujo en ausencia de obstáculos geográficos.³²

Energía eólica a nivel global

Estudios recientes muestran que las condiciones de vida en el planeta son cada vez más críticas, esto se debe al uso desmedido de los recursos y a la contaminación del entorno atmosférico en el cual nos desenvolvemos, dichos cambios han generado sobre todo en las últimas décadas cambios drásticos en el clima global, así como lo demuestra un estudio reciente de la ONU (Organización de naciones unidas y por el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (intergovermental Panel on Climate Change – IPCC), es necesario que se disminuyan las emisiones globales de CO2 entre un 50 y un 80 por ciento lo que supone una cantidad estimada de 40 Giga toneladas de CO2 por año.³³

Siendo la mayor concentración de emisiones de CO2 en los países desarrollados por el uso excesivo de los recursos energéticos debido a la gran demanda de estos consecuencia de su creciente densidad demográfica, se estima que con la subida de solo 1 grado Celsius en la temperatura mundial podría ser devastadora ya que esto aceleraría el deshielo de los glaciares y los casquetes polares aumentando de esta forma el nivel de los océanos, como consecuencia de esto grandes cantidades de masas terrestres presentes en las regiones insulares del mundo se verían amenazadas a sucumbir bajo la aguas de los océanos, aparte de

³¹ *TWINENERGY, Energía eólica global más barata, 10/abril/2016, disponible en <http://twenergy.com/energia/energia-eolica>.* ☐

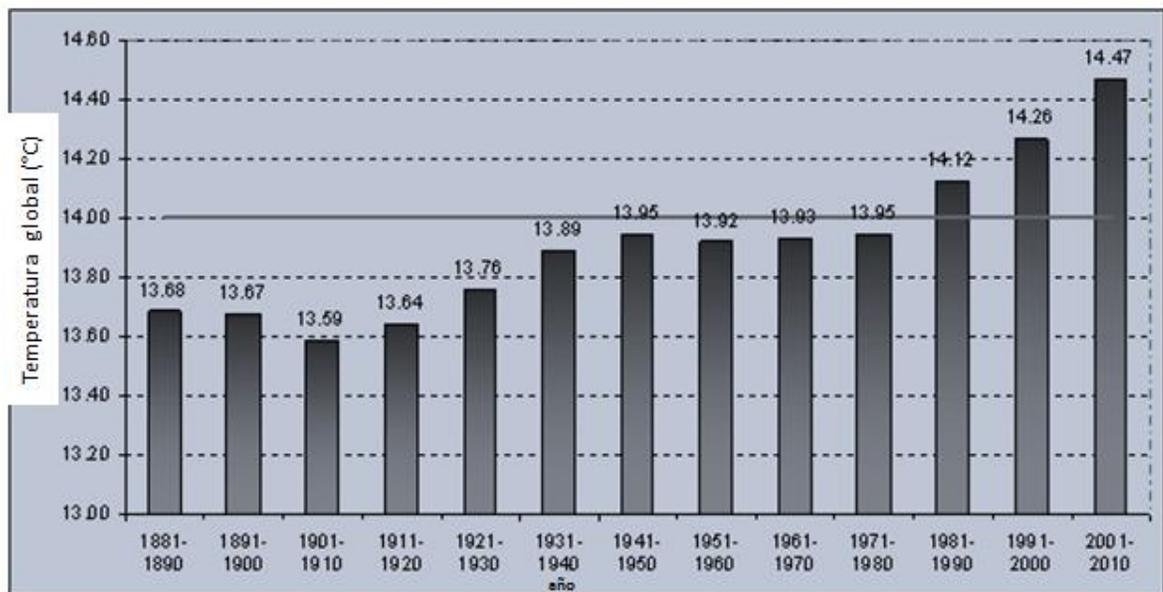
³² *Altaeros energies. 2010. Aerogenerador flotante [en línea], disponible en <www.altaosenergies.com >*

³³ *ONU, cambio climático, 17/abril/2016, disponible en <https://calentamientoglobalclima.org/tag/onu/>*

todo los fenómenos climatológicos tales como, sequias, fuertes tormentas, huracanes... entre otros aumentarían de manera exponencial mitigando la calidad de vida en algunas naciones del globo³⁴

La gráfica 1 muestra como es el aumento gradual de la temperatura global por décadas en grados Celsius, desde el año 1881 hasta el año 2010 y que aún sigue en aumento.

Gráfica 1. calentamiento global – WWM



Fuente: <http://productosquimicosymedioambiente.com/>

Para satisfacer la demanda de energía que actualmente se tiene con combustibles fósiles que son principales emisores de CO₂ a la atmosfera es necesario implementar nuevas formas de generación de energía que no atenten contra el medio ambiente, se sabe que es necesario hacer grandes inversiones por parte de las naciones, pero de esta forma se puede garantizar un futuro sostenible³⁵

La forma de mitigar el efecto del cambio climático es mediante el uso de energías alternativas, más puntualmente hablando se puede tocar el tema de la energía aportada por el viento en beneficio de la población generando a partir de esta energía eléctrica capaz de abastecer a grandes ciudades de este recurso.

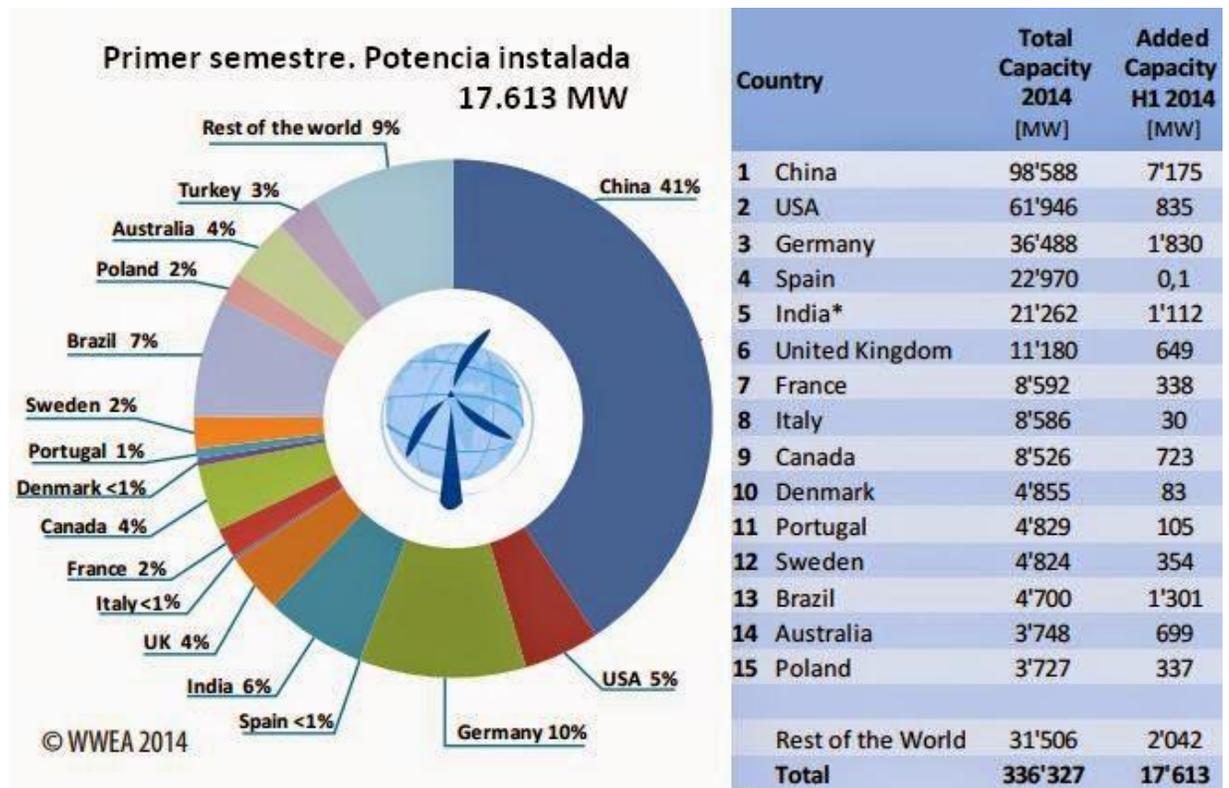
³⁴ ONU, cambio climático, 17/abril/2016, disponible en <https://calentamientoglobalclima.org/tag/onu/>

³⁵ NACIONES UNIDAS, Energía limpia, 01/junio/2016, disponible de, <http://newsroom.unfccc.int>

El uso de energía eólica a partir de generadores ha tomado auge desde que se sabe que se deben disminuir las emisiones de gases de invernadero hacia la atmósfera, según el Consejo Mundial de Energía Eólica (por sus siglas en inglés GWEC) el año 2014 fue un año importante para la tecnología de generación eólica ya que con una inversión estimada de 100.000 millones de dólares fueron instalados mundialmente 51,5 Gigavatios en todo el mundo, China siendo el país que más invierte en este tipo de tecnologías debido a su gran problema climatológico, añadió cerca del 41,1 % de nuevas infraestructuras eólicas, por otra parte Alemania añadió 10,2%, y EEUU el 5 %, por eso se considera que el año 2014 fue un record mundial, incluso diferentes países del globo han hecho aportes a la integración de este tipo de generación de energía, incluyendo entre estos países de América Latina como Argentina y Brasil³⁶

La grafica número 2 muestra en qué proporción los países del mundo han invertido en el uso de la energía eólica, este promedio esta dado en Mega vatios que es lo que producen los parques eólicos.

Gráfica 2. Países que usan la energía eólica



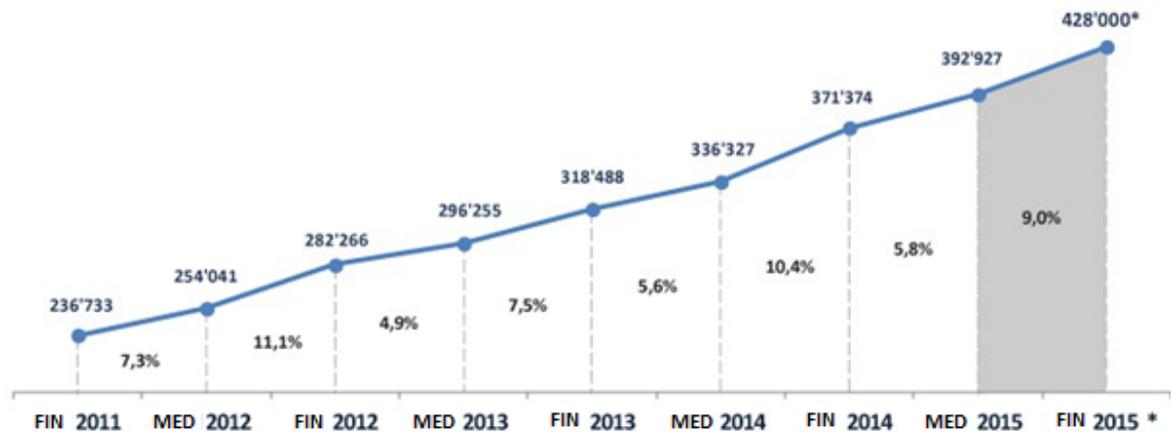
³⁶ PCC- intergovernmental Panel on Climate Change- world surface heating, Ginebra-Suiza <http://www.ipcc.ch/>

Fuente: <http://www.energiaestrategica.com/>

La grafica numero 3 muestra el crecimiento de la potencia instalada hacia finales del año el año 2015 paso de 236.733 MW en 2011 a 428.000 MW a finales de 2015, teniendo un crecimiento del 9% respecto al año anterior, como se puede apreciar la potencia instalada en el mundo está en gradual crecimiento y en la actualidad, dada la creciente demanda de recursos energético y a su vez el aumento de la temperatura global esta curva de potencia instalada va a tender a aumentar³⁷

Gráfica 3. Países que usan la energía eólica

CAPACIDAD INSTALADA TOTAL 2011-2015



*Estimado

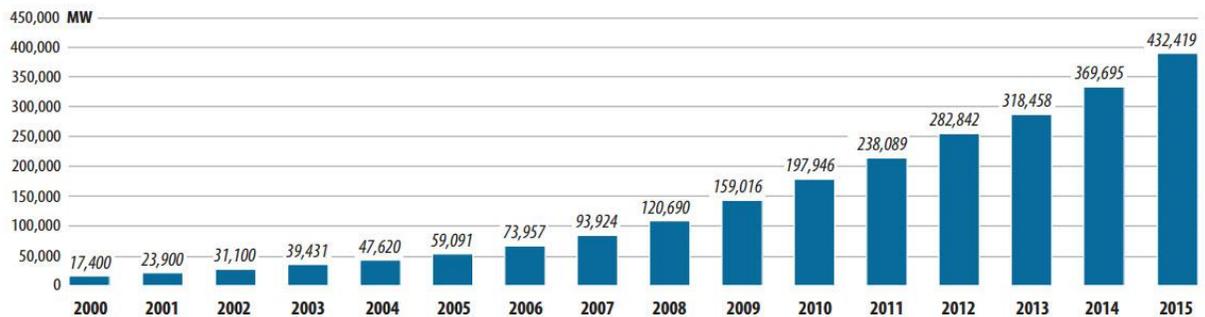
Capacidad total instalada: Incluye la capacidad eólica instalada, conectada y no conectada a una red

© WWEA - 2015

Fuente: <http://www.energiaestrategica.com>

³⁷ FENES, Gastón, Argentina se posiciona 40 en el ranking mundial de capacidad de energía eólica instalada, 29/mayo/2016, disponible en <http://www.energiaestrategica.com>

Gráfica 4. Potencia instalada en MW a 2015



Fuente: <http://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>

La gráfica 4 da una perspectiva más clara de cómo ha sido el aumento de los Megavatios instalados en todo el mundo, el crecimiento desde el año 2000 hasta el año 2015 ha sido exponencial, para el año 2000 se estima que los MW instalados fueron cerca de 17.400 mientras que para el año 2015 fue de 432.419 aproximadamente, haciendo una proyección a futuro teniendo en cuenta la necesidad la demanda de energía mundial y el continuo aumento demográfico se estima que en años futuros la tendencia de la curva siga en aumento como lo ha venido haciendo de manera acelerada sobre todo en la última década³⁸

Energía eólica en Colombia

En Colombia el uso de energías no renovables aún no ha tenido el auge que ha tenido en otras regiones del mundo, solo hasta hace algunos años se empezó a implementar estudios de suelos, ambientales y estudios de zonas del país que tienen vientos de interés energético para poder usar generadores, esto permitiría al país Sud americano ponerse a la vanguardia con la globalización y la generación de energía mediante métodos limpios.

De acuerdo con estudios realizados por el IDEAM existen ciertas zonas del país que sirven de puntos estratégicos para dichos parques eólicos, esto debido a que sus condiciones meteorológicas se prestan para obtener grandes masas de viento que sería la materia prima a utilizar, mediante la ayuda de un atlas de viento diseñado por el instituto de hidrología, meteorología, y estudios ambientales de Colombia por sus siglas (IDEAM), se ha podido determinar 16 sitios puntuales que presentan niveles de velocidad en los vientos de interés energético, de esta forma se da el primer paso para el desarrollo de este tipo de tecnologías a gran escala en el país, sin embargo también se muestra que en otros puntos los niveles

³⁸ AEE, *La eólica en el mundo*, Madrid-España, 03/junio/2016 disponible en <http://www.aeeolica.org>

requeridos para la generación de energía a partir del viento solo son propicios en ciertas épocas del año, estas zonas de interés energético están consignadas en la tabla 1 tomada directamente del atlas de vientos del IDEAM³⁹

Tabla 1. Velocidades de vientos por regiones (velocidades en nudos)

ID	LONGITUD	LATITUD	ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO
1	75°16'W	10°47'N	GALERAZAMBA	BOLÍVAR	5.9
2	73°33'W	05°28'N	GACHANECA	BOYACÁ	5.5
3	81°43'W	12°35'N	AEROPUERTO SESQUICENTENARIO	ISLA DE SAN ANDRÉS	5.1
4	74°44'W	03°20'N	LA LEGIOSA	HUILA	4.1
5	81°21'W	13°22'N	AEROPUERTO EL EMBRUJO	ISLA DE PROVIDENCIA	4.0
6	72°56'W	11°32'N	AEROPUERTO ALMIRANTE PADILLA	LA GUAJIRA	4.0
7	73°30'W	05°32'N	VILLA CARMEN	BOYACÁ	3.9
8	77°18'W	01°11'N	OBONUCO	NARIÑO	3.5
9	72°31'W	07°56'N	AEROPUERTO CAMILO DAZA	NORTE DE SANTANDER	3.3
10	76°07'W	06°20'N	URRAO	ANTIOQUIA	3.0
11	74°36'W	10°53'N	AEROPUERTO ERNERTO CORTISSOZ	ATLÁNTICO	2.9
12	74°14'W	11°08'N	AEROPUERTO SIMÓN BOLÍVAR	MAGDALENA	2.9
13	73°11'W	07°08'N	AEROPUERTO PALONEGRO	SANTANDER	2.8
14	75°08'W	03°35'N	ANCHIQUE	TOLIMA	2.7
15	73°14'W	08°05'N	ÁBREGO CENTRO ADMINISTRATIVO	NORTE DE SANTANDER	2.5
16	74°09'W	04°43'N	AEROPUERTO EL DORADO PISTAS 1-2	CUNDINAMARCA	2.2

Fuente: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/019813/Capitulo4.pdf>

En Colombia un 70% de la energía la proveen las centrales hidroeléctricas, es muy difícil depender exclusivamente de dichas empresas puesto que en tiempos de sequías el país debe enfrentar posibles riesgos de razonamiento de energía como ha sucedido especialmente en el último año, la sequía trajo consigo la disminución de los caudales de las grandes vertientes de agua que abastecen estas centrales hidroeléctricas, sin embargo con el último fenómeno del niño que tuvo lugar en el país los grandes reservorios de agua tuvieron disminución considerable en su nivel lo que puso a varias zonas del país a presentar grandes

³⁹ IDEAM, *Atlas de viento y energía eólica de Colombia, capítulo 4,29/mayo/2016*, disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co>

apagones debido a que no era posible producir la cantidad de vatios requeridos para abastecer las grandes poblaciones.⁴⁰

Para ello la empresa ISAGEN en el año 2000 propuso hacer un estudio de impacto ambiental sobre la zona de Riohacha departamento de la Guajira en donde se espera implementar el primer parque eólico del país, debido a que como se pudo observar en la tabla 1 esta zona es de suma importancia energética gracias a sus condiciones meteorológicas bastante estables en condición de las velocidades que manejan los vientos en esa parte del territorio.

A partir del año 2001 la empresa WAYUU S.A E.S.P, con el apoyo del gobierno Holandés hacen la promoción del proyecto en el territorio conocido como el Cabo de la Vela en el departamento de la Guajira, Colombia, hacia el año 2005 se instaló la primera torre meteorológica con el fin de tomar datos de la velocidad del viento y la humedad relativa del lugar, finalmente entre los años 2007 y 2008 se realizó un estudio de impacto ambiental en la zona.⁴¹

⁴⁰ IDEAM, *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*, capítulo 4,29/mayo/2016, disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co>

⁴¹ ISAGEN S.A, *Estudio de impacto ambiental*, 27/mayo/2016, disponible en <https://www.isagen.com.co>

Imagen. 9 Zona donde se encontrará el parque eólico



Fuente: https://www.isagen.com.co/comunicados/Eolica_espanol_wayuu.pdf

El parque eólico tendrá una capacidad instalada aproximada de 32 MW, conformado básicamente por dos plantas de generación, una de 12 MW y otra de 20 MW, este parque estará conformado por 21 aerogeneradores de 1,5 MW cada uno, ubicados en dos hileras, la línea de transformación estará dispuesta Puerto Bolívar y la línea de transmisión nacional.⁴²

4.2. MARCO CONCEPTUAL

Concepto general

La energía eólica es el aprovechamiento en diversas aplicaciones de la energía mecánica, que poseen las masas de viento, dicha energía es proporcional a su velocidad. La velocidad del viento varía con la altura y depende principalmente del

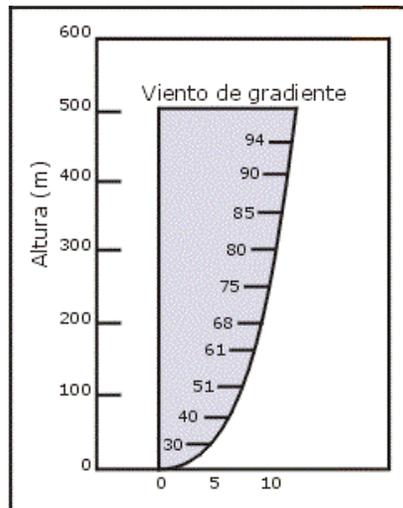
⁴² ISAGEN S.A, *Estudio de impacto ambiental*, 27/mayo/2016, disponible en <https://www.isagen.com.co>

terreno sobre la que están circulando las corrientes de aire y está expresada como.⁴³

(e.c. 1)⁴⁴

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\sigma$$

Gráfica 5. Gradiente de velocidades



Fuente: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc3/lecc3_7.html

Funcionamiento y obtención de energía eléctrica

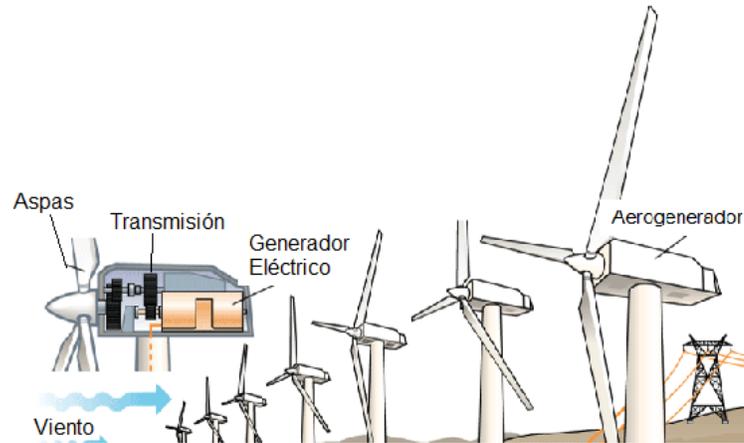
La obtención de energía eléctrica a partir de un sistema eólico se fundamenta en el uso de la energía cinética del viento, la cual es transformada en energía mecánica y luego es convertida en energía eléctrica mediante el uso de un generador como se muestra a continuación.⁴⁵

⁴³ Kamkwamba. *Energía Eólica y Aerogeneradores*. Mayo 1, 2011/20 Enero, 2016, Disponible en <<http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/>>

⁴⁴ Velocidad del viento http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc3/lecc3_7.html

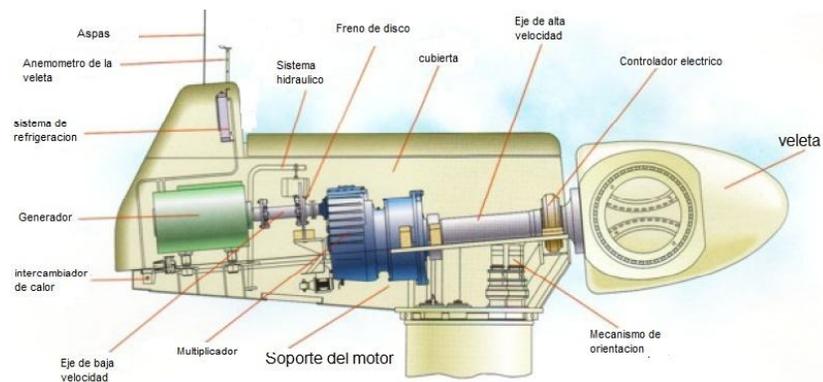
⁴⁵ Kamkwamba. *Energía Eólica y Aerogeneradores*. Mayo 1, 2011/20 Enero, 2016, Disponible en <<http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/>>

Imagen. 10 Generadores eólicos



Fuente: http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/2011_05_01_archive.html

Imagen. 11 Partes del generador



Fuente: http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/2011_05_01_archive.html

Estructura de una turbina eólica

1. Aspas
2. Buje
3. Eje de baja velocidad
4. Multiplicador
5. Sistema hidráulico
6. Eje de alta velocidad

7. Mecanismo de orientación del molino
8. Generador eléctrico (de 500 a 1500 KW)
9. Controlador eléctrico
10. Unidad de refrigeración
11. Anemómetro y veleta

Análisis de cada componente del generador

Aspas: Elaboradas en su mayoría con materiales compuestos, están dispuestas en el generador para transformar la energía cinética proporcionada por el viento en forma de momento torsor en el eje del equipo. Los rotores usados actualmente pueden alcanzar diámetros entre 42 y 80 metros y generar potencias de varios MW.⁴⁶

Buje: Es la pieza que aloja las aspas, las cuales están unidas a éste rígidamente

Eje de baja velocidad: éste transfiere el giro del rotor al multiplicador. Pueden ser de dos tipos: con dos rodamientos o con rodamiento único.

- Ejes de baja velocidad con dos rodamientos: Únicamente se transmite al multiplicador el par torsor, los esfuerzos restantes se transmiten de los rodamientos a: los soportes, la estructura de la máquina y a la torre.
- Ejes de baja velocidad con rodamiento único: un rodamiento de apoyo es situado cerca al buje, y el segundo apoyo del eje es propiamente el multiplicador. Se sitúa lejos el uno del otro apoyo para disminuir las cargas en este punto.⁴⁷

Multiplicador: La función de éste es la de acelerar la velocidad de giro del rotor mediante la implementación de un conjunto de engranajes y piñones que permiten la multiplicación de la energía mecánica (momento torsor) para poder emplear generadores estándar con número bajo de polos que giran a unas 1500 rpm. El

⁴⁶ Kamkwamba. *Energía Eólica y Aerogeneradores*. Mayo 1, 2011/20/ Enero, 2016, Disponible en <<http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com>

⁴⁷ Kamkwamba. *Energía Eólica y Aerogeneradores*. Mayo 1, 2011/20/ Enero, 2016, Disponible en <<http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/>

multiplicador está ubicado pendiendo del eje y sus apoyos sólo son brazos de reacción para el par.⁴⁸

Sistema hidráulico: El Sistema hidráulico proporciona un método de controlar a distancia una amplia gama de componentes de transmisión de una fuerza a través de un fluido confinado, el cual funciona principalmente por presión hidráulica (aceite) inyectado por cierto número de bombas.

Eje de alta velocidad: es el elemento de unión entre el multiplicador y el generador. Gira normalmente entre 1000 – 1500 rpm. Éste debe ser capaz de absorber las posibles desalineaciones entre los ejes del multiplicador y generador.⁴⁹

Generador eléctrico (de 500 a 1500 KW): existen diferentes tipos dependiendo del diseño del aerogenerador. Pueden ser síncronos o asíncronos, jaula de ardilla o doblemente alimentados, con excitación o con imanes permanentes. Es posible definirlo como parte del generador que convierte la energía en electricidad.⁵⁰

Controlador eléctrico: permite el control de la correcta orientación de las palas del rotor, también en caso de cualquier eventualidad como sobrecalentamiento del aerogenerador lo detiene.⁵¹

Unidad de refrigeración: se encargada de mantener al generador a una temperatura prudente.

Anemómetro y veleta: Están dedicadas a calcular la velocidad del viento y la dirección del mismo respectivamente.

Todos estos componentes están conectados al controlador electrónico que procesa estas señales de forma adecuada.⁵²

⁴⁸ *Ibid.*, p. 47

⁴⁹ *Ibid.*, p. 47

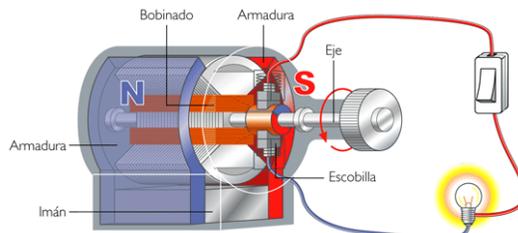
⁵⁰ *Ibid.*, p. 47

⁵¹ *Ibid.*, p. 47

⁵² *Ibid.*, p. 47

Dinamo

Imagen. 12 Dinamo



Fuente: <http://iesgoya4adiver.blogspot.com.co>

La imagen 12 muestra un dinamo que es el principio de funcionamiento básico que se encuentra en los aerogeneradores existentes para poder obtener la energía a partir de la acción del viento, sus componentes básicos son:

Armadura o carcasa: es la parte que permite mantener todas las piezas del dinamo, ensambladas, además protege las piezas internas de este para evitar daños al interior de la estructura.⁵³

Bobinado: Básicamente se trata de una bobina de cobre, la cual está enrollada y soportada por un eje.

Imán: el imán está soportado de manera fija en cualquier parte de la carcasa sin hacer contacto con el bobinado o con el eje.

Eje: El eje es donde se encuentran sujetas las palas del aerogenerador, y en su otro extremo lleva el embobinado.

Escobilla: En este punto se toma toda la energía almacenada por la bobina en forma de campo magnético, y es conducida a una serie de transformadores, los cuales traducen este campo y lo convierten en energía eléctrica.⁵⁴

Funcionamiento de un dinamo:

Las palas del aerogenerador hacen que el eje de vueltas gracias a la acción de la energía cinética que proporciona el viento, de esta manera al eje está sujeto en el

⁵³ IOANA, Mihaela, *alternador, dinamo y motor eléctrico*, 03/febrero/2016, disponible en <http://iesgoya4adiver.blogspot.com.co/2009/11/alternador-dinamo-y-motor-electrico.html>

⁵⁴ *Ibid.*, p. 53

interior de la góndola el embobinado, el cual comienza a girar conforme lo hace el eje.

El imán que esta al interior de la góndola, hace que por la interacción con la bobina se cree un campo magnético, este campo magnético es traducido mediante un sistema de transformadores, en energía eléctrica, dicha energía es almacenada y finalmente distribuida.⁵⁵

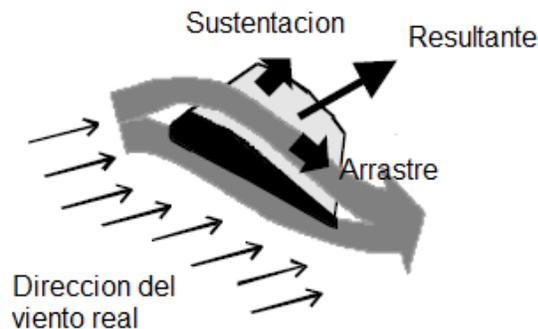
Sistema aerodinámico

Existen dos tipos de molinos: de eje horizontal y de eje vertical (en ambos casos el funcionamiento es en esencia el mismo). La captación de la energía se realiza mediante la acción del viento sobre las paletas del rotor.

El principio aerodinámico, es similar al que hace que los aviones vuelen.

Según este principio, el viento real es captado por la cara superior, y la cara inferior de las paletas, generando una diferencia de presiones en ambas caras, dando origen de este modo a una fuerza resultante perpendicular a las caras de la paleta, haciendo que esta se mueva en sentido de la fuerza resultante.⁵⁶

Imagen. 13 Aerodinámica del perfil



Fuente: <http://avesecologaymedioambiente.blogspot.com.co>

La sustentación permite obtener con menor peso y costos, mayores potencias por unidad de área. La sustentación es la única que puede dar el origen al par motor,

⁵⁵ Kamkwamba. *Energía Eólica y Aerogeneradores*. Mayo 1, 2011/20 Enero, 2016, Disponible en <http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/>

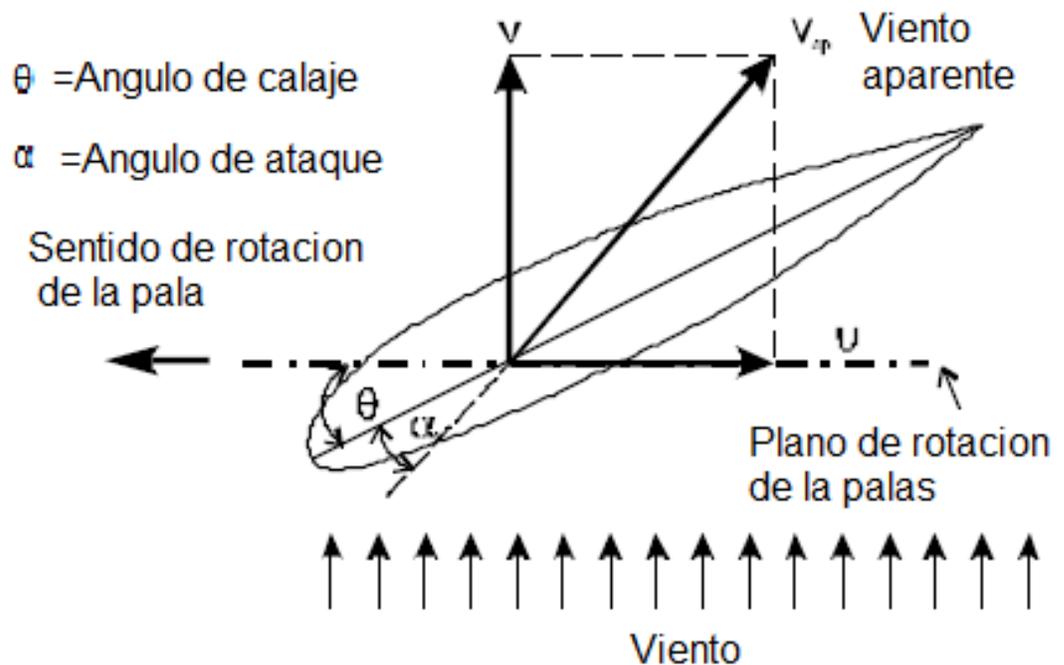
⁵⁶ GYROCLUB DE LA SIERVA, *Pérdida del perfil aerodinámico07* /Febrero /2016, Disponible en <http://www.gyroclubdelacierva.es>

por ende las paletas y el perfil de la estructura, deben estar ubicadas con cierto ángulo de ataque de tal modo que se haga máxima la relación entre sustentación y arrastre.

La fuerza resultante sobre las paletas es una combinación del viento aparente y el viento real, debido a que cada sección de la paleta tiene una velocidad diferente el viento aparente también varía en toda la longitud de la misma, por ello la paleta deberá presentar un ángulo de incidencia diferente a lo largo de toda su longitud efecto que se logra dándole un alabeo⁵⁷

Las velocidades son más altas al acercarse a las puntas de la paleta, el perfil podrá tener menores dimensiones para así obtener la fuerza resultante.⁵⁸

Imagen. 14 Pala



Fuente:<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/>

Teoría aerodinámica

⁵⁷ Kamkwamba. *Energía Eólica y Aerogeneradores*. Mayo 1, 201120/ Enero,2016, Disponible en <<http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/>

⁵⁸ *Ibid.*, p. 57

Partiendo de conocer si el flujo que se está usando es compresible o incompresible:

Ecuación usada cuando es un flujo compresible.

(e.c. 2)⁵⁹

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2$$

Cuando el flujo es incompresible.

(e.c. 3)⁶⁰

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

Conocimiento de número de Mach:

(e.c. 4)⁶¹

$$Ma = \frac{Va}{a}$$

Velocidad del sonido de acuerdo a la altura y temperatura:

(e.c. 5)⁶²

$$a = \sqrt{\gamma R T}$$

Si:

- Ma < 1 Régimen subsónico.
- Ma = 1 Régimen sónico.
- Ma > 1 Régimen supersónico.
- Ma > 10 Régimen hipersónico.
- 0,3 > Ma < 0,8 Régimen transónico.

Determinar la constante dinámica:

(e.c. 6)⁶³

⁵⁹ *Flujo compresible ANDERSON, Fundamentals of Aerodynamics, fifth edition 2007, Ed. McGraw*

⁶⁰ *Flujo incompresible, Ibid. , p 59*

⁶¹ *Numero de Mach, Ibid., p 59*

⁶² *Velocidad del sonido Ibid. , p 59*

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Determinar coeficientes en función de la superficie.

Coeficiente de sustentación:

(e. c 7)⁶⁴

$$Cl = \frac{L}{q S}$$

Coeficiente de arrastre:

(e.c. 8)⁶⁵

$$Cd = \frac{D}{q S}$$

Determinar coeficientes en función del Mach y el ángulo de ataque.

Coeficiente de sustentación:

(e.c. 9)⁶⁶

$$Cl = \frac{4\alpha}{(Ma^2 - 1)^{1/2}}$$

Coeficiente de arrastre:

(e.c. 10)⁶⁷

$$Cd = \frac{4\alpha^2}{(Ma^2 - 1)^{1/2}}$$

Determinar coeficiente de presiones:

(e.c. 11)⁶⁸

⁶³ Constante dinámica ANDERSON, *Fundamentals of Aerodynamics, fifth edition 2007*, Ed. McGraw

⁶⁴ Coeficiente de sustentación. *Ibid.*, p 63

⁶⁵ Coeficiente de arrastre. *Ibid.*, P 63

⁶⁶ Coeficiente de sustentación. *Ibid.*, p 63

⁶⁷ Coeficiente de arrastre. *Ibid.*, P 63

⁶⁸ Coeficiente de presiones ANDERSON, *Introduction to flight, 3d edition 1989*, Ed. McGraw-Hill

$$c_p = \frac{p - p^\infty}{\left(\frac{1}{2}\rho V^2\right)}$$

Determinar fuerzas aerodinámicas.

Arrastre:

(e.c. 12)⁶⁹

$$D = C_d * q * S$$

Sustentación:

(e.c. 13)⁷⁰

$$L = C_l * q * S$$

Determinación del número de Reynolds

(e.c. 14)⁷¹

$$Re = \frac{\rho V \delta}{\mu}$$

El número de Reynolds determina el régimen del fluido

Re < 500000 flujo de régimen laminar

500000 = Re flujo de régimen de transición

Re > 500000 flujo de régimen turbulento

La sustentación y eficiencia de un perfil aerodinámico depende de la distribución de presiones a lo largo de su cuerda, por otro lado también hay que tener en cuenta el diferencial de presiones entre los intradós y los extradós del perfil, otro factor importante es el ángulo de ataque con respecto a la dirección del viento relativo.

Con la obtención de los coeficientes adimensionales es posible determinar la eficiencia de los perfiles aerodinámicos.⁷²

Aerodinámica para palas en rotación

La sustentación permite obtener con menor peso y costos, mayores potencias por unidad de área. La sustentación es la única que puede dar el origen al par motor,

⁶⁹ Arrastre. *Ibid.*, 68

⁷⁰ Sustentación. *Ibid.*, 68

⁷¹ Número de Reynolds. *Ibid.* 68

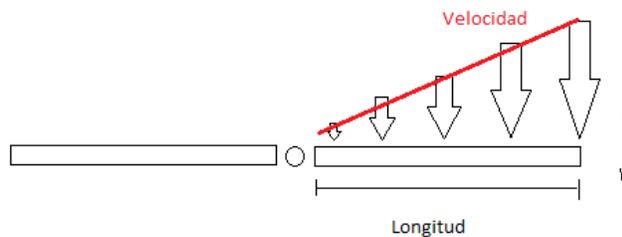
⁷² MUNSON Bruce. YOUNG Donald. OKIISHI Theodore. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*, México D.F, 2003

por ende las palas y el perfil de la estructura, deben estar ubicadas con cierto ángulo de ataque de tal modo que se haga máxima la relación entre sustentación y arrastre.

La fuerza resultante sobre las palas es una combinación del viento aparente y el viento real, debido a que cada sección de la pala tiene una velocidad diferente el viento aparente también varía en toda la longitud de la misma, por ello la pala deberá ser capaz de adaptarse a las diferentes condiciones de velocidad en sus diferentes secciones.

Las velocidades son más altas al acercarse a las puntas de la pala, el perfil podrá tener menores dimensiones para así obtener la fuerza resultante.⁷³

Gráfica 6. Aerodinámica rotacional



Fuente: Hecha por los autores

La ecuación para determinar la velocidad en la punta de las palas sería la siguiente.⁷⁴

(e.c. 15)⁷⁵

$$V_{pp} = \theta * r$$

⁷³ J Gordon Leishman, *Principles of Helicopter Aerodynamics, Capitulo 4 Cambridge University Press, 23/12/2002*

⁷⁴ *Ibid.*, p 73

⁷⁵ *Velocidad de punta de pala BASTIANON Ricardo A. Calculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas 2008 Argentina.*

4.3. MARCO LEGAL

Partiendo de nuestra idea de aerogenerador flotante, y en vista de que lo único que nos rige es la parte del espacio aéreo por ser un proyecto innovador, nos tenemos que adherir a las siguientes normas:

Normas aeronáuticas.

- I. En su condición de Autoridad en materia aeronáutica en todo el territorio nacional, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil – UAEAC, tiene el carácter de autoridad ATS competente y como tal, es la exclusiva responsable del suministro de los Servicios de Tránsito Aéreo en el espacio aéreo sobre el cual tenga soberanía o jurisdicción el Estado Colombiano, o aquel que le sea asignado a Colombia mediante acuerdo regionales de Navegación Aérea, correspondiéndole también velar por el cumplimiento del Reglamento del Aire en dicho espacio. Tal autoridad es ejercida por el Secretario de Sistemas Operacionales, quien tiene como función primordial el prestar los servicios de protección y apoyo al vuelo para la navegación en el Espacio Aéreo nacional, o el que le sea delegado.⁷⁶
- II. Los globos libres no tripulados deben utilizarse de modo que se reduzca al mínimo el peligro a las personas, bienes u otras aeronaves, y de conformidad con las condiciones establecidas en el Apéndice D y en los capítulos XXIV y XXV de la Parte Cuarta de la RAC
- III. Son sectores designados del Espacio Aéreo Colombiano delimitados por la Fuerza Aérea Colombiana FAC en coordinación con la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil UAEAC y que abarcan áreas en las cuales existe sospecha razonable de ser rutas utilizadas para el tráfico ilícito de drogas o armas, u otros actos ilícitos empleando aeronaves.⁷⁷
 - ✓ Se delimitan las siguientes Zonas Especiales de Control Aéreo – ZECA:
 - a) Zona W. Comprende el Espacio Aéreo Colombiano al occidente de la cordillera occidental y el valle del Río Cauca, con excepción de la ciudad de Cali.

⁷⁶ AERONAUTICA CIVIL UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE COLOMBIA. *Reglamento del aire. Cap. 3 y Cap 24. Última actualización Noviembre 16, 2015. Disponible en <http://www.aerocivil.gov.co>*

⁷⁷ *Ibid.*, p. 76

- b) Zona N. Comprende el Espacio Aéreo Colombiano al Norte del país exceptuando las ciudades de Barranquilla, Cartagena y San Andrés-isla.
- c) Zona E Comprende el Espacio Aéreo Colombiano al Oriente y Sur del país.⁷⁸

✓ Los puntos designados a continuación por sus coordenadas geográficas, corresponden a los puntos de referencia para la delimitación de las Zonas Espaciales de Control Aéreo – ZECA, según se indica en las Cartas, No 1, 2 y 3, siguientes:

⁷⁸ AERONAUTICA CIVIL UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPACIAL DE COLOMBIA.
Reglamento del aire. Cap. 3 y Cap 24. Última actualización Noviembre 16, 2015.
Disponibile en <http://www.aerocivil.gov.co>

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1. 07 13 11 N 077 53 12 W | 13. 06 10 48 N 074 03 54 W |
| 2. 08 31 42 N 077 21 36 W | 14. 07 01 15 N 074 42 34 W |
| 3. 08 40 28 N 077 21 32 W | 15. 07 01 15 N 075 33 52 W |
| 4. 08 50 06 N 077 14 00 W | 16. 06 32 00 N 076 13 31 W |
| 5. 12 06 04 N 070 55 02 W | 17. 05 08 28 N 076 13 31 W |
| 6. 07 00 00 N 072 00 12 W | 18. 05 08 28 N 075 42 38 W |
| 7. 06 09 22 N 072 11 48 W | 19. 05 08 28 N 075 11 15 W |
| 8. 05 40 48 N 072 54 24 W | 20. 02 34 51 N 076 17 40 W |
| 9. 04 36 05 N 073 56 53 W | 21. 02 34 51 N 074 56 40 W |
| 10. 03 18 47 N 072 58 38 W | 22. 01 28 28 N 075 29 17 W |
| 11. 03 18 47 N 073 56 53 W | 23. 00 25 16 N 076 14 50 W. |
| 12. 05 27 50 N 074 11 48 W | |

IV. Para la operación de Globos deberá observarse lo siguiente:

- a) La superficie exterior de la cubierta (envoltura) de los globos, debe ser de colores que contrasten y que lo hagan visible durante su operación, como mínimo a una milla de distancia.
- b) No podrá operarse un globo, libre o cautivo, en zonas prohibidas o restringidas, sin permiso previo de la Autoridad Aeronáutica.
- c) No podrá operarse un globo, libre o cautivo, de manera que cree una condición peligrosa a aeronaves, personas o propiedades.
- d) En condiciones normales de operación, no se podrá arrojar objeto alguno desde un globo en vuelo, salvo que haya sido expresamente autorizado por la autoridad Aeronáutica.⁷⁹

V. Para la operación de globos cautivos, debe tenerse en cuenta que éstos no podrán operarse:

- a) A menos de 150 metros (500 ft.) de la base de las nubes.
- b) A más de 150 metros (500 ft.): sobre la superficie del terreno (AGL).
- c) En una zona donde la visibilidad horizontal a nivel del suelo sea de menos de 5 km. (3 millas).
- d) A menos de 8 km (5 millas) del límite de un aeródromo.
- e) No se podrá operar un globo cautivo o de amarre, a menos que esté equipado con un dispositivo que de forma automática y rápida pueda llevar a efecto la operación de desinfla, si es que llega a soltarse de sus amarras. Si el dispositivo no funciona debidamente, el operador deberá inmediatamente informar a la autoridad ATS más cercana, la localización y

⁷⁹ *Ibid.*, p78

hora en que empezó el desprendimiento, con el fin que se tomen las medidas de seguridad del caso.⁸⁰

Ley 1715 de 2014 (Mayo 13) congreso de Colombia

Por medio del cual se regula la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

Capítulo 1 disposiciones generales

- **Artículo 1°. Objeto.** La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda.⁸¹
- **Artículo 2°. Finalidad de la ley.** La finalidad de la presente ley es establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional. Igualmente, tiene por objeto establecer líneas de acción para el cumplimiento de compromisos asumidos por Colombia en materia de energías renovables, gestión eficiente de la energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, tales como aquellos adquiridos a través de la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena) mediante la Ley 1665 de 2013.⁸²
- **Artículo 20. Desarrollo de la energía eólica.**

⁸⁰ AERONAUTICA CIVIL UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPACIAL DE COLOMBIA. *Reglamento del aire. Cap. 3 y Cap 24. Última actualización Noviembre 16, 2015. Disponible en <http://www.aerocivil.gov.co>*

⁸¹ Ley 1715 de 2014 (Mayo 13) congreso de Colombia Capítulo I (artículos 1 y 2), Capítulo 4(artículo 20) 01/junio/2016

⁸² Ley 1715 de 2014 (Mayo 13) congreso de Colombia Capítulo I (artículos 1 y 2), Capítulo 4(artículo 20) 01/junio/2016

- ✓ La energía eólica se considerará como FNCER. Se deberá estudiar y analizar las condiciones propias de la naturaleza de la fuente para su reglamentación técnica por parte de la CREG.
- ✓ El Gobierno Nacional a través del Ministerio de Minas y Energía fomentará el aprovechamiento del recurso eólico en proyectos de generación en zonas aisladas o interconectadas.
- ✓ El Ministerio de Minas y Energía, directamente o a través de la entidad que designe para este fin, determinará requerimientos técnicos y de calidad a cumplir por las instalaciones que utilicen el recurso eólico como fuente de generación
- ✓ El Gobierno Nacional, por intermedio del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, determinará los parámetros ambientales que deberán cumplir los proyectos desarrollados con energía eólica, así como la mitigación de los impactos ambientales que puedan presentarse en la implementación.⁸³
- **Artículo 43. Armonización de requisitos ambientales para el desarrollo de las FNCE.**
 - ✓ 1. El Gobierno Nacional, en cabeza del MADS, con el apoyo de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, ANLA, y las Corporaciones Autónomas Regionales, formulará y adoptará los instrumentos y procedimientos para la realización y evaluación de los estudios de impacto ambiental de los proyectos de competencia de la ANLA y de las Corporaciones Autónomas Regionales; por su parte, en cabeza del MME formulará y adoptará los instrumentos y procedimientos para evaluar el impacto energético de las instalaciones a partir de FNCE, para su aplicación a aquellos proyectos sometidos a autorización por parte del Gobierno Nacional.
 - ✓ 2. El procedimiento al que se refiere el literal 1) diferenciará entre distintas tipologías de instalaciones, definiendo las características generales que debe cumplir cada una de ellas.⁸⁴
- **Artículo 44. Emisiones y vertidos de las instalaciones de FNCE.**

⁸³ *Ibid.*, p. 82

⁸⁴ Ley 1715 de 2014 (Mayo 13) congreso de Colombia Capítulo I (artículos 1 y 2), Capítulo 4(artículo 20) 01/junio/2016

Los límites de emisiones o vertimientos establecidos para las instalaciones de FNCE, en ningún caso podrán ser más rigurosos que los límites establecidos en el caso menos exigente aplicado a fuentes de energía convencionales.

- ✓ En particular, el Gobierno Nacional desarrollará una normativa específica que regule las emisiones y los vertimientos de las instalaciones que utilicen recursos renovables de acuerdo a sus características específicas.⁸⁵

- **Artículo 45. Seguimiento estadístico y evaluación conjunta del cumplimiento de los objetivos.**

- ✓ 1. Para el adecuado seguimiento y evaluación del cumplimiento de los objetivos de la presente ley, además de los informes periódicos de seguimiento de los diferentes planes y programas, cada cuatro años se realizará una evaluación de:
 - a) Los planes y programas de ahorro para la gestión eficiente de la energía;
 - b) El Plan de FNCE;
 - c) Los escenarios de evolución del escenario energético general;
 - d) La planificación de redes de transporte de electricidad y gas natural.
- ✓ 2. Las evaluaciones tendrán en cuenta las posibles desviaciones de la trayectoria prevista, el desarrollo de las distintas tecnologías de aprovechamiento de las FNCE, así como la evolución del marco socioeconómico experimentado y previsible, e incorporará las medidas apropiadas para el cumplimiento de los objetivos globales del Plan y para una utilización eficiente de las distintas tecnologías y de los instrumentos para la promoción de las FNCE.
- ✓ 3. El Gobierno Nacional, asegurará y articulará los mecanismos de colaboración necesarios con entidades públicas y privadas, para la captación y provisión de la información estadística requerida.
- ✓ 4. El Gobierno Nacional, a través de los Ministerios y los organismos responsables de la elaboración de estadísticas de consumo de energía por fuentes y sectores, garantizará la calidad de las mismas.⁸⁶

Resolución 281 de 2015

Diario Oficial No. 49.534 de 5 de junio de 2015

Unidad de Planeación Minero-Energética

Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala.

⁸⁵ *Ibid.*, p. 84

⁸⁶ *Ley 1715 de 2014 (Mayo 13) congreso de Colombia Capítulo I (artículos 1 y 2), Capítulo 4(artículo 20) 01/junio/2016*

El Director General de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), en ejercicio de sus facultades legales,

CONSIDERANDO:

Que la Ley 1715 de 2014, “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”, estableció el marco legal y los instrumentos para la promoción, desarrollo y utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), en especial las de carácter renovable, en el Sistema Interconectado Nacional mediante su integración al mercado eléctrico;

Que la misma ley, en su artículo 5°, numeral 2, definió la autogeneración a gran escala como la autogeneración cuya potencia máxima supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME); y en el numeral 3 del mismo artículo, definió la autogeneración a pequeña escala como la autogeneración cuya potencia máxima no supera dicho límite;

Que el literal b) del numeral 3 del artículo 6° de la Ley 1715 de 2014 establece la función a la UPME de “Definir el límite máximo de potencia de la Autogeneración a Pequeña Escala”;

Que el artículo 3° del Decreto número 2469 de 2014, “por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración”, expedido por el Ministerio de Minas y Energía, definió un período de seis (6) meses para que la UPME establezca “...el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala, el cual se podrá actualizar si las variables que se tuvieron en cuenta para su determinación cambian significativamente. Este tendrá en cuenta criterios técnicos y económicos y no podrá ser superior al límite mínimo de potencia establecido por regulación para que una planta de generación pueda ser despachada centralmente”;

Que la UPME realizó análisis técnicos y económicos consignados en el Documento “Análisis para la definición del límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)”, y que estos sirvieron de base para la definición del límite de que trata la presente resolución; Que en mérito de lo expuesto,

RESUELVE:

Artículo 1°. El límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala será de un (1) MW, y corresponderá a la capacidad instalada del sistema de generación del autogenerador.

Artículo 2°. La presente resolución rige a partir de su publicación en el Diario Oficial.

Publíquese y cúmplase.

Dada en Bogotá, D. C., a 5 de junio de 2015.⁸⁷

Decreto 1623 de 2015

Diario Oficial No. 49.601 de 11 de agosto de 2015 Ministerio de Minas y Energía

Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas.

Que el artículo 365 de la Constitución Política establece que los servicios públicos son inherentes a la finalidad social del Estado y es deber de este asegurar su prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional.

Que de conformidad con lo previsto en los artículos 1°, 2° y 4° de la Ley 142 de 1994, la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica y sus actividades complementarias constituyen servicios públicos esenciales y el Estado intervendrá en los mismos a fin de, entre otros, garantizar la calidad del bien y su disposición final para asegurar el mejoramiento de la calidad de vida de los usuarios, así como su prestación continua, ininterrumpida y eficiente.⁸⁸

4.4. MARCO AMBIENTAL

La implementación de energía eólica es un beneficio muy importante para la obtención de energía de una manera que sea amigable con el ambiente, sin embargo vale la pena aclarar que de una u otra manera representa diferentes impactos ambientales en el lugar en el que se quiera implementar, ya que la instalación de un parque eólico significa invadir espacios de un ecosistema que ya está previamente constituido, de esta forma es importante tener en cuenta estrategias que permitan la recuperación de los ecosistemas que se ven involucrados en este tipo de intervenciones o al menos disminuir en la mayor

⁸⁷ UPME, Ministerio de Minas Colombia, Unidad de planeación minero energética, resolución 281 de 2015, tomado de [:faolex.fao.org/docs/pdf/col146970.pdf](http://faolex.fao.org/docs/pdf/col146970.pdf)

⁸⁸ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Colombia, decreto 1623 de 2015, tomado de <http://faolex.fao.org/docs/pdf/col150817.pdf>

medida posible el impacto que pueda tener un proyecto de esta magnitud en espacios de interés ecológico.⁸⁹

El proyecto de parques eólicos desarrollado por ISAGEN contempla entre sus múltiples estudios y actividades el impacto medioambiental que se generaría con este tipo de proyectos, estos impactos ambientales se pueden presentar a corto, mediano o largo plazo, pero de una u otra manera afectarían tanto factores bióticos y abióticos por la alteración del ecosistema.

Un proyecto de interés energéticos, aunque genera impactos positivos en términos de desarrollo regional y mejoramiento de la calidad de vida para las poblaciones beneficiadas, también generan impactos de carácter negativo, con aprobación de la CAR (Corporación autónoma regional) que es una de las entidades encargadas de la buena administración de los recursos naturales y el ecosistema, este tipo de proyecto debe generar de cierta forma una conciencia ambiental por parte de los grandes empresarios a fin de mitigar estos efectos tanto en el ecosistema como en el paisaje.⁹⁰

Entre los principales efectos ambientales vale la pena hacer una descripción en dos categorías principales:

Principales efectos sobre el agua, el aire, el suelo y el paisaje.

- Generación de energía de una manera limpia y amigable con el ambiente.
- Cambios en el paisaje.
- Alteración superficial de los drenajes y principales afluentes de corrientes y aluviales, tanto superficiales como subterráneos.
- Contaminación del aire por aumento temporal de vehículos en la zona.
- Desarrollo y aceleración de procesos de erosión.
- Cambios del uso actual del suelo.
- Contaminación del suelo.⁹¹

Principales impactos sobre la flora y fauna

- Pérdida de la capa vegetal superficial.
- Desplazamiento de aves por efectos de alteración de rutas aéreas migratorias.
- Afectación de comunidades de mamíferos, reptiles y anfibios.

⁸⁹ EEPMP, Revista eólica y del vehículo eléctrico, La energía eólica en Colombia: 40 megavatios eólicos instalados y un potencial desaprovechado y poco estudiado, disponible en: <http://www.evwind.com>

⁹⁰ *Ibid.*, p. 89

⁹¹ ISAGEN S.A, *Estudio de impacto ambiental*, 27/mayo/2016, disponible en <https://www.isagen.com.co>

- Posible colisionamiento de aves con los generadores o líneas de transmisión y conexión.
- Transformación y alteración del ecosistema y del hábitat de la fauna.⁹²

Para el manejo de los impactos ambientales mediante la construcción y operación del proyecto se generó un plan de manejo ambiental que en cierta forma permita mitigar los efectos sobre el ecosistema, estos planes están consignados en las dos tablas mostradas a continuación.

Tabla 2 Plan de manejo ambiental en manejos físicos

Programas	Proyecto
Programa de manejo conservación y restauración del terreno	Manejo de áreas de excavaciones y obras civiles
	Manejo y disposición de material sobrante de excavaciones
	Obtención de material de préstamo
Programa de manejo de residuos	Manejo de residuos sólidos
	Manejo de residuos líquidos
Programa de manejo de emisiones atmosféricas	Manejo de la calidad del aire
	Manejo de emisiones de ruido
Programa de manejo de cuerpos de agua	Manejo de cuerpos de agua y zonas de drenaje
Programa de señalización	Señalización de zonas de trabajo y del parque
Programa de manejo del recurso suelo	Manejo de los procesos erosivos
	Manejo de suelos contaminados por sustancias peligrosas
	Manejo y reutilización del suelo

Fuente. https://www.isagen.com.co/comunicados/Eolica_espanol_wayuu.pdf

Tabla 3 Plan de manejo ambiental en aspectos bióticos

Programas	Proyecto
Programa de manejo de la vegetación	Control de despeje de la vegetación
	Manejo de la cobertura vegetal removida
	Compensación forestal por afectación de la cobertura vegetal
Programa de manejo de la vegetación y la fauna	Protección de bosques de galería y conservación de hábitats
Programa de manejo de la fauna	Talleres de capacitación para el manejo de la fauna silvestre
	Manejo por colisión de aves

Fuente. https://www.isagen.com.co/comunicados/Eolica_espanol_wayuu.pdf

⁹² *Ibid.*, p.91

Mediante el uso de un plan de manejo ambiental se busca disminuir al máximo posible el impacto ambiental generado por el proyecto, el incumplimiento de estos planes podría acarrear consigo sanciones de índole legal o incluso la no conclusión del proyecto ya que se encuentra respaldado por el capítulo 9 y 10 de la ley 1715 del congreso de la Republica de Colombia el cual habla de las consideraciones relacionadas con los aspectos medio ambientales y su cumplimiento, esta ley se encuentra consignada en el marco legal del presente documento.

5. METODOLOGIA

Observación: En la etapa de observación básicamente se dejan establecidos los factores preliminares mediante los cuales se desarrolló el proyecto, en esta fase se debe reconocer el problema, abarcando la mayor cantidad de áreas posibles del proyecto, se planteó la pregunta problema teniendo en cuenta que este debía responder a todas las posibles necesidades de lo que se está buscando, se abordó directamente la consecuencia mediante el modelo causa – efecto.

Formulación de hipótesis: Se hizo planteamiento de las posibles hipótesis y teorías que de una u otra manera llegaron hasta la resolución del proyecto y finalmente se resolvió la pregunta problema se plantearon los posibles interrogantes que a su vez pueda plantear la pregunta global del proyecto.

Experimentación y control de variables: En la experimentación básicamente se hizo el uso de modelos matemáticos, modelos físicos y teóricos los cuales de una u otra manera permitieron abordar las hipótesis planteadas en la etapa de formulación, de igual forma los modelos fueron coherentes estableciendo una relación entre cada una de las hipótesis, de esta forma se controlaron las variables que en cierta forma influyen en la experimentación, además fue una manera de confirmar que los modelos e hipótesis planteados fuesen comprobables ya que al momento de no ser comprobables se debía hacer un nuevo planteamiento que encaminara de una mejor manera el modelo lógico que se está usando.

Las conclusiones: En las conclusiones es posible establecer de qué manera fue abordado el problema si fue abordado de manera correcta o no ya que en las conclusiones se dio respuesta y solución total a la pregunta planteada no de forma parcial, además mediante las conclusiones fue posible saber si los modelos e hipótesis planteadas fueron pertinentes en la solución del problema, por otro lado fue posible saber si los métodos de experimentación y control de variables que se usaron fueron los más adecuados, y finalmente la solución del problema y el impacto e importancia que se le dio a esta.

• CAPITULO I

TOMA DE VARIABLES REPRESENTATIVAS

CONDICIONES METEOROLOGICAS EN LA SABANA DE BOGOTA

En la sabana de Bogotá tiene presencia la terminal aérea más grande del país ubicado a 2600 metros sobre el nivel del mar el aeropuerto internacional El Dorado es la terminal aérea que más mueve tráfico aéreo tanto nacional como internacional, para ello se estima que esta zona del país tiene unas condiciones meteorológicas las cuales hacen posible la afluencia de diferentes tipos de aeronaves desde y hacia esta zona.

Las condiciones meteorológicas en la sabana de Bogotá son de vital importancia para cualquier estudio aerodinámico que busque la eficiencia y manejo de la energía eólica, en esta zona del país existe una estación meteorológica que está

encargada de la toma de datos meteorológicos para ello se hace un registro diario de condiciones tales como temperaturas, presiones, velocidades del viento entre otros.

La estación meteorológica tiene una recopilación de datos completos acerca de la variación del clima desde que entró en funcionamiento en el año de 1942, la estación meteorológica conocida como “SKBO Bogotá/El dorado 802220” ha sido de vital importancia en la toma de muestras de datos meteorológicas tanto para estudios climáticos como medición de la resistencia del viento o simplemente variaciones del clima a lo largo de los años, como para las operaciones aéreas del aeropuerto internacional el Dorado de la ciudad de Bogotá.⁹³

De acuerdo a los datos obtenidos de los diferentes modelos meteorológicos generados por el Banco Mundial y acorde a diferentes organizaciones medioambientales se ha podido determinar que la temperatura del globo está cambiando de manera abrupta sobre todo en lo corrido que va del siglo XXI y desde que fue el auge de la revolución industrial en el siglo XVIII el uso de combustibles fósiles y la desmedida globalización y mal uso de los recursos naturales han generado bastantes variaciones en el clima mundial⁹⁴.

Un buen punto de partida para el diseño del perfil aerodinámico que cumpla con los principales objetivos del presente proyecto es reconocer las condiciones del medio en el cual el perfil se va a desarrollar de esta manera es posible saber cuáles son las características que debe tener el perfil para que se adapte a las condiciones climáticas más conocidas como condiciones de frontera.

Para poder conocer las condiciones climáticas de la sabana de Bogotá se realizó un recuento del comportamiento climático de la ciudad de Bogotá teniendo como referencia tres variables importantes para poder determinar las condiciones de frontera mediante la realización de ecuaciones básicas de termodinámica y aerodinámica de perfiles.

El grupo de investigación SITDFAE que fue el objeto de estudio para la realización del presente proyecto tiene como objetivo realizar todo el diseño de un aerogenerador flotante para su posterior funcionamiento en la sabana de Bogotá, el proyecto se espera se continúe trabajando en los años venideros es por eso que fue necesario hacer una predicción meteorológica con un modelo estadístico para de esta forma tener una idea clara de cómo será el clima en los próximos años, así de esta forma se está asegurando que el perfil aerodinámico diseñado

⁹³ ICAO, SKBO, Registro de históricos metar 08/junio/2016 tomado de <http://www.tutiempo.net/registros/skbo>

⁹⁴ BANCO MUNDIAL, Emisiones de CO2, 09/junio/2016, disponible en <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=map>

fue diseñado para que trabaje en estas condiciones meteorológicas a las cuales este la ciudad en ese entonces, además el modelo estadístico va apoyado en la información registrada por las diferentes ONG y el Banco mundial que habla del calentamiento global, y el aumento de la temperatura global en los años que están por venir solo que para ello se ha considerado únicamente la zona que será objeto de estudio, como se ha mencionado anteriormente se está hablando de la Sabana de Bogotá, ubicada en la región andina de la Republica de Colombia.

Como primera medida se realizó la búsqueda de las condiciones meteorológicas gracias a la base meteorológica SKBO 802220 del aeropuerto el Dorado de la Ciudad de Bogotá, dichos datos tomados son avalados y utilizados por la industria aérea y meteorológica de Colombia para ello y teniendo en cuenta las variables más importantes para el diseño del perfil se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

Temperatura media

Presión estática de la zona

Densidad del aire en esta zona con respecto a la temperatura

Velocidad promedio del viento anualmente

Para poder determinar la predicción que se esperaba hacer que permitiera conocer las condiciones climáticas por lo menos durante los próximos 5 años, que es el tiempo estimado de la conclusión del proyecto del aerogenerador flotante se realizó una compilación completa de datos climáticos.

Para poder determinar la cantidad de años que se pueden predecir con un grado alto de confiabilidad se usó la ecuación raíz de n en la cual se utilizan la cantidad de años que se tienen para poder saber cuántos años se pueden predecir a partir de estos datos, para el caso se determinó de acuerdo a la ecuación que⁹⁵:

(e.c. 11)⁹⁶

$$\sqrt{n} = n(\text{prediccion})$$

$$\sqrt{\text{numero de años obtenidos}} = \text{prediccion en años}$$

⁹⁵ UNIVERSIDAD CATOLICA DE ARGENTINA. *Regresion y correlacion, estadística y complementos*. 15/julio/2016. Tomado de www.uca.edu.sv/matematica/upload_w/file/REGRESION%20SIMPLE%20Y%20MULTIPL E.pdf

⁹⁶ *Modelo de predicción Ibid., p 95*

$$\sqrt{35 \text{ años}} = 5,91 \text{ años}$$

Mediante la toma de 35 años es posible hacer una predicción de 6 años con un margen de confiabilidad del 95% aproximadamente es decir que para la predicción de los 5 años son suficientes para obtener datos confiables de la predicción que se piensa hacer.

Para aumentar el grado de acierto y confiabilidad en la predicción se hizo la toma de datos desde el año 1980 para lo cual sería un total de 35 años y seis meses, contando la primera mitad del año en curso ya con estos datos el grado de confiabilidad de la predicción tendría un alto grado de acierto, sin embargo, no es posible acceder a años más antiguos debido a que los reportes de la estación meteorológica inferiores al año 1980 ya son de manera incompleta y no están del todo claros.

En el anexo 3 se puede encontrar la tabla de datos tomados desde el año 1980 hasta la primera mitad del año 2016, los datos de la estación meteorológica SKBO 802220 ofrecen temperaturas máximas, mínimas y medias de forma diaria, mensual, y anual. Las temperaturas bajo las cuales se trabajaron fueron las temperaturas medias debido a que en los registros diarios las temperaturas más altas y más bajas tienden a darse solo en ciertos periodos del día que no superan las dos horas, mientras que la temperatura media está entre el rango de dichas temperaturas teniendo en cuenta que nunca se va a salir de este rango, la predicción fue necesaria debido a que los cambios en la meteorología mundial sugieren un aumento en la temperatura.

Por otro lado, las velocidades utilizadas también fueron velocidades medias esto debido a que la variación en la velocidad del viento de acuerdo a la temporada del año se mantiene prácticamente igual año a año es por ello que no se tomó la velocidad más crítica para que de esta forma pueda haber una adaptación del perfil ante cualquier condición de vientos que se presente.

MODELO ESTADISTICO PARA LA PREDICION DE LOS DATOS

Para la predicción de los datos se ha usado un modelo conocido como SARIMA, este modelo se usó debido a que tiene un alto grado de precisión en materia de predicciones además de que maneja un bajo margen de error en las predicciones próximas, este modelo tiene implícitos varios modelos estadísticos integrados, por lo cual hace una simplificación de los datos y relaciona diferentes modelos como lo son: regresiones simples, integraciones, medias móviles, y lo más importante es la observación que se hace a partir de datos y muestras pasadas en función del tiempo para realizar la predicción.

El modelo estadístico usado para realizar la predicción de las temperaturas obtenidas con 35 años y medio de datos fue el modelo SARIMA, también conocido como modelos estacionarios multiplicativos, pero el modelo SARIMA tiene sus raíces en el modelo ARIMA que son modelos autor regresivos integrados de medias móviles, para entender el modelo de auto regresión es importante en primera medida conocer el modelo estocástico.⁹⁷

Un proceso estocástico básicamente consiste en una sucesión de variables aleatorias y ordenadas que puede tomar cualquier valor t entre $-\infty$ e ∞ , el valor t desde el punto de vista estocástico representa básicamente lo que es el paso del tiempo⁹⁸.

La palabra ARIMA significa Modelos Auto-regresivos Integrados de Medidas Móviles.

Dichos modelos auto-regresivos se abrevian con la palabra AR tras la que se indica el orden del modelo que expresa el número de observaciones retasadas de la serie temporal analizada que interviene.

El término de error de estos modelos se denomina ruido blanco cuando cumplen las tres condiciones que son: media nula, varianza constante y covarianza nula entre errores correspondientes a observaciones diferentes.

La palabra MA es para denominar los modelos de medias móviles, que son los que explican el valor de una determinada variable en un periodo t en función de un término independiente y una sucesión de errores correspondientes a periodos precedentes, ponderados convenientemente.

La I es para denominar las integraciones que se hacen de las medidas móviles, y la S es para denominar las regresiones del modelo⁹⁹.

El modelo ARIMA permite describir un valor como una función lineal de datos anteriores y errores debidos al azar, además, puede incluir un componente cíclico o estacional. Es decir, debe contener todos los elementos necesarios para

⁹⁷ DE ARCE RAFAEL, U D I Economía e informática, depto. De economía aplicada, modelos arima 17/julio/2016 tomado de: https://www.uam.es/personal_pdi/economicas/anadelsur/pdf/Box-Jenkins.PDF

⁹⁸ Ibid., p.97

⁹⁹ DE ARCE RAFAEL, U D I Economía e informática, depto. De economía aplicada, modelos arima 17/julio/2016 tomado de: https://www.uam.es/personal_pdi/economicas/anadelsur/pdf/Box-Jenkins.PDF

describir el fenómeno. Este modelo proporciona además una predicción puntual y la distribución de probabilidad completa para los futuros valores de la serie¹⁰⁰.

Para identificar el modelo se debe tener en cuenta si se maneja la función de auto-correlación (FAC) o la función de auto-correlación parcial (FACP), a través de las cuales se determinan los órdenes p , d , q que representan p (AR), q (MA), d (I), respectivamente para formar el modelo ARIMA.

La metodología para utilizar este modelo fue propuesta por Box-Jenkins y consta de cuatro etapas las cuales son:

1. Identificación: Consiste en elegir uno o más modelos ARIMA, SARIMA como candidatos que pueden representar adecuadamente el comportamiento de la serie. En ésta etapa deben determinarse las transformaciones necesarias para conseguir estacionariedad, contraste de inclusión de un término de tendencia determinística (θ_0) y elegir los órdenes p y q para cada uno de los modelos competitivos.
2. Estimación: Consiste en estimar los parámetros de cada uno de los modelos identificados en la fase anterior.
3. Diagnósis (Validación): Trata de determinar si los modelos identificados y estimados son adecuados para representar a los datos. Las deficiencias encontradas en ésta etapa pueden utilizarse como información para reformular los modelos.
4. Predicción: Con los modelos que han sido diagnosticados favorablemente, se pueden realizar predicciones. Esta etapa también puede poner de manifiesto qué modelos poseen deficiencias a la hora de predecir, y puede utilizarse como herramienta de validación de los modelos.

De esta forma siguiendo estas etapas y cuando más pequeño sea el criterio AIC (Criterio de información Akaike), mejor será el modelo, más verídico y confiable.¹⁰¹

Para hacer predicciones hay que tener en cuenta dos supuestos iniciales:

Para el desarrollo del algoritmo lógico matemático se hizo una programación con el programa para simulaciones estadísticas R el cual puede hacer predicciones estadísticas mediante la introducción de datos y variables conocidas entre más

¹⁰⁰ DE LA FUENTE, Santiago, Universidad autónoma de Madrid, departamento de economía aplicada, modelo arima, 20/julio/2016 tomado de www.estadistica.net/ECONOMETRIA/SERIES-TEMPORALES/modelo-arima.pdf

¹⁰¹ DE ARCE RAFAEL, U D I Economía e informática, depto. De economía aplicada, modelos arima 17/julio/2016 tomado de: https://www.uam.es/personal_pdi/economicas/anadelsur/pdf/Box-Jenkins.PDF

datos se tengan el grado de confiabilidad de la predicción será mayor, a continuación, se visualizan las gráficas obtenidas para determinar la temperatura que se espera a manejar en los próximos 5 años, las temperaturas están tomadas en grados kelvin.

Algoritmo usado en el programa r para predicción

```
library(forecast)
library(urca)
library(MASS)
library(tseries)
library(moments)

setwd("C:/Users/slozanof/Documents/TEMPERATURA")
BASE<-read.table("base.txt",header=T)
base<-ts(BASE, start=1980, freq=12)
plot(base,main="Temperatura en Bogotá (1980-2016)",xlab="Año",ylab="Temperatura (K°)")
abline(reg<-lm(base~time(base)),col=2)
summary(reg)
boxplot(base~cycle(base), main="Distribución por meses en el año",
        xlab="Mes",ylab="Temperatura (K°)")
plot(stl(base,s.window="periodic"))
#Los datos son estacionales
adf.test(base)
par(mfrow=c(2,1))
acf(diff(base))
pacf(diff(base))
par(mfrow=c(1,1))
auto.arima(base)
ajuste <- arima(base,c(2,1,1), seasonal = list(order = c(2,0,0), period = 12))
#Modelo ajustado S AR I MA(2,1,1)(2,0,0)
```

```

pred <- predict(ajuste, n.ahead = 60)

valores <- pred$pred

ts.plot(base,pred$pred, log = "y", lty = c(1,3),main="Recaudos",ylab="Ganancias en
Millones",xlab="Años")

tsdiag(ajuste)

#####PREDICCIONES#####
#####

# Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec

#2016 287.3907 287.4426 287.4799 287.5706 287.4819 287.4926

#2017 287.5747 287.9508 288.1251 288.0000 287.9208 287.5868 287.6465 287.7044 287.6965
287.7470 287.6566 287.7007

#2018 287.7889 288.0561 288.1952 288.0521 287.9649 287.7117 287.7805 287.8102 287.8152
287.8504 287.8023 287.8192

#2019 287.8651 288.0303 288.1119 288.0389 287.9939 287.8419 287.8769 287.8985 287.8986
287.9205 287.8862 287.9008

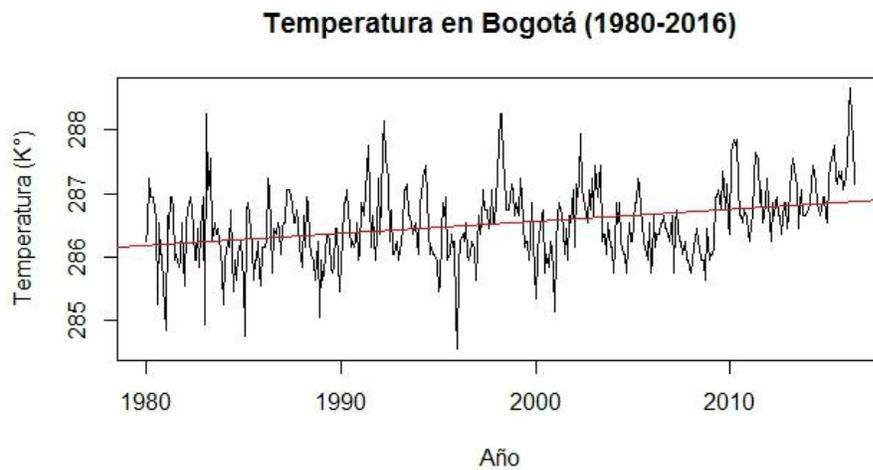
#2020 287.9340 288.0431 288.0984 288.0451 288.0124 287.9106 287.9361 287.9494 287.9504
287.9648 287.9437 287.9519

#2021 287.9723 288.0421 288.0770 288.0445 288.0245 287.9598

#####
#####

```

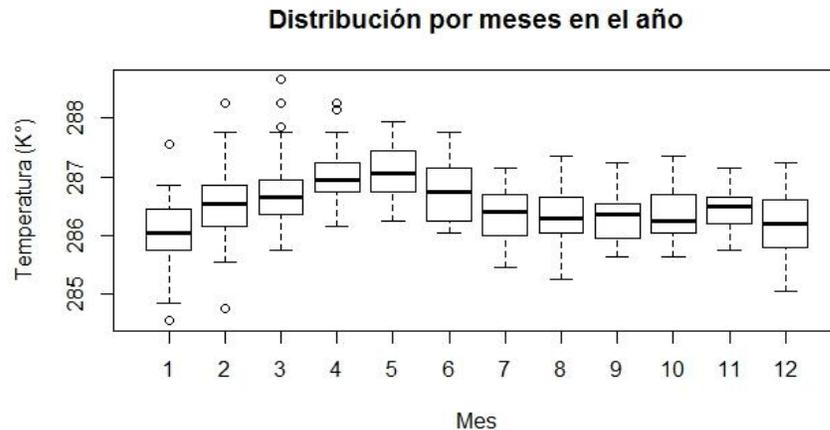
Gráfica 7 tendencia desde 1980 hasta 2016



Fuente: Departamento de estadística Fundación Universitaria los libertadores

La gráfica 7 muestra básicamente la tendencia de la temperatura anual para cada uno de los meses, la línea roja muestra el incremento de la temperatura desde el año 1980 esta tendencia se puede expresar como la simplificación y comportamiento de la temperatura a lo largo de los años de manera clara ya que se puede apreciar que de igual forma los diferentes picos marcan las temperaturas mayores y menores para cada mes del año, sin embargo se puede apreciar que estas temperaturas tienen un incremento que se comporta de manera lineal, a medida que pasan los años.

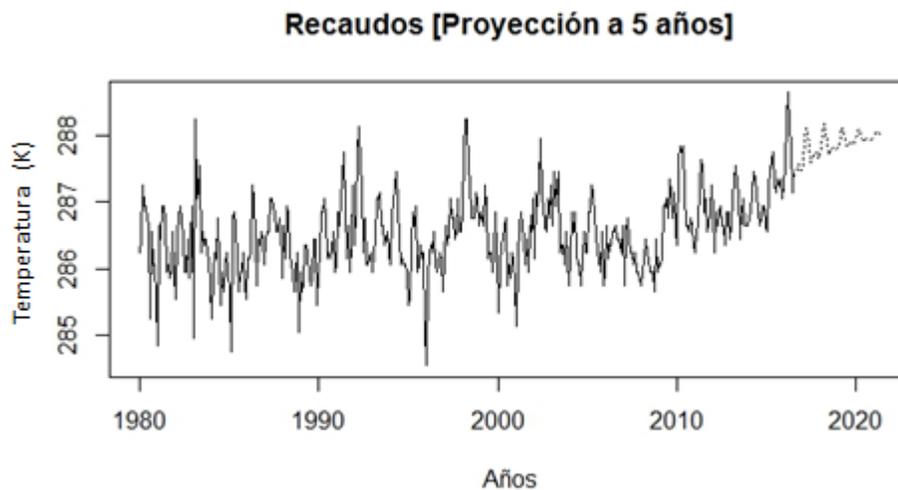
Gráfica 8. Distribución de la temperatura promediada por meses



Fuente: Departamento de estadística Fundación Universitaria los Libertadores

La grafica 8 muestra el comportamiento de la temperatura por año, teniendo en cuenta todos los datos de las temperaturas obtenidas en todos los años para cada mes se puede apreciar que el comportamiento anual de la temperatura tiende a ser de manera similar dependiendo del mes se puede apreciar que los picos más elevados de temperatura se dan sobre los meses de abril, mayo y junio siendo aproximadamente 287,3 K, por otro lado los picos de temperatura más bajos corresponden a los meses de enero y diciembre siendo aproximadamente 286,7 K, los otros meses restantes la temperatura tiende a mantenerse prácticamente constante o con variaciones prácticamente despreciables, por otro lado se puede apreciar la tendencia de temperatura máxima y mínima que ha alcanzado en cada mes y también la línea de tendencia que marca la temperatura media de cada mes.

Gráfica 9. Predicción de la temperatura en grados Kelvin para los próximos 5 años



Fuente: Departamento de estadística Fundación Universitaria los Libertadores

En la gráfica 9 se puede apreciar un aumento gradual de la temperatura, hacia el año 2020 que fue el estudio que se esperaba hacer para la búsqueda de las condiciones de frontera para el perfil aerodinámico, se pudo determinar en la predicción a cinco años que la temperatura aumento en un grado Kelvin, en ese orden de ideas la predicción que se realizó es consistente con la información obtenida del Banco Mundial y de la ONU que decía que en los próximos años más exactamente en la próxima década la temperatura global ira subiendo gradualmente hasta llegar a un grado, con este tipo de información se puede garantizar el éxito de la predicción, ya que se está teniendo en cuenta un factor y es que se está haciendo una comparación teórica con una práctica en la que los datos coinciden lo cual da seguridad que el modelo que utilizo si fue el apropiado

OBTENCIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA

✓ ECUACIONES AERODINÁMICAS

Mediante el modelo estadístico realizado anteriormente se pudieron determinar las condiciones de temperatura en una predicción de 5 años, con ayuda de esta temperatura y mediante el uso de las ecuaciones termodinámicas se pudieron determinar otras variables necesarias como el número de Mach, la velocidad del

sonido local y la densidad del fluido para el desarrollo de un perfil aerodinámico conocido como las condiciones de frontera, las condiciones de frontera básicamente son las características que va a tener el flujo en el cual este inmerso el cuerpo que se pretende estudiar, para este caso el perfil aerodinámico a trabajar.

De acuerdo a la predicción realizada estadísticamente y con ayuda de los datos obtenidos con la base meteorológica SKBO 802220 “El Dorado” se pudieron determinar las variables que influyen directamente en la aerodinámica del perfil, tales variables son las siguientes:

$$V_v = 23 \text{ Km/H} = 6,38 \text{ m/s}$$

$$\rho = 0,9091 \text{ Kg/m}^3$$

$$T = 288 \text{ K} = 14,85^\circ\text{C}$$

$$P = 75150 \text{ Pa}$$

$$\gamma = 1,4$$

$$R = 287 \text{ J/Kg} * \text{K}$$

Primero que todo fue necesario analizar la velocidad del sonido para las condiciones meteorológicas que se están empleando, para ello se hizo uso de la temperatura local registrada en la predicción meteorológica, se usó el coeficiente de dilatación adiabática estándar para el aire y la constante universal de los gases.

(e.c. 12)¹⁰²

$$a = \sqrt{\gamma * R * T}$$

$$a = \sqrt{1,4 * 287 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 288\text{K}} = 340,174 \text{ m/s}$$

Ya con la velocidad del sonido local se procede a hacer el análisis del número de Mach de la siguiente forma.

(e.c. 13)¹⁰³

¹⁰² Velocidad del sonido para condiciones locales ANDERSON, *Fundamentals of Aerodynamics, fifth edition 2007, Ed. McGraw*

$$Ma = \frac{V}{a}$$

$$Ma = \frac{6,38 \text{ m/s}}{340,174 \text{ m/s}} = 0,018$$

El número de Mach es una de las variables principales que se requieren para realizar la simulación.

Posteriormente también se procede a hacer el análisis de la densidad que es una variable importante para poder determinar el número de Reynolds.

(e.c. 14)¹⁰⁴

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{75150 \text{ Pa}}{287 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 288\text{K}} = 0,9091 \text{ Kg/m}^3$$

✓ DETERMINACION DEL REYNOLDS

Para el análisis de problemas en ingeniería aeronáutica una parte importante es la determinación del número de Reynolds que es el que nos determina cual es el régimen del fluido que se está utilizando teniendo en cuenta ciertas características y variables, vale la pena resaltar que el número de Reynolds no tiene los mismos parámetros en todo tipo de problemas matemáticos, ya que no es lo mismo que se esté trabajando sobre una superficie como un perfil aerodinámico o una superficie alar, a hablar del flujo en una tubería.

Para hacer este análisis lo primero que se necesita es saber que el régimen de un fluido dependiendo del número de Reynolds para superficies en aeronáutica se muestra de la siguiente manera:

El régimen del flujo es de vital importancia puesto que esto permite saber cómo será el comportamiento de las partículas de aire en la superficie.

Cuando se está hablando de un flujo laminar, el flujo laminar es básicamente cuando las partículas del fluido que están en circulación se mueven de una manera ordenada, estratificada y suave, se le llama laminar por que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entrecruzarse entre si, el fluido laminar se da cuando el número de Reynolds es menor a 500000, por otro lado se tiene el régimen de transición, se le dice de transición porque es el punto en el que el fluido cambia de régimen de laminar a régimen turbulento y se da cuando el

¹⁰³ Numero de Mach para condiciones locales. *Ibid.* P 102

¹⁰⁴ Densidad para condiciones locales. *Ibid.* P 102

número de Reynolds es igual a 500000, por otro lado también está el flujo de régimen turbulento que se da cuando el número de Reynolds es superior a 500000 en este punto las partículas del fluido circulan de manera desorganizada, generando vórtices y turbulencia al interior de este por lo cual se presenta un desprendimiento en la capa limite.¹⁰⁵

RE < 500000 flujo de régimen laminar

RE = 500000 Flujo de régimen de transición

RE > 500000 Flujo de régimen turbulento

Imagen. 15, Reynolds en los perfiles aerodinámicos

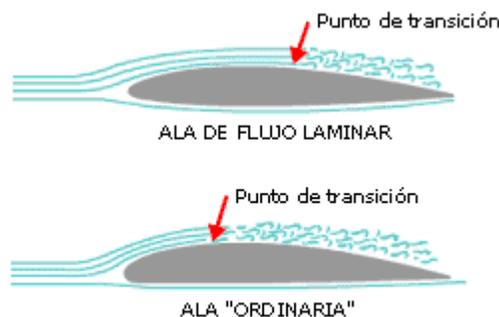


Fig.1.8.8 - Ala "ordinaria" y de flujo laminar.

Fuente: <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html>

Como se puede apreciar en la Imagen 15 En los perfiles aerodinámicos se pueden encontrar los tres regímenes de flujo en el mismo perfil, lo ideal es mantener el flujo laminar el mayor tiempo posible en el perfil, esto con el ánimo de que haya una mayor sustentación, al momento que hay desprendimiento de capa limite el flujo pasa a ser de laminar a turbulento y es allí donde se comienza a disminuir la sustentación y donde posteriormente se da la perdida, este proceso de desprendimiento de capa limite se da sobre todo en los extradós del perfil.

Para la obtención del número de Reynolds se tuvieron en cuenta las siguientes variables

La densidad del aire hallada anteriormente = $0,9091 \text{Kg}/\text{m}^3$

La velocidad del aire = 6,38 m/s

¹⁰⁵ FERNANDEZ PEÑA, Lucas, Universidad Carlos III, Madrid, España XFLR5 software de análisis de perfiles planos y aviones 25/julio/2016 tomado de http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15280/PFC_Lucas_Fernandez-Pena_Molla.pdf?sequence=1

Cuerda del perfil = 1 m

Para poder hacer un análisis de Reynolds óptimo que diera un régimen de flujo aceptable para la simulación se usó una cuerda del perfil de 1 metro ya que teniendo en cuenta dimensiones superiores el régimen tiende a ser turbulento.

Viscosidad dinámica del aire bajo los parámetros dados

Para el caso de la viscosidad dinámica del aire fue necesario acudir a la siguiente tabla:

Tabla 4 Tabla de viscosidades

884 APPENDIX 1							
TABLE A-15							
Properties of air at 1 atm pressure							
Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-5}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-5}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-4}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-4}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-4}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-4}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-4}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-4}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-4}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-4}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-4}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-4}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-4}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-4}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-4}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-4}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-4}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-4}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228

Fuente: YUNUS A. Cengel, Transferencia de Calor y masa un enfoque práctico, Tercera Edición. 2007 Ed. McGraw Hill

Como se puede apreciar en la tabla. Fue necesario hacer una interpolación para poder determinar la viscosidad dinámica esto debido a que se necesitaba hallar para una temperatura de 14,85°C que fue la temperatura hallada según las predicciones meteorológicas para lo cual se tomaron los siguientes valores

$$T_a = 10^\circ\text{C}$$

$$T_b = 15^\circ\text{C}$$

$$T_c = 14,85^\circ\text{C}$$

$$\mu_a = 1,778 \text{ e } -5 \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$$

$$\mu_b = 1,802 \text{ e } -5 \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$$

para el proceso de interpolación de la viscosidad dinámica para Tc se realizó la siguiente operación:

(e.c. 15)¹⁰⁶

$$\mu_c = \frac{-(-T_b - T_c) * (\mu_b - \mu_a)}{T_b - T_a} + \mu_b$$

$$\mu_c = \frac{-(-15 - 14,85)^\circ C * ((1,802e - 5) - (1,778e - 5) \frac{Kg}{m * s})}{(15 - 10)^\circ C} + (1,802e - 5) \frac{Kg}{m * s}$$

$$\mu_c = 1,80128e - 5 \frac{Kg}{m * s}$$

Posteriormente después de haber hallado la viscosidad dinámica para las condiciones requeridas y habiendo completado todas las variables necesarias se procedió a hacer el análisis del número de Reynolds.

(e.c. 16)¹⁰⁷

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu_c}$$

$$Re = \frac{0,9091 \frac{Kg}{m^3} * 6,38 \frac{m}{s} * 1m}{(1,80128e - 5) \frac{Kg}{m * s}} = 321996,46$$

$$Re = 321996,46$$

Con el análisis del número de Reynolds se pudo determinar que el régimen del flujo que se está utilizando para ciertas condiciones previamente propuestas y para el perfil que se espera trabajar es laminar, ya con el conocimiento del número

¹⁰⁶

Interpolacion

de

datos.

<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/sevipres/P4/01/ANEXOS01.php>

¹⁰⁷ Numero de Reynolds para condiciones locales ANDERSON, *Fundamentals of Aerodynamics, fifth edition 2007, Ed. McGraw*

de Reynolds quedan establecidas las condiciones de frontera para el perfil a trabajar.

CAPITULO II

PERFILES UTILIZADOS EN AEROGENERADORES

Para el diseño de un aerogenerador es de vital importancia el diseño del rotor, en él se encuentran contenidas las palas cuyo valor puede variar de acuerdo a las condiciones y de acuerdo a la necesidad para la que se emplee el generador, cada pala esta provista de un perfil aerodinámico que está diseñado de manera tal que pueda proveer la mayor cantidad de sustentación posible para así poder generar un torque, las palas suelen tener una geometría variada que puede ser básicamente en la longitud de la cuerda, teniendo así geometría de cuerda de raíz y geometría de cuerda de punta, o también puede tener un ángulo de twist a lo largo de toda la pala, de esta forma el ángulo de ataque de la cuerda de raíz es diferente al ángulo de ataque de la cuerda de punta, estas características son dadas por el diseñador o fabricante de manera que se cumpla el objetivo central del rotor.

El perfil aerodinámico que se seleccione es de vital importancia en el funcionamiento del rotor debido a que la influencia del perfil sobre el coeficiente de potencia se encuentra determinado por el rendimiento aerodinámico de los perfiles también conocido como L/D, este coeficiente integra las variables de sustentación y arrastre, lo que básicamente se pretende con el rendimiento aerodinámico es ver que tanto coeficiente de arrastre se produce frente a un coeficiente de sustentación.¹⁰⁸

Los generadores pueden ser clasificados de acuerdo a la función que estos desempeñen, estos pueden ser de altas o bajas velocidades, así mismo pueden variar en su número de palas e incluso en la posición de las palas frente al viento, pero un factor bastante determinante es el rendimiento aerodinámico que puedan tener ya que lo que se espera es que sea capaz de funcionar perfectamente incluso si las condiciones meteorológicas no son lo más favorables.

¹⁰⁸ CARANTOÑA, Alejandro, *análisis del comportamiento aerodinámico de perfiles empleados en aerogeneradores junio 2009 Venezuela, 30/mayo/2016* tomado de: <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/FGLONGATT-R-2009-12.pdf>

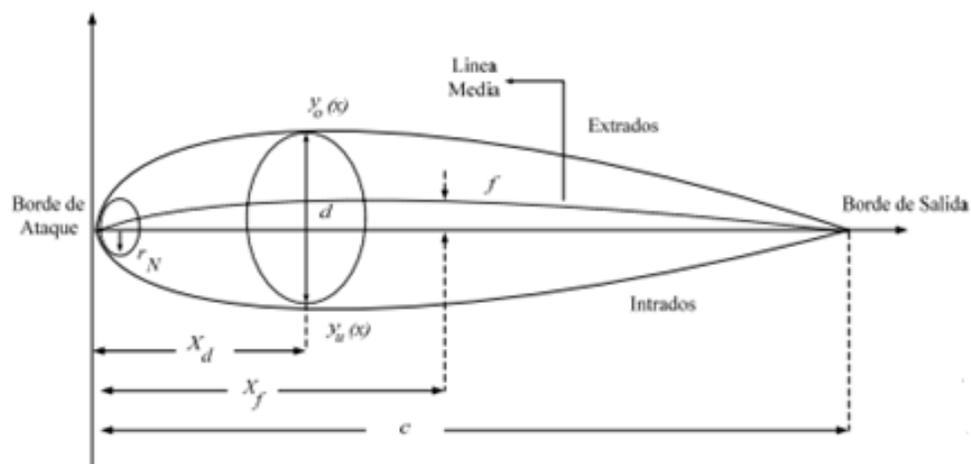
Para el estudio de los perfiles aerodinámicos usados en generadores eólicos valdría la pena conocer previamente la teoría básica de los perfiles, para ello es necesario conocer los conceptos básicos que son los siguientes:

- C: Cuerda es básicamente una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga, es una medida que hay que tener en cuenta en varios aspectos aerodinámicos usualmente las dimensiones de los perfiles están dados en términos de la cuerda.
- Línea de curvatura media: es la línea entre los intradós y los extradós
- Curvatura máxima: es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda
- Posición de la curvatura máxima x_f
- Espesor máximo x_d : Es la distancia máxima que hay entre intradós y extradós
- Borde de ataque: es la parte frontal del perfil en donde el flujo hace su primer contacto con el perfil.
- Borde de salida: Se encuentra en la parte de atrás del perfil es donde el flujo abandona el perfil.
- Extradós: Cara de presión
- Intradós: Cara de succión
- Radio del borde de ataque r_n

Cada una de estas componentes hace el perfil único, ya que la variación de cada una de estas le da al perfil características aerodinámicas únicas.

A continuación, la figura siguiente tiene las partes del perfil mostradas al detalle

Imagen. 16 Perfil aerodinámico



Fuente: <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/FGLONGATT-R-2009-12.pdf>

A continuación, se muestra la tabla 5 en la que se encuentran consignados los perfiles aerodinámicos comúnmente utilizados en aerogeneradores.

Tabla 5 perfiles aerodinámicos para aerogeneradores

Perfil	Grosor	Curva	Max C_l	Angulo para C_l Max	Máximo L/D	Angulo para L/D Max	Cl para el L/D Max
Avistar	14.5%	2.2%	0.686	5.0°	31.665	5.0°	0.686
BW-3	5%	5.8%	1.041	4.0°	47.122	4.0°	1.041
Clark Y	11.7%	3.4%	1.311	9.0°	52.519	6.0°	1.072
DH4009	8.9%	0.2%	0.356	2.0°	26.967	2.0°	0.356
E387	9.1%	3.8%	1.130	7.0°	55.864	5.5°	0.987
E174	8.9%	3.8%	1.133	7.0°	56.127	5.5°	0.989
E176	8.8%	3.3%	1.036	7.0°	52.433	5.0°	0.854
GOE 479	11.7%	3.7%	1.059	6.5°	44.434	4.5°	0.911
GOE 623	12%	3.9%	1.429	12.0°	43.3	4.5°	0.873
MH 106	13.1%	1.0%	0.845	10.5°	33.665	4.5°	0.523
MH 108	12%	1.1%	0.824	10.5°	37.55	5.5°	0.633
MH 110	10%	1.15%	0.588	6.0°	34.148	5.5°	0.564
S3025	9.4%	3.6%	1.235	8.0°	55.555	5.0°	0.981
S6063	7%	1.4%	0.573	4.0°	39.224	3.5°	0.520
S8036	16%	1.9%	1.294	12.5°	43.271	6.0°	0.863
S9037	9%	3.5%	1.142	8.5°	48.42	5.5°	0.902
SD7032	10%	3.7%	1.361	5.0°	53.926	5.0°	1.008
SD7037	9.2%	3.0%	1.254	9.5°	51.724	5.0°	0.938
SG6040	16%	2.5%	1.489	11.5°	52.772	5.5°	1.068
SG6041	10%	2.0%	1.169	8.5°	49.174	3.5°	0.704
SA7035	9.2%	2.6%	1.210	8.5°	42.088	5.5°	0.882
SA7038	9.2%	3.2%	1.258	9.0°	44.301	5.5°	0.979

Fuente: <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/FGLONGATT-R-2009-12.pdf>

Para poder hacer el rediseño del perfil aerodinámico se hizo una simulación y observación de los perfiles mencionados anteriormente, esto con el fin de saber cuál es el perfil que mejor se comporta ante las condiciones de frontera que se tienen previamente seleccionadas, con ayuda del programa XFLR5 se realizó la simulación con sus respectivas graficas de análisis y de esta manera se pudo determinar la eficiencia de los perfiles ante las características dadas, para ello las características principales a tener en cuenta fueron:

- El valor de Cl/Cd , de esta manera se permite conocer la eficiencia del perfil, a su vez esto permite que el coeficiente de potencia aumente y en el diseño del rotor disminuye su radio.
- El valor de Cl/Cd Vs el ángulo de ataque esto en cierta forma permite saber cuál es el mayor ángulo en el cual el perfil es eficiente para el diseño del rotor esta información es de vital importancia puesto que así se puede determinar a qué ángulo de twist aerodinámico puede llegar la pala del rotor.

- Cl vs ángulo de ataque puesto que esta información permite conocer en que ángulo el perfil entra en pérdida, sería un buen parámetro de diseño para las palas del rotor.

CAPITULO III

SELECCIÓN DE PERFILES SEGÚN GRAFICAS DE XFLR5

Para poder hacer una selección preliminar de los perfiles aerodinámicos, lo primero que se hizo fue hacer una simulación con ayuda del programa XFLR5 que permitieran determinar cuál es el comportamiento de cada perfil ante las condiciones de frontera previamente establecidas, las condiciones que el programa solicita fueron halladas mediante el modelo estadístico realizado anteriormente, con la determinación de la velocidad del viento y la temperatura del aire fue posible determinar el número de Reynolds, dichas variables son las siguientes:

$$Re = 321996,46$$

$$Ma = 0,018$$

$$T = 288 \text{ K}$$

Por otro lado, se hizo un análisis de variación de ángulos de ataque entre -5° como ángulo mínimo y 50° como ángulo máximo, con el fin de tener una observación bastante amplia de los rangos de análisis, además por cada uno de los ángulos el software se encarga de hacer un análisis para un gran total de 55 ángulos trabajados.

Para cada uno de los ángulos se realizó una configuración de 100 iteraciones con el fin de que las gráficas obtenidas tengan un grado de confiabilidad elevado dando como resultado 5500 iteraciones en total, para hacer el análisis y las condiciones previas de trabajo de cada uno de los perfiles la configuración quedo de la siguiente manera.

Imagen. 17 Configuración condiciones de frontera en XFLR5



Fuente: Autores

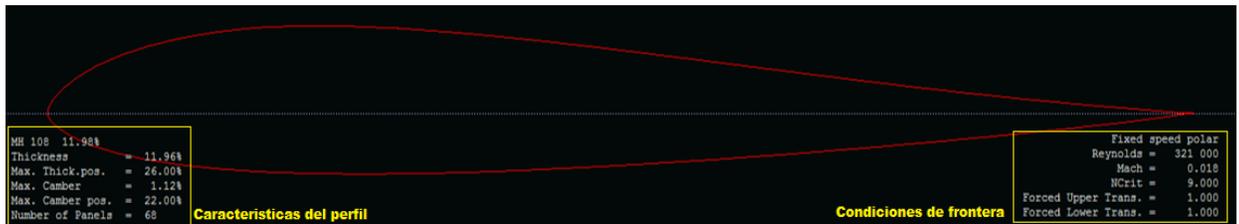
Después de adecuar las condiciones de frontera se procedió a hacer las respectivas simulaciones para lo cual se obtuvieron como resultado las gráficas para cada uno de los perfiles, el datasheet que son las coordenadas de diseño de estos perfiles, se encuentra en la base de datos de la universidad de Illinois¹⁰⁹ esta información puede encontrarse en los anexos del proyecto, de esta forma fue posible determinar la eficiencia de los perfiles, este análisis puede verse reflejado en los anexos del proyecto.

Vale la pena aclarar que no todos los perfiles mencionados en la tabla pudieron ser trabajados puesto que algunos de estos tenían errores en el datasheet, estos perfiles fueron: GOE 479, GOE 623, AVISTAR, BW3, y CLARKY.

¹⁰⁹ UNIVERSIDAD DE ILLINOIS. Perfiles aerodinámicos. 11/febrero/2016. Disponible en: <http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html>

De acuerdo a las gráficas obtenidas, el perfil que tuvo mejor comportamiento ante las condiciones de frontera dadas anteriormente fue el MH108 estos datos se pueden evidenciar a continuación:

Imagen. 18 características del perfil MH108



Fuente: Autores

En la imagen 18 se puede apreciar el perfil aerodinámico seleccionado con sus respectivas características, además de apreciar las características de frontera que se estudiaron posteriormente equivalentes a un número de Reynolds de 321000 lo cual sugiere que el flujo que se está manejando es de régimen incompresible, también se tiene un número de Mach de 0,018.

Por otra parte, para la simulación fue necesario determinar el valor que se le iba a dar al Ncrit, este valor básicamente imita el nivel de perturbación deseado al cual se puede encontrar sometido el perfil, de acuerdo a la siguiente tabla fue posible determinar el valor, dicho valor fue de 9 haciendo la simulación de un túnel de viento promedio ya que el análisis no está destinado a hacer parte de la superficie alar de una aeronave sino que se le debe dar otra clase de tratamiento ya que la aerodinámica utilizada para el análisis de generadores es de tipo rotacional, por ello es mejor usar un modelo experimental estándar.

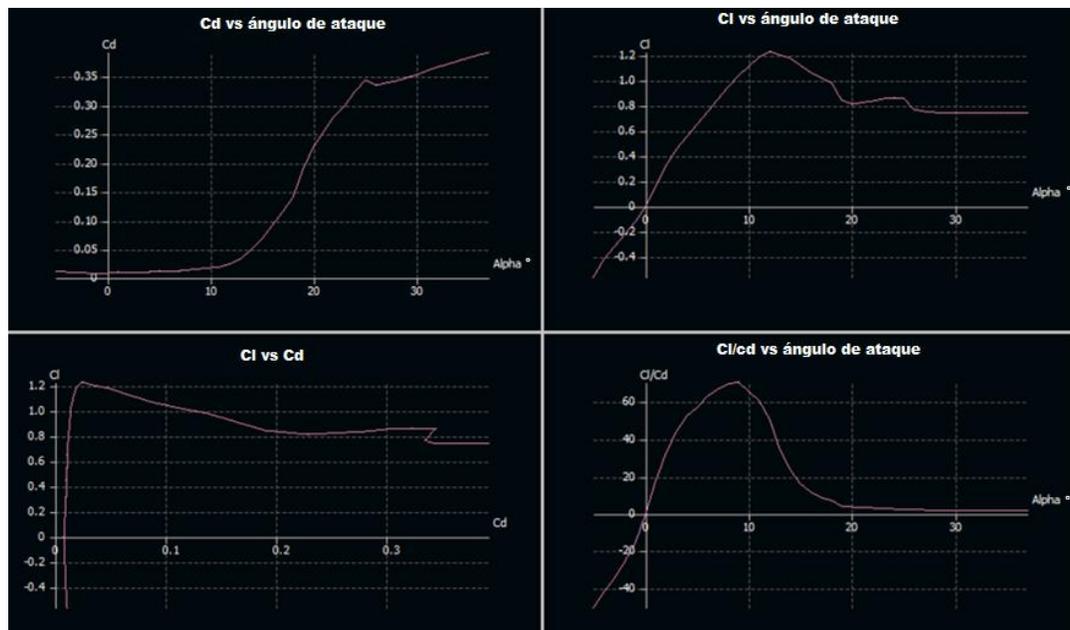
Tabla 6 Selección del Ncrit

AERONAVES	
Sailplane	12-14
Motorglider	11-13
Clean wind tunnel	10-12
Average wind tunnel	9
Dirty wind tunnel	4 - 8
BUQUES, TIMONES, HIDROALAS, ETC.	
Perfil sumergido en aguas naturales durante mucho tiempo	1
Perfil que está en agua limpia, experiencias hidrodinámicas, etc.	3

<http://www.enavales.com/index>.

También se puede observar las características de diseño del perfil, el espesor del perfil es de 11,96 por ciento el tamaño de la cuerda, la posición de máximo espesor del perfil está ubicado al 26 por ciento de la cuerda desde el borde de ataque, la línea de curvatura media es de 1,12 por ciento respecto a la cuerda, y la ubicación de esta línea de curvatura media es al 22 por ciento de la cuerda desde el borde de ataque, para el análisis y según el código coordenado del perfil (datasheet), el cual es un código con puntos en el plano cartesiano X y Y que permite conocer la ubicación de cada uno de estos puntos a fin de formar una geometría mediante la unión de estos, está seccionado en 68 partes a lo largo de toda su geometría.

Gráfica 10. análisis de coeficientes del perfil MH108



Fuente: Autores

De acuerdo al análisis y a las simulaciones hechas con las condiciones de frontera previamente establecidas para las necesidades mencionadas en el presente

proyecto, “condiciones meteorológicas en la sabana de Bogotá” se pudo establecer mediante un análisis comparativo que el perfil que tuvo un mejor comportamiento ante dichas condiciones de frontera fue el perfil MH108 cuyos resultados se muestran en la gráfica 10 las gráficas de los otros perfiles que dieron paso a la comparación se encuentran en los (anexos 1) del presente documento.

Este análisis fue realizado con los mismos parámetros de condiciones de frontera a los 17 perfiles preseleccionados para uso en aerogeneradores, para estos perfiles se tomaron los mismos datos y se llegó a las mismas gráficas, de aquí se realizó una comparación de cada una de las gráficas a fin de definir cuál fue el perfil que mejor se comportó ante dichas condiciones este análisis puede encontrarse en (anexos 1).

Análisis de graficas de coeficientes

El análisis que se realizó básicamente fue teniendo en cuenta cada una de las diferentes graficas de coeficientes con su respectivo ángulo de ataque y se hizo de la siguiente manera:

Gráfica de coeficiente de sustentación (que es una variable adimensional) Vs Angulo de ataque, esta gráfica permite saber cuál es el punto máximo hasta llegar a la perdida, es decir, para cada ángulo de ataque tomado corresponde un coeficiente de sustentación, sin embargo para cada perfil aerodinámico hay un pico máximo de sustentación, después de este pico la sustentación empieza a caer y a comportarse de diferentes maneras a medida que sigue aumentando el ángulo de ataque, este ángulo se conoce como ángulo de perdida, y es en este punto en donde el perfil llega a su punto de sustentación máxima para finalmente dejar de sustentar, se podría decir que este es el ángulo de trabajo máximo del perfil.

Para el caso del perfil MH108 el ángulo al que entra en pérdida y comienza a bajar la sustentación es 12 grados con un pico de sustentación máxima de 1,22 aproximadamente, así como se muestra a continuación:

Gráfica 11. C_i vs α XFLR5

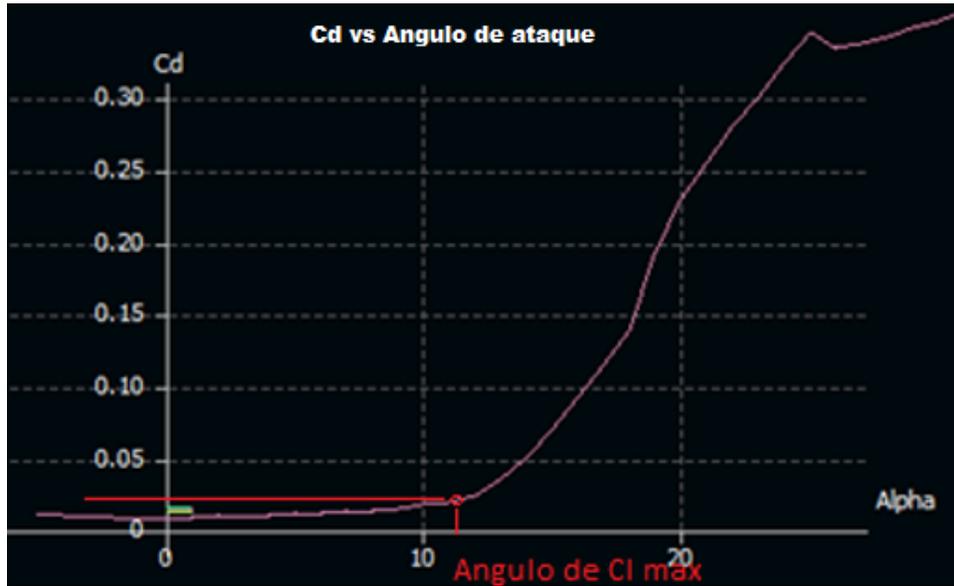


Fuente: Autores

Gráfica de coeficiente de arrastre (variable adimensional) Vs ángulo de ataque, todos los perfiles aerodinámicos no solo describen una sustentación con respecto al ángulo de ataque que este tenga, sino que también describen un arrastre que es básicamente la resistencia que el cuerpo opone ante el fluido en el cual está inmerso, hay que tener en cuenta que a medida que el coeficiente de sustentación aumenta el de arrastre también lo hace pero lo que se busca es que el coeficiente de arrastre no sea tan significativo para cada punto de sustentación del perfil.

Para el perfil MH108 para el caso de los 12 grados de ángulo de ataque que es en donde se encuentra el coeficiente de sustentación máximo hay un coeficiente de arrastre de aproximadamente 0,0246, también se puede apreciar que a medida que el ángulo de ataque aumenta el coeficiente de arrastre también lo hace de manera prácticamente exponencial, la gráfica 11 se puede ver a continuación.

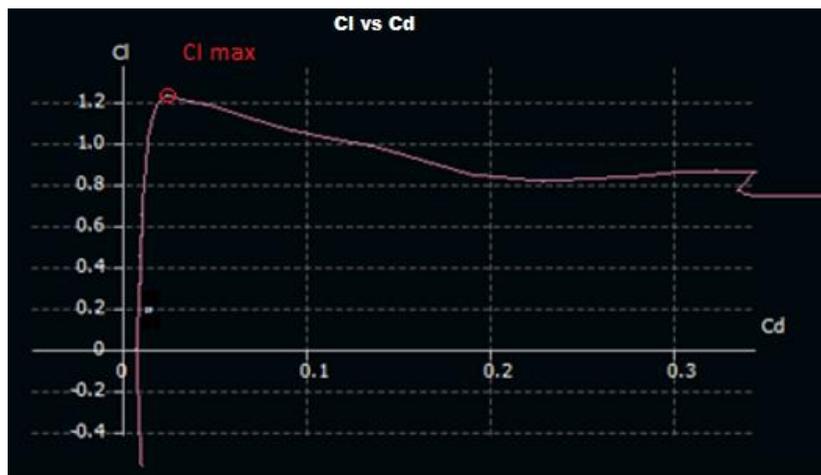
Gráfica 12. Cd vs α XFLR5



Fuente: Autores

Gráfica de coeficiente de sustentación Vs coeficiente de arrastre, se puede apreciar el comportamiento del coeficiente de sustentación con respecto al coeficiente de arrastre, aclarando que el C_l máximo mostrado en la gráfica el cual es aproximadamente 1,22 y que coincide con 12 grados de ángulo de ataque tiene un crecimiento tenue para el coeficiente de arrastre, ya después del punto de C_l Max se puede apreciar un crecimiento progresivo en el C_d , este fenómeno se puede apreciar y analizar a continuación.

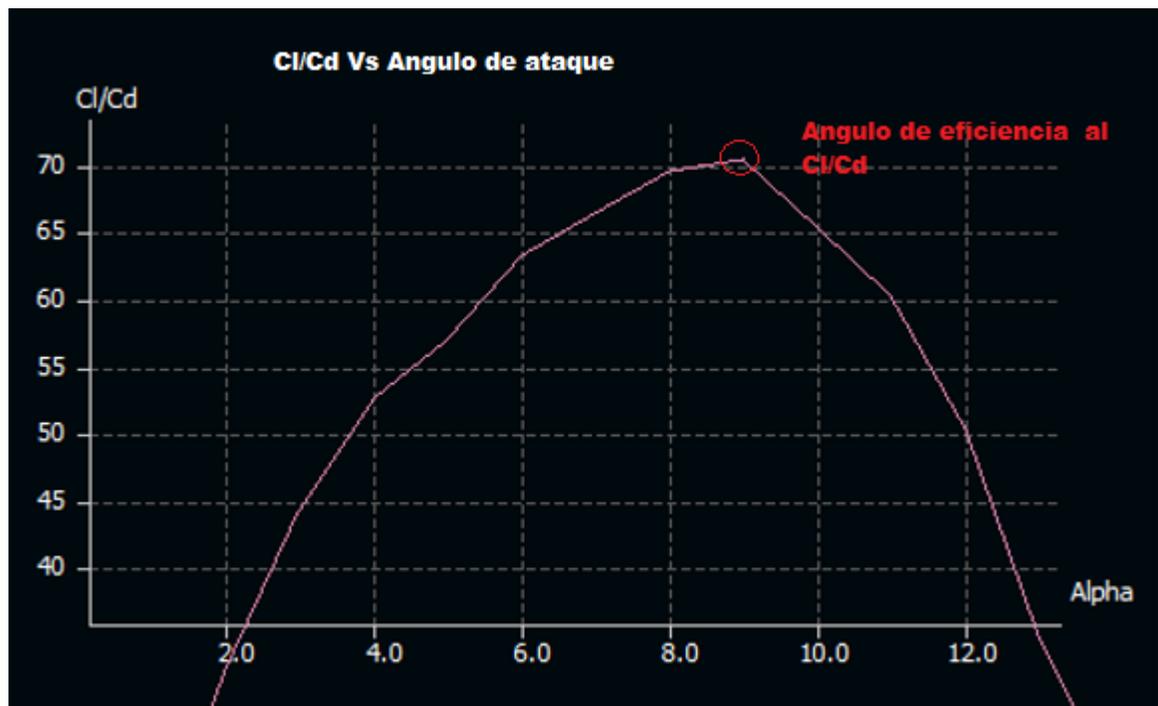
Gráfica 13. C_l vs C_d XFLR5



Fuente: Autores

La gráfica mostrada a continuación es la que tiene mayor relevancia en la selección del perfil ya que en ella se puede apreciar cual es el punto en el cual se da la mayor cantidad de sustentación con la menor cantidad de arrastre de esta forma es posible determinar qué tan eficiente es el perfil que se está utilizando y cuál es su ángulo de ataque máximo de trabajo en el cual va a trabajar con buenos resultados sin disminuir su eficiencia por efectos de desprendimiento de capa límite y de excesivo arrastre.

Gráfica 14. C_l/C_d XFLR5



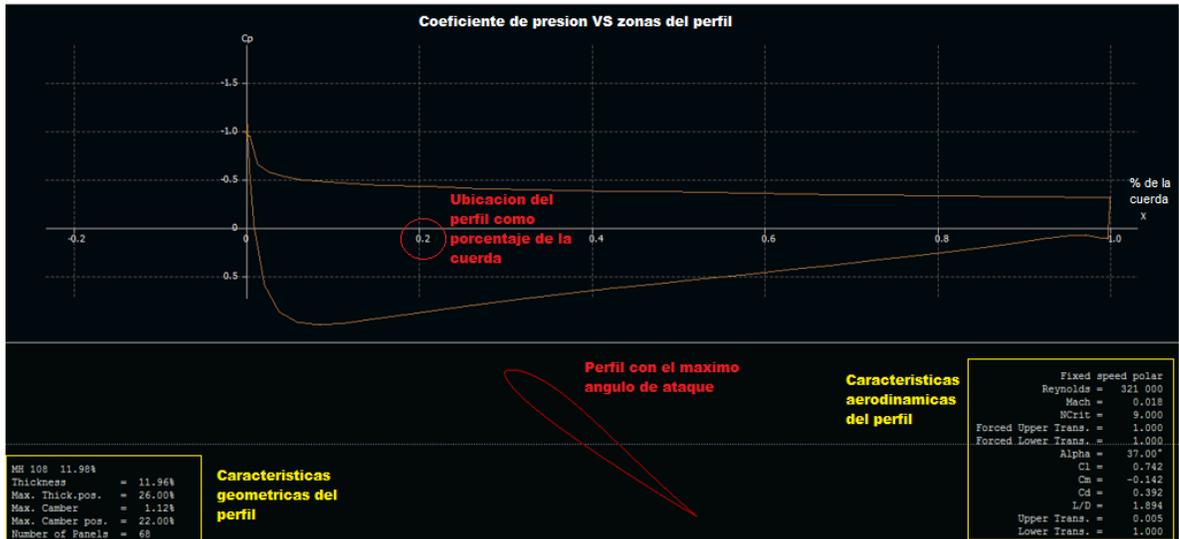
Fuente: Autores

De esta forma se realizó la simulación y análisis de cada uno de los perfiles seleccionados en la tabla 5 cuyo análisis se encuentra en los anexos del presente documento, para su posterior selección lo cual dio como resultado saber que el perfil que mejor se comporta ante las condiciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá es el MH 108 así como se mencionó anteriormente.

La siguiente gráfica muestra como es el comportamiento del coeficiente de presiones a lo largo de las secciones del perfil, se puede apreciar que en puntos cercanos al borde de ataque los coeficientes de presiones empiezan a caer tanto para los intradós como para los extradós en aproximadamente el 9 por ciento de la cuerda en donde alcanza su punto mínimo, ya después de estos puntos el

coeficiente de presiones empieza a aumentar progresivamente para las otras secciones del perfil, finalmente esta gráfica muestra una geometría que representa la sustentación del perfil mediante el comportamiento de las presiones en todos puntos del mismo.

Gráfica 15. Coeficiente de Presiones



Fuente: Autores

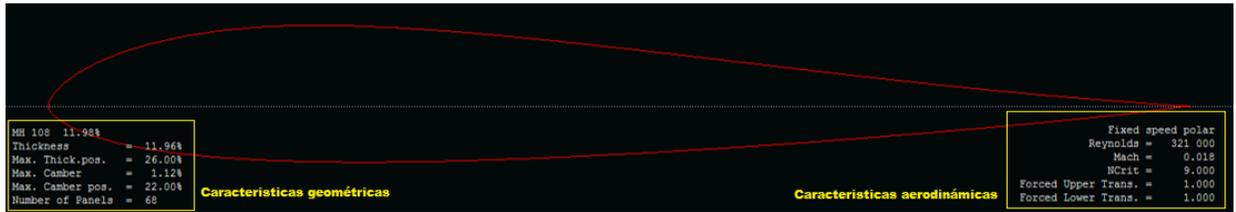
CAPITULO IV

REDISEÑO Y COMPARACION DE LOS PERFILES AERODINAMICOS

Después de obtener el perfil aerodinámico MH108 como perfil más óptimo para ser usado en las condiciones meteorológicas de la sabana de Bogotá se procedió a hacer el rediseño del mismo, mediante la variación de las coordenadas obtenidas en el datasheet de este, se hicieron diferentes variaciones para lo cual cada una tuvo su respectiva simulación y análisis, para de esta manera poder determinar cuál es el perfil que finalmente cumple con las características de diseño para la necesidad que se ha planteado con anterioridad.

De esta forma mediante la comparación de las gráficas obtenidas para cada uno de los diferentes rediseños poder determinar qué perfil será el definitivo para el uso en el aerogenerador flotante

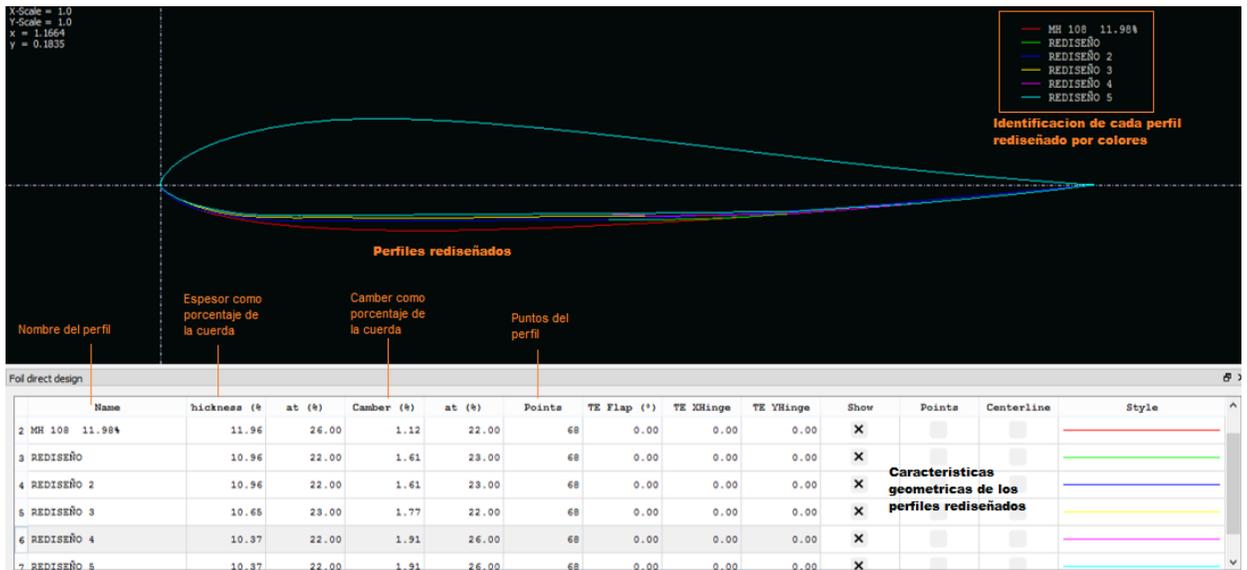
Imagen. 19 Perfil original MH108



Fuente: Autores

Mediante el diseño original se procedió a hacer las alteraciones pertinentes a las coordenadas de diseño y construcción del perfil en cuestión después de hacer cada rediseño fue necesario hacer la simulación para cada uno para de esta manera poder conocer si las características de coeficientes del perfil cambiaban y así mismo poder determinar si mejoraban o por el contrario empeoraban, básicamente los rediseños más relevantes y que dieron cambios satisfactorios fueron los rediseños 1, 2, 3, 4 y 5 que se encuentran en los anexos del presente documento con su respectivo código de coordenadas (datasheet), el cual es un código con puntos en el plano cartesiano X y Y que permite conocer la ubicación de cada uno de estos puntos a fin de formar una geometría mediante la unión de estos, en este caso el perfil aerodinámico, a continuación se muestran las alteraciones y los perfiles que fueron producto del rediseño con sus respectivas características geométricas.

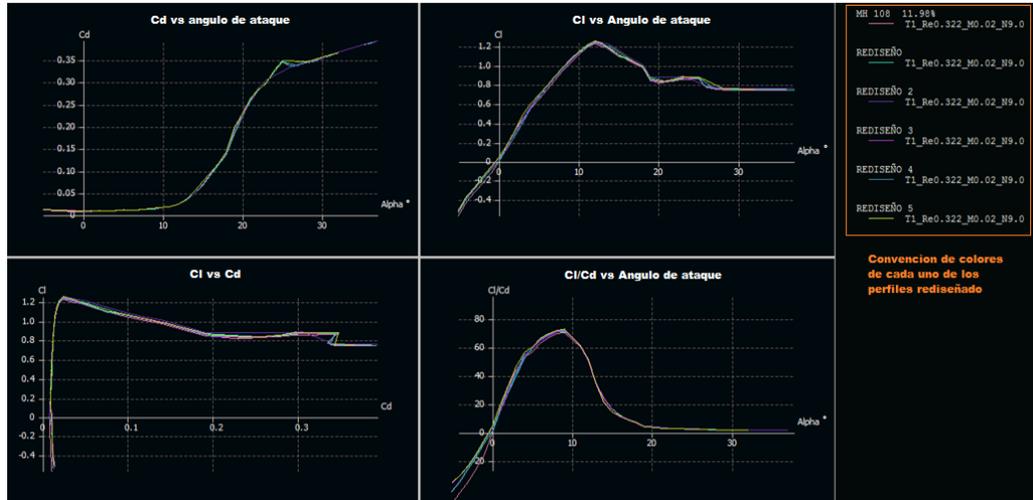
Imagen. 20 Rediseño y alteración del perfil original



Fuente: Autores

Sin embargo, al hacer las simulaciones pertinentes se obtuvieron las siguientes graficas que permitieron hacer la selección de un perfil definitivo.

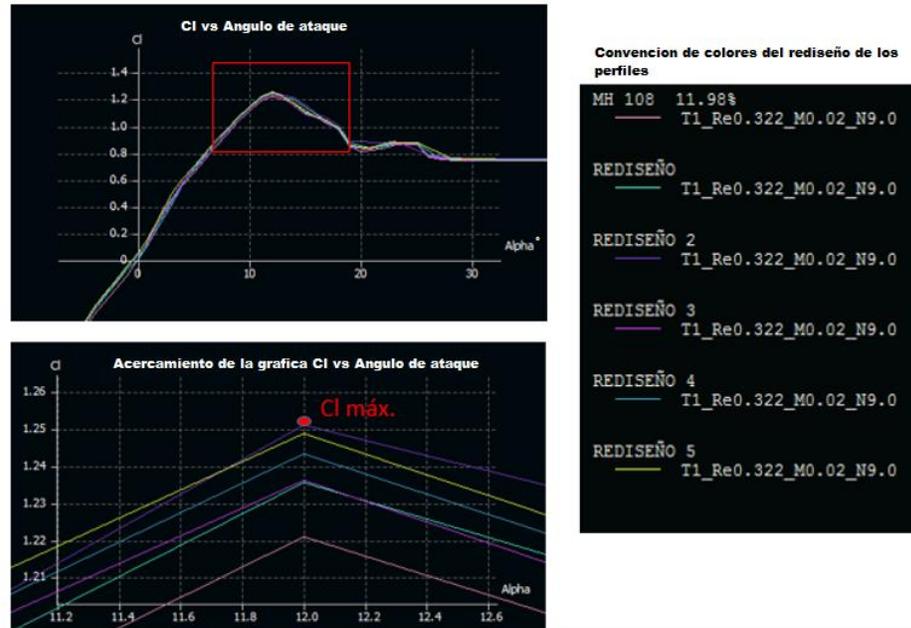
Gráfica 16 coeficientes de los perfiles rediseñados



Fuente: Autores

Primero se obtiene la gráfica del coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque en comparación con las otras gráficas para poder determinar cómo alteró el diseño el comportamiento del perfil original en cuanto a lo que sustentación se refiere, para ello se realizó el análisis de la siguiente gráfica para lo que se obtuvieron los siguientes resultados:

Gráfica 17 Cl vs α rediseños

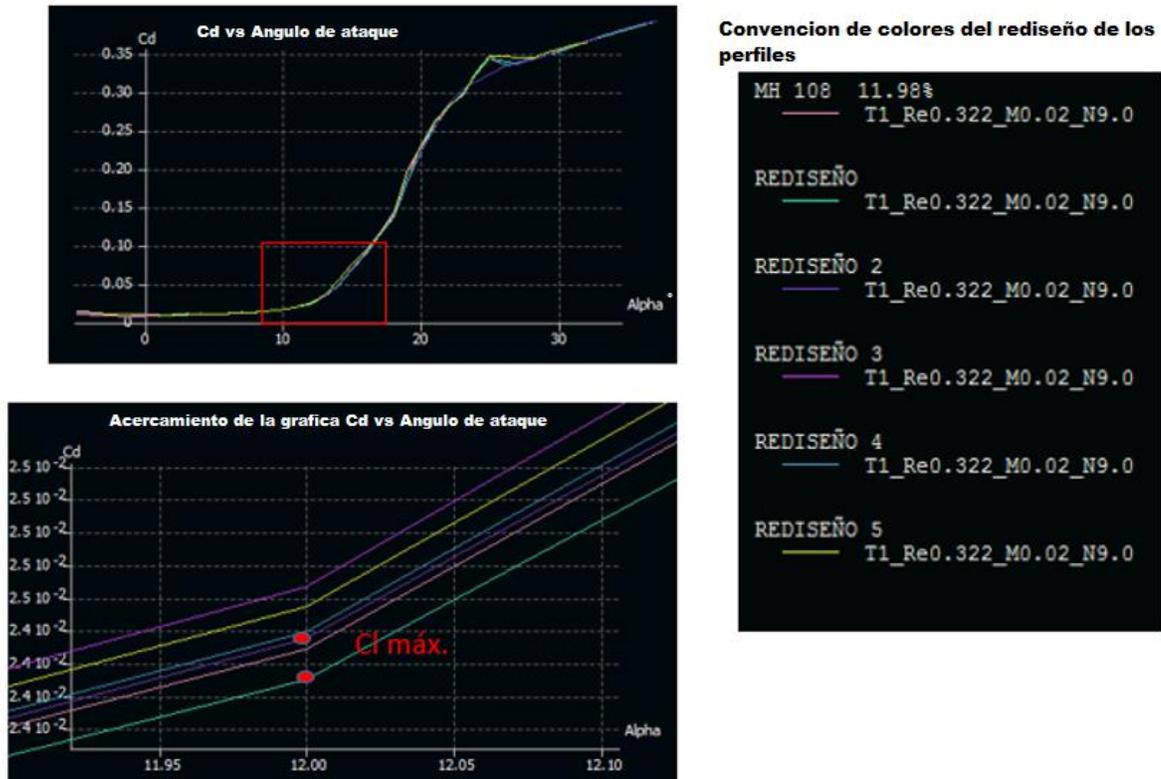


Fuente: Autores

La gráfica 17 muestra como fue el aumento del coeficiente de sustentación para cada uno de los rediseños empleados con respecto al perfil original para lo cual se pudo determinar que el perfil que más coeficiente de sustentación tuvo a 12 grados de ángulo de ataque fue el rediseño 2, aunque no hubo disminución o aumento del ángulo de ataque si hubo un aumento significativo en el C_l máx, el valor de C_l máx obtenido fue de aproximadamente 1,251, para ello se puede decir que hubo una mejora frente al perfil original.

Posteriormente se obtiene la gráfica de coeficiente de arrastre vs α haciendo una comparación entre el perfil original y los perfiles rediseñados, de esta forma se puede observar el comportamiento del coeficiente de arrastre para cada uno, a continuación, se muestra la gráfica en la que se realizó el análisis.

Gráfica 18 Cd vs α rediseños



Fuente: Autores

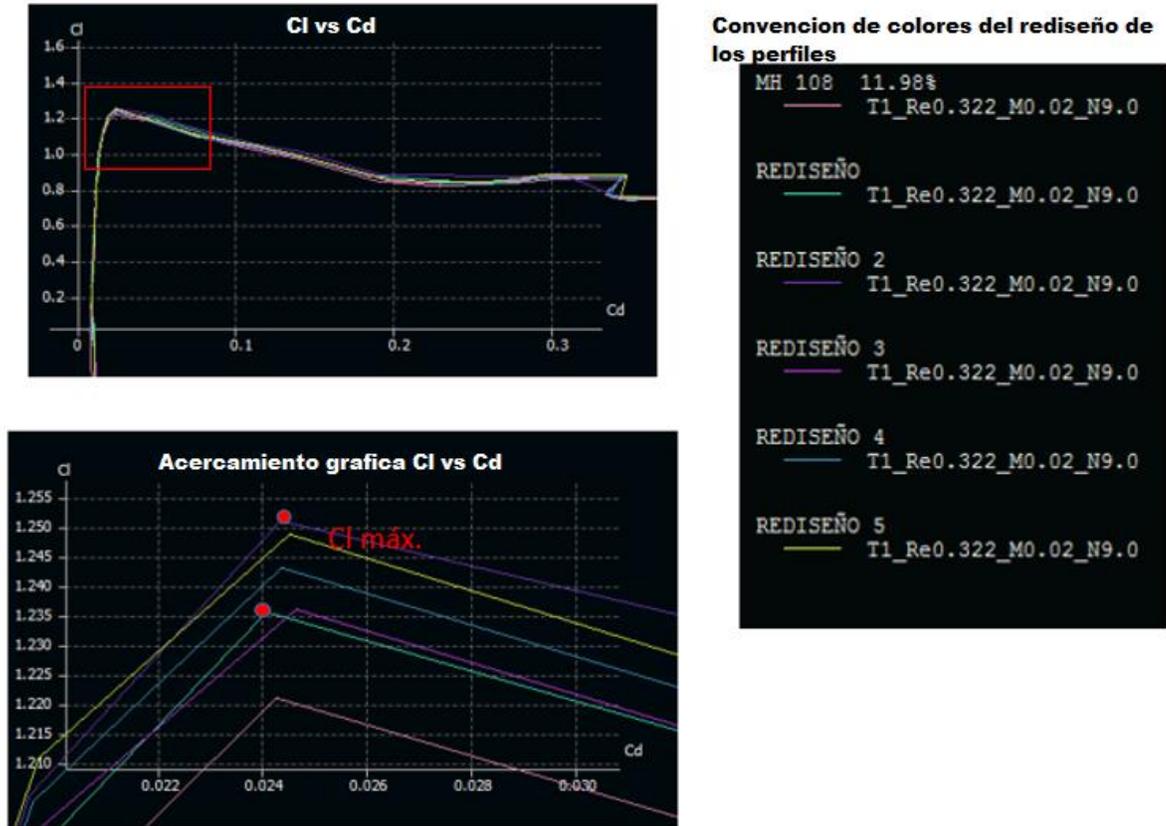
La gráfica 18 muestra el comportamiento del Cd para cada uno de los perfiles implementados teniendo como referencia los 12 grados de ángulo de ataque que es donde se tuvo el Cl máx., se pudo analizar que hubo un aumento para el rediseño 2 que no fue muy significativo ya que fue de aproximadamente de 0,0248, por otro lado el rediseño 1 tuvo una disminución de coeficiente de arrastre siendo este aproximadamente 0,0243, se puede establecer que con respecto al perfil original hubo un aumento de Cd para el rediseño 2 y una disminución de Cd para el rediseño 1 aunque no fue muy significativo.

De acuerdo a los análisis de las gráficas anteriores se puede establecer que los perfiles que son candidatos para la selección del perfil definitivo son el rediseño 2 y el rediseño 1, debido a sus características aerodinámicas frente al flujo trabajado.

A continuación, se muestra la gráfica de Cl vs Cd (coeficiente de sustentación vs coeficiente de arrastre) en esta gráfica es posible saber que tanto coeficiente de arrastre se da para cada coeficiente de sustentación para cada uno de los perfiles aerodinámicos, más puntualmente el análisis se hizo para el rediseño 2 y el

rediseño 1 ya que fueron los que presentaron las mejores características aerodinámicas mostradas anteriormente.

Gráfica 19. Cl vs Cd rediseños

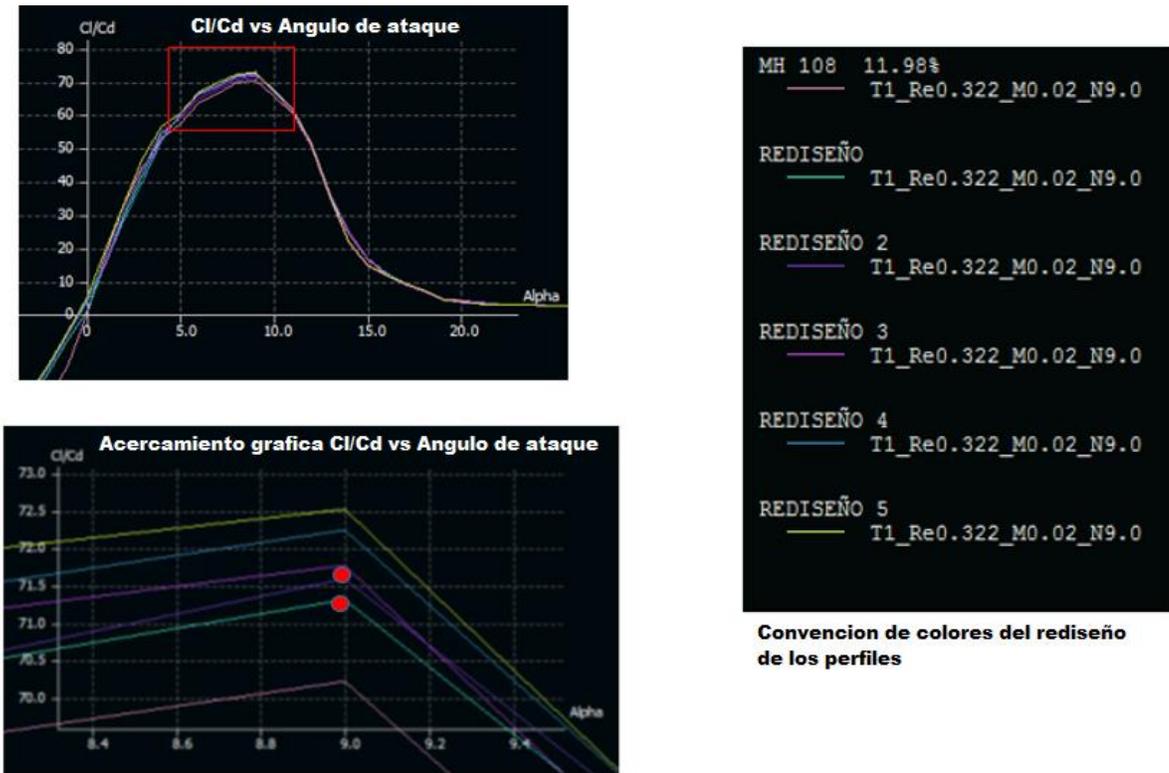


Fuente: Autores

La grafica 19 muestra el comportamiento del Cl frente al Cd, los perfiles analizados fueron el rediseño 2 y el rediseño 1 se puede apreciar claramente que aunque los dos presentan relativamente un mismo coeficiente de arrastre siendo este de 0,0248 y 0,0243 respectivamente, si hay una variación de coeficiente de sustentación bastante significativo, claramente se puede ver que frente al perfil original si hay un mejoramiento significativo en las características aerodinámicas en los perfiles rediseñados.

Por último, se obtiene la gráfica Cl/Cd vs α , en esta gráfica se puede observar la eficiencia del perfil para cada ángulo de ataque, esta gráfica es definitiva puesto que en ella se puede apreciar el mayor CL para un menor Cd posible y saber hasta que ángulo de ataque es eficiente este perfil.

Gráfica 20. CI/Cd vs ángulo rediseños



Fuente: Autores

La grafica 20 muestra el comportamiento y la eficiencia de cada uno de los perfiles rediseñados sin embargo se observa que frente al perfil original todos los perfiles rediseñados son más eficientes, sin embargo, hay que establecer todas las características y variables de los perfiles para poder tomar una decisión acertada en el momento de la selección del perfil, sin embargo teniendo en cuenta las características no solo de eficiencia sino también de CI y Cd los perfiles que han sido seleccionados para la selección final son el rediseño 2 y el rediseño 1.

Para el rediseño 2 el CI/Cd fue de 71,6 aproximadamente y para el rediseño 1 fue de 71,32 aproximadamente, mientras que para el perfil original fue de 70,2 aproximadamente, por otro lado, se puede apreciar que el ángulo máximo de ataque al cual el perfil es eficiente tanto para el rediseño 2 como para el rediseño 1 es de 9 grados, de esta manera se muestra la mejora en el diseño para las condiciones meteorológicas planteadas al principio del presente documento frente a un perfil ya existente.

Selección del perfil definitivo

Ya después de haber realizado todo el análisis de las gráficas comparando las características aerodinámicas de los perfiles rediseñados frente al original se pudo obtener la siguiente tabla de datos con la cual se hizo una comparación de datos para la selección del perfil definitivo.

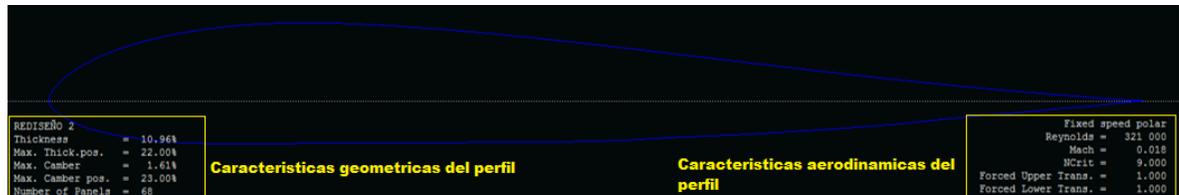
Tabla 7 coeficientes de los perfiles usados

Perfil	Cl máx.	α para Cl máx.	Cd en Cl máx.	Cl/Cd	Cl/Cd vs α
MH108	1,22	12	0,0246	70,2	70,2-9
Rediseño 1	1,235	12	0,0243	71,3	71,3-9
Rediseño 2	1,251	12	0,0248	71,6	71,6-9
Rediseño 3	1,236	12	0,0254	71,8	71,7-9
Rediseño 4	1,243	12	0,0249	72,3	72,3-9
Rediseño 5	1,2485	12	0,025	72,5	72,5-9

Fuente: Autores

De acuerdo a la tabla 7 se llegó a la conclusión que el perfil que mejor se comporta para las condiciones meteorológicas de la Sabana de Bogotá es el rediseño 2 debido a que tiene mejores características aerodinámicas frente a los otros, tuvo el coeficiente de sustentación más alto y un coeficiente de arrastre más bajo frente a los otros perfiles cuyos coeficientes de sustentación no eran tan altos y en cambio si presentan un alto coeficiente de arrastre, debido a las condiciones de las velocidades de vientos en el área de estudio lo que se requiere es un perfil que sea capaz de tener altos Cl pero que no tengan un Cd demasiado alto y se puede apreciar que también ante el perfil original tuvo un aumento en la eficiencia, por lo tanto es el perfil que se ha escogido para el uso en el aerogenerador flotante.

Imagen. 21 Rediseño número 2 perfil seleccionado



Fuente: Autores

Las características del perfil seleccionado son las siguientes: el espesor del perfil es de 10,96 por ciento el tamaño de la cuerda, la posición de máximo espesor del perfil está ubicado al 22 por ciento de la cuerda desde el borde de ataque, la línea de curvatura media es de 1,61 por ciento respecto a la cuerda, y la ubicación de esta línea de curvatura media es al 23 por ciento de la cuerda desde el borde de ataque, este está seccionado en 68 partes a lo largo de toda su geometría, las coordenadas de diseño del perfil se encuentran a continuación:

Tabla 8 Datasheet perfil rediseño 2

Rediseño 2		0.18281	0.06933	0.14920	-0.03900
x coordenada	Y coordenada	0.14799	0.06584	0.18710	-0.03900
1	0.00000	0.11636	0.06076	0.22849	-0.03870
0.99643	0.00010	0.08817	0.05435	0.27297	-0.03870
0.98604	0.00067	0.06366	0.04682	0.32010	-0.03840
0.96948	0.00192	0.04296	0.03836	0.36940	-0.03800
0.94720	0.00366	0.02618	0.02925	0.42037	-0.03770
0.91936	0.00580	0.01339	0.01987	0.47246	-0.03730
0.88624	0.00850	0.00471	0.01069	0.52506	-0.03600
0.84838	0.01190	0.00214	0.00668	0.57751	-0.03300
0.80639	0.01600	0.00097	0.00421	0.62924	-0.03100
0.76089	0.02079	0.00024	0.00190	0.67967	-0.02800
0.71259	0.02616	0.00002	0.00046	0.72822	-0.02500
0.66217	0.03201	0.00006	-0.00086	0.77431	-0.02140
0.61035	0.03816	0.00044	-0.00214	0.81740	-0.01700
0.55780	0.04439	0.00112	-0.00347	0.85697	-0.01300
0.50520	0.05050	0.00260	-0.00555	0.89253	-0.01031
0.45319	0.05623	0.00455	-0.00768	0.92363	-0.00714
0.40235	0.06133	0.00918	-0.01163	0.94985	-0.00526
0.35322	0.06557	0.02136	-0.01892	0.97091	-0.00300
0.30629	0.06871	0.03812	-0.02579	0.98661	-0.00130
0.26199	0.07055	0.05940	-0.03080	0.99655	-0.00020
0.22076	0.07088	0.08512	-0.03500	1	0.00000
		0.11512	-0.03780		

Fuente: Autores

CAPITULO V

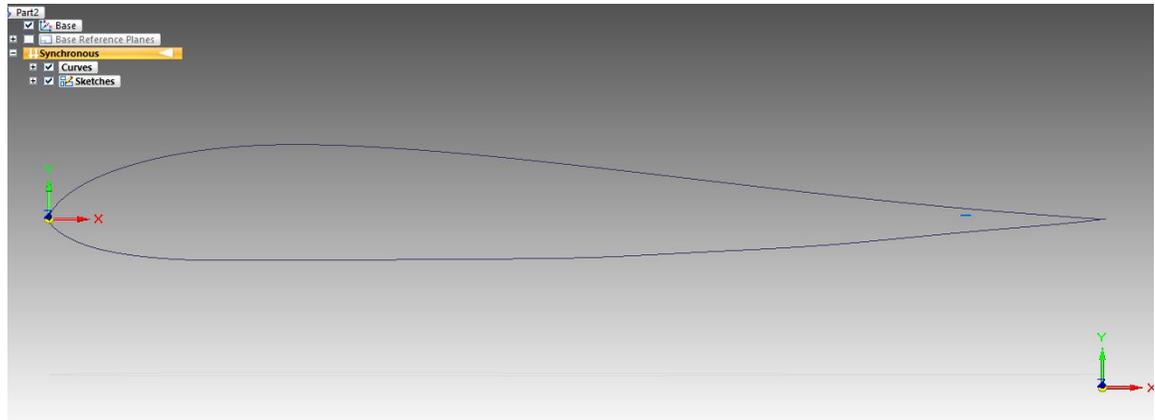
SIMULACION DEL PERFIL REDISEÑADO EN ANSYS FLUENT

Una vez habiendo obtenido el perfil se realizó una simulación 3D del perfil ya como una superficie para poder determinar cómo es el comportamiento del flujo en el perfil, vale la pena aclarar que dicha simulación se hace solo con fines informativos para apoyar la teoría propuesta en la simulación anterior que fue realizada en 2D de esta manera se puede observar como son los vectores de velocidades y las dispersión de presiones para el perfil en cuestión, ya para hacer

el análisis de la construcción de las palas del rotor del generador se tiene que hacer otro tipo de análisis teniendo en cuenta la teoría de aerodinámica rotacional.

Una vez teniendo el perfil previamente seleccionado y conociendo sus coordenadas de diseño y construcción se procedió a hacer el diseño en el software solid edge con el ánimo de importar después la geometría al programa de simulación ansys.

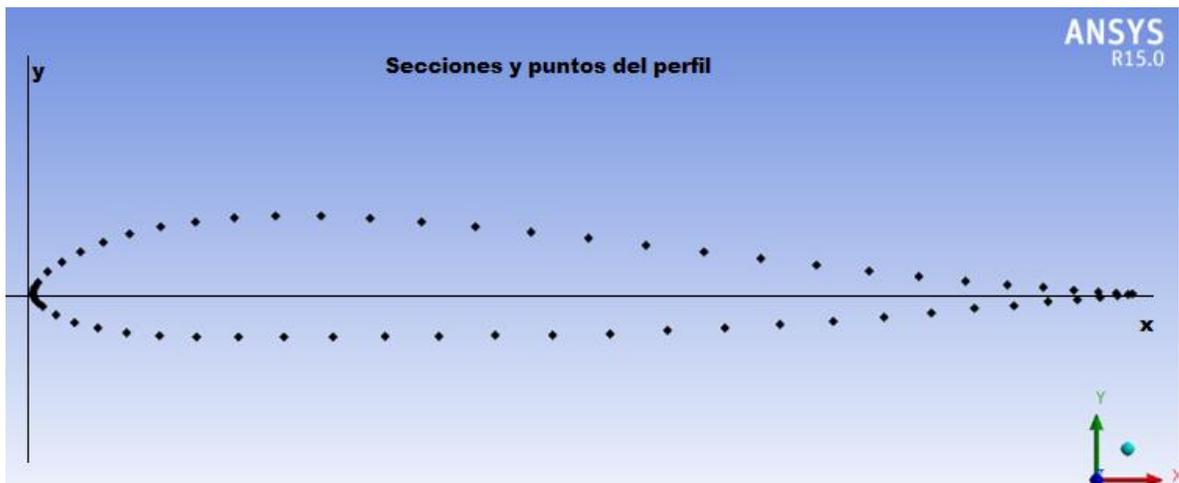
Imagen. 22 Perfil en solid edge



Fuente: Autores

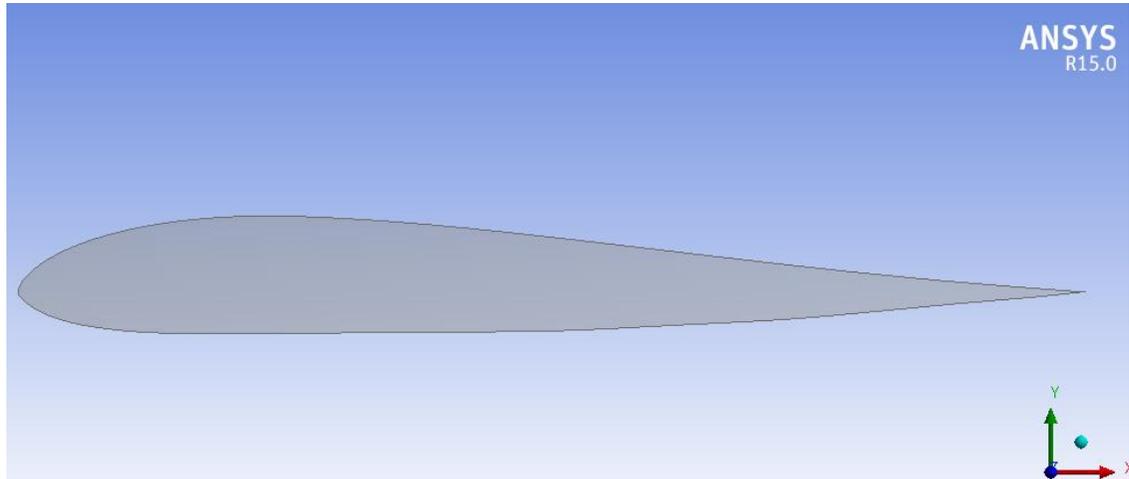
Posterior a ello se importa la geometría al software de diseño ansys para comenzar el proceso de enmallado y posterior simulación.

Imagen. 23 Puntos coordenados del perfil



Fuente: Autores

Imagen. 24 Superficie del perfil en ansys



Fuente: Autores

Para poder hacer la superficie se determinó que el perfil tuviera de envergadura 0,1 metro, de esta forma con base en ello se puede proceder a hacer el análisis de las dimensiones del volumen de control que se usara para el posterior enmallado.

Para el diseño del volumen de control se realizaron estudios previos con el fin de dar solidez y que sirvieran como respaldo al volumen de control planteado a continuación, para eso se recurrió a dos tesis de grado cuyo objetivo era el análisis de superficies y alas finitas, ya que se va a hacer la simulación de una parte de la superficie, para ello se usaron como referencia una tesis de grado de la Universidad San Buenaventura (Análisis aerodinámico del ala del navigator x-2.1 mediante un software de dinámica de fluidos computacional).¹¹⁰

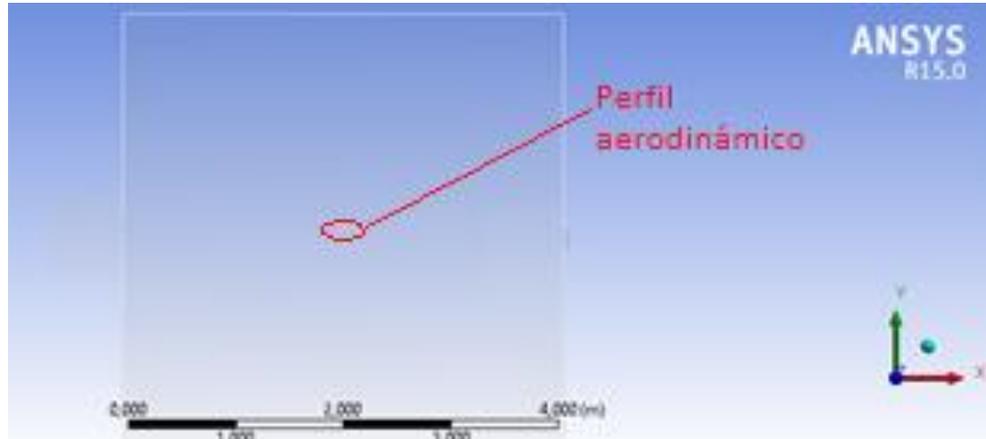
Con base en lo anterior se procedió a hacer el volumen de control para la superficie que se pretende analizar, para ello lo primero que se tuvo en cuenta basándose en los estudios previos realizados fue que El volumen de control debe tener un espacio suficientemente amplio con respecto al perfil de manera que no se genere interferencia en el flujo que se encuentra circulando por la capa limite a causa de la reflexión generada por las paredes de dicho volumen.

De acuerdo a lo anterior se hizo la generación del volumen de control para lo cual se tuvo en cuenta la cuerda del perfil 0,1 metros y quedo de la siguiente manera: eje (X) 2 metros, eje (Y) 2 metros eje (Z) 4 metros, para hacer este análisis se

¹¹⁰ GARCIA ANDRES, MARTINEZ GEYSSON, ROJAS JOHN, Universidad San Buenaventura Bogota, Proyecto de grado (Análisis aerodinámico del ala del navigator x-2.1 mediante un software de dinámica de fluidos computacional) Bogota, Colombia, 2013

tomo solo una parte de la superficie total de 0,1 metros ya que lo que se pretende apreciar es el comportamiento del flujo con respecto al perfil

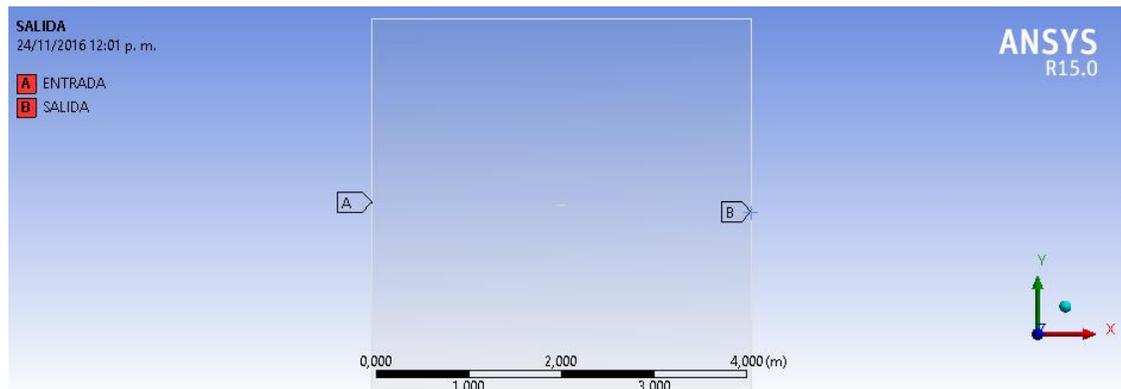
Imagen. 25 Volumen de control del perfil



Fuente: Autores

Posterior a ello se establecen las condiciones de frontera del volumen de control es decir debe quedar previamente claro por donde será la toma de aire, y por donde será el escape de aire, para ello se dejaron establecidas tanto la ENTRADA de aire como la SALIDA.

Imagen. 26 Entrada y salida del flujo



Fuente: Autores

Para poder realizar el enmallado se contó con la ayuda del Software Gambit que permite hacer un enmallado más fino y organizado, este software ofrece dos tipos de mallas estructuradas y no estructuradas, para la superficie del perfil se usó una malla Pave es decir no estructurada debido a que se obtiene una mayor precisión en el análisis de los datos del flujo y el comportamiento del perfil para lo cual

necesita una mayor adaptabilidad¹¹¹, para realizar el enmallado lo que se hizo fue hacer una sustracción, al volumen de control se le resto el volumen del sólido, de esta manera el programa entiende que el fluido va a atravesar todo el volumen de control, pero en donde no hay enmallado se entiende que a través de este punto el fluido no pasara sino que más bien lo rodeara.

Tabla 9. Condiciones de frontera

Entrada	Velocidad	6,38 m/s
	Temperatura	288 K
	Densidad	0,9091 Kg/m ³
Salida	Velocidad	6,38 m/s
	Temperatura	288 K
	Densidad	0,9091 Kg/m ³
	Gradiente de presiones	0

Fuente: autores

En la generación de la malla, inicialmente se tuvo en cuenta la calidad del enmallado, para ello se realizó una malla inicial y un refinamiento de esta, así de esta forma se determinó que la malla más densa y apropiada para la simulación es aquella que no exceda la capacidad computacional del equipo utilizado y de la licencia de la versión del Software ANSYS que se está utilizando, para este análisis se obtuvo ayuda del software GAMBIT usado para el refinamiento de la malla, la rectificación de la malla debe hacerse mínimo tres veces, de esta forma se garantiza que la calidad sea óptima.¹¹²

Tabla 10. Características del enmallado

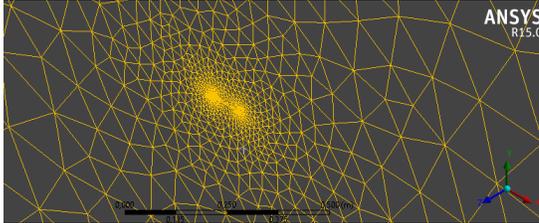
Malla	Número de nodos	Número de elementos	Número de celdas
1	360.534	1'056.332	257.854
2	1'346167	2'654.352	705.162
3	2'353.726	3'009.765	1'213689

Fuente : Autores

¹¹¹ GARCIA ANDRES, MARTINEZ GEYSSON, ROJAS JOHN, Universidad San Buenaventura Bogota, Proyecto de grado (Análisis aerodinámico del ala del navegador x-2.1 mediante un software de dinámica de fluidos computacional) Bogota, Colombia, 2013

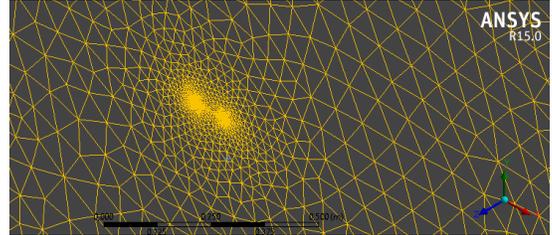
¹¹² LOPEZ CANO, SAMUEL, Universidad de Valencia, Proyecto de grado (Análisis estructural mediante el código de elementos finitos abaqus de un dispositivo de punta alar "winglet) Valencia España, septiembre 2016

Imagen. 27 Enmallado 1



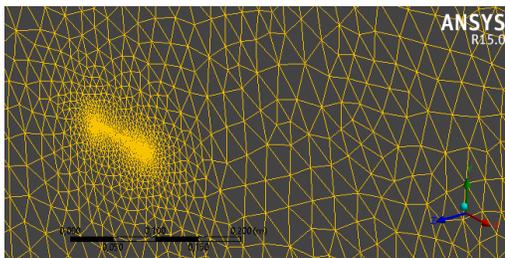
Fuente: Autores

Imagen. 28 Enmallado 2



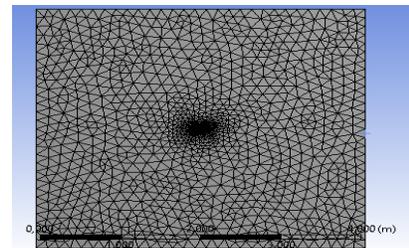
Fuente : Autores

Imagen. 29 Enmallado 3



Fuente: Autores

Imagen. 30 Enmallado de la entrada y la salida



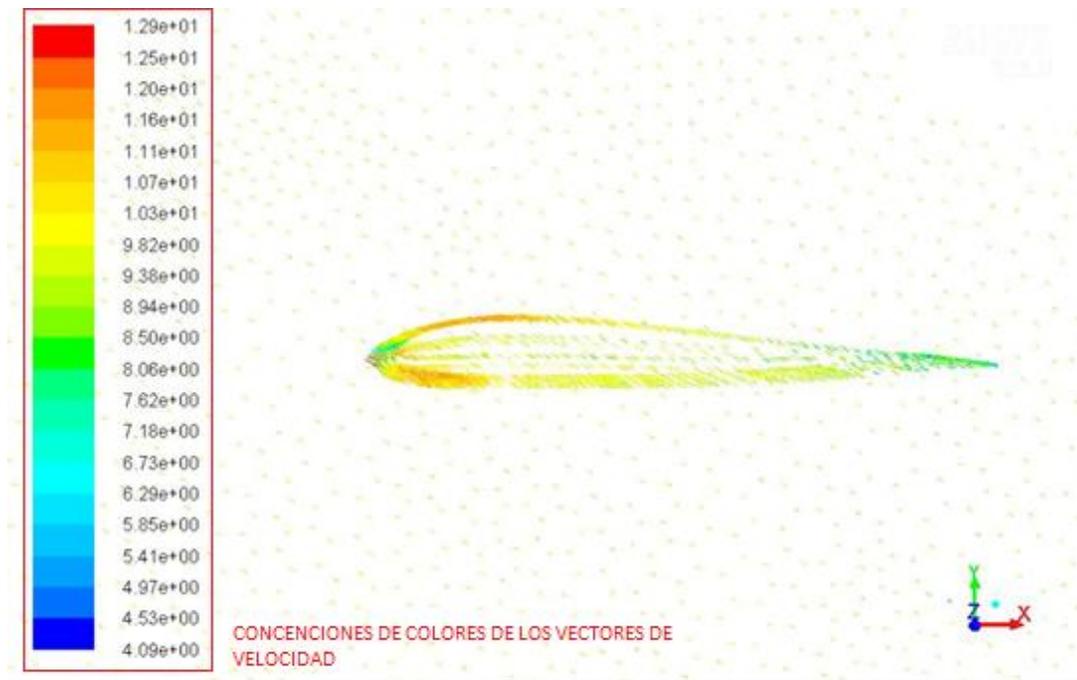
Fuente: Autores

En el enmallado número 3 del volumen de control se usó un total de 2'353.726 de nodos en la malla, posteriormente para iniciar la simulación en el software Fluent se programaron los parámetros iniciales de las condiciones de frontera y las características del flujo en el cual estaría inmerso el perfil aerodinámico, fue necesario establecer las condiciones tales como la velocidad del flujo la densidad del aire el número de mach, y el número de Reynolds de esta forma se hace una simulación de la meteorología para la sabana de Bogotá, además de que se programó un total de 400 iteraciones en dicha simulación.

Especificación y análisis de graficas de las condiciones de frontera

Después de haber realizado la simulación se obtuvieron las siguientes graficas que determinan la velocidad del flujo en el perfil aerodinámico y la distribución de presiones en el mismo, esta simulación se realizó con cero grados de ángulo de ataque para apreciar el comportamiento del perfil de manera general.

Gráfica 21. Vectores de velocidades en la capa límite del perfil

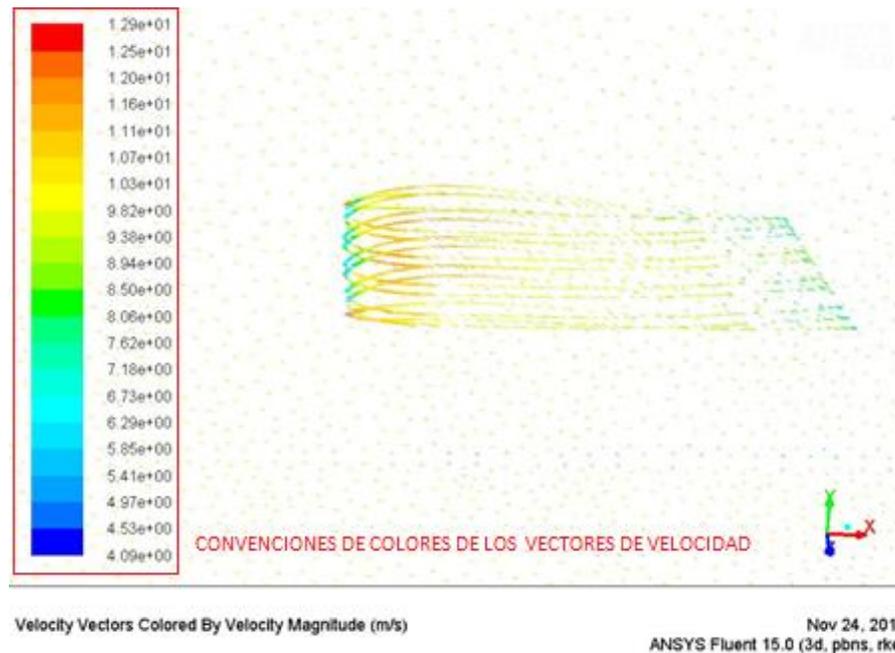


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Nov 24, 2016
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

Fuente: Autores

Gráfica 22. Vectores de velocidades en la capa límite del perfil

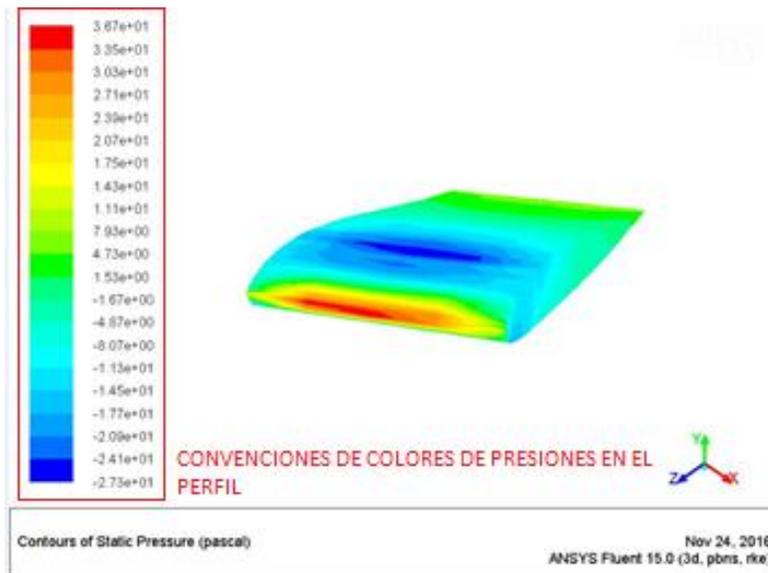


Fuente: Autores

La grafica 22 deja ver las velocidades que alcanza el flujo de aire en el perfil aerodinámico las zonas de colores amarillos y verdes son las velocidades críticas que describe la partícula de aire en el perfil alcanzando velocidades de 12 m/s, por otro lado, los colores azules son velocidades bajas en el perfil que alcanzan los 4,09 m/s, se puede observar que en los extradós y los intradós del perfil el flujo se ve acelerado mientras que hacia el borde de ataque y el borde de fuga, el flujo tiende a disminuir su velocidad.

De igual manera se pudo recrear la distribución de presiones en el perfil así como se muestra a continuación.

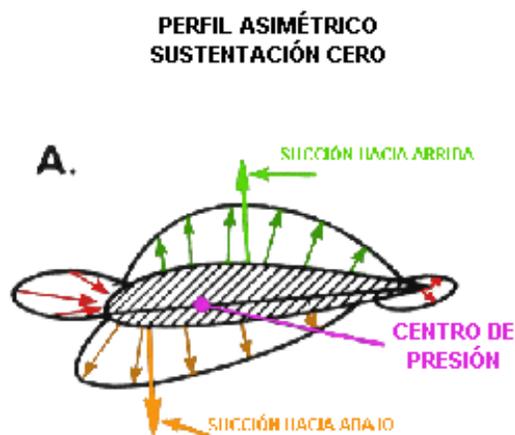
Gráfica 23. Distribución de presiones en el perfil



Fuente: Autores

En la gráfica 23 se puede apreciar la distribución de presiones a lo largo del perfil, la presión crítica, así como se puede observar se da sobre todo en el borde de ataque que es donde el viento toca el perfil por primera vez, se puede apreciar que la presión crítica representada en color rojo puede alcanzar magnitudes de 36 Pa, ya para los intradós y extradós las presiones van desde los Pa hasta llegar a los 43 Pa. Los valores que son negativos se deben a que hay una succión, en términos generales la distribución de presiones del perfil se ve de la siguiente manera.

Imagen. 31 Distribución de presiones en perfil aerodinámico



Fuente: <http://cometistas.blogspot.com.co/2005/11/mt-nzj.html>

El análisis realizado con las simulaciones en 3D en el programa Ansys apoyan y comprueban las simulaciones realizadas en el programa XFLR5 en 2D.

Para el análisis del perfil no se realizó un modelo real y prueba en túnel de viento ya que lo que se pretendía hacer con la simulación 3D era poder observar cómo era el comportamiento del flujo de aire sobre el perfil, ya que para hacer un análisis de una superficie en el túnel de viento hay que tener en cuenta el perfil de velocidades que se distribuye a lo largo de la geometría de esta debido a que va a ser utilizada en un rotor y para ello hay que tener en cuenta que la aerodinámica va aplicada de otra manera es decir hay que tener en cuenta que la aerodinámica debe ser rotacional ya que la superficie hará parte de un rotor que estará girando de cara al viento, para hacer dicho análisis se da una breve introducción a continuación.

Parámetros a tener en cuenta para diseñar la pala

Para el diseño de la pala del rotor hay que tener en cuenta varias variables, ya con el perfil aerodinámico previamente seleccionado se puede proceder a hacer el diseño de la superficie de las palas, el análisis en 3D realizado anteriormente está enfocado para servir como apoyo a las simulaciones realizadas en 2D, para hacer el diseño de las palas del rotor primero que todo hay que tener en cuenta que se debe hacer un análisis de aerodinámica rotacional.

Para el diseño de las palas se deben tener en cuenta ciertos parámetros de diseño, el primer parámetro que se debe tener en cuenta es la velocidad que tienen las palas, esto debido a que la velocidad en la punta de las palas no puede exceder la velocidad del sonido.

Esta velocidad debe ser controlada puesto que exceder estas velocidades produce ondas de choque lo cual puede verse reflejado en vibraciones y así mismo disminuye la eficiencia de la pala, además teniendo en cuenta que si estas ondas de choque y vibraciones son muy críticas esto podría terminar con la desintegración de la pala:

(e.c. 17)¹¹³

$$V_{pp} = \theta * r$$

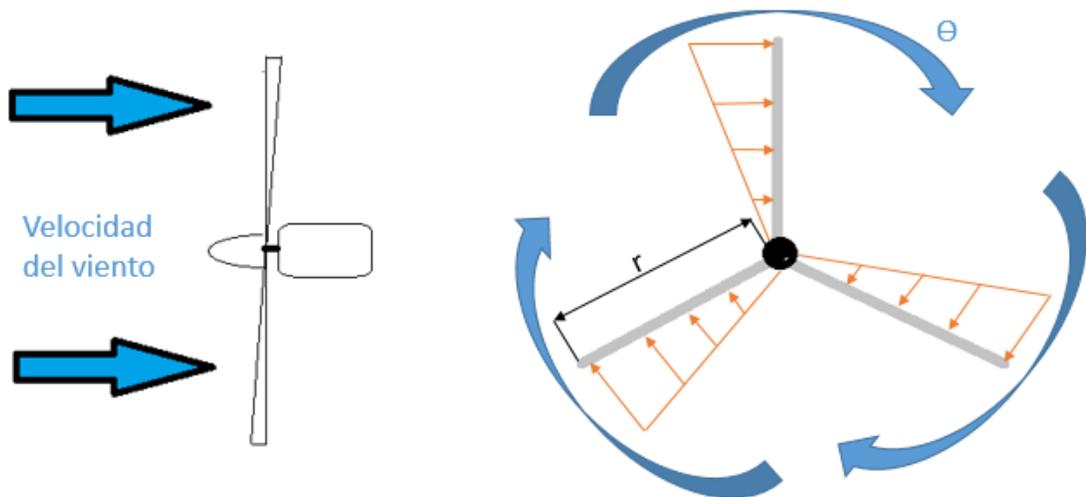
¹¹³ *Velocidad de punta de pala BASTIANON Ricardo A. Calculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas 2008 Argentina.*

La ecuación 17 muestra básicamente como se determina la velocidad en la punta de la pala del generador usando aerodinámica rotacional, ya que para determinarla se cuentan con dos variables de vital importancia el radio de la pala y la velocidad angular, para ello hay que tener en cuenta la relación entre las dos últimas, esto debido a que si el radio del generador es mayor la velocidad angular no puede ser tan elevada o por lo contrario si la velocidad angular es muy alta el radio del generador no puede ser muy alto, esto debido a que el resultado es decir la velocidad en la punta de la pala aumenta de manera significativa ante el cambio de cualquiera de las dos variables.

Por otro lado, hay que tener en cuenta para el diseño, el ángulo de paso que va a tener la pala además del twist aerodinámico, este último ofrece ciertos beneficios a la superficie tales como la reducción de la resistencia inducida y suaviza las características de entrada en pérdida en otras palabras se retrasa la entrada en pérdida.

La grafica 24 muestra como es el perfil de velocidades cuando se hace el análisis para la pala de un rotor.

Gráfica 24. Perfil de velocidades en una pala



Fuente: autores

Para el análisis de una sección de la pala o de la pala completa es necesario tener en cuenta el perfil de velocidades que se genera en una superficie en rotación

para de esta manera conocer de forma exacta el comportamiento del perfil en una simulación real o en una simulación virtual en 3D.

6. CONCLUSIONES

De lo anterior se puede inferir:

- Para el análisis de la pala del rotor es necesario hacer otro análisis usando el modelo de aerodinámica rotacional puesto que los vectores de velocidad se comportan de manera diferente a lo largo de toda la superficie.
- La simulación 3D sirvió para apoyar la simulación realizada en 2D en el programa XFLR5 ya que se pudo determinar mediante el conocimiento de graficas de presiones que el perfil tiende a tener un comportamiento similar tanto en 3D como en 2D.
- El perfil aerodinámico escogido MH 108 fue elegido finalmente gracias a sus diferentes características aerodinámicas como: C_l max, ángulo de perdida, y rendimiento.
- Los datos obtenidos en la predicción fueron consistentes con la investigación realizada, ya que según el Banco Mundial y la ONU para los próximos años se espera un incremento en la temperatura de 1 grado y fue esto exactamente lo que se obtuvo en la predicción para un estimado de cinco años.
- El proyecto queda abierto de manera de que las futuras generaciones de estudiantes decidan continuarlo, la continuación del proyecto sería el diseño de la pala del generador.
- No se realizó simulación en túnel de viento de la superficie en 3D debido a que el análisis realizado en Ansys fue para apoyar la información de la simulación 2D además el comportamiento de velocidades a lo largo del perfil son diferentes a cada punto por lo que tocaría hacer un análisis de aerodinámica rotacional

7. BIBLIOGRAFÍA

AEE, La eólica en el mundo, Madrid-España, citado el 03/junio/2016 [en línea] disponible en <http://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>

AERONAUTICA CIVIL UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPACIAL DE COLOMBIA. Reglamento del aire. Cap. 3 y Cap 24. Última actualización Noviembre 16, 2015. Citado el 16/abril/2016 [en línea], Disponible en <http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/Rrglamentacion/RAC/Biblioteca>

ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA. Bogotá D.C, citado el 28/abril/2016, [en línea] disponible en <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>

ALFREDO Arias Montaña, Dinámica de fluidos computacional, Instituto politécnico Nacional, Edición. 11 de Abril de 2013, citado el 13/junio/2016, [en línea], disponible en http://www.academia.edu/5848305/ANALISIS_DE_UN_PERFIL_AER_ODINAMICO_NACA_2412_EN_ANSYS_FLUENT

Altaeros energies. 2010. Aerogenerador flotante, citado el 03/abril/2016 [en línea], disponible en <www.altaosenergies.com>

ANDERSON, Fundamentals of Aerodynamics, fifth edition 2007, Ed. McGraw Hill series in Aeronautical And Aerospace Engineering, citado el 10/junio/2016

ANDERSON, Introduction to flight, 3d edition 1989, Ed. McGraw-Hill series in Aeronautical And Aerospace Engineering, Citado el 06/julio/2016

ANTONIO Oñate. Turborreactores, teoría de sistemas y propulsión de aeronaves, 6 edición, Capítulo 8 1981. Editorial Paraninfo, citado el 02/junio/2016

ANSYS FLUENT, 3.3 Face meshing commands, edición 1998-2007, citado el 29/julio/2016, [en línea], disponible en https://www.sharcnet.ca/Software/Gambit/html/modeling_guide/mg0303.htm

BANCO MUNDIAL, Emisiones de CO2, citado el 09/junio/2016, [en línea], disponible en, <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=map>

BERTIN, Cummings, Aerodynamics for engineers, Sixth edition 2014, Ed. Pearson, citado el 20/junio/2016

Congreso de Colombia Capítulo I Ley 1715 de 2014 (Mayo 13) Capítulo 1(artículos 1 y 2), Capítulo 4(artículo 20), Capítulo 9 y capítulo 10, citado el 01/junio/2016

DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, Demostración de la ley de Betz, actualizado el 12 de Mayo de 2003, citado el 20/junio/2016, [en línea], disponible en http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm

DELERY, Hoboken, wiley, Handbook of compressible aerodynamics, Ed. Imperial College London, 2012, citado el 18/junio/2016

DIAZ MURILLO, Gonzalo, Respirar en Bogotá puede amenazar la vida, citado el 21/abril/2016, [en línea] disponible en <http://drqdiaz.com/eco/salud/contaminacionenbogota.shtml>

Dumitrescu, M., "Fuzzy critical analysis for an electric generator protection system," [en línea] in *Intelligent Systems, 2008. IS '08. 4th International IEEE*, citado el 07/Febrero/2016. Disponible en <http://biblioteca.libertadores.edu.co:2087/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4670403&isnumber=4670391>>

EEPPM, Revista eólica y del vehículo eléctrico, La energía eólica en Colombia: 40 megavatios eólicos instalados y un potencial desaprovechado y poco estudiado, citado el 10/febrero/2016 [en línea] disponible en: <http://www.evwind.com>.

FENES, Gastón, Argentina se posiciona 40 en el ranking mundial de capacidad de energía eólica instalada, citado el 29/mayo/2016, [en línea] disponible en <http://www.energiaestrategica.com>

GYROCLUB DE LA SIERVA, Pérdida del perfil aerodinámico, citado el 07 /Febrero /2016, [en línea] Disponible en http://www.gyroclubdelacierva.es/files/nociones_basicas_de_aerodinamica.pdf

IDEAM, Atlas de viento y energía eólica de Colombia, capítulo 4, citado el 29/mayo/2016, [en línea] disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/019813/Capitulo4.pdf>

IDEAM, cartas de vientos ideam, citado el 03/marzo/2016, [en línea] disponible en <http://www.meteoaeronautica.gov.co/meteorologia-aeronautica>

IDEAM, El país es muy vulnerable a la variabilidad climática, citado el 19/abril/2016, [en línea] disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias>

IOANA, Mihaela, alternador, dinamo y motor eléctrico, citado el 03/febrero/2016, [en línea] disponible en <http://iesgoya4adiver.blogspot.com.co/2009/11/alternador-dinamo-y-motor-electrico.html>

ISAGEN S.A, Estudio de impacto ambiental, citado el 27/mayo/2016, [en línea] disponible en https://www.isagen.com.co/comunicados/Eolica_espanol_wayuu.pdf

J Gordon Leishman, Principles of Helicopter Aerodynamics, Capítulo 4 Cambridge University Press, 23/12/2002, citado el 02/abril/2016

Ju Young Kang; Lee, B.S., "Application of morphing technique to airfoil design," citado el 08/Febrero/2016, [en línea] Disponible en: <http://biblioteca.libertadores.edu.co:2087/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6263576&isnumber=6263358>

Kamkwamba. Energía Eólica y Aerogeneradores. Mayo 1, 201120/ citado 28/enero/2016, [en línea] Disponible en http://aerogeneradores-energia-olica.blogspot.com/2011_05_01_archive.html

Linyue Gao; Yongqian Liu; Shuang Han; Jie Yan, "Aerodynamic performance of a blunt trailing-edge airfoil affected by vortex generators and

a trailing-edge wedge," citado el 12/Febrero/2016. [En línea] Disponible en: <<http://biblioteca.libertadores.edu.co:2087/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6993310&isnumber=6941339>>

Miguel A. Sistemas Funcionales. [En línea]. Perfiles, citado el 03/febrero/2016 Disponible en <<http://www.manualvuelo.com/SIF/SIF37.html>>.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Colombia, decreto 1623 de 2015, tomado de <http://faolex.fao.org/docs/pdf/col150817.pdf>

MUNSON Bruce. YOUNG Donald. OKIISHI Theodore. Fundamentos de Mecánica de Fluidos, México D.F, 2003, citado el 15/abril/2016

NACIONES UNIDAS, cambio climático, citado el 21/abril/2016, [en línea] disponible en <https://calentamientoglobalclima.org/tag/onu/>

NACIONES UNIDAS, Energía limpia, citado el 01/junio/2016, [en línea] disponible de, <http://newsroom.unfccc.int/es/energ%C3%ADa-limpia/la-energia-eolica-crece-en-el-mundo/>

ONU, cambio climático, citado el 17/abril/2016, [en línea] disponible en <https://calentamientoglobalclima.org/tag/onu/>

PCC- intergovernmental Panel on Climate Change- world surface heating, Ginebra-Suiza, citado el 17/abril/2016, [en línea] disponible en <http://www.ipcc.ch/>

REVE, Asociación europea de energía eólica, citado el 01/junio/2016, [en línea] disponible en, <http://www.evwind.com/tags/asociacion-europea-de-energia-eolica/>

Roncero, Jiménez. Aeronaves y Vehículos espaciales [en línea]. Escuela Superior de ingenieros. Universidad de Sevilla. Curso 2009-2010. Carga alar, citado el 10/febrero/2016, Disponible en: [http://aero.us.es/AVE/archivos/Y0910/Tema4_parte1\(WEB\).pdf](http://aero.us.es/AVE/archivos/Y0910/Tema4_parte1(WEB).pdf)

SECRETARIA DE HACIENDA, Bogotá en datos, citado el 25/abril/2016, [en línea] disponible en <http://institutedeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0110/0112hidro/01121182.htm>

SECRETARIA DE AMBIENTE BOGOTA, El distrito capital ya cuenta con el inventario de g,e,i, citado el 09/junio/2016, [en línea], disponible en <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/cambio-climatico>

SITDFAE, Semillero de investigación, 2016, Fundación Universitaria Los Libertadores, citado el 10/junio/2016

SOLIDWORKS, análisis por elementos finitos, citado el 10/junio/2016, [en línea] disponible en <http://www.solidworks.es>

TWINENERGY, Energía eólica global más barata, citado el 10/abril/2016, [en línea], disponible en <<http://twenergy.com/energia/energia-eolica.>>

UCLM, Curso de física ambiental, tema 6 energía eólica, citado el 10/junio/2016 [en línea], disponible en <http://www.uclm.es>

Universidad de Illinois. Perfiles aerodinámicos, citado el 11/febrero/2016, [en línea], disponible en:<http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html>

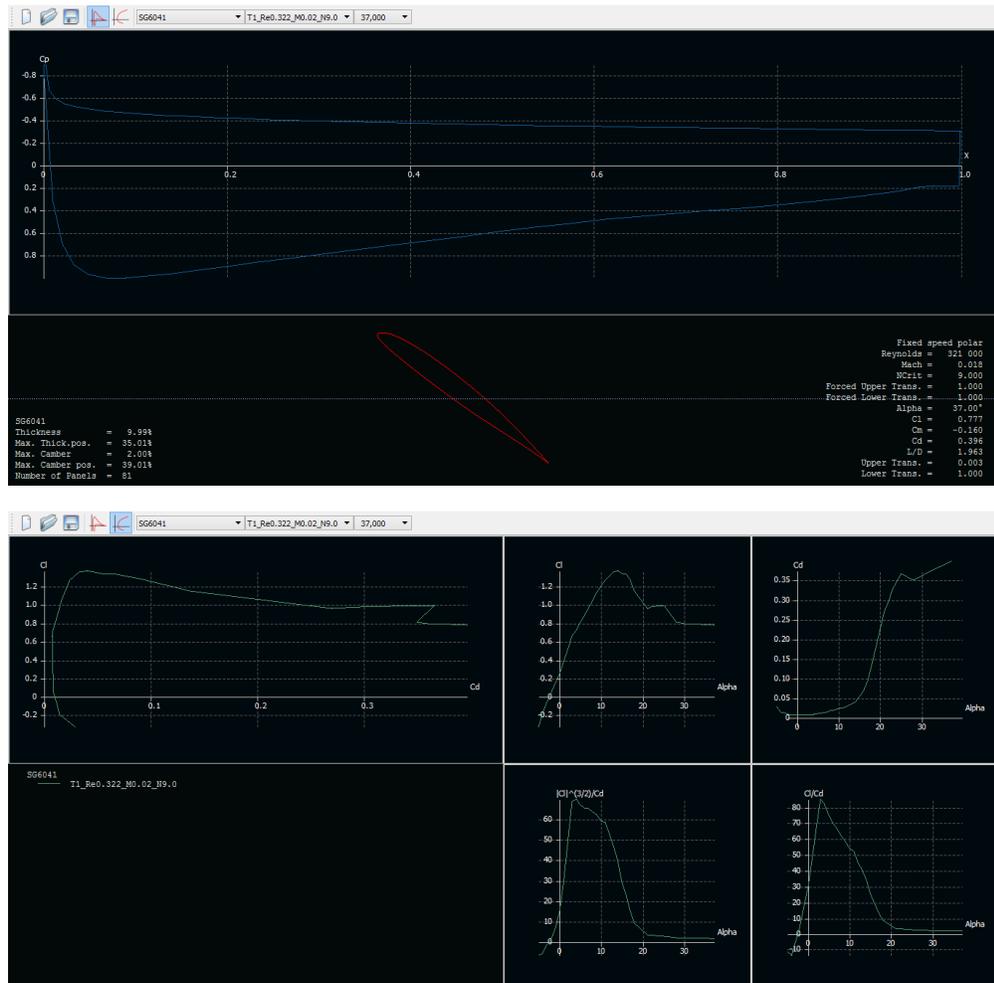
UPME, Ministerio de Minas Colombia, Unidad de planeación minero energética, resolución 281 de 2015, tomado de [:faolex.fao.org/docs/pdf/col146970.pdf](http://faolex.fao.org/docs/pdf/col146970.pdf)

YUNUS A. Cengel, Transferencia de Calor y masa un enfoque práctico, Tercera Edición. 2007 Ed. McGraw Hill, Apéndice 1, tabla A-15, propiedades del aire a la presión de 1 atm, citado el 15/junio/2016.

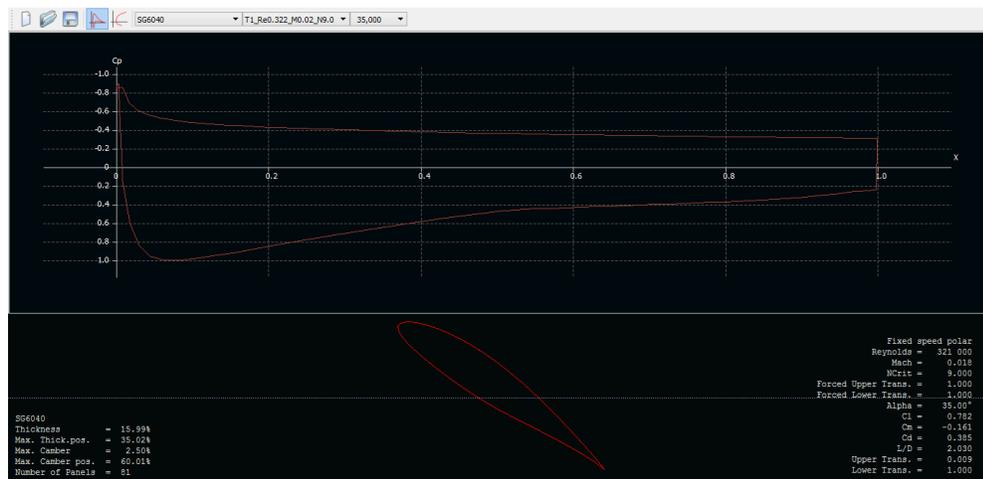
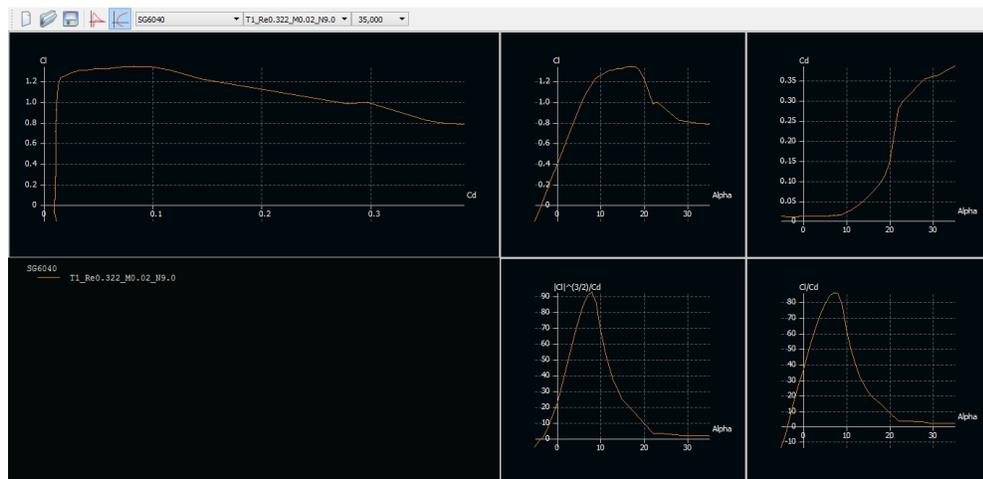
ANEXOS 1

A continuación, se muestran las simulaciones para todos los perfiles seleccionados de donde se derivó la selección del perfil definitivo.

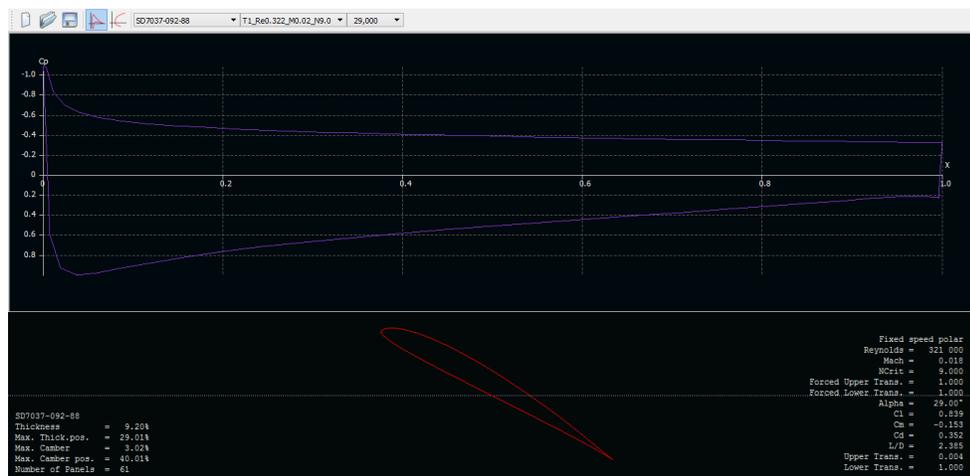
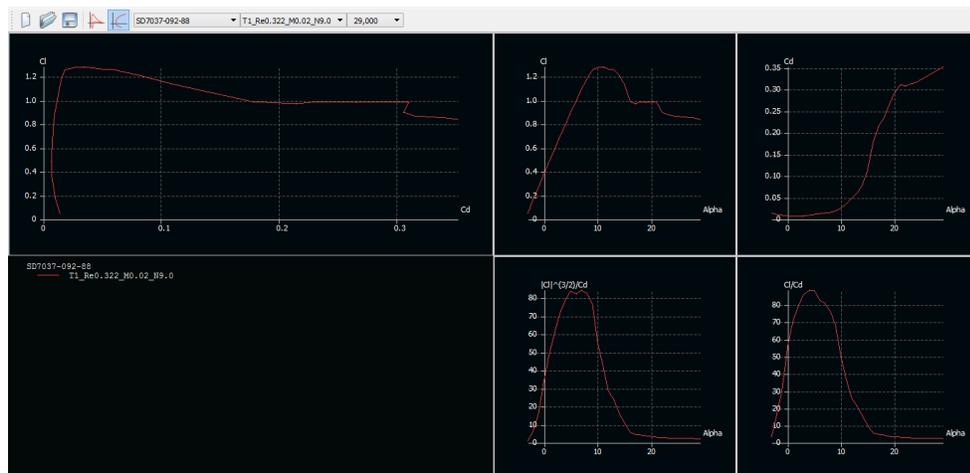
PERFIL SG6041



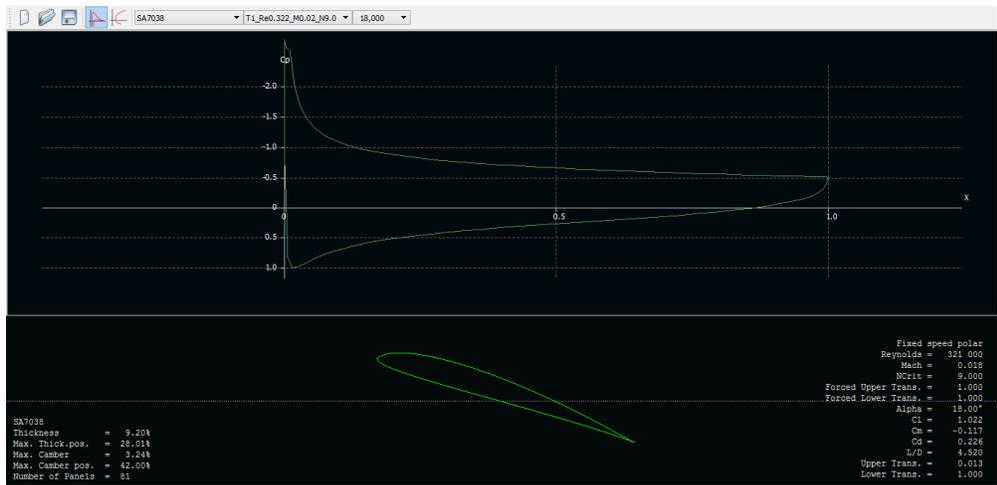
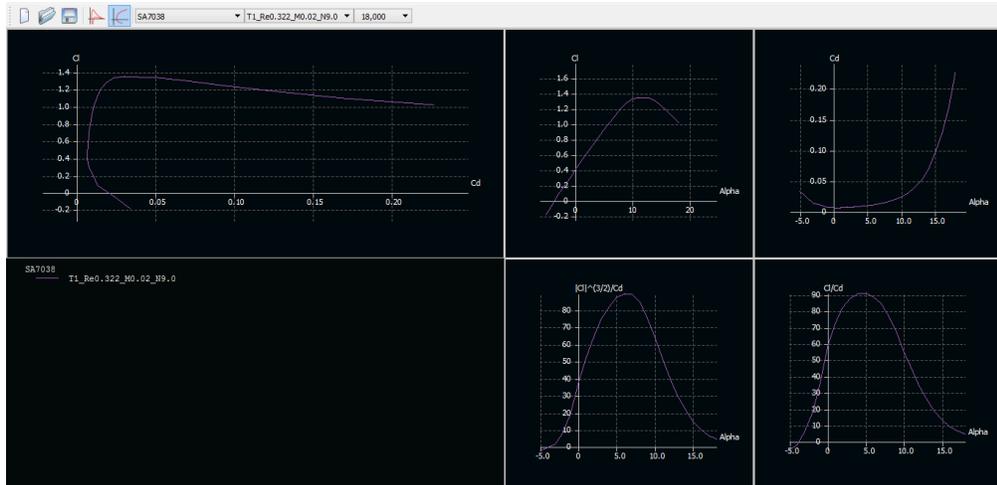
PERFIL SG6040



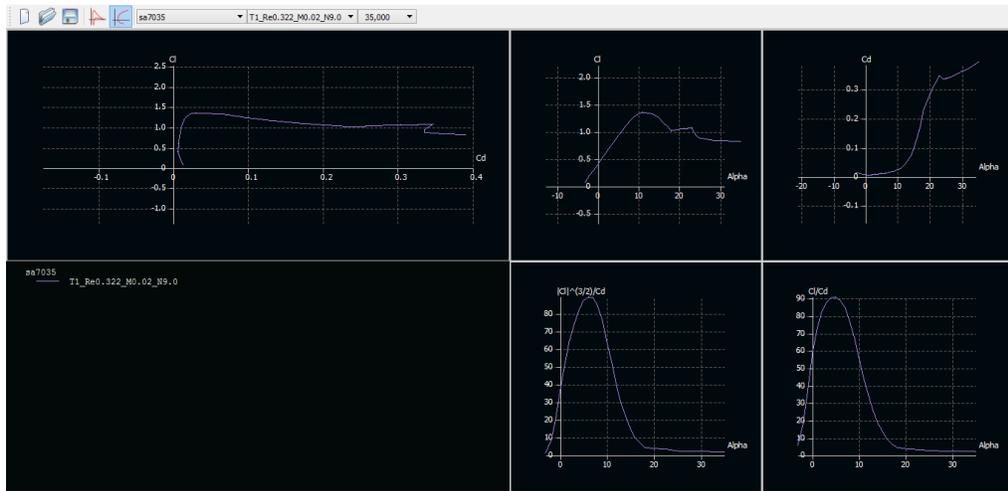
PERFIL SD 7037



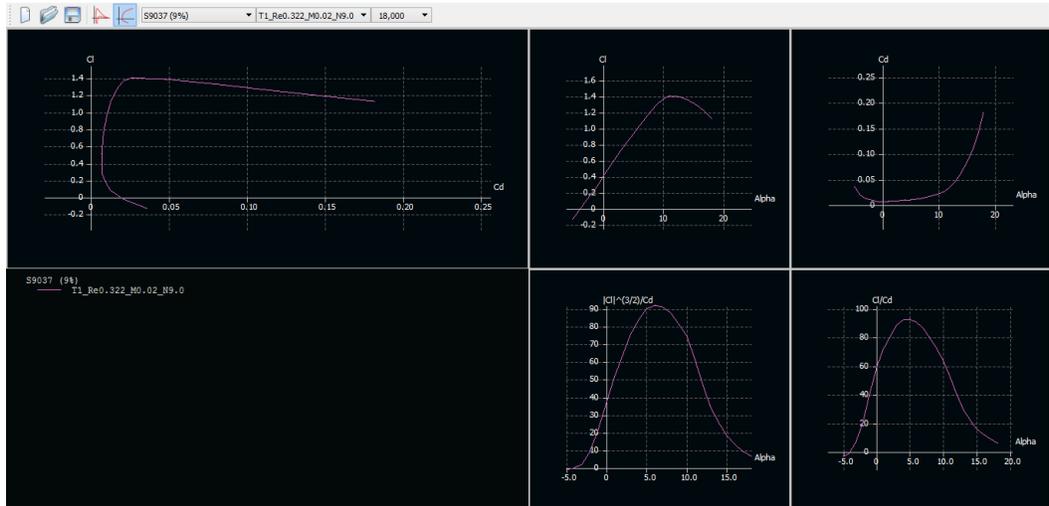
PERFIL SA7038



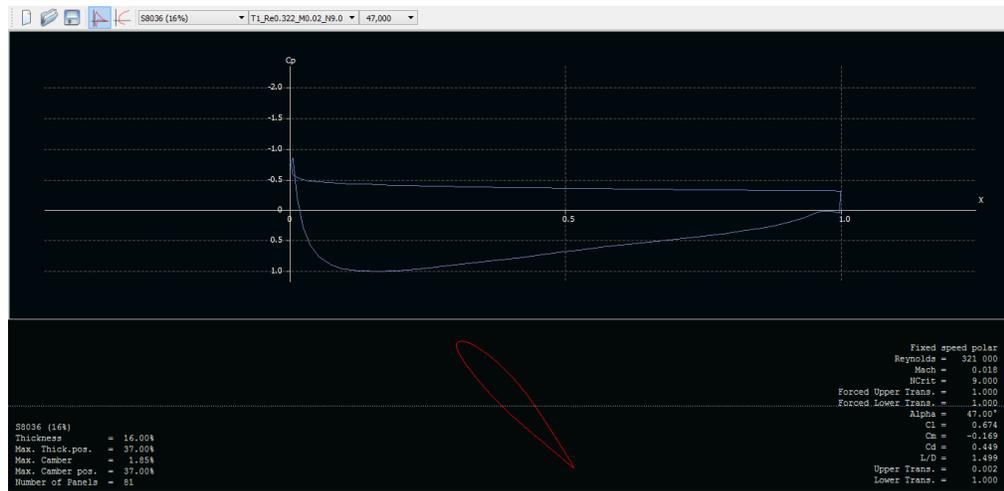
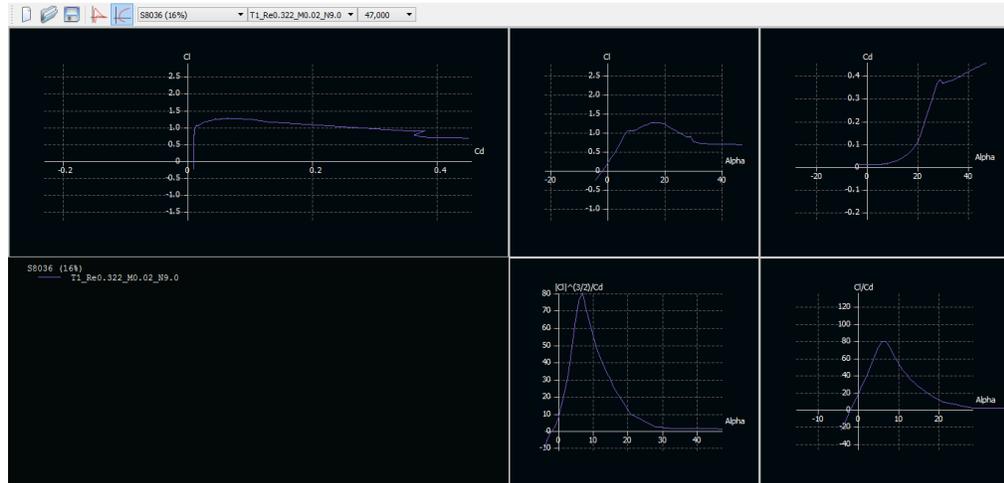
PERFIL SA7035



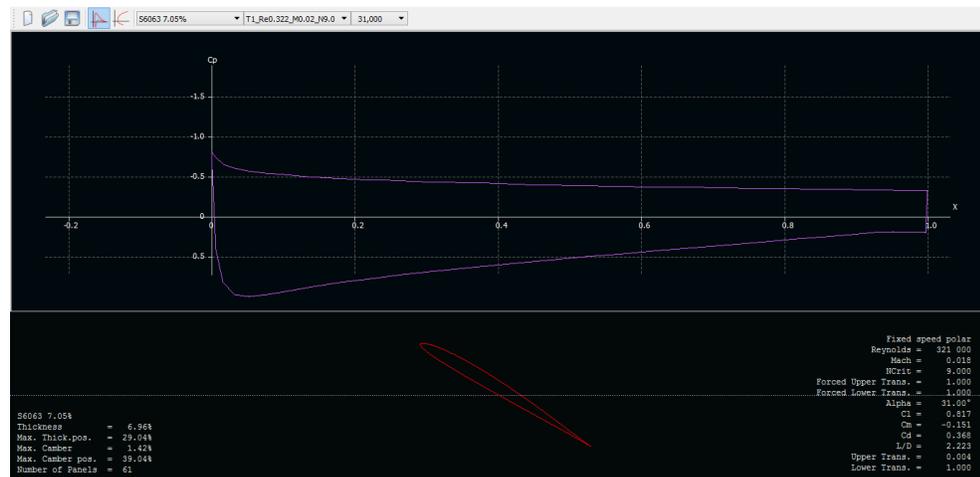
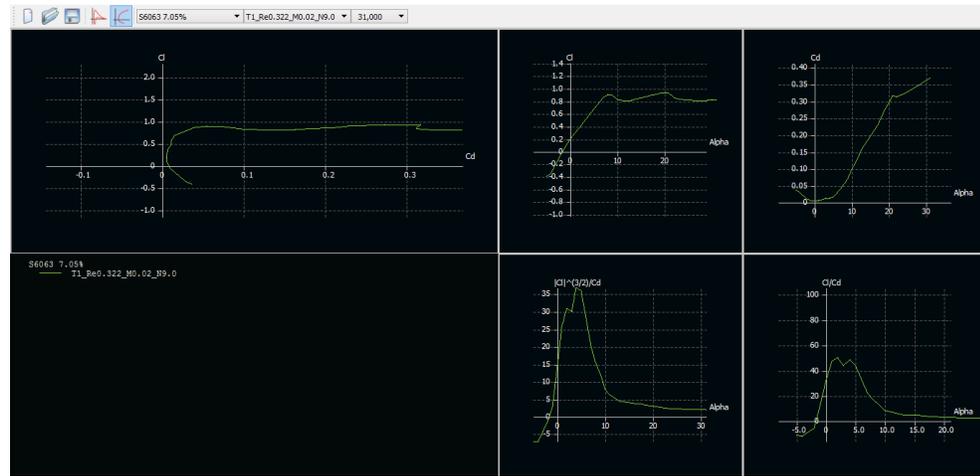
PERFIL S9037



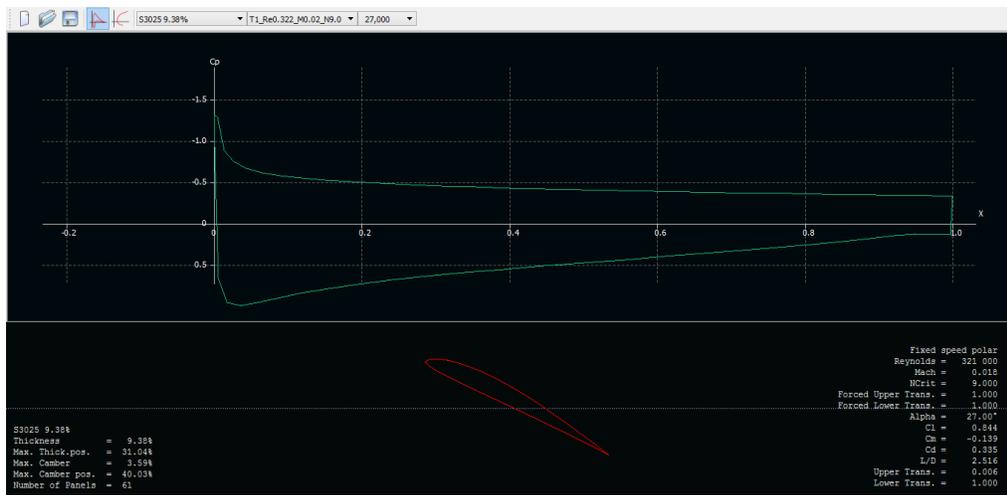
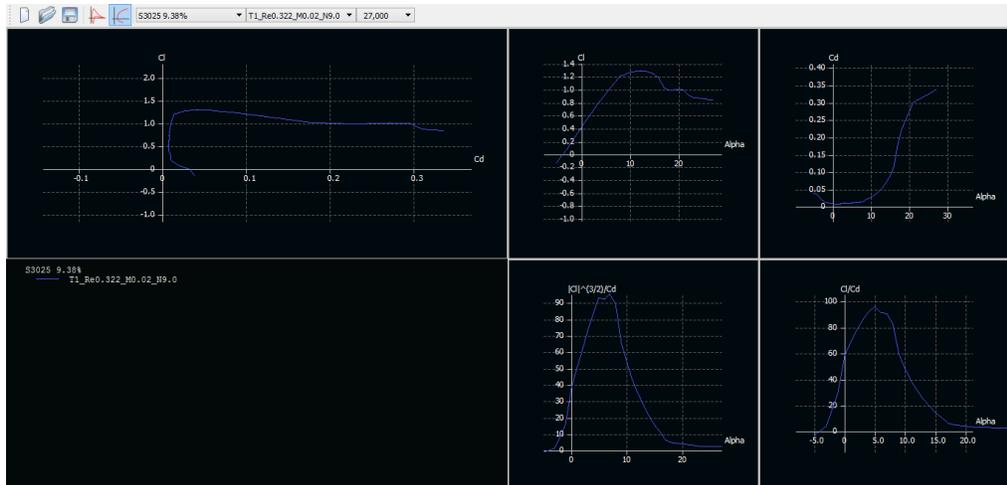
PERFIL S8036



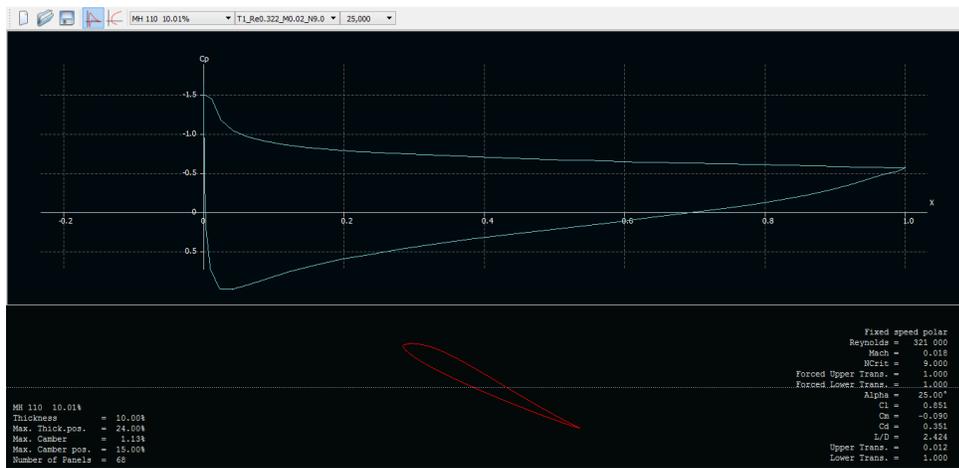
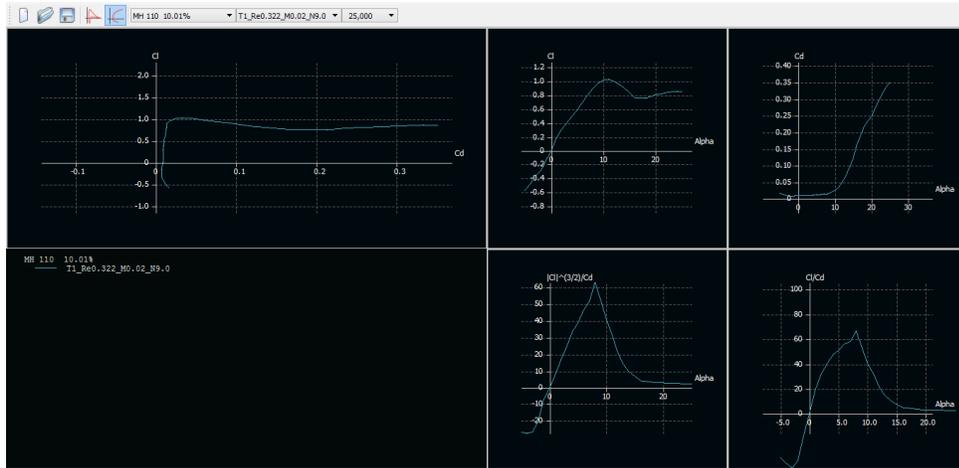
PERFIL S6063



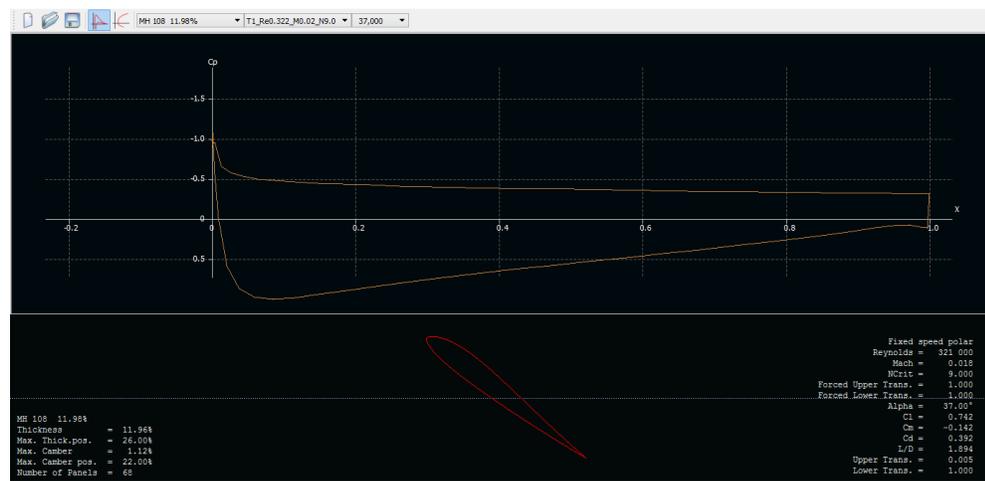
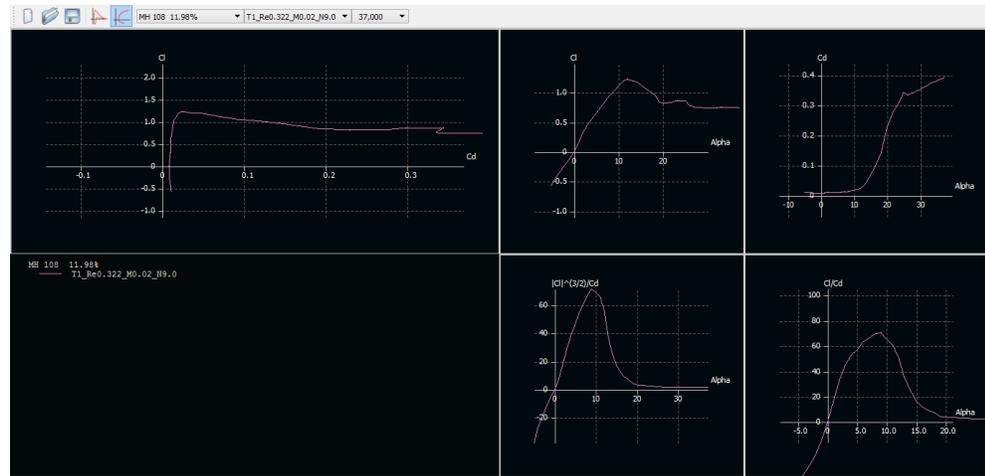
PERFIL S3025



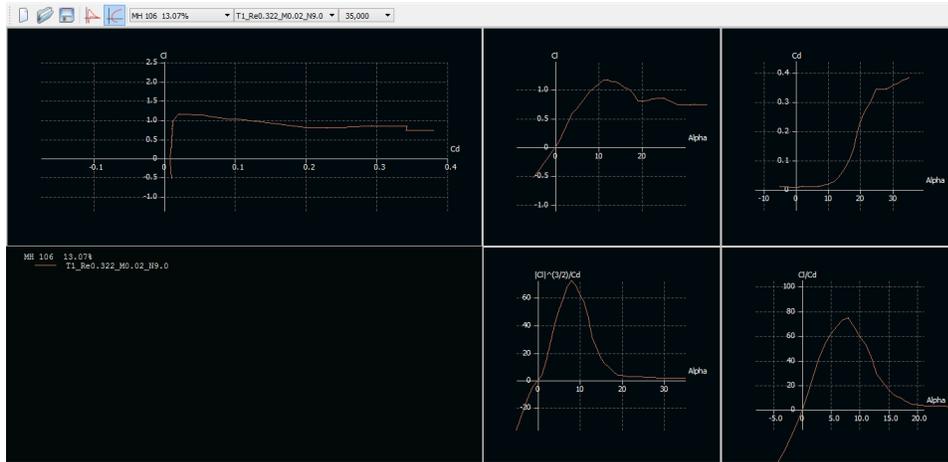
MH110



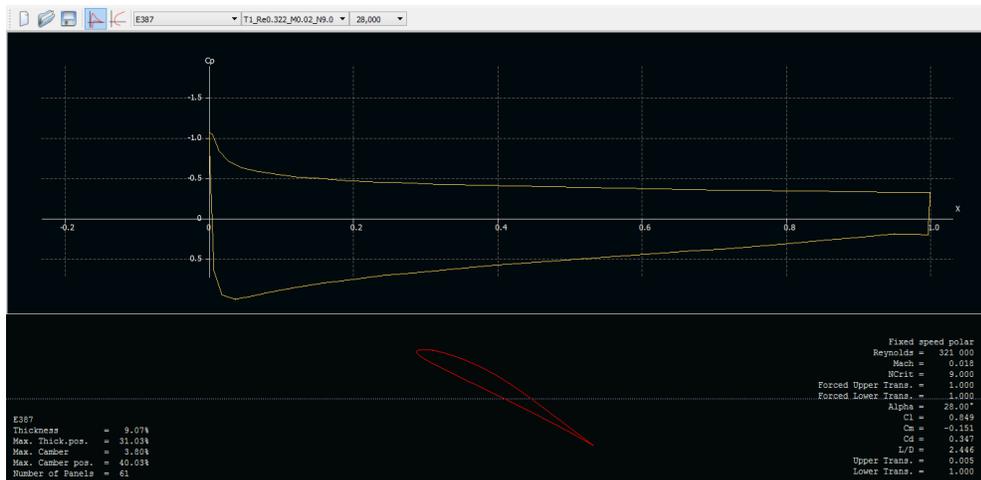
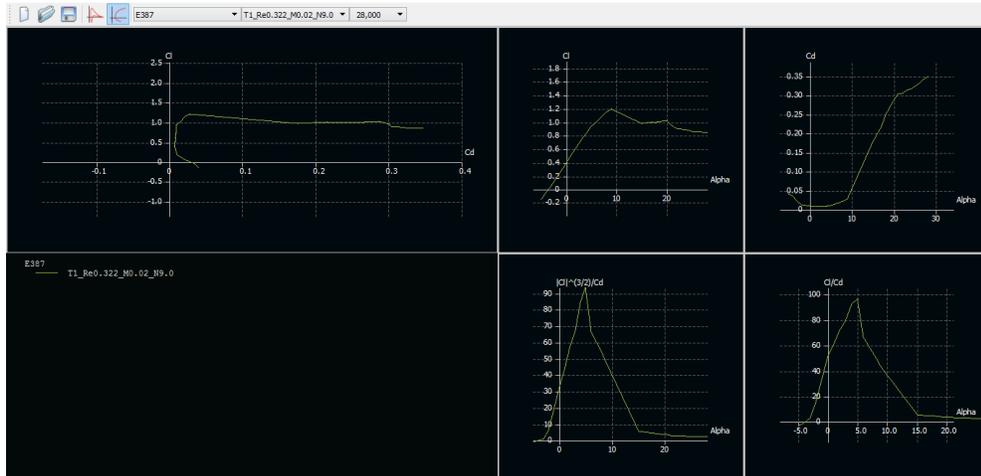
PERFIL MH108



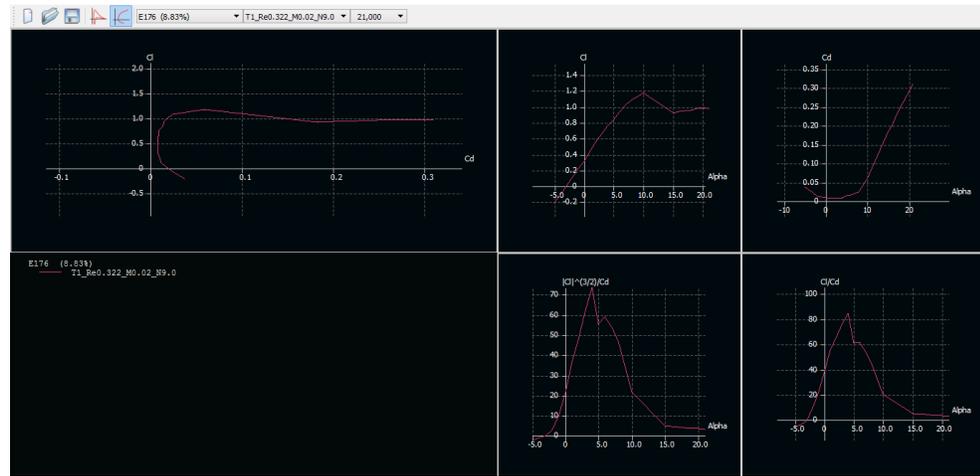
MH106



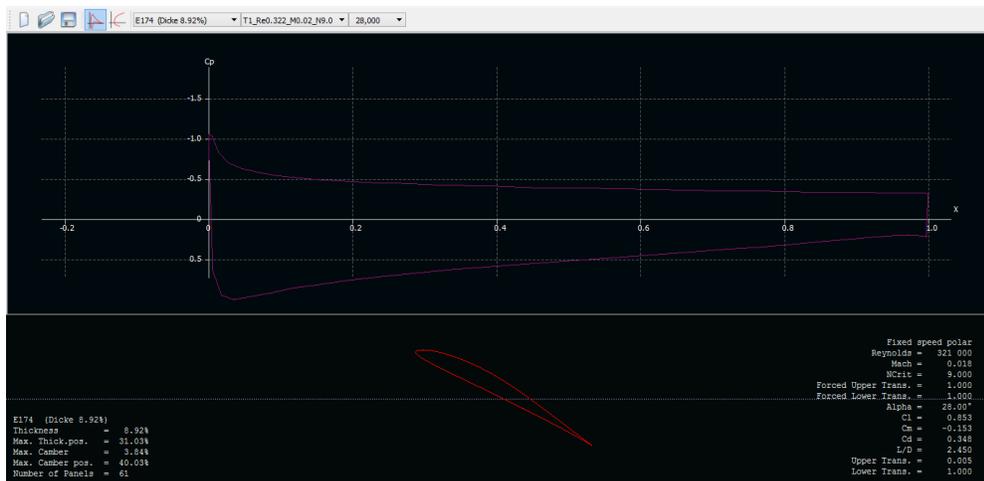
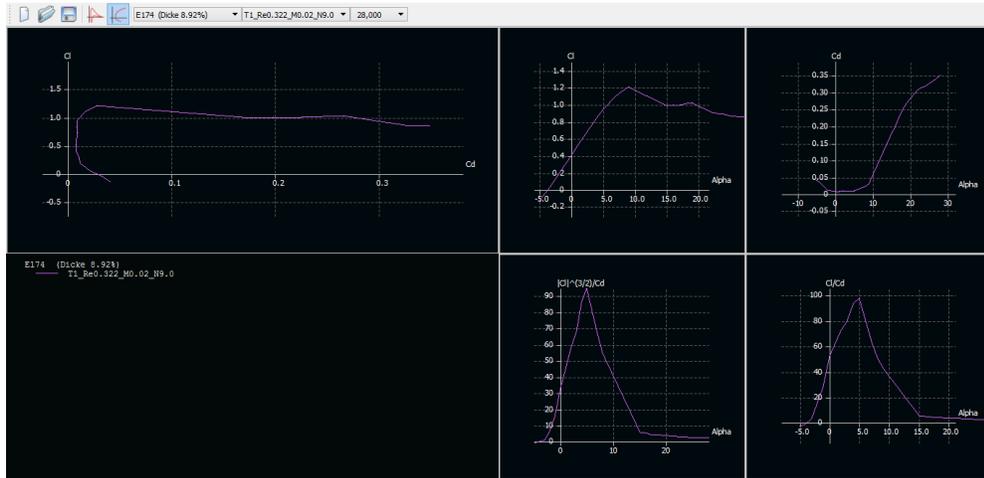
PERFIL E387



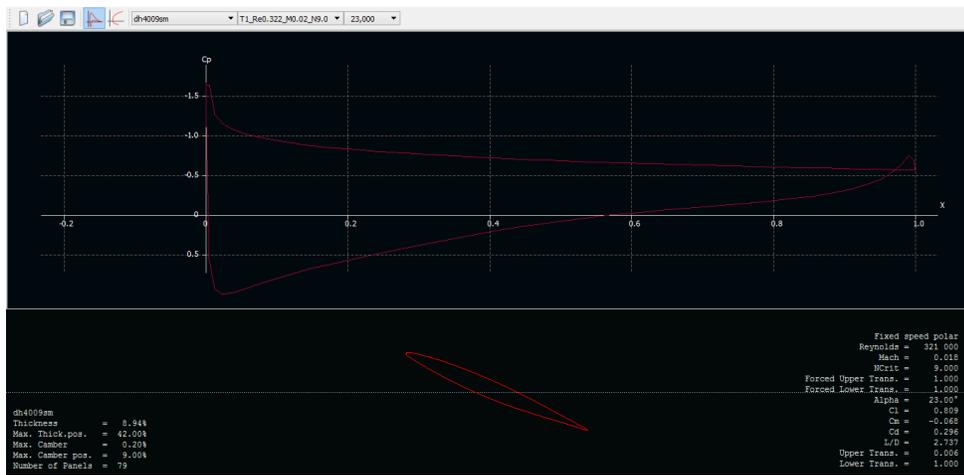
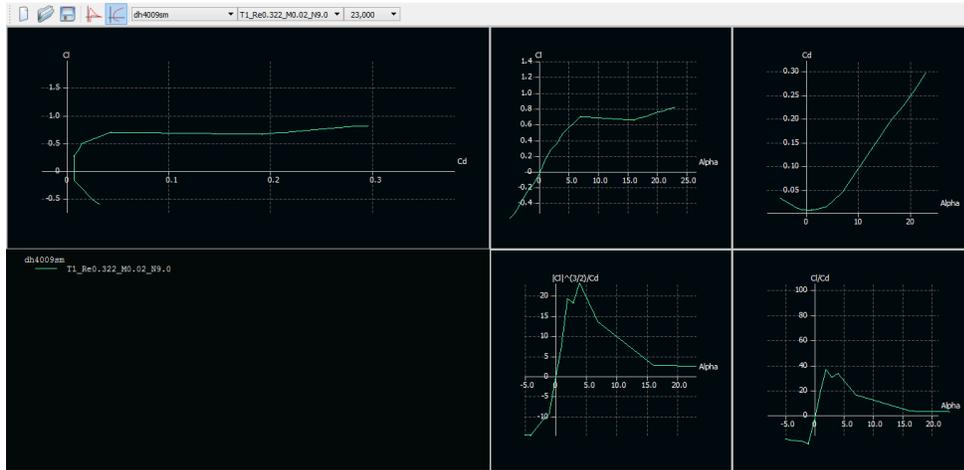
PERFIL E176



PERFIL E174



PERFIL DH4009



dh4009m
 Thickness = 8.94%
 Max. Thick.pos. = 42.00%
 Max. Camber = 0.20%
 Max. Camber pos. = 9.00%
 Number of Panels = 79

Fixed speed polar
 Reynolds = 321 000
 Mach = 0.018
 Wcst = 9.000
 Forced Upper Trans. = 1.000
 Forced Lower Trans. = 1.000
 Alpha = 23.007
 Cl = 0.609
 Cm = -0.068
 Cd = 0.286
 l/D = 2.737
 Upper Trans. = 0.006
 Lower Trans. = 1.000

ANEXOS 2

A continuación, se muestra el datasheet de los perfiles rediseñados por los autores y el perfil original de la base de datos de la Universidad de Illinois

PERFIL ORIGINAL MH108

MH 108	
Eje x	Eje y
1	0
0.99643	0.00010
0.98604	0.00067
0.96948	0.00192
0.94720	0.00366
0.91936	0.00580
0.88624	0.00850
0.84838	0.01190
0.80639	0.01600
0.76089	0.02079
0.71259	0.02616
0.66217	0.03201
0.61035	0.03816
0.55780	0.04439
0.50520	0.05050
0.45319	0.05623
0.40235	0.06133
0.35322	0.06557
0.30629	0.06871
0.26199	0.07055
0.22076	0.07088

0.18281	0.06933
0.14799	0.06584
0.11636	0.06076
0.08817	0.05435
0.06366	0.04682
0.04296	0.03836
0.02618	0.02925
0.01339	0.01987
0.00471	0.01069
0.00214	0.00668
0.00097	0.00421
0.00024	0.00190
0.00002	0.00046
0.00006	-0.00086
0.00044	-0.00214
0.00112	-0.00347
0.00260	-0.00555
0.00455	-0.00768
0.00918	-0.01163
0.02136	-0.01892
0.03812	-0.02579
0.05940	-0.03194
0.08512	-0.03724
0.11512	-0.04158

0.14920	-0.04492
0.18710	-0.04727
0.22849	-0.04866
0.27297	-0.04916
0.32010	-0.04881
0.36940	-0.04770
0.42037	-0.04592
0.47246	-0.04358
0.52506	-0.04083
0.57751	-0.03773
0.62924	-0.03432
0.67967	-0.03068
0.72822	-0.02692
0.77431	-0.02313
0.81740	-0.01938
0.85697	-0.01575
0.89253	-0.01231
0.92363	-0.00914
0.94985	-0.00626
0.97091	-0.00369
0.98661	-0.00163
0.99655	-0.00039
1	0

Datasheet rediseño 1

REDISEÑO					
Eje x	Eje y				
1	0.00000	0.18281	0.06933	0.14920	-0.03900
0.99643	0.00010	0.14799	0.06584	0.18710	-0.03900
0.98604	0.00067	0.11636	0.06076	0.22849	-0.03870
0.96948	0.00192	0.08817	0.05435	0.27297	-0.03870
0.94720	0.00366	0.06366	0.04682	0.32010	-0.03840
0.91936	0.00580	0.04296	0.03836	0.36940	-0.03800
0.88624	0.00850	0.02618	0.02925	0.42037	-0.03770
0.84838	0.01190	0.01339	0.01987	0.47246	-0.03760
0.80639	0.01600	0.00471	0.01069	0.52506	-0.03740
0.76089	0.02079	0.00214	0.00668	0.57751	-0.03680
0.71259	0.02616	0.00097	0.00421	0.62924	-0.03432
0.66217	0.03201	0.00024	0.00190	0.67967	-0.03068
0.61035	0.03816	0.00002	0.00046	0.72822	-0.02692
0.55780	0.04439	0.00006	-0.00086	0.77431	-0.02313
0.50520	0.05050	0.00044	-0.00214	0.81740	-0.01938
0.45319	0.05623	0.00112	-0.00347	0.85697	-0.01575
0.40235	0.06133	0.00260	-0.00555	0.89253	-0.01231
0.35322	0.06557	0.00455	-0.00768	0.92363	-0.00914
0.30629	0.06871	0.00918	-0.01163	0.94985	-0.00626
0.26199	0.07055	0.02136	-0.01892	0.97091	-0.00369
0.22076	0.07088	0.03812	-0.02579	0.98661	-0.00163
		0.05940	-0.03080	0.99655	-0.00039
		0.08512	-0.03500		
		0.11512	-0.03780	1	0.00000

Datasheet rediseño 2

Rediseño 2		0.18281	0.06933	0.14920	-0.03900
x coordenada	Y coordenada	0.14799	0.06584	0.18710	-0.03900
1	0.00000	0.11636	0.06076	0.22849	-0.03870
0.99643	0.00010	0.08817	0.05435	0.27297	-0.03870
0.98604	0.00067	0.06366	0.04682	0.32010	-0.03840
0.96948	0.00192	0.04296	0.03836	0.36940	-0.03800
0.94720	0.00366	0.02618	0.02925	0.42037	-0.03770
0.91936	0.00580	0.01339	0.01987	0.47246	-0.03730
0.88624	0.00850	0.00471	0.01069	0.52506	-0.03600
0.84838	0.01190	0.00214	0.00668	0.57751	-0.03300
0.80639	0.01600	0.00097	0.00421	0.62924	-0.03100
0.76089	0.02079	0.00024	0.00190	0.67967	-0.02800
0.71259	0.02616	0.00002	0.00046	0.72822	-0.02500
0.66217	0.03201	0.00006	-0.00086	0.77431	-0.02140
0.61035	0.03816	0.00044	-0.00214	0.81740	-0.01700
0.55780	0.04439	0.00112	-0.00347	0.85697	-0.01300
0.50520	0.05050	0.00260	-0.00555	0.89253	-0.01031
0.45319	0.05623	0.00455	-0.00768	0.92363	-0.00714
0.40235	0.06133	0.00918	-0.01163	0.94985	-0.00526
0.35322	0.06557	0.02136	-0.01892	0.97091	-0.00300
0.30629	0.06871	0.03812	-0.02579	0.98661	-0.00130
0.26199	0.07055	0.05940	-0.03080	0.99655	-0.00020
0.22076	0.07088	0.08512	-0.03500	1	0.00000
		0.11512	-0.03780		

Datasheet rediseño 3

REDISEÑO 3	
Eje x	Eje y
1	0
0.99643	0.00010
0.98604	0.00067
0.96948	0.00192
0.94720	0.00366
0.91936	0.00580
0.88624	0.00850
0.84838	0.01190
0.80639	0.01600
0.76089	0.02079
0.71259	0.02616
0.66217	0.03201
0.61035	0.03816
0.55780	0.04439
0.50520	0.05050
0.45319	0.05623
0.40235	0.06133
0.35322	0.06557
0.30629	0.06871
0.26199	0.07055
0.22076	0.07088

0.18281	0.06933
0.14799	0.06584
0.11636	0.06076
0.08817	0.05435
0.06366	0.04682
0.04296	0.03836
0.02618	0.02925
0.01339	0.01987
0.00471	0.01069
0.00214	0.00668
0.00097	0.00421
0.00024	0.00190
0.00002	0.00046
0.00006	-0.00086
0.00044	-0.00214
0.00112	-0.00330
0.00260	-0.00450
0.00455	-0.00600
0.00918	-0.00963
0.02136	-0.01592
0.03812	-0.02290
0.05940	-0.02880
0.08512	-0.03300
0.11512	-0.03500

0.14920	-0.03520
0.18710	-0.03470
0.22849	-0.03570
0.27297	-0.03600
0.32010	-0.03540
0.36940	-0.03460
0.42037	-0.03400
0.47246	-0.03360
0.52506	-0.03350
0.57751	-0.03300
0.62924	-0.03200
0.67967	-0.03068
0.72822	-0.02692
0.77431	-0.02313
0.81740	-0.01938
0.85697	-0.01575
0.89253	-0.01231
0.92363	-0.00914
0.94985	-0.00626
0.97091	-0.00369
0.98661	-0.00163
0.99655	-0.00039
	1 0.00000

Datasheet rediseño 4

REDISEÑO 4	
Eje x	Eje y
1	0
0.99643	0.00010
0.98604	0.00067
0.96948	0.00192
0.94720	0.00366
0.91936	0.00580
0.88624	0.00850
0.84838	0.01190
0.80639	0.01600
0.76089	0.02079
0.71259	0.02616
0.66217	0.03201
0.61035	0.03816
0.55780	0.04439
0.50520	0.05050
0.45319	0.05623
0.40235	0.06133
0.35322	0.06557
0.30629	0.06871
0.26199	0.07055
0.22076	0.07088

0.18281	0.06933
0.14799	0.06584
0.11636	0.06076
0.08817	0.05435
0.06366	0.04682
0.04296	0.03836
0.02618	0.02925
0.01339	0.01987
0.00471	0.01069
0.00214	0.00668
0.00097	0.00421
0.00024	0.00190
0.00002	0.00046
0.00006	-0.00086
0.00044	-0.00214
0.00112	-0.00330
0.00260	-0.00450
0.00455	-0.00600
0.00918	-0.00963
0.02136	-0.01592
0.03812	-0.02200
0.05940	-0.02680
0.08512	-0.03100
0.11512	-0.03300

0.14920	-0.03320
0.18710	-0.03300
0.22849	-0.03280
0.27297	-0.03220
0.32010	-0.03200
0.36940	-0.03160
0.42037	-0.03100
0.47246	-0.03060
0.52506	-0.03350
0.57751	-0.03300
0.62924	-0.03200
0.67967	-0.03068
0.72822	-0.02692
0.77431	-0.02313
0.81740	-0.01938
0.85697	-0.01575
0.89253	-0.01231
0.92363	-0.00914
0.94985	-0.00626
0.97091	-0.00369
0.98661	-0.00163
0.99655	-0.00039
	1 0.00000

Datasheet rediseño 5

REDISEÑO 5					
Eje x	Eje y				
1	0.00000	0.18281	0.06933	0.14920	-0.03320
0.99643	0.00010	0.14799	0.06584	0.18710	-0.03300
0.98604	0.00067	0.11636	0.06076	0.22849	-0.03280
0.96948	0.00192	0.08817	0.05435	0.27297	-0.03220
0.94720	0.00366	0.06366	0.04682	0.32010	-0.03200
0.91936	0.00580	0.04296	0.03836	0.36940	-0.03160
0.88624	0.00850	0.02618	0.02925	0.42037	-0.03100
0.84838	0.01190	0.01339	0.01987	0.47246	-0.03060
0.80639	0.01600	0.00471	0.01069	0.52506	-0.03030
0.76089	0.02079	0.00214	0.00668	0.57751	-0.03000
0.71259	0.02616	0.00097	0.00421	0.62924	-0.02900
0.66217	0.03201	0.00024	0.00190	0.67967	-0.02868
0.61035	0.03816	0.00002	0.00046	0.72822	-0.02500
0.55780	0.04439	0.00006	-0.00086	0.77431	-0.02230
0.50520	0.05050	0.00044	-0.00214	0.81740	-0.01938
0.45319	0.05623	0.00112	-0.00330	0.85697	-0.01575
0.40235	0.06133	0.00260	-0.00450	0.89253	-0.01231
0.35322	0.06557	0.00455	-0.00600	0.92363	-0.00914
0.30629	0.06871	0.00918	-0.00963	0.94985	-0.00626
0.26199	0.07055	0.02136	-0.01592	0.97091	-0.00369
0.22076	0.07088	0.03812	-0.02200	0.98661	-0.00163
		0.05940	-0.02680	0.99655	-0.00039
		0.08512	-0.03100		
		0.11512	-0.03300	1	0.00000

ANEXOS 3

A continuación, se ven los datos tomados para hacer la predicción de temperaturas de la base meteorológica SKBO 802220 desde el año 1980 hasta el año 2016.

	R(J/Kg*K)	MES	T°(K)	P(Pa)	ρ (Kg/m ³)	T(C°)
1980	287	Enero	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Febrero	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Marzo	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Abril	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Mayo	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Junio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Julio	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Agosto	285,25	75150	0,91795509	12,1
	287	Septiembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Octubre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Noviembre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Diciembre	285,55	75150	0,91699068	12,4
1981	287	Enero	284,85	75150	0,91924413	11,7
	287	Febrero	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Marzo	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Abril	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Mayo	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Junio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Julio	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Agosto	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Septiembre	285,85	75150	0,9160283	12,7
	287	Octubre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Diciembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
1982	287	Enero	285,55	75150	0,91699068	12,4
	287	Febrero	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Marzo	286,75	75150	0,91315323	13,6

	287	Abril	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Mayo	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Junio	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Julio	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Agosto	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Septiembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Octubre	285,85	75150	0,9160283	12,7
	287	Noviembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Diciembre	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Enero	284,95	75150	0,91892153	11,8
	287	Febrero	288,25	75150	0,90840135	15,1
	287	Marzo	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Abril	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Mayo	287,55	75150	0,91061273	14,4
	287	Junio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Julio	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Agosto	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Septiembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Octubre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Noviembre	286,15	75150	0,91506794	13
1983	287	Diciembre	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Enero	285,25	75150	0,91795509	12,1
	287	Febrero	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Marzo	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Abril	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Mayo	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Junio	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Julio	285,45	75150	0,91731193	12,3
	287	Agosto	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Septiembre	285,65	75150	0,91666967	12,5
	287	Octubre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Noviembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
1984	287	Diciembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Enero	285,65	75150	0,91666967	12,5
	287	Febrero	284,75	75150	0,91956695	11,6
	287	Marzo	286,75	75150	0,91315323	13,6
1985	287	Abril	286,85	75150	0,9128349	13,7

	287	Mayo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Junio	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Julio	285,65	75150	0,91666967	12,5
	287	Agosto	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Septiembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Octubre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Noviembre	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Diciembre	285,55	75150	0,91699068	12,4
	287	Enero	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Febrero	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Marzo	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Abril	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Mayo	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Junio	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Julio	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Agosto	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Septiembre	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Octubre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Noviembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
1986	287	Diciembre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Enero	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Febrero	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Marzo	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Abril	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Mayo	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Junio	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Julio	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Agosto	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Septiembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Octubre	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
1987	287	Diciembre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Enero	285,85	75150	0,9160283	12,7
	287	Febrero	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Marzo	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Abril	286,95	75150	0,91251678	13,8
1988	287	Mayo	286,85	75150	0,9128349	13,7

	287	Junio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Julio	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Agosto	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Septiembre	285,65	75150	0,91666967	12,5
	287	Octubre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Noviembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Diciembre	285,05	75150	0,91859916	11,9
	287	Enero	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Febrero	285,65	75150	0,91666967	12,5
	287	Marzo	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Abril	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Mayo	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Junio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Julio	285,85	75150	0,9160283	12,7
	287	Agosto	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Septiembre	285,85	75150	0,9160283	12,7
	287	Octubre	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Noviembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
1989	287	Diciembre	285,45	75150	0,91731193	12,3
	287	Enero	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Febrero	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Marzo	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Abril	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Mayo	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Junio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Julio	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Agosto	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Septiembre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Octubre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
1990	287	Diciembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Enero	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Febrero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Marzo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Abril	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Mayo	287,35	75150	0,91124653	14,2
1991	287	Junio	287,75	75150	0,90997981	14,6

	287	Julio	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Agosto	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Septiembre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Octubre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Noviembre	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Diciembre	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Enero	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Febrero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Marzo	287,75	75150	0,90997981	14,6
	287	Abril	288,15	75150	0,90871661	15
	287	Mayo	287,55	75150	0,91061273	14,4
	287	Junio	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Julio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Agosto	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Septiembre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Octubre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Noviembre	286,15	75150	0,91506794	13
1992	287	Diciembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Enero	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Febrero	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Marzo	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Abril	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Mayo	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Junio	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Julio	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Agosto	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Septiembre	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Octubre	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
1993	287	Diciembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Enero	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Febrero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Marzo	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Abril	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Mayo	287,45	75150	0,91092952	14,3
	287	Junio	286,95	75150	0,91251678	13,8
1994	287	Julio	286,45	75150	0,91410958	13,3

	287	Agosto	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Septiembre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Octubre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Noviembre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Diciembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Enero	285,45	75150	0,91731193	12,3
	287	Febrero	285,55	75150	0,91699068	12,4
	287	Marzo	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Abril	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Mayo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Junio	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Julio	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Agosto	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Septiembre	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Octubre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Noviembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
1995	287	Diciembre	285,15	75150	0,91827701	12
	287	Enero	284,55	75150	0,92021328	11,4
	287	Febrero	285,85	75150	0,9160283	12,7
	287	Marzo	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Abril	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Mayo	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Junio	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Julio	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Agosto	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Septiembre	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Octubre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Noviembre	286,15	75150	0,91506794	13
1996	287	Diciembre	285,65	75150	0,91666967	12,5
	287	Enero	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Febrero	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Marzo	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Abril	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Mayo	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Junio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Julio	286,75	75150	0,91315323	13,6
1997	287	Agosto	286,45	75150	0,91410958	13,3

	287	Septiembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Octubre	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Diciembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Enero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Febrero	287,75	75150	0,90997981	14,6
	287	Marzo	288,25	75150	0,90840135	15,1
	287	Abril	288,25	75150	0,90840135	15,1
	287	Mayo	287,45	75150	0,91092952	14,3
	287	Junio	287,35	75150	0,91124653	14,2
	287	Julio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Agosto	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Septiembre	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Octubre	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Noviembre	287,05	75150	0,91219888	13,9
1998	287	Diciembre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Enero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Febrero	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Marzo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Abril	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Mayo	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Junio	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Julio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Agosto	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Septiembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Octubre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Noviembre	286,85	75150	0,9128349	13,7
1999	287	Diciembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Enero	285,35	75150	0,9176334	12,2
	287	Febrero	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Marzo	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Abril	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Mayo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Junio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Julio	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Agosto	286,05	75150	0,91538783	12,9
2000	287	Septiembre	285,85	75150	0,9160283	12,7

	287	Octubre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Noviembre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Diciembre	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Enero	285,15	75150	0,91827701	12
	287	Febrero	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Marzo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Abril	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Mayo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Junio	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Julio	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Agosto	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Septiembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Octubre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
2001	287	Diciembre	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Enero	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Febrero	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Marzo	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Abril	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Mayo	287,95	75150	0,90934777	14,8
	287	Junio	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Julio	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Agosto	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Septiembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Octubre	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Noviembre	286,75	75150	0,91315323	13,6
2002	287	Diciembre	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Enero	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Febrero	287,45	75150	0,91092952	14,3
	287	Marzo	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Abril	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Mayo	287,45	75150	0,91092952	14,3
	287	Junio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Julio	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Agosto	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Septiembre	286,05	75150	0,91538783	12,9
2003	287	Octubre	286,55	75150	0,91379058	13,4

	287	Noviembre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Diciembre	286,15	75150	0,91506794	13
2004	287	Enero	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Febrero	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Marzo	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Abril	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Mayo	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Junio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Julio	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Agosto	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Septiembre	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Octubre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Diciembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
2005	287	Enero	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Febrero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Marzo	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Abril	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Mayo	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Junio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Julio	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Agosto	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Septiembre	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Octubre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Noviembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Diciembre	285,75	75150	0,91634887	12,6
2006	287	Enero	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Febrero	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Marzo	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Abril	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Mayo	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Junio	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Julio	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Agosto	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Septiembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Octubre	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Noviembre	286,35	75150	0,91442881	13,2

	287	Diciembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Enero	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Febrero	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Marzo	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Abril	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Mayo	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Junio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Julio	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Agosto	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Septiembre	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Octubre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Noviembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
2007	287	Diciembre	285,85	75150	0,9160283	12,7
	287	Enero	285,75	75150	0,91634887	12,6
	287	Febrero	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Marzo	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Abril	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Mayo	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Junio	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Julio	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Agosto	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Septiembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Octubre	285,65	75150	0,91666967	12,5
	287	Noviembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
2008	287	Diciembre	285,95	75150	0,91570796	12,8
	287	Enero	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Febrero	286,05	75150	0,91538783	12,9
	287	Marzo	286,15	75150	0,91506794	13
	287	Abril	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Mayo	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Junio	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Julio	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Agosto	287,35	75150	0,91124653	14,2
	287	Septiembre	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Octubre	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Noviembre	287,15	75150	0,91188121	14
2009	287	Diciembre	286,55	75150	0,91379058	13,4

	287	Enero	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Febrero	287,65	75150	0,91029616	14,5
	287	Marzo	287,85	75150	0,90966368	14,7
	287	Abril	287,75	75150	0,90997981	14,6
	287	Mayo	287,85	75150	0,90966368	14,7
	287	Junio	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Julio	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Agosto	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Septiembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Octubre	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Noviembre	286,65	75150	0,91347179	13,5
2010	287	Diciembre	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Enero	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Febrero	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Marzo	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Abril	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Mayo	287,65	75150	0,91029616	14,5
	287	Junio	287,55	75150	0,91061273	14,4
	287	Julio	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Agosto	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Septiembre	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Octubre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Noviembre	286,85	75150	0,9128349	13,7
2011	287	Diciembre	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Enero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Febrero	286,25	75150	0,91474826	13,1
	287	Marzo	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Abril	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Mayo	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Junio	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Julio	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Agosto	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Septiembre	286,35	75150	0,91442881	13,2
	287	Octubre	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Noviembre	286,85	75150	0,9128349	13,7
2012	287	Diciembre	286,45	75150	0,91410958	13,3
2013	287	Enero	286,65	75150	0,91347179	13,5

	287	Febrero	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Marzo	287,35	75150	0,91124653	14,2
	287	Abril	287,55	75150	0,91061273	14,4
	287	Mayo	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Junio	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Julio	286,45	75150	0,91410958	13,3
	287	Agosto	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Septiembre	287,05	75150	0,91219888	13,9
	287	Octubre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Noviembre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Diciembre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Enero	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Febrero	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Marzo	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Abril	287,45	75150	0,91092952	14,3
	287	Mayo	287,35	75150	0,91124653	14,2
	287	Junio	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Julio	286,85	75150	0,9128349	13,7
	287	Agosto	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Septiembre	286,75	75150	0,91315323	13,6
	287	Octubre	286,95	75150	0,91251678	13,8
	287	Noviembre	286,95	75150	0,91251678	13,8
2014	287	Diciembre	286,65	75150	0,91347179	13,5
	287	Enero	286,55	75150	0,91379058	13,4
	287	Febrero	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Marzo	287,45	75150	0,91092952	14,3
	287	Abril	287,65	75150	0,91029616	14,5
	287	Mayo	287,75	75150	0,90997981	14,6
	287	Junio	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Julio	287,15	75150	0,91188121	14
	287	Agosto	287,35	75150	0,91124653	14,2
	287	Septiembre	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Octubre	287,35	75150	0,91124653	14,2
	287	Noviembre	287,05	75150	0,91219888	13,9
2015	287	Diciembre	287,25	75150	0,91156376	14,1
	287	Enero	287,55	75150	0,91061273	14,4
2016	287	Febrero	288,25	75150	0,90840135	15,1

287	Marzo	288,65	75150	0,90714253	15,5
287	Abril	288,15	75150	0,90871661	15
287	Mayo	287,85	75150	0,90966368	14,7
287	Junio	287,15	75150	0,91188121	14