DISEÑAR UN PROTOTIPO PARAMETRIZADO DE UNA TURBINA EÓLICA TIPO MULTIPALAS, PARA AEROGENERACION DE ENERGIA, ENTRE LOS BLOQUES 4 Y 5 DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS (FACULTAD TECNOLÓGICA)

DAVID SNEYDER TORRES URREGO

NESTOR ENRIQUE LINARES MORALES

UNIVERSIDAD FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENÍERIA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2016

DISEÑAR UN PROTOTIPO PARAMETRIZADO DE UNA TURBINA EÓLICA TIPO MULTIPALAS, PARA AEROGENERACION DE ENERGIA, ENTRE LOS BLOQUES 4 Y 5 DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS (FACULTAD TECNOLÓGICA)

DAVID SNEYDER TORRES URREGO

NESTOR ENRIQUE LINARES MORALES

MONOGRAFÍA

CAMILO ANDRES ARIAS HENAO

Director

UNIVERSIDAD FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENÍERIA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2016

LISTA DE SIMBOLOS

P	Potencia [W]
ρ	Densidad [kg/m3]
A	Área de barrido [m2]
Cp.	Coeficiente de potencia [-]
TSR o λ	Velocidad especifica o tangencial [-]
V	Velocidad del viento [m/s]
r	Radio del generador [m]
n	Revoluciones por minuto [RPM]
D	Diámetro del rotor [m]
T	Torque [Nm]
F	Fuerza [N]
Pd	Potencia de diseño [W]
Pmax	Potencia máxima [W]
Cm	Coeficiente de potencia par [-]
w	Velocidad angular [rad/s]
FL	Fuerza de sustentación [N]
FD	Fuerza de arrastre [N]
Re	Reynolds [-]
ϑ	Viscosidad cinemática [m2/s]
l	Longitud de la cuerda [m]
Faerod.	Fuerza aerodinámica [Kg]

CONTENIDO

		Pág.
-	INTRODUCCIÓN	-
1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1	ESTADO DEL ARTE.	2
1.1.1	Turbinas eólicas de eje horizontal paralelo al viento (TEEH)	4
1.1.2	Turbinas eólicas en Latinoamérica	10
1.2	JUSTIFICACIÓN	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVOS GENERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
3	MARCO TEORICO	14
3.1	ASPECTOS TECNICOS Y TEORICOS	14
3.1.1	Estudio del viento en la Facultad tecnologica	14
3.1.2	Túnel del viento en la Facultad Tecnológica	17
3.1.2.1	Clasificación	18
3.1.2.2	Composición general del túnel de viento en el cual se realiza las pruebas	19
3.1.3	La ley de BETZ para determinación de potencial de energía cinética en rotor	21
3.1.4	Selección del perfil de un alabe	25
4	METODOLOGÍA	27
4.1	IDENTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPIPOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS	27
4.2	ESTABLECIMIENTO DEL CASO AERODINÁMICO A TRABAJAR	27

4.3	VALORACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RECURSO EÓLICO	27
4.4	CARACTERIZACION DE LAS HELICES	27
4.5	CALCULO Y DISEÑO DE LA HELICE OPTIMA	28
4.6	FABRICACION DEL PROTOTIPO A ESCALA	28
4.7	PRUEBAS DEL PROTOTIPO	28
5.	DISEÑO DEL AEROGENERADOR	29
5.1	SELECCIÓN DEL PERFIL DEL AEROGENERADOR	30
5.2	PERFIL DE LA PALA	32
5.3	PRUEBAS TUNEL DEL VIENTO	
5.4		
5.5	ANALISIS	
5.6	TORRES DE SUSTENTACION	69
5.7	TORRES DE SUSTENTACION	70
6.	ESTIMACION DE COSTOS	
7	CONCLUSINES	74
8	BIBLIOGRAFIA	73
9	ANEXOS	75

ÍNDICE DE TABLAS

			Pág.
Tabla 1	Sistema de clasificación para turbinas eólicas (EWEA)	➢ wind-energy-the-facts.org	7
Tabla 2	Clasificación de las turbinas pequeñas (SWT)	➢ ciemat.es/	7
Tabla 3	Velocidad media horario de la tarde, estación de la universidad distrital.	➢ Lugo Daniel – Bejarano Laura (2015). (Tesis) Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de 60 watts, para el suministro de energía en zonas urbanas.	36
Tabla 4	Áreas de contacto a diferentes ángulos de ataque	➢ Fuente: Autores	70
Tabla 5	Inclinación a 15 grados	➢ Fuente: Solidworks	71
Tabla 6	Inclinación a 30 grados	➢ Fuente: Solidworks	72
Tabla 7	Inclinación a 45 grados	➢ Fuente: Solidworks	74
Tabla 8	Ventajas y desventajas en torres de sustentación	➢ Fuente: Autores	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1	Capacidad y proyección de energía eólica	➢ jewishpolicycenter.org	1
Figura 2	Países que han ratificado el tratado IRENA	➢ irena.org	2
Figura 3	Países y regiones generadores de energía eólica	➢ wwindea.org	2
Figura 4	Parque eólico Jepírachi	➢ epm.com	2
Figura 5	Parque velocidad media del viento	➢ upme.gov	2
Figura 6	Lugares con mayor potencial eólico	➢ upme.gov	2
Figura 7	Granja eólica Tasmania	➢ wwindea.org	3
Figura 8	Turbina eólica eje vertical tipo Diarreus	➢ gstriatum.com	4
Figura 9	Turbina eólica eje vertical tipo tripala LOS-H 500W	➢ ge-t.ch/es	5
Figura 10	Curva de potencia	➢ ge-t.ch/es	5

Figura 11	Aerogenerador tipo tripala Anelion SW3.5	➢ anelion.com	6
Figura 12	Curva de potencia	➢ . anelion.com	7
Figura 13	Aerogenerador tipo multipalas Ampair 100	➢ ampair.com	7
Figura 14	Curva de potencia	➢ ampair.com	8
Figura 15	Aerogenerador de eje horizontal Silentwind	➢ silentwindgenerator.com	9
Figura 16	Curva de potencia	➢ silentwindgenerator.com	9
Figura 17	Vista aérea Universidad Distrital	➢ Google Earth	14
Figura 18	Datos de los sensores externos de las estaciones meteorológicas	➢ Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogotá	15
Figura 19	Distribución de velocidades para cada dirección correspondiente al mes de mayo de 2009	➢ Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogotá	15
Figura 20	Comportamiento de la velocidad del viento para 4 días del mes de mayo de la Estación A	➢ Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS*	16

		BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA. Bogotá	
Figura 21	Rosa de los vientos en porcentaje de tiempo para el mes de mayo de 2009, Estación A (Izquierda) y Estación B (Derecha)	➢ Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogotá	16
Figura 22	Rosa de los vientos en porcentaje de velocidad media para el mes de mayo de 2009, Estación A (Izquierda) y Estación B (Derecha).	➢ Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogotá	17
Figura 23	Túnel de viento abierto (Izquierda) y cerrado (Derecha).	➢ wikipedia.org	18
Figura 24	Tipo de túneles aerodinámicos por la velocidad.	➢ Wikipedia.org	19
Figura 25	Túnel del viento	➢ Vargas Guarnizo Mónica - Gonzales Sánchez José (2008). (Tesis) *diseño y construcción de un banco de pruebas didáctico para caracterizar el comportamiento del aire sobre un cuerpo sometido a*	19

		diferentes velocidades de flujo. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá.	
Figura 26	Velocidad y caudal en cada posición	➢ Vargas Guarnizo Mónica - Gonzales Sánchez José (2008). (Tesis) *diseño y construcción de un banco de pruebas didáctico para caracterizar el comportamiento del aire sobre un cuerpo sometido a diferentes velocidades de flujo*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá	20
Figura 27	Dimensiones y velocidades en cada zona	➢ Vargas Guarnizo Mónica - Gonzales Sánchez José (2008). (Tesis) *diseño y construcción de un banco de pruebas didáctico para caracterizar el comportamiento del aire sobre un cuerpo sometido a diferentes velocidades de flujo*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá	21
Figura 28	Velocidad antes y después de pasar una turbina eólica.	➢ Wikipedia.org	21
Figura 29	Potencia extraída del aire.	➢ /power/alumno03	22
Figura 30	Distintos CP. Máximos para aerogeneradores.	➢ Cp. Máximos	24
Figura 31	Curva límite de Betz, para aerogeneradores.	➢ 2Festudio-diseno-aerodinamico	24
Figura 32			25

	Fuerzas que actúan sobre un perfil alar	➢ . Tesis Optimización del Diseño Aerodinámico de un Alabe de Turbina de Viento por el Método del Elemento Finito Caso Holbox Quintana Roo [Consultado 3 de junio de 2014]. Universidad Michoacán y San Nicolás de Hidalgo	
Figura 33		➢ wikipedia.org	26
Figura 34	Partes de un perfil alar	➢ (VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001).	31
Figura 35	Variación del coeficiente de potencia (Cp.) frente a la velocidad especifica () para distintos tipos de aerogeneradores. NACA 23012.	➢ NACA 23012. Fuente: Wikipedia.com [en línea] Perfil alar [Consultado el 01 de noviembre de 2014] Disponible en Internet en http://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar.	33
Figura 36	Partes de un perfil alar	➢ . Fuente: Wikipedia.com [en línea] Perfil alar [Consultado el 01 de noviembre de 2014] Disponible en Internet en http://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar.	33
Figura 37	Forma de pala.	➢ Fuente: Wind turbines (HAU Erich)	34
Figura 38	Forma de la pala.	➢ Fuente: Wind turbines (HAU Erich)	34
Figura 39	Forma de la pala.	➢ Fuente: Wind turbines (HAU Erich)	35
Figura 40			35

Figura 41	División de una pala.	➢ Fuente: Wikipedia.com [en línea] (http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf)	36
Figura 42	Coeficientes de arrastré y de sustentación.	➢ Fuente: (http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf)	36
Figura 43	Valores de Sp en función de SR.	➢ Fuente: (http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf)	37
Figura 44	Familia Cinco dígitos	➢ Fuente: Carmona, A. (1999). Aerodinámica y Actuaciones del Avión, p. 79. Madrid: Thomson-Paraninfo.	38
Figura 45	Airfoil tools	➢ Fuente: Airfoil tools. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23012-il.	38
Figura 46	Airfoil tools	➢ Fuente: Airfoil tools. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23012-il.	39
Figura 47	Airfoil tools	➢ Fuente: Airfoil tools. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23012-il.	40
Figura 48	Airfoil tools	➢ Fuente: Airfoil tools. http://airfoiltools.com/airf	40

		oil/details?airfoil=naca23012-il	
Figura 49	Excel 2016.	➢ Fuente Autores Excel 2016.	41
Figura 50	Excel 2016.	➢ Fuente Autores Excel 2016.	41
Figura 51	Excel 2016.	➢ Fuente Autores	42
Figura 52		➢ Fuente Autores	42
Figura 53	Excel 2016.	➢ Fuente Autores	43
Figura 54	Excel 2016.	➢ Fuente Autores	43
Figura 55	Excel 2016.	➢ Fuente Autores, longitud del alabe generando 49 planos, solidworks	44
Figura 56	Solidworks	➢ Fuente Autores, longitud del alabe curvas guía, Solidworks	45
Figura 57	Solidworks	➢ Fuente Autores, perfil sólido, solidworks	45
Figura 58	Solidworks	➢ Fuente Autores, perfil, solidworks	46
Figura 59	Solidworks	➢ Fuente Autores, perfil, solidworks	46
Figura 60	Solidworks	➢ Fuente Autores, cabezal, solidworks	47
Figura 61	Solidworks	➢ Fuente Autores, cabezal, solidworks	47
Figura 62	Solidworks	➢ Fuente Autores, cabezal, solidworks	47
Figura 63	Solidworks	➢ Fuente Autores, cabezal, solidworks	48
Figura 64	Solidworks	➢ Fuente Autores, cabezal, solidworks	48

Figura 65	Solidworks	➢ Fuente Autores, cabezal, solidworks	48
Figura 66	Solidworks	➢ Fuente Autores, indicador de ángulo, solidworks	49
Figura 67	Solidworks	➢ Fuente Autores, indicador de ángulo, solidworks	49
Figura68	Solidworks	➢ Fuente Autores, indicador de ángulo, solidworks	49
Figura 69	Solidworks	➢ Fuente Autores, ensamble prototipo, solidworks	50
Figura 70	Solidworks	➢ Fuente Autores, ensamble prototipo, solidworks	50
Figura 71	ensamble alabes	➢ Fuente Autores, ensamble alabes, solidworks	51
Figura 72	ensamble alabes	➢ Fuente Autores, ensamble alabes, solidworks	51
Figura 73	prototipadora	➢ Fuente prototipadora dimensión 1200, https://www.google.es/#q=prototipadora+1200+es	52
Figura 74	Prototipadora	➢ Fuente prototipadora dimensión 1200, https://www.google.es/#	52

		g=prototipadora+1200+es	
Figura 75	Prototipo de los alabes	➢ Fuente autores, Prototipo de los alabes	53
Figura 76	Prototipo del aerogenerador	➢ Fuente autores, Prototipo del aerogenerador.	54
Figura 77	Acoples de sujeción a túnel del viento.	➢ Fuente autores, Acoples de sujeción a túnel del viento.	55
Figura 78	Túnel de viento Universidad Nacional de Colombia.	➢ Fuente autores, Túnel de viento Universidad Nacional de Colombia.	56
Figura 80	Implementos que componen el túnel de viento	➢ Fuente autores, Implementos que componen el túnel de viento.	57
Figura 81	zonas de ensayos túnel de viento	➢ Fuente autores, zonas de ensayos túnel de viento	58
Figura 82	. Ensayo perfil alar túnel de viento	➢ Fuente autores	
Figura 83 y 84	Simulación de velocidad mediante elementos finitos.	➢ Solidworks-Autores	
Figura 85 y 86	Simulación de velocidad y presión mediante elementos finitos. Solidworks-Autores	➢ Solidworks-Autores	
Figura 87		➢ Solidworks-Autores	

Figura 88	Ensayo perfil alar túnel de viento.	➢ Solidworks-Autores
Figura 89	Simulación de velocidad mediante elementos finitos.	➢ Solidworks-Autores
Figura 90	Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 91	Simulación de presión mediante elementos finitos.	➢ Solidworks-Autores
Figura 93	Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 94	Simulación de presión mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 95	Ensayo perfil alar túnel de viento.	➢ Solidworks-Autores
Figura 96	Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 97	Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 98	Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 99	Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 100	Simulación de presión mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores

Figura 101	. Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 102	Simulación de velocidad mediante elementos finitos	➢ Solidworks-Autores
Figura 103	Simulación de velocidad mediante elementos finitos Torre tubular y celosía, Energía eólica	➢ (Fernández Diez 2007)
Figura 104	Construcciones antiguas para la fabricación de palas	➢ Fuente (Fernández Diez 2007)
Figura 105	Construcciones modernas para la fabricación de palas	➢ Fuente (Fernández Diez 2007)

RESUMEN

El siguiente proyecto se realizó el diseño de un prototipo a escala de turbina eólica tipo multipala de eje horizontal para la producción de energía eléctrica, a partir de un estudio previo del potencial eólico realizado en la UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS (facultad tecnológica); con estos datos recolectados se definió el número de palas y el tipo de perfil que se utilizara para dicho estudio. Una vez escogido estos factores se procedió a realizar las pruebas correspondientes en el túnel del viento y el análisis por elementos finitos, para observar el comportamiento de dicho perfil; se pretende dejar como conclusión un sistema de diseño con la intención de facilitar futuras aplicaciones de este tipo de turbinas en otros entornos.

Palabras claves: Aerogenerador, cuerda, perfil aerodinámico, numero de palas, eje horizontal, velocidad específica.

ABSTRACT

The next project, the design of a prototype was made at scale wind multiblade type turbine horizontal axis for the production of electricity from a previous study of wind potential conducted at the “UNIVERSIDAD FRANCISCO JOSE DE CALDAS (technological faculty)”; with these collected data the number of blades and the type of profile that was used for this study was defined. Once these factors chosen proceeded to carry out the relevant tests in the wind tunnel and finite element analysis, to observe the behavior of the profile; it is intended to make the conclusion a design system intended to facilitate future applications of this type of turbines in other environments.

Key words: Wind turbine, Rope, Airfoil, number of blades, shaft horizontal, specific speed.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, una de las formas producción energética que ha tenido una fuerte acogida por la comunidad internacional, es aquella que involucra la energía proveniente del viento o conocida mejor como eólica, puesto que representa múltiples ventajas respecto a los métodos convencionales de generación, entre sus virtudes principales se cuenta el impacto casi nulo sobre el ambiente.

La alta demanda energética mundial, ha traído consigo la difusión de la energía eólica como medio de generación, hasta llevarla a una escala macro; lo anterior se hace evidente en la implementación de granjas eólicas a nivel global, con las cuales se pueden obtener altas potencias, incluso con capacidad de satisfacer las necesidades de pequeñas y medianas comunidades. Adicionalmente la implementación de este tipo de energía brinda una gran versatilidad, puesto que se pueden implementar grandes molinos de viento (cuyas producciones oscilan entre 1 y 3 megavatios), hasta pequeños aerogeneradores (entre los 100 y los 500 vatios), con estas pequeñas aplicaciones es posible construir sistemas complementarios a las redes domésticas, contribuyendo con el ahorro de energía e incluso logrando el abastecimiento total de una residencia dependiendo del caso en particular. Su aplicación también es importante en zonas aisladas, para usos de iluminación o satisfacer necesidades básicas en zonas que no cuentan con un fluido eléctrico constante.

Bajo esta perspectiva, la presente propuesta se encamina en encontrar la mejor selección del tipo de aerogenerador, contemplando una búsqueda acerca de las variables que inciden en la eficiencia del mismo y la geometría del perfil alar que más se acomode a las condiciones iniciales de diseño como lo son el estudio del potencial eólico expuesto en la tesis (*DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogota.) Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010).).

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los proponentes han planteado realizar el diseño de una turbina eólica de eje horizontal que permita realizar un avance en la investigación de este tipo de energías en el marco del desarrollo tecnológico en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Del mismo modo en este proyecto se plantea la iniciativa de generar un diseño de turbina multipalar, dadas las investigaciones y estudios recopilados por los proponentes, que se adaptan a las características del potencial eólico analizado en la Universidad Distrital Francisco José De Caldas (Facultad Tecnológica) entre los bloques 4 y 5. Aunque existen diversas soluciones a la misiva de generación eólica urbana, de las cuales se expondrán algunos modelos que tienen como objeto la guía y asentamiento de ideas en el desarrollo del prototipo.

¿Por lo tanto es posible implementar este tipo de aerogeneradores en la universidad Distrital Francisco José de Caldas (Facultad tecnológica) entre los bloques 4 y 5) de acuerdo al potencial eólico suministrado en la tesis (*DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogota.) Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010).

1.1 ESTADO DEL ARTE

Como primera medida es importante destacar que las turbinas eólicas (TE) poseen diversas clasificaciones según sus características: potencia, tamaño, forma, configuración geométrica; aunque para cada país y asociación varía de acuerdo a las diferentes legislaciones. En este orden de ideas, en algunas zonas y países de gran aplicación (de las turbinas eólicas), se han generado una serie de estándares para catalogarlas. A continuación, se presenta el caso europeo:

SCALE	POWER RATING	FEATURE and *R&D ASPECTS*
Micro	Less than 3 kW	Direct drive permanent magnet generators for battery charging
Small	3 kW to 30 kW	Low maintenance and high reliability Permanent magnet generators applied
Large	200 kW to 1.5 MW	Permanent magnet generators and wound-rotor designs applied *Direct drive systems employed* *Variable-speed operation*
Megawatt	> 1.5 MW	*Multi-rotor systems*

Fuente: Sistema de clasificación para turbinas eólicas de la asociación europea de energía eólica (EWEA) [en línea]. [Consultado el 05 de octubre de 2014]. Disponible en Internet en: http://www.wind-energy-the-facts.org/technology.html

En el proceso de categorización de las pequeñas turbinas eólicas (Small wind turbines – SWT), encontramos la siguiente codificación según la norma Europea.

S.No.	Rated Power	Rotor Swept Area	Category
1	$P_{rated} < 1$ kW	$A < 4.9$ m^2	Pico wind
2	1 kW < P_{rated} < 7 kW	$A < 40$ m^2	Micro wind
3	7 kW < P_{rated} < 50 kW	$A < 200$ m^2	Mini wind
4	50 kW < P_{rated} < 100 kW	$A < 300$ m^2	Small wind

Fuente: Clasificación de turbinas eólicas pequeñas (SWT clasificación) [en línea]. CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). [Consultado el 05 de octubre de 2014]. Disponible en Internet en: http://www.ciemat.es/

En la actualidad, Latinoamérica no cuenta con una entidad que reglamente y genere estándares de clasificación respecto al tema del ordenamiento de la energía eólica, por este motivo los estándares de mayor aceptación en el ámbito sudamericano son los reglamentados por la comunidad europea.

Como podemos observar, es importante anotar que las diferentes clasificaciones de las SWT están fundamentadas en la potencia que generan, pero también es significativo anotar para los casos de las potencias altas, que son de alrededor de 100KW este estimativo de pequeñas turbinas se queda un poco subestimado puesto que esta potencia es considerable respecto al consumo de los hogares promedio del país. Es de anotar que estas potencias dependen esencialmente del recurso eólico con el que se cuente (velocidad, continuidad y densidad del viento).

Esencialmente las SWT se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Las turbinas de *eje horizontal* que son aquellas en las cuales el generador y el eje principal del rotor se colocan en la parte superior de la torre de la turbina y debe ser directamente señalado en la dirección del flujo de viento. Se llaman turbinas de eje horizontal porque el eje de rotación del rotor es paralelo a la dirección del flujo de aire y el suelo. Estas abarcan aproximadamente el 70% del total de turbinas instaladas a nivel mundial.



Figura 7: Granja eólica Woolnorth Tasmania, Australia. Tomado de http://www.wwindea.org/home/index.php

- Las turbinas de eje vertical en las cuales el rotor principal de estas se encuentra puesto perpendicularmente con el suelo. La principal ventaja de esta disposición es que es totalmente omnidireccional. No necesita estar orientado hacia el flujo de viento. Se puede capturar cualquier flujo direccional de viento.



Figura 8: Turbinas eólica de eje vertical tipo Diarreus (izquierda) y Savonius (Derecha). Tomado de: http://www.gstriatum.com/energiasolar/2012/06/22/tipos-de-turbinas-eolicas-o-aerogeneradores/

1.1.1 Turbinas eólicas de eje horizontal paralelo al viento (TEEH)

- AEOLOS-H 500W (Reino unido) Figura 9.

  Esta turbina es capaz de generar hasta 1KW de energia eléctrica a una velocidad de 10 m/s, ademas es un equipo que esencialmente no requiere de mantenimiento, aunque el fabricante recomienda revisiones periódicas anuales. Es un dispositivo de fácil instalación y de dimensiones reducidas; cuenta con un generador de imanes permanentes integrado, el cual le permite generar una potencia electrica de 500W a una velocidad nominal de 5 m/s (curva de potencia figura 10); es importante anotar que la potencia que genera podria llegar a cubrir necesidades basicas de un hogar o inclusive llegar a suplir las necesidades energeticas de un hogar pequeño de bajo consumo electrico.

  La salida que ofrece el generador es de 24V DC o de 220V AC luego de pasar por el inversor de potencia. Este módulo ha tenido gran acogida en países tales como China, Japón, Rumania, Brasil y España, donde han tenido una extensa aplicación en el sector de iluminación auto sostenible de calles además su aplicación en viviendas es bastante amplia gracias a sus bajos costos, tanto de adquisición como de mantenimiento. El costo de este equipo oscila entre las 800 y 900 libras esterlinas, lo que equivale a unos 1200 a 1500 dólares americanos.



Figura9: Turbina eólica AEOLOS-H 500W de eje vertical tipo tripala. Tomado de: http://www.ge-t.ch/es/energia-eolica/productos/aeolos-h-500w/1601#.VGLLEvmG8nJ

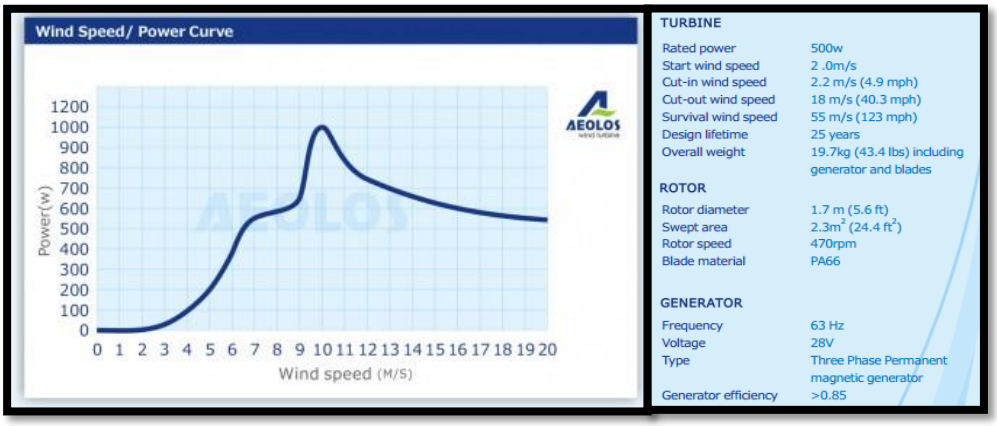


Figura10: Curva de potencia turbina eólica AEOLOS-H 500W de eje vertical tipo tripala. Tomado de: http://www.ge-t.ch/es/energia-eolica/productos/aeolos-h-500w/1601#.VGLLEvmG8nJ

El equipo incorpora un sistema de gestión de la energía, el cual maximiza las prestaciones y eficiencia del sistema, al permitir incorporar más equipos al medio energético; estos equipos son diversos, pero entre ellos se cuentan mecanismos tales como paneles solares micro centrales hidráulicas u otro dispositivo que pueda proporcionar potencia al sistema. El sistema de gestión de la energía, adicionalmente permite equilibrar el sistema de acuerdo a la demanda del usuario; del mismo modo es importante anotar que los diferentes dispositivos de generación eléctrica de baja potencia, ofrecen la posibilidad de conectar baterías a fin de hacer acumulación de la energía para su posterior consumo.

- Anelion SW3.5 Aerogenerador Mini eólica (España) Figura 11.

  Es un aerogenerador de diseño y fabricación española, que tiene como principales propiedades su alto rendimiento bajo regímenes de recurso eólico de los 12 m/s, alcanzando una potencia máxima de 3.5KW, además posee una velocidad de arranque baja del orden de los 3.5 m/s lo q lo hace uno de los aerogeneradores más eficientes del mercado en lo que respecta a equipos de pequeños de alta generación eléctrica. Es un dispositivo que requiere de una torre de izamiento de al menos 10 metros esta con el fin de abarcar zonas con vientos de altas velocidades que a una altura menor sería difícil obtener. Sus componentes principales se encuentran fabricados en epoxi reforzado con fibra de vidrio, lo cual le brinda un balance óptimo entre el peso y la resistencia que requiere el equipo.



Figura11: Anelion SW3.5 Aerogenerador de eje vertical tipo tripala. Tomado de: http://www.anelion.com/TechnicalSpecs/Anelion%20SW3.5-GT_ES.pdf

El conjunto cuenta además con generador de imanes directamente acoplado a el rotor de la turbina, además posee sistemas de frenado, orientación y de potencia que lo hacen un sistema robusto con respecto al lugar de implementación de la unidad.

Las aplicaciones del dispositivo son múltiples y pueden ir desde abastecer una red eléctrica local pequeña de varios hogares e incluso el suministro de energía a negocios de consumo intermedio de energía; del mismo modo es un equipo versátil que permite su conexión directa a la red de suministro local o a una micro red eléctrica aislada, también tiene la posibilidad de ser interconectado a baterías de almacenamiento de entre 24V y hasta los 48V. A continuación, se encuentran la curva de potencia respectiva de la turbina y su capacidad de generación eléctrica anual.

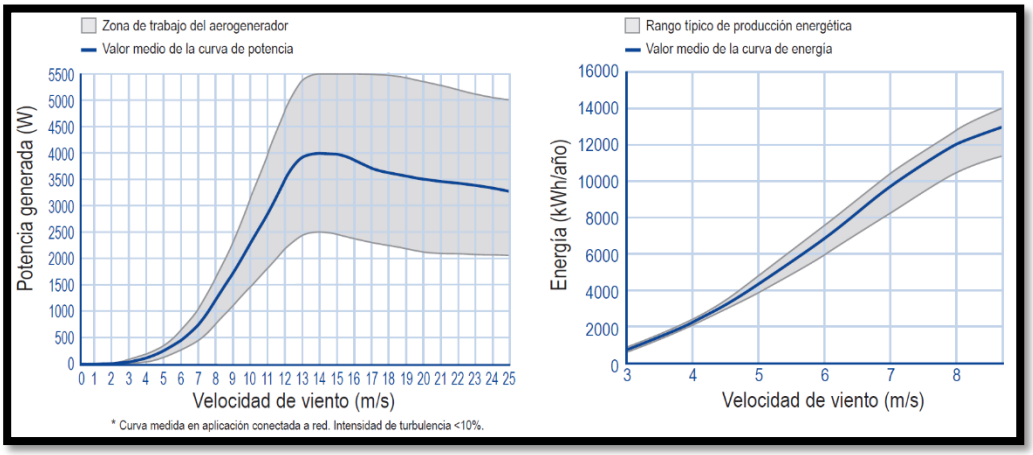


Figura12: Anelion SW3.5 curva generación en W y kWh/año. Tomado de: http://www.anelion.com/TechnicalSpecs/Anelion%20SW3.5-GT_ES.pdf

- Ampair 100 aerogenerador multípalas (Reino Unido) Figura 13.

  Este dispositivo tiene la capacidad de generar hasta 100W a un régimen de vientos de 3 m/s; es un equipo óptimo para pequeñas aplicaciones residenciales o zonas remotas no interconectadas, gracias a su sistema multipalas tiene una de las capacidades más alta de generación eléctrica, a menor velocidad de viento del mercado, puesto que al tener una mayor cantidad de alabes la cantidad de potencial eólico aprovechado es mayor; es un dispositivo de fácil adaptación y no requiere de mantenimiento, gracias a que los componentes de rotación y alineamiento en este son casi nulos y los pocos con los que cuenta son de alta calidad, lo q lo hace un mecanismo de gran adaptación a cualquier condición de aplicación, además de proporcionar una gran rentabilidad al consumidor.



Figura13: Ampair 100 aerogenerador tipo multípalas. Tomado de: http://www.ampair.com/wind-turbines/ampair-100

El sistema Ampair 100 es de gran versatilidad puesto que la posibilidad de interconectar varios sistemas de turbinas es posible, además ofrece la posibilidad de acoplarse con diferentes equipos, ya sean paneles solares u otros sistemas de generación eléctrica, esto gracias a q el fabricante ofrece reguladores acopladores de potencia, los cuales permiten recibir la potencia

generada por los diferentes estamentos del sistema y acoplar este régimen de generación a las diferentes necesidades del usuario. Resaltamos el hecho de que siempre está disponible en estos equipos, la posibilidad de hacer acumulación de la energía en baterías con el fin de tener flujo energético constante y no depender siempre del recurso eólico disponible. Finalmente se presenta la curva de potencia y las especificaciones de la micro turbina.

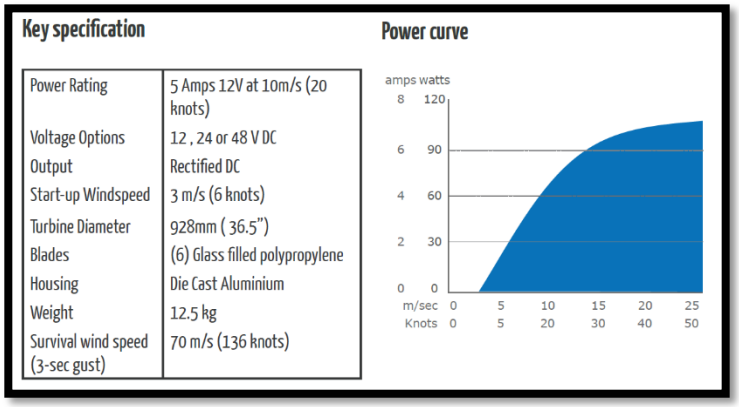


Figura14: Ampair 100 especificaciones-curva de potencia. Tomado de: http://www.ampair.com/wind-turbines/ampair-100

- Silentwind (Portugal-Alemania) Figura 15.

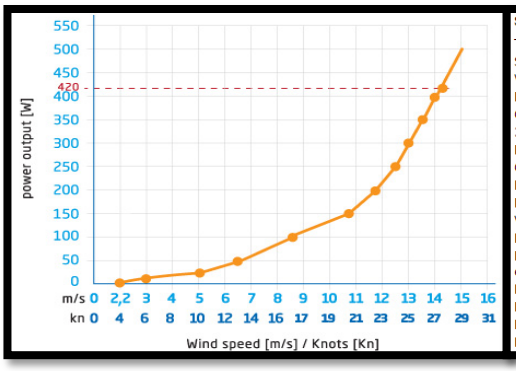
Es un generador de viento de 12 voltios en su modelo básico, pero también está pensado para trabajar a voltajes de 24V y 48V según sea la aplicación para la cual se va a utilizar. Ejemplifica la evolución del diseño de la turbina de viento, cuenta con una cabeza ligera que combinada con sus cuchillas de fibra de carbono de alta tecnología, ofrecen un producto sencillo pero fiable; puede soportar desde ambientes marinos rigurosos hasta ambientes urbanos de menor exigencia con fiabilidad sin fin. Es un generador silencioso y esto hace que tenga una extensa aplicación en zonas urbanas donde las limitantes legales pueden llegar a descartar muy buenos equipos pero que pueden exceder los límites auditivos en zonas urbanas.

El control y gestión de la energía se lleva a cabo a través de un controlador montado de forma remota que se puede ajustar para dirigir diferentes equipos ya sean baterías turbinas paneles u otros diversos tipos de equipo de generación eléctrica. La potencia máxima de apagado y reinicio de secuencia también son programables. Indicadores de estado proporcionan al operador amplios datos sobre el rendimiento de la turbina, incluyendo voltaje de la batería, la corriente en amperios-hora de producción, etc. Además, este controlador ofrece una función híbrida que permite hasta 150 vatios de paneles solares para ser interconectados.



Figura15: Silentwind. Aerogenerador de eje horizontal. Tomado de: http://www.silentwindgenerator.com/en/windgenerator-silentwind/windgenerator-12v

Su diseño ha sido optimizado en túneles de viento, lo cual genera una alta fiabilidad en el diseño aerodinámico del dispositivo; además cuenta con un generador de imanes permanentes el cual arroja una potencia de salida de hasta 420 vatios. Adicionalmente presenta muy buen rendimiento en la puesta en marcha, debido a que la velocidad de arranque está en el orden de los 2.2 m / s. Su aplicación podría denotarse como universal, dado que presenta buen rendimiento para bajas, medias y altas velocidades de viento. Los alabes del módulo son construidos en fibra de carbono resistente a los rayos UV y ha sido probada con éxito según la norma DIN EN 61400-2 a velocidad huracán 122 kph (5480 rpm, con casi la velocidad del sonido en las puntas de las palas). Su mantenimiento es duradero y de bajo costo, esto porque los componentes tanto del controlador y externos son de alta calidad. A continuación, se presenta la curva de potencia del equipo y sus especificaciones.



Silentwind Especificaciones de aerogeneradores:

Tensión nominal	12V DC
Salida nominal	420 W
Velocidad del viento nominal	32,4 mph (14,5 m / s)
Puesta en marcha	4,9 mph (2.2 m / s)
Control de seguridad	75 mph (122 km / h) "túnel de viento"
3-Fase Generador sin escobillas de imán de neodimio	
Diámetro del rotor	46 "(1,15 m)
Cuchillas	3
Peso de Blade	5,3 oz (150 g) por blade
Material de la lámina CFK Mano laminado	
Velocidad de rotación	550 - 1700 rpm
Peso del Generador	15 libras (6,8 kg)
La carcasa completa está hecha de aluminio en condiciones de navegar y con recubrimiento en polvo	
Diámetro de mástil	48 mm - 54 mm
Dimensión del embalaje	31 "x 16" x 8.3 "(740 × 370 × 220 mm)
Peso total	22 libras (10 kg)
Proceso de frenado	Electrónicamente más interruptor de parada manual

Figura16: Silentwind especificaciones-curva de potencia. Tomado de: http://www.silentwindgenerator.com/en/windgenerator-silentwind/windgenerator-12v

1.1.2 Turbinas eólicas en Latinoamérica

Durante los últimos años, la energía eólica ha encontrado una buena aceptación en América Latina, esto principalmente a escala de utilidad de generación energética, es decir los equipos instalados principalmente son equipos de alta generación eléctrica (superiores a 1 megavatio), a fin de obtener dividendos provenientes de la comercialización de la energía.

A pesar de que el incremento de la industria eólica ha sufrido cierto desaceleramiento durante el año anterior, su recepción a seguido imponiéndose principalmente en países latinoamericanos (Sudamérica, Centroamérica y el caribe), donde el recurso eólico es copioso y las zonas de implementación son abundantes (especialmente zonas costeras). Con el fin de promover el desarrollo eólico se han propuesto diversos proyectos para continuar su expansión.

Debido a la naturaleza del mercado que abarca cada zona, los fabricantes han diseñado medidas basadas según la capacidad de instalación, teniendo diversas gamas de equipos, desde medianas a grandes turbinas. Donde se hace posible la implementación de pequeñas turbinas eólicas, se han realizado estudios de viabilidad midiendo los ingresos del fabricante y las utilidades que esta genera para el comerciante.

Los incentivos más grandes para el mercado eólico en América Latina se destacan en:

- Incremento en la demanda de energía en América Latina.
- Esfuerzos por disminución en la emisión.
- Aumento en la capacidad de generación de las turbinas eólicas.
- Éxito de proyectos en América Latina, como también en el ámbito mundial.

Factores que todavía podrían restringir el crecimiento del mercado son:

- Problemáticas con el financiamiento de proyectos eólicos en América Latina (alianzas público-privadas).
- Altos costos en infraestructura; que se incrementan debido al costo de instalaciones de este tipo.
- Competencia con otras energías renovables más económicas que requieren de menor infraestructura o las necesidades son bajas (demanda energética).
- Planes gubernamentales que incentivan la utilización del gas natural.

En el continente americano los únicos países manufactureros de turbinas eólicas de pequeña, mediana y gran escala son los Estados Unidos y Canadá; en la

zona latinoamericana aun ninguno de sus miembros cuenta con compañías constructoras de este tipo de equipos; solo se encuentran empresas dispuestas como franquicias de grandes productores europeos tales como Enercon, Nordex, Siemenes, Vegnet y Vestas, asimismo se llevan a cabo convenios directos de estas, con grandes compañías de generación y distribución de energía. Es el caso de la empresa nacional EPM, que en contratación directa con la firma Nordex llevaron a consecución el parque eólico Jepirachi ubicado en la alta Guajira colombiana.

1.2 JUSTIFICACION

La propuesta de este proyecto se encaminará en generar un diseño y prototipo de turbina eólica tipo multipalas, orientado a los datos arrojados por la investigación (Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogota:); aunque no se han realizado estudios correspondientes sobre diseños y prototipos de aerogeneradores de eje horizontal, se buscara obtener variables de diseño que inciden en mejorar la eficiencia de este tipo de turbina, generar simulaciones en software para evaluar su eficiencia, en tipologías de espacio, diámetro, dimensión y velocidad, acoplándolos a los parámetros establecidos por dicho estudio.

Al mismo tiempo diseñara un prototipo del aerogenerador para analizar el comportamiento de las líneas de flujo que inciden sobre el perfil alar y hacer la comparación con lo obtenido en las simulaciones obtenidas por el software. Se buscará un avance respecto a la ejecución de este tipo de turbinas en los ambientes de la universidad, así como propiciar futuros desarrollos y evaluaciones en diversos lugares donde la implementación sea viable.

Con este proyecto se pretende dar un paso más hacia la proyección de la energía eólica como fuente de generación, y pueda ser implementada a futuro en las edificaciones de gran altura y zonas de bajas concentraciones de vientos de la universidad o del ambiente que se requiera.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una turbina eólica tipo multipalas, para aerogeneración de energía, entre los bloques 4 y 5 de la Universidad Distrital Francisco José De Caldas; sede (Facultad tecnológica).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer cuáles son las variables principales que inciden en la eficiencia aerodinámica del aerogenerador a bajas velocidades de viento.
- Diseñar una turbina eólica (eje horizontal, tipo multipalas) de acuerdo a las variables principales establecidas.
- Generar simulaciones en un software de análisis por elementos finitos para evaluar la eficiencia del diseño.
- Fabricar un prototipo del diseño obtenido para la turbina eólica tipo multipalas, en el que se puedan analizar las líneas de en el túnel de viento que posee la facultad.
- Observar y analizar las líneas de flujo obtenidas en la simulación por elementos finitos y las obtenidas en el túnel de viento.
- Hallar la geometría de las aspas del rotor, que presenten el mejor rendimiento para el caso específico de estudio.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ASPECTOS TÉCNICOS Y TEÓRICOS

3.1.1 Estudio del viento en la Facultad Tecnológica.

La Universidad Distrital Francisco José de caldas (Facultad Tecnológica) se encuentra ubicada al sur de la capital de Bogotá D.C, en Calle 68 D Bis A Sur # 49 F – 70 Barrio Candelaria la Nueva IV Etapa.

En este sitio se realizó el estudio correspondiente al potencial energético del viento, como se puede observar en la (figura 17), entre los bloques 4 y 5 de la Facultad Tecnológica, dando lugar a la investigación de la energía del viento como fuente de materia prima.



Figura 17. Vista aérea de la Universidad Distrital Francisco José de caldas (Facultad Tecnológica). Tomada de Google Earth.

Para el desarrollo de esta investigación se buscó tomar mediciones de velocidades y direcciones del viento, mediante dos anemómetros (tipo cazoletas) a diferente altura estación A (6 Y 9 metros) estación B, estos son fáciles de instalar y por su complejidad en la recolección de datos vía inalámbrica, este va a un receptor encargado de guardar los registros suministrados.

Se cuenta además con dos estaciones meteorológicas, estas registraran temperaturas, humedad, velocidades, direcciones, presión barométrica, precipitaciones del viento y tiene una capacidad máxima de 4800 lecturas al mes por estación; permiten recopilar datos por medio de sensores de manera sencilla a

una pantalla y extraer un archivo de texto por USB y ser analizado en Excel identificando las variables antes descritas; se puede observar sus especificaciones en la (figura 18).

Figura 18. Datos de los sensores externos de las estaciones metereologicas**.**



Distancia de transmisión en campo abierto	100 metros
Frecuencia	868 MHz
Rango de temperatura	-40°C--+65°C
Resolución	0.1°C (0.2°F)
Rango medición de la humedad relativa	10% -- 90%
Rango de volumen de lluvias	0-9999mm (muestra--si esta fuera de rango)
Resolución	0.1mm (si el volumen < 1000 mm) 1mm (Si el volumen >1000 mm)
Rango de velocidades de viento	0-240 Km/h

Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogota:

Se tomaron mediciones cada 10 minutos por cada receptor, analizando un total de 8900 mediciones por mes, durante seis meses comprendido entre Diciembre de 2008 y mayo de 2009.

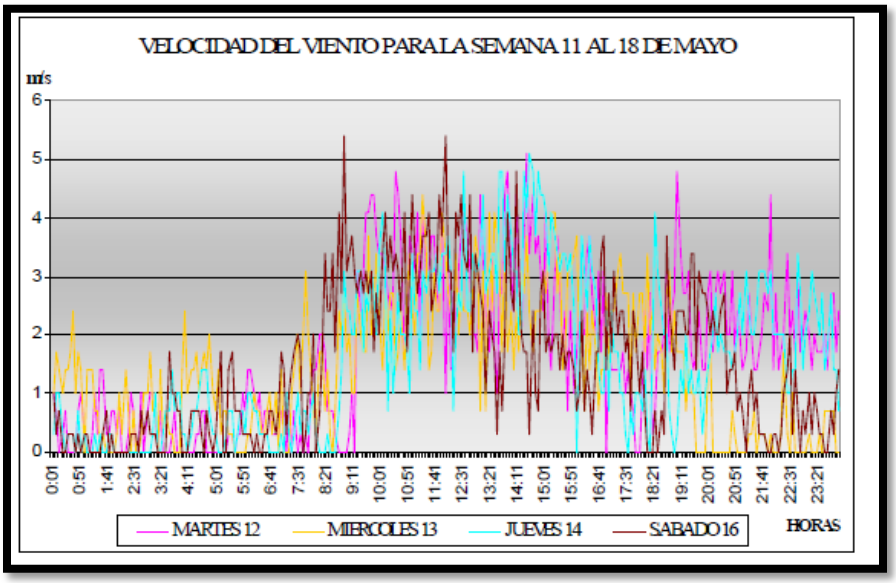
En la figura 19 y 20 se realizó el análisis del mes de mayo de 2009 de las distintas velocidades y direcciones del viento en función de la hora, no se asumieron velocidades menores a 1m/s para el calculo la velocidad media ya que estas no son suficientes para producir energía eléctrica.

Figura 19. Distribución de frecuencias de velocidades para cada dirección correspondiente al mes de Mayo de 2009.

DISTRIBUCIÓN DE DATOS vs VELOCIDAD DEL VIENTO Y DIRECCIÓN DEL VIENTO																	
Velocidad	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	∑
0-1 m/s	784	10	397	23	117	3	233	20	739	38	212	38	61	2	200	11	2888
1-2 m/s	821	56	232	56	28	9	78	6	316	8	138	17	47	4	199	29	2044
2-3 m/s	1087	71	277	71	16	11	36	6	105	2	39	15	36	7	185	33	1997
3-4 m/s	757	39	193	39	10	10	13	3	25	2	21	6	16	5	130	20	1289
4-5 m/s	322	26	88	26	2	8	12	4	3	0	6	0	4	1	53	2	557
5-6 m/s	75	4	21	4	2	1	4	0	0	0	2	2	5	0	3	0	123
6-7 m/s	18	2	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	30
Frecuencia	3080	198	818	198	58	39	143	19	449	12	206	40	108	17	571	84	6040
Vel Media m/s	3,91	3,74	3,911	3,74	2,81	3,2	3,06	2,34	2,892	2,44	3,062	2,53	3,23	2,43	3,28	2,55	

Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA* .Bogota.

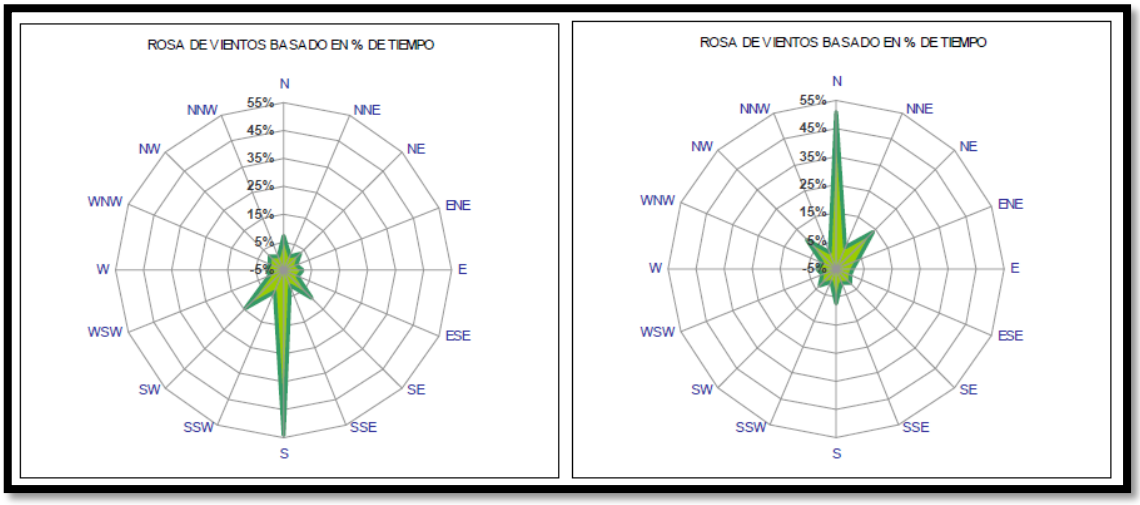
Figura 20. Comportamiento de la velocidad del viento para 4 días del mes de mayo de la Estación A.



Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA*. Bogota.

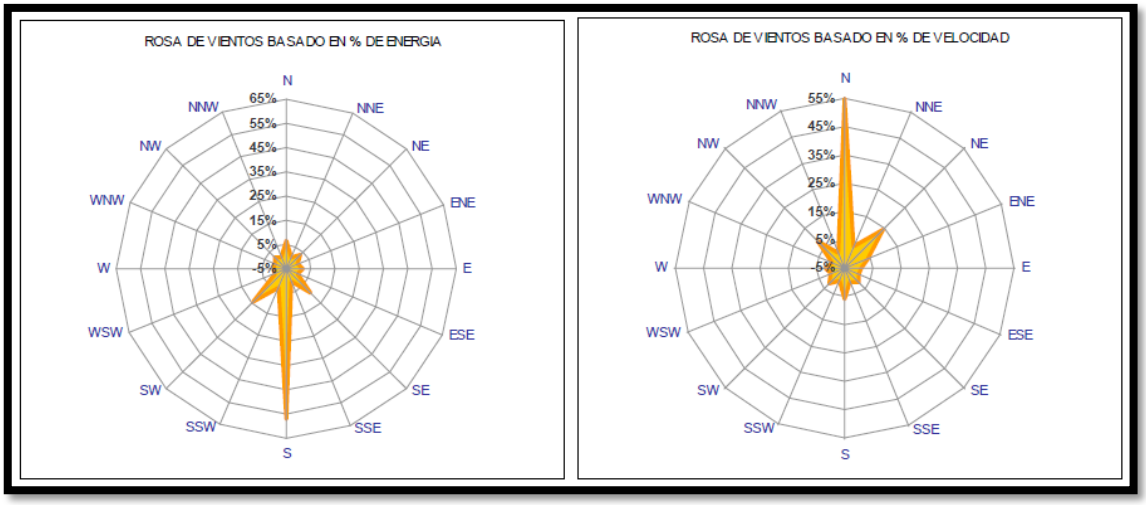
En las figuras 21 y 22 representan la rosa de viento que identifica los porcentajes de velocidad media con respecto al tiempo y la energía mostrando la dirección predominante para las mayores velocidades de viento

Figura 21. Rosa de los vientos en porcentaje de tiempo para el mes de Mayo de 2009, Estación A (Izquierda) y Estación B (Derecha).



Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *DETERMINACION DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO ENTRE LOS BLOQUES CUATRO Y CINCO DE LA (UDFJC) FACULTAD TECNOLOGICA.* Bogota .

Figura 22. Rosa de los vientos en porcentaje de velocidad media para el mes de Mayo de 2009, Estación A (Izquierda) y Estación B (Derecha).



Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *determinacion del potencial energético del viento entre los bloques cuatro y cinco de la (udfjc) facultad tecnologica* Bogota.

Apartir de estos datos obtenidos en el correspondiente estudio se llega a concluir que las horas en que se encuentra un mayor flujo de corriente de viento se comprende entre las 8 y las 18 horas con un promedio de velocidad de viento de 3 m/s, lo que hace posible utilizar este como fuente, para el aprovechamiento en la produccion de energia electrica, con esta investigacion se incidira el siguiente proyecto para definir los parametros de diseño e implementacion de una turbina eolica para determinar su maxima eficiencia.

3.1.2 Tunel del viento en la Facultad Tecnologica.

El tunel de viento o tunel aerodinamico es un mecanismo que se desarrolla para el estudio de movimiento del aire alrededor de los objetos solidos, con esto se busca simular de forma real el comportamiento que experimenta el objeto, el aire es soplado o aspirado por medio de una turbina o un ventilador conectado atravez de un conducto y una rejilla para buscar que el flujo de aire se comporte de forma laminar o con obstaculos si se busca que se comprte de forma turbulenta.

Otras funciones que cumple el tunel del viento es mediante hebras para detectar la direccion y velocidad del aire,ademas pueden inyectarse tintes o humo para identificar el movimiento de las particulas en su superficie cuando pasan las corrientes de viento y sondas en puntos especificos para medir presion hidrostatica y dinamica del aire.

En la Universidad Distrital Francisco Jose De caldas (Facultad Tecnologica) se construyo un banco de pruebas, el objetivo de este proyecto fue disenar un tunel del viento con las especificaciones tecnicas que corresponden, gran velocidad, baja turbulencia en el flujo a traves de la seccion de pruebas y permitir la observacion del flujo de aire resultante sobre el modelo a probarse, sera de gran importancia

para el proyecto puesto que en el se realizaran las respectivas pruebas de funcionamiento del prototipo parametrizado.

3.1.2.1 Clasificacion.

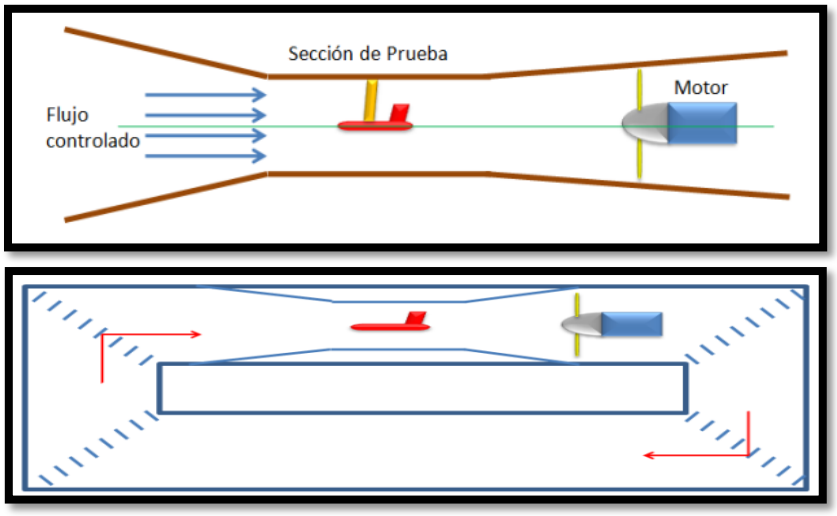
Se pueden clasificar en:

- Como circula en su interior: Abierto o cerrado.

  Abierto: El aire se toma directamente de la atmosfera ,pasando por la camara de ensayos y voloviendo de nuevo a ella.

  Cerrado: El aire circula durante varias veces en la camara,recuperando su energia atraves de un difusor.

Figura 23. tunel de viento abierto (Izquierda) y cerrado(Derecha).

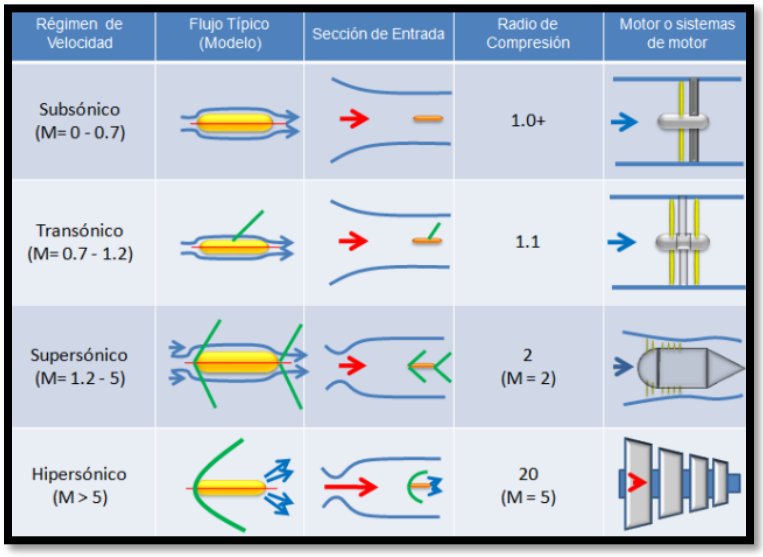


Fuente: Wikipedia.org [en línea]. Túnel del viento [Consultado 10 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: http://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento

- Por la velocidad en su flujo interior:

  Existen varios tipos de tuneles de viento aerodinamicos que dependen de (figura 24) subsonico,transonico,supersonico,hipersonico.

Figura 24. Tipo de tuneles aerodinamicos por la velocidad.

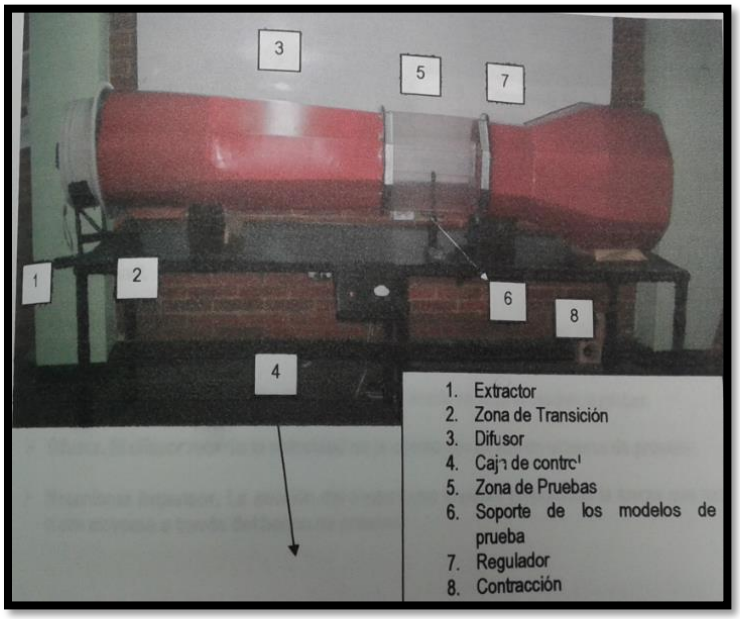


Fuente: Wikipedia.org [en línea]. Túnel del viento [Consultado 10 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: http://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento

3.1.2.2 Composicion general del tunel viento en el cual se realizaran las pruebas.

El banco de pruebas que se construyo es de ciclo abierto en cuanto a los bajos costos y facil montaje en comparacion con el de ciclo cerrado.

Figura 25. Tunel del viento



Fuente: Vargas Guarnizo Mónica - Gonzales Sánchez José (2008). (Tesis) *diseño y construcción de un banco de pruebas didáctico para caracterizar el comportamiento del aire sobre un cuerpo sometido a diferentes velocidades de flujo*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá.

1. Extractor o ventilador: Desarrolla la circulacion del aire, debe tener la velocidad exacta para la correcta medicion.

2. Zona de transicion:Ordenar y acelerar el flujo.

3. Difusor:Retarda la velocidad de la circulacion del aire en el banco de pruebas.

4. Zona de pruebas:Es donde se situa el modelo a probar.

5. Zona de control:Obtener las variables de medicion.

6. Contraccion:Toma un volumen grande de aire de baja velocidad y lo reduce a un volumen pequeño de alta velocidad sin crear turbulencia.

7. Camara de humo: Observar como es la curva descrita por el aire sobre el elemento sobre el elemento para ver la formacion de posibles turbulencias .

8. Rejilla: Permite el equilibrio de las presiones y evita las oscilaciones criticas de las mismas.

9. Boquilla: El proposito de esta es enderezar la circulacion del aire,ademas ayuda a la reduccion de corrienetes que remolinan en la circulacion del aire del tunel.

Unas de las carateristicas de este banco son las distintas velocidades que se genera y los caudales que proprorciona por cada una de ellas, son factores que se deben de tener en cuenta al momento de realizar la practica que se quiere en este banco de pruebas, se puede observar en la siguiente grafica.

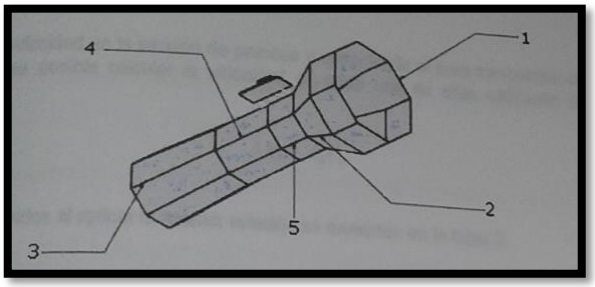
Figura 26. Velocidad y caudal en cada posicion.

Posicion	Velocidad (m/s)	Caudal (CFM)
1	5.31	1070
2	6.13	1187
3	7.03	1333
4	7.64	1483

Fuente: Vargas Guarnizo Mónica - Gonzales Sánchez José (2008). (Tesis) *diseño y construcción de un banco de pruebas didáctico para caracterizar el comportamiento del aire sobre un cuerpo sometido a diferentes velocidades de flujo*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá.

El diseño de este banco consta de cinco zonas y cada sección se construyó de acuerdo a parámetros normalizados, además por los costos y facilidad de montaje de cada una de sus partes.

Figura 27. Dimensiones y velocidades en cada zona.



Sección	Área (m^2)	Longitud (m)	Velocidad (m/s)
Transición	0.126	0.40	5.23
Contracción (2)	0.25	0.25	2.62
Difusor (3)	0.116	0.60	5.68
Pruebas (4)	0.09	0.40	7.3
Regulador (5)	0.09	0.20	7.3

Fuente: Vargas Guarnizo Mónica - Gonzales Sánchez José (2008). (Tesis) *diseño y construcción de un banco de pruebas didáctico para caracterizar el comportamiento del aire sobre un cuerpo sometido a diferentes velocidades de flujo*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá.

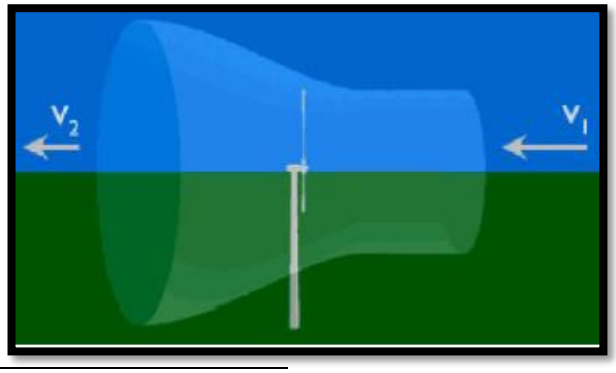
Con lo anterior expuesto y bajo las condiciones de trabajo encontradas se diseñara una turbina eólica de eje horizontal para aprovechar el potencial del viento como fuente de energía, se tendrán en cuenta todas las especificaciones anteriores del banco, para realizar las correspondientes pruebas del prototipo que se ha de construir.

3.1.3 La ley de Betz para determinación de potencial de energía cinética en rotor.

Una turbina eólica convierte la energía cinética del viento en energía mecánica disponible en su eje y se conecta a un generador eléctrico que convierte la energía mecánica en energía eléctrica, se estableció mediante la ley de BETZ que solo es posible extraer una pequeña porción de energía cinética al viento si esto no ocurriera el aerogenerador permanecería estático y su valor teórico es aproximadamente de (59.3%), por lo tanto, las turbinas reales podrán extraer una energía inferior a la que planteo BETZ[1].

La potencia rotor es definida por Betz como un obstáculo que frena el movimiento libre del viento, por esto se considera un aerogenerador como obstáculo, y es la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar el aire en un tiempo (dt).

Figura 28. Velocidad antes y despues de pasar una turbina eolica.



Fuente: Wikipedia.org [en línea]. Velocidad antes y después [Consultado 10 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.html

[1] La ley de BETZ fue formulada por primera vez por el físico alemán ALBERT BEZT en 1919. En su libro (Wind-Energie), fue publicado en el año 1926, proporciona parte del conocimiento acerca de aerogeneradores y energía eólica.

Se considera que la velocidad que entra al tubo V1 y sale V2 y la que entra al aerogenerador es (V1+V2/2).

El flujo másico que entra al rotor viene definido por:

$$m = \rho A(\frac{(V1+V2)}{2}) \quad (3.1)$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica,2001)

Donde m es la masa, ρ la densidad del viento, Al área barrida por la turbina, La potencia que se va por el rotor:

$$Pot\ rotor = \frac{1}{2}m(v2^2 - v1^2) \quad (3.2)$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica,2001)

Reemplazando la masa en la ecuación anterior nos queda:

$$Pot\ rotor = \frac{p}{4}(v2^2 - v1^2)(\ V1 + V2)A \quad (3.3)$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica,2001)

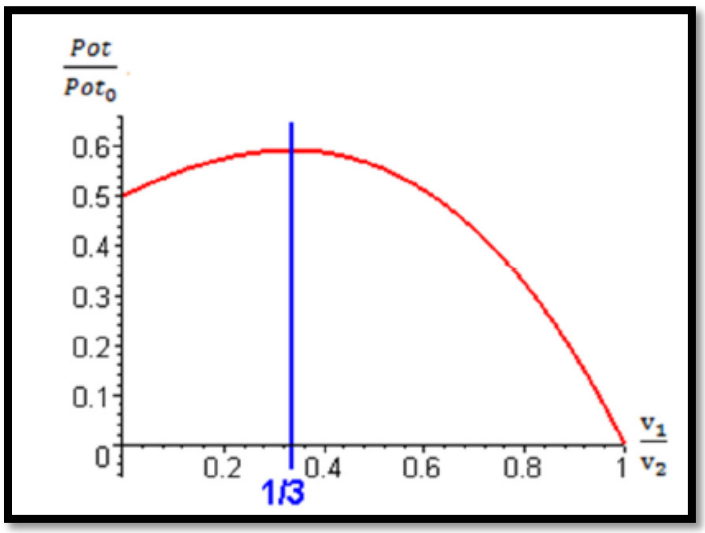
La potencia que lleva el viento antes de entrar a la turbina:

$$Pot\ = \frac{p}{2}v1^3A \quad (3.4)$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica,2001)

Al graficar $Pot\ rotor/Pot$ sobre v2/v1 se obtiene el valor máximo de la potencia extraída del aire como se había mencionado anteriormente. (Figura 33).

Figura 29. Potencia extraida del aire.



Fuente: Wikipedia.org [en línea]. Potencia extraída del aire [Consultado 10 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm

El modelo de Bezt asume que un fluido de densidad constante y el área de la sección transversal del flujo varían inversamente con la velocidad axial. Por lo tanto, no se puede convertir toda la energía cinética en rotacional, sabiendo que el Cp.=coeficiente de potencia máximo es 0.59 y representan el rendimiento aerodinámico máximo de la hélice.

El coeficiente de potencia Cp. permite representar las principales características de las hélices, en combinación con otro parámetro adimensional denominado velocidad específica, este establece la relación entre la punta de la pala y la velocidad del viento y viene dado por la siguiente ecuación:

$$\lambda = \omega \frac{R}{V_\infty} \qquad (3.5)$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica,2001)

λ: Velocidad especifica

ω: Velocidad angular en (rad/seg)

R: Radio de la hélice en (m)

V_∞: Velocidad del viento (m/s)

Se puede expresar ω en función de n, Siendo n: revoluciones de rotación de la hélice (RPM).

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60} \quad (3.6)$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

En la figura 34 se define los distintos Cp. Máximos de los distintos tipos de rotor

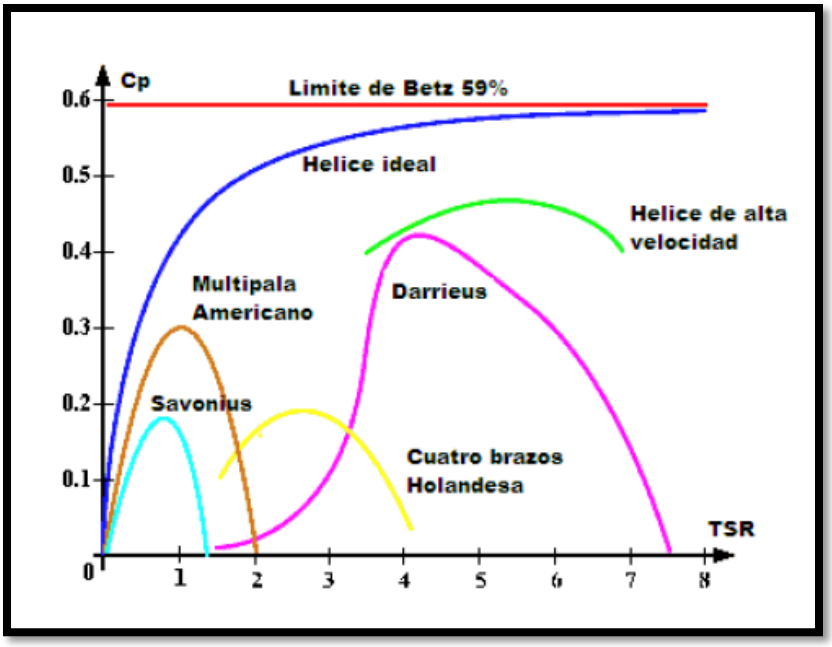
Figura 30. Distintos CP. Maximos para aerogeneradores.

Tipo de aerogenerador	Velocidad de operación	Torque	Complejidad constructiva	C_p	Robustez en %
Eje horizontal					
de moderadas RPM	Moderada	Bajo	Moderada	0.2-0.35	5-10
De altas RPM	Alta	Muy bajo	de precisión	0.3-0.45	< 5
Eje vertical					
Panemono	Baja	Medio	En bruto	> 0.1	50
Savonius	Moderada	Medio	Moderada	0.15	100
Darrieus	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.25-0.35	10-20
Geometría variable	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.2-0.35	15-40

Fuente: Wikipedia.org [en línea]. Cp máximos [Consultado 10 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm

La curva Cp. En función de caracteriza el comportamiento de una hélice, depende de la forma y las formas geométricas.

Figura 31. Curva limite de Betz, para aerogneradores.



Fuente: Wikipedia.org [en línea].curva límite de Betz [Consultado 10 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAcQjRw&url=http%3A%2F%2Fwww.monografias.com%2Ftrabajos94%2Festudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill2%2Festudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill2.shtml&ei=syZlVPGXBsKmgwSA64HIDw&bvm=bv.79189006,d.cWc&psig=AFQjCNGBgNAGuCSoLyxnNCvQXrWigErn6g&ust=1416001521037900

3.1.4 Selección del Perfil de Un Álabe

De acuerdo con la ley de Betz, al sumergir un cuerpo romo en el seno de una corriente fluida, siempre aparece una fuerza que empuja al cuerpo sumergido. Es esta la que hace variar la velocidad del flujo aguas arriba y aguas abajo.

Supóngase que se introduce un verticalmente una placa plana de madera en un río. El perfil en este caso será un rectángulo, que es la sección de la placa. Se observa que la fuerza que arrastra dicha placa corriente abajo es pequeña cuando se enfrenta la cara más estrecha a la corriente, y el arrastre es grande si la corriente incide en la cara más ancha. Esta fuerza que empuja en el sentido de la corriente se denomina *resistencia* o *arrastre*. Este arrastre varía conforme gira la placa respecto a un eje longitudinal, cuando se varía el ángulo que forma la sección de la placa con la dirección de la corriente. Ese ángulo se denomina *ángulo de ataque*.

Cuando la corriente fluida incide sobre la placa con cierto ángulo de ataque, además de la mencionada fuerza de arrastre, aparece otra fuerza que no tiene la dirección

y el sentido de la corriente, sino una dirección perpendicular a ella. “Esta fuerza perpendicular al sentido de la corriente, que también depende del ángulo de ataque, se denomina *sustentación* y puede ser muchas veces mayor que la de resistencia. En aplicaciones en las que se quiera una corriente fluida o *empuje* con la mayor fuerza posible a un sólido, este sólido se diseñará de manera que tenga la forma y el ángulo de ataque adecuado para lograr la máxima sustentación y el menor arrastre posible. La forma del perfil alar influye sustancialmente en las fuerzas de sustentación y arrastre que aparecerán (Figura 36).

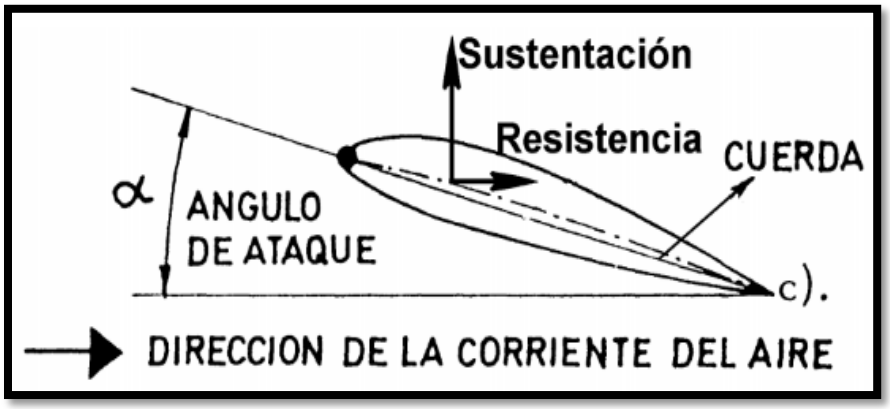


Figura 32. Fuerzas que actuan sobre un perfil alar. Fuente: Ramírez José Luis. Tesis Optimización del Diseño Aerodinámico de un Alabe de Turbina de Viento por el Método del Elemento Finito Caso Holbox Quintana Roo [Consultado 3 de Junio de 2014]. Universidad Michoacan y San Nicolás de Hidalgo

La placa del ejemplo, de perfil rectangular, demuestra ser poco eficiente desde el punto de vista aerodinámico, pues los perfiles eficaces normalmente presentan un arrastre mucho menor y una sustentación enorme. Para ello suelen tener redondeada la zona enfrentada a la corriente (borde de ataque), y afilada la zona opuesta (borde de fuga o borde de salida). En la Figura 37 se muestran las partes de un perfil alar.

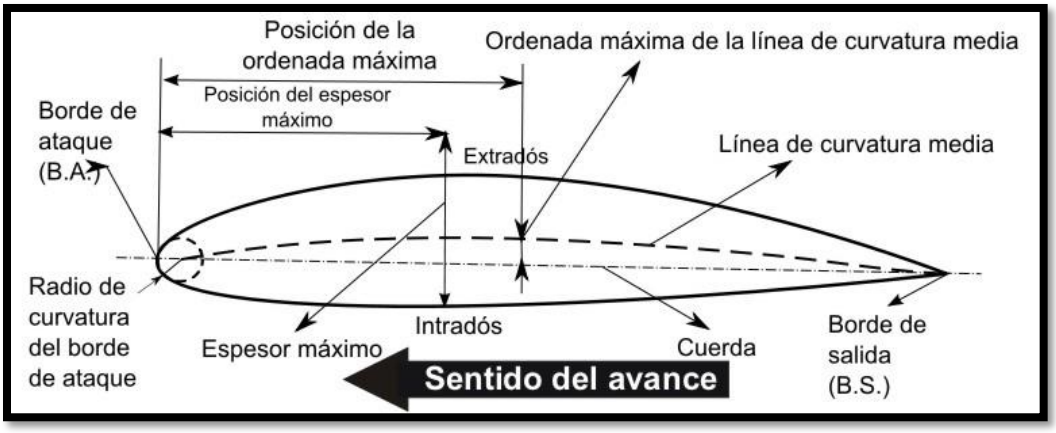


Figura 33 – Partes de un perfil alar. Fuente: Wikipedia.com [en línea] Perfil alar [Consultado el 01 de noviembre de 2014] Disponible en Internet en http://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar

En los Estados Unidos el Comité Nacional de Aeronáutica (NACA), antecesor de la actual NASA, ha desarrollado la mayor parte de los perfiles empleados en la actualidad. Sin embargo, las características aerodinámicas de algunos perfiles empleados en la aviación militar, siguen siendo alto secreto.[2]

Determinadas las características del perfil del alabe, se puede escoger alguno de los catálogos NACA, por ejemplo, para generadores eólicos los hay de la serie de cuatro dígitos, cinco dígitos, serie 1 o serie 6 habitualmente y seleccionan bajo el siguiente parámetro:

NACA 2412
- Máxima curvatura al 2%
- Máxima curvatura localizada al 40% (0.4 cuerdas) del borde de ataque
- Máximo espesor del 12% de la cuerda

NACA 0015
- Perfil simétrico (00)
- Máximo espesor del 15% de la cuerda

4. METODOLOGÍA

4.1 *IDENTIFICAR LOS PRINCIPIOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS.*

Equiparar los diferentes conceptos de la mecánica de fluidos:
- Viscosidad
- Densidad.
- Viscosidad cinemática.
- Fuerzas dentro de un fluido.
- Número de Reynolds.
- Flujo incompresible.
- Capa límite laminar y turbulenta.
- Capa límite laminar sobre una placa plana.
- Flujo alrededor de una esfera.
- Resistencia aerodinámica.

4.2 ESTABLECER EL CASO AERODINÁMICO A TRABAJAR.

Estudiar los diversos perfiles aerodinámicos.
- Perfiles aerodinámicos.
- Variación de la sustentación y la resistencia.
- Coeficiente de momento.
- Influencia del número de Reynolds
- Elección del perfil aerodinámico.

[2] CARMONA Aníbal. Aerodinámica y actuaciones del avión, 12va. edición (2004). Editorial Paraninfo

- Datos prácticos perfiles aerodinámicos.
- Características de perfiles aerodinámicos.

4.3 VALORAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RECURSO EÓLICO.

A partir del estudio de viento realizado en la zona de instauración del proyecto, se evaluará el potencial aprovechable.

- Energía del viento.
- Potencia disponible y potencia captada.
- Pruebas túnel de viento.
- Potencia captada por resistencia.
- Potencia captada por sustentación.

4.4 CARACTERIZAR LAS HÉLICES.

- Coeficiente de potencia y relación de velocidades.
- Solidez.
- Numero de palas.
- Tamaño de la hélice.
- Influencia de la calidad aerodinámica en los perfiles.
- Velocidad de rotación.

4.5 *CÁLCULAR Y DISEÑAR LA HÉLICE.*

Ejecutar una evaluación y captar los modelos de mayor eficiencia, a continuación, tasarlos respecto a los conceptos de hélice.

- Hélice óptima.
- Teoría de la cantidad de movimiento axial.
- Factor de velocidad angular.
- Factor de pérdidas en puntas.
- Teoría del elemento de pala de hélice.
- Calculo de hélice óptima.
- Procedimiento de cálculo.
- Análisis de la hélice óptima.
- Dada la geometría de la hélice realizar simulaciones para verificar su comportamiento.

4.6 *FABRICAR EL PROTOTIPO A ESCALA.*

Luego de haber concluido los parámetros para la fabricación del prototipo a escala, se procederá con la selección de materiales que se requieren para construir las partes funcionales del diseño. Con la máquina de prototipado rápido de la UDFJC ubicada en la Facultad Tecnológica, se llevará a cabo la construcción del mecanismo a escala, y las demás piezas que no sea posible

desarrollarlas por este método, se obtendrán mediante otras fuentes de mecanizado.

4.7 REALIZAR PRUEBAS AL PROTOTIPO.

Mediante el túnel de viento se recrearán diversas situaciones de velocidades a escala, además el módulo cuenta con una unidad tipo cámara de humo que permite la observación de las líneas de flujo, con lo cual se observara el comportamiento del viento a través del dispositivo (la hélice). Y de este modo se dará por culminado el proceso y se darán las respectivas conclusiones del proyecto.

5. DISEÑO DEL AEROGENERADOR

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Facultad Tecnológica) se encuentra ubicada al sur de la capital de Bogotá D.C, localidad 19 de ciudad bolívar, barrio la candelaria la nueva IV etapa.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron mediciones de velocidades y direcciones del viento en las estaciones meteorológicas ubicadas en la Universidad Distrital (Facultad Tecnológica) en los 9 meses comprendidos entre los años 2014 y 2015 en los meses de junio a febrero.

Tabla 3. Velocidad media horario de la tarde, estación de la universidad distrital

Año	Mes	velocidad m/s
2014	Junio	5.35
2014	Julio	3.11
2014	Agosto	5.73
2014	Septiembre	4.78
2014	Octubre	2.17
2014	Noviembre	2.02
2014	Diciembre	2.02
2015	Enero	2.44
2015	Febrero	2.35
	PROMEDIO	3.33

Fuente: Lamus P. Marcela - Aguilar O. Leonardo (2010). (Tesis) *determinacion del potencial energético del viento entre los bloques cuatro y cinco de la (udfjc) facultad tecnologica* Bogota.

A partir de estos datos obtenidos se asumirá una velocidad promedio de 3.5 m/s para efectuar los cálculos correspondientes del aerogenerador.

5.1 SELECCIÓN DEL PERFIL DEL AEROGENERADOR

Comenzaremos por definir los siguientes parámetros de diseño:

$v = \ velocidad\ media\ anual\ del\ viento = 3.5\ \frac{m}{s}$

El rotor del aerogenerador tendrá un diámetro $(D = 2m)$ por la ubicación y el espacio comprendido en el montaje de llegarse a realizar.

La energía del viento que se proyecta antes de chocar con el rotor se conoce como potencia disponible (Pd), por lo tanto, su área de barrido se calcula de la siguiente manera:

$A = Area\ de\ barrido$

$$A = \pi r^2 = 3.1416m^2$$

$$Pd = \frac{1}{2}\ \rho A v^3 = 67.34W$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

Se procede a obtener la potencia máxima eólica suministrada por la energía del viento aplicando la relación entre el diámetro y la velocidad, que comprende la máxima potencia que se puede extraer de un flujo de viento con cierta velocidad:

$$Pmax = 0{,}20D^2v^3 = 34.3\ W$$

(D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

Velocidad de giro viene dada por:

$$n = 115\frac{v}{D} = 201\ RPM$$

(D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

Es una relación entre la velocidad y el diámetro del rotor.

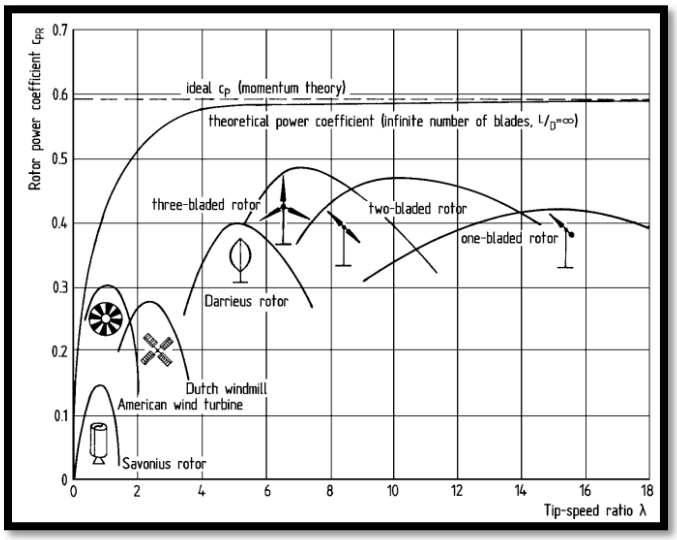
λ = Velocidad especifica Y $C_p = Coeficiente\ de\ potencia$

La velocidad específica es un factor importante en nuestro diseño, sirve para comparar el funcionamiento de distintos tipos de aerogeneradores y el coeficiente de potencia determina el porcentaje de rendimiento aerodinámico definido como la relación entre la potencia en el eje y la potencia disponible del viento.

$$\lambda = \frac{\pi D n}{60 v} = 6.02 \qquad C_p = \frac{2Pmax}{\rho \pi r^2 v^3} = 0.48 \; o \; 48\%$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

Obtenidos estos valores se procede a determinar el tipo de aerogenerador en función del coeficiente de potencia y la velocidad especifica utilizando las siguientes graficas:



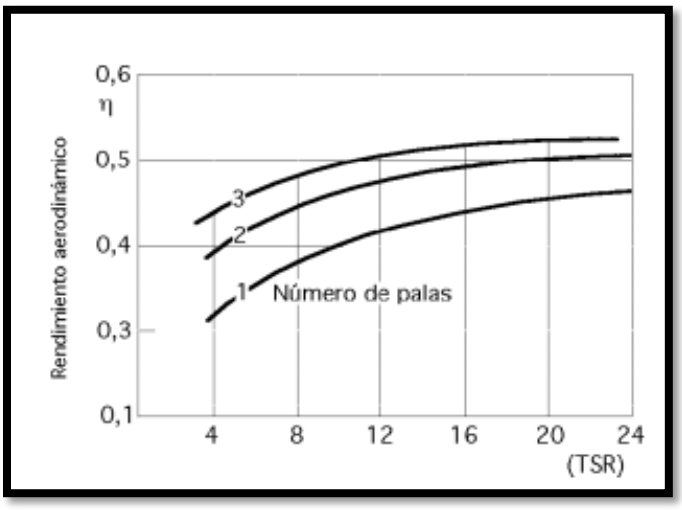


Figura 33 y 34, Variación del coeficiente de potencia (Cp.) frente a la velocidad especifica () para distintos tipos de aerogeneradores (VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001).

De acuerdo con las figuras se obtiene el tipo de aerogenerador que se utilizara" de tres palas", con esta configuración definiremos el tipo de perfil que se utilizara para determinar su diseño.

Se puede observar que los rotores tripala de eje horizontal son las más utilizados en la producción de energía eléctrica por tener un par de arranqué menor que el de los rotores de eje vertical. Las fuerzas de sustentación y arrastre, el par o momento y el coeficiente par vienen dados por las siguientes expresiones:

$C_m = Coeficiente\ de\ potencia\ par$

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = 0.08$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

$\Omega = \text{Velocidad del rotor}$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = 21.04\ \frac{rad}{s}$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

$T = Torque$

$$T = \frac{P}{\Omega} = 1.62\ N.m$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

$F_L = Fuerza\ de\ sustentacion$

$$F_L = C_L \frac{\rho v^2}{2} A = 12.12N$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

$F_D = Fuerza\ de\ arrastre$

$$F_D = C_D \frac{\rho v^2}{2} A = 0.26\ N$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

Una vez seleccionado el aerogenerador se procede a determinar el perfil de la pala, para esto interesan perfiles con altos valores de coeficiente de sustentación; para nuestro caso se optó por escoger un perfil NACA 23012 contiene las siguientes especificaciones:

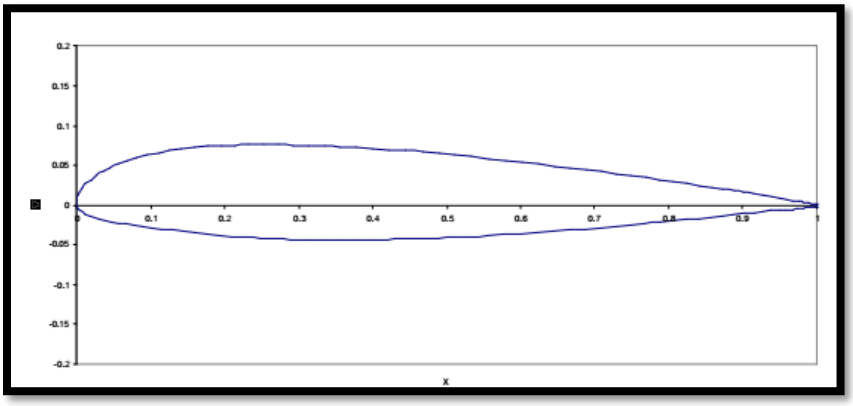


Figura 35 – NACA 23012. Fuente: Wikipedia.com [en línea] Perfil alar [Consultado el 01 de noviembre de 2014] Disponible en Internet en http://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar

- Ordenada máxima de la línea de curvatura media en porcentaje de cuerda 2%
- Posición de dicha flecha máxima en porcentaje de cuerda 15%
- Espesor máximo del perfil de cuerda 12%.

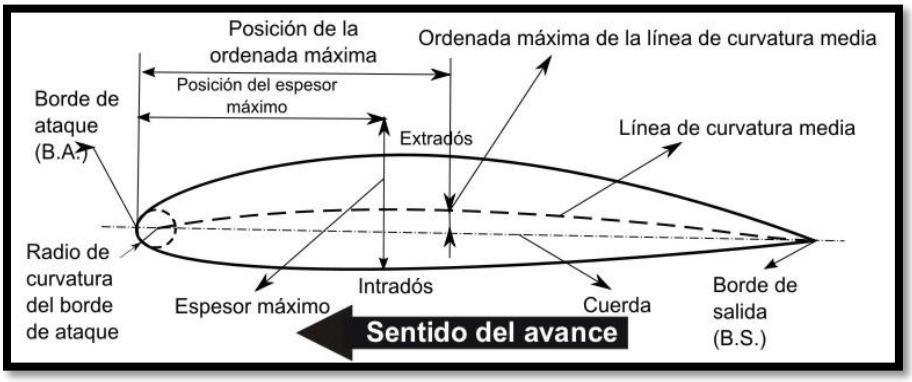


Figura 36 – Partes de un perfil alar. Fuente: Wikipedia.com [en línea] Perfil alar [Consultado el 01 de noviembre de 2014] Disponible en Internet en http://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar

5.2 PERFIL DEL ALABE

Para elegir el perfil de la pala utilizamos el coeficiente de potencia (Cp.) vs velocidad especifica (λ); mediante graficas llegamos a la configuración del perfil como se puede observar.

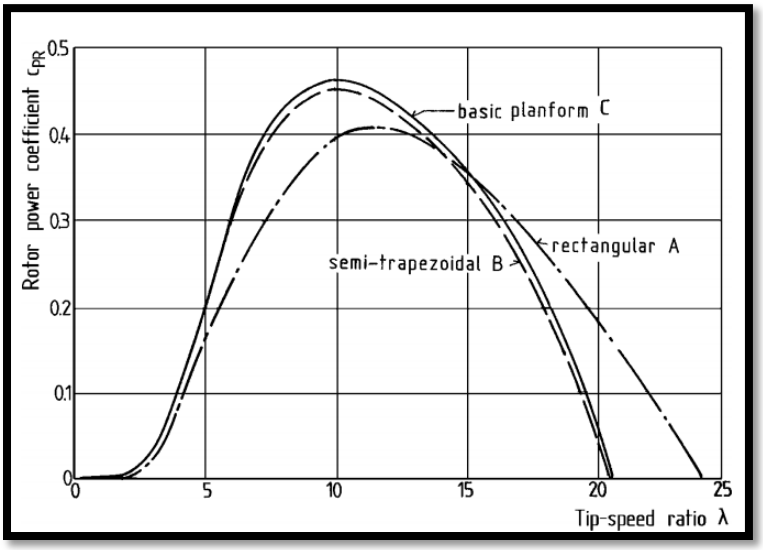


Figura 37 – forma de pala. Fuente: Wind turbines (HAU Erich)

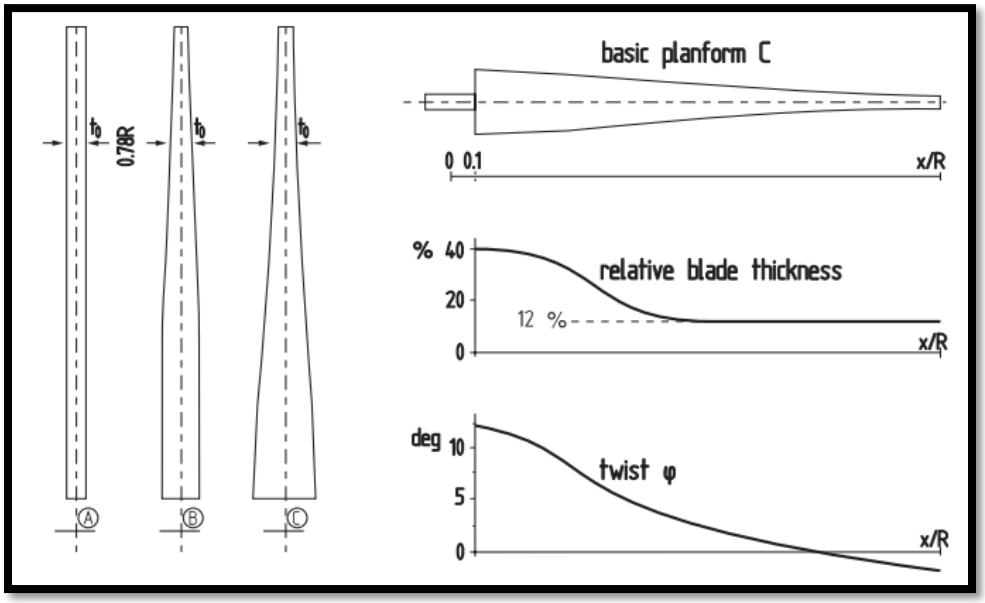


Figura 38 – Forma de la pala. Fuente: Wind turbines (HAU Erich)

De acuerdo a las gráficas se asume la forma de pala tipo (B) semitrapezoidal. Otra forma de seleccionar la forma de la pala es utilizando de la velocidad especifica cómo se puede observar en la figura 39.

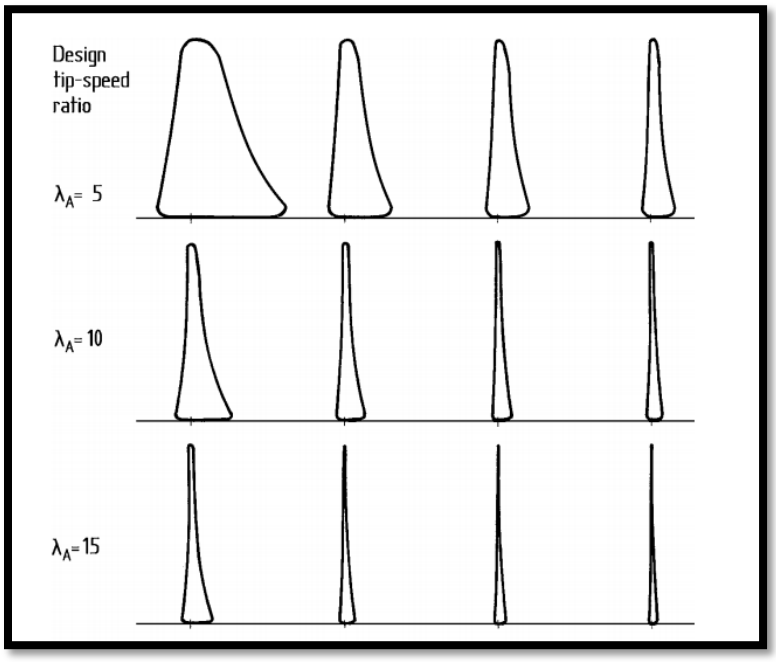


Figura 39 – Forma de la pala. Fuente: Wind turbines (HAU Erich)

Para perfilar la pala se procede a dividirla en varias secciones figura 39 calculando la relación de velocidades SR.

$$SR = \frac{r\lambda}{R}$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

Donde se integra la velocidad especifica (λ), las distancias entre secciones (r), y la longitud total de la pala (R).

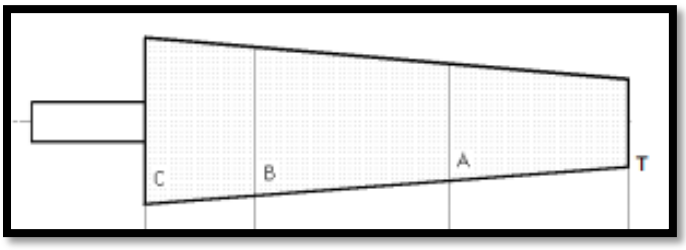


Figura 40 – División de una pala. Fuente: Wikipedia.com [en línea] (http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf)

Una vez obtenida la relación de velocidad, determinamos el coeficiente aerodinámico de sustentación máximo, a medida que el ángulo de ataque aumenta figura 41.

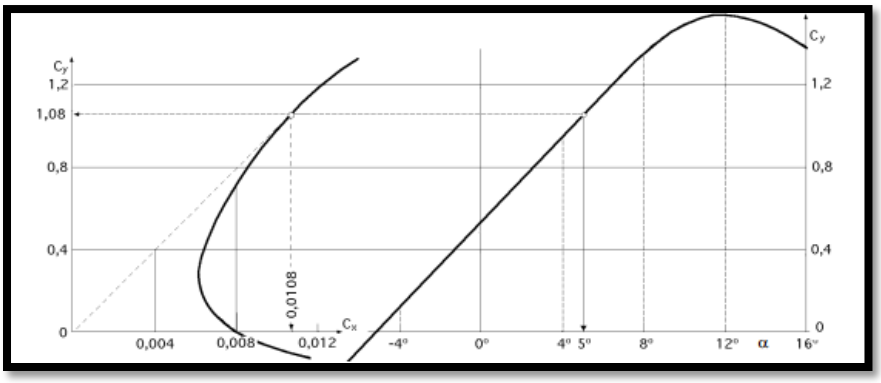


Figura 41 – Coeficientes de arrastré y de sustentación. Fuente: (http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf)

Se determina el parámetro (SP) de forma a partir de la relación de velocidades (SR) de la figura. Para cada sección r le corresponde una longitud de cuerda L, siendo z el número de palas y (C_y) el coeficiente de sustentación máximo.

$$L = \frac{rSp}{C_y Z}$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

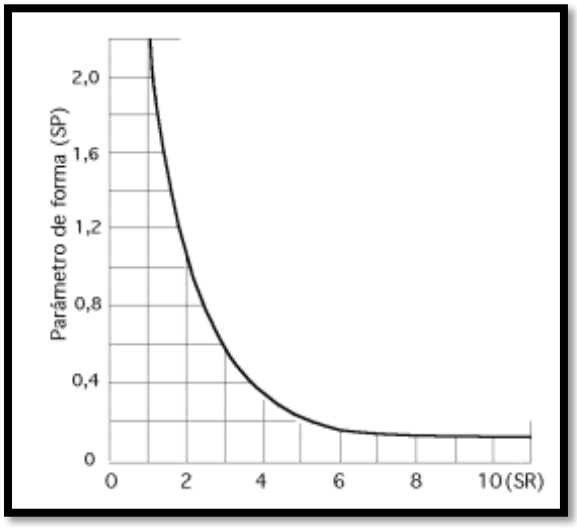


Figura 42- Valores de Sp en función de SR. Fuente: (http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf)

Fuerza aerodinámica viene dado por:

$$F\ aerod = 0.062Av^2 = 2.38\ Kg\ por\ pala$$

Como nuestro diseño es de tres palas la nueva fuerza correspondiente es : 7.14Kg

5.3 DISEÑO EN CAD (Perfil alar NACA 23012)

El primer dígito cuando se multiplica por 3/2 otorga el coeficiente de sustentación de diseño en décimas. El coeficiente de sustentación de diseño es un índice del incremento en camber y por ende, si el camber del perfil incrementa, el coeficiente de sustentación de diseño se incrementa. En este caso, el coeficiente de sustentación de diseño para el perfil NACA 23012 es de 0.3.

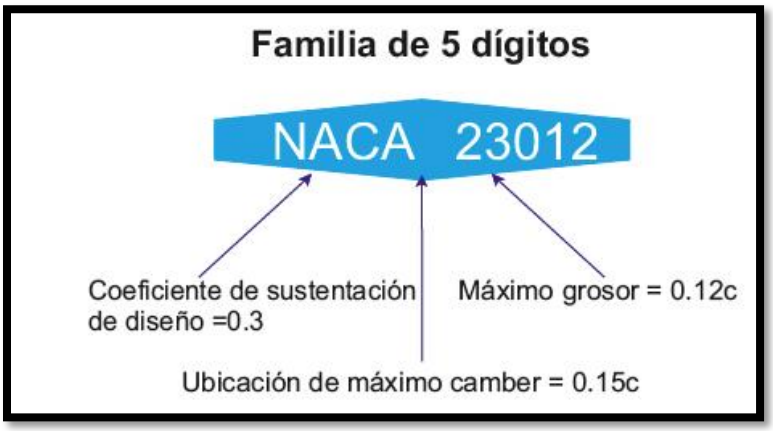


Figura 43- Fuente: Carmona, A. (1999). Aerodinámica y Actuaciones del Avión, p. 79. Madrid: Thomson-Paraninfo.

El segundo y tercer dígito forman un número que multiplicado por ½ otorga la ubicación del camber máximo en porcentaje de la longitud de línea de cuerda tomada desde el borde de ataque. En este caso se tiene el camber máximo al 15% de longitud de cuerda. Los últimos dos dígitos dan el grosor máximo del perfil alar que en este caso es del 12% o 0.12c de la longitud de cuerda.

Para nuestro perfil alar nos dirigimos a la página (airfoiltools), nos suministra los distintos tipos de perfiles aerodinámicos disponibles en la web con las imágenes previas del tipo de perfil que se busca , nos permite cambiar espesores , hacer comparaciones con distintos números de Reynolds, trazar dos o más superficies de sustentación del mismo perfil.

La fineza de un ala también depende del denominado número de Reynolds (Re) que es una medida de la calidad de la circulación del aire alrededor de la misma y que se define del siguiente modo:

$$Re = \frac{Vl}{\vartheta} = 50000 \text{ aprox.}$$

Toda ala tiene su número de Reynolds crítico. Si la medida de la circulación del aire alrededor del ala es inferior a este valor crítico, el coeficiente de sustentación disminuirá y el de resistencia aumentará, es decir, la fineza del ala disminuirá rápidamente.



Ingresamos los datos de nuestro perfil alar de la serie 23012.

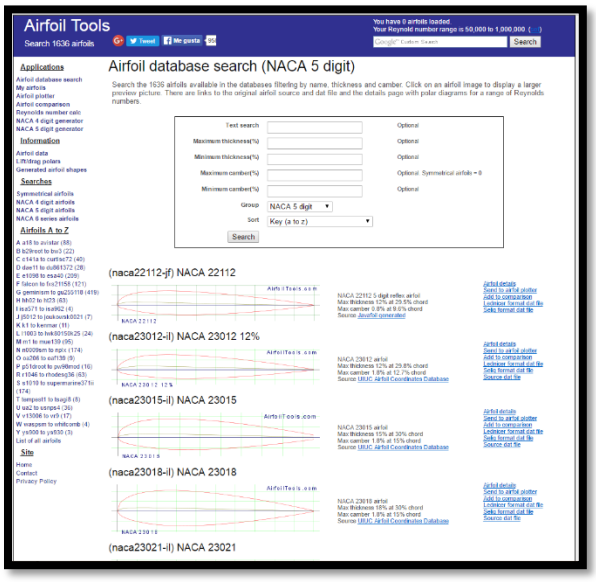


Figura 44 y 45- Fuente: Airfoil tools. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23012-il.

Ingresamos a airfoil plotter proporcionándonos una serie de datos para nuestro caso seleccionamos el perfil 23012 con un numero de Reynolds aproximado a los 50000, arrojándonos los máximos coeficientes de sustentación y de arrastre.



En la sección “chord” o cuerda se cambia la longitud de la cuerda para obtener el perfil deseado según el delta de longitud a lo largo del alabe.

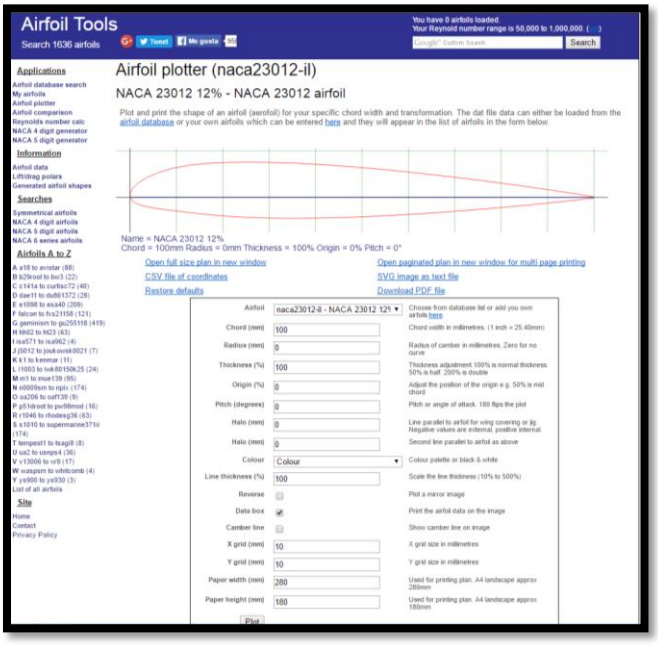
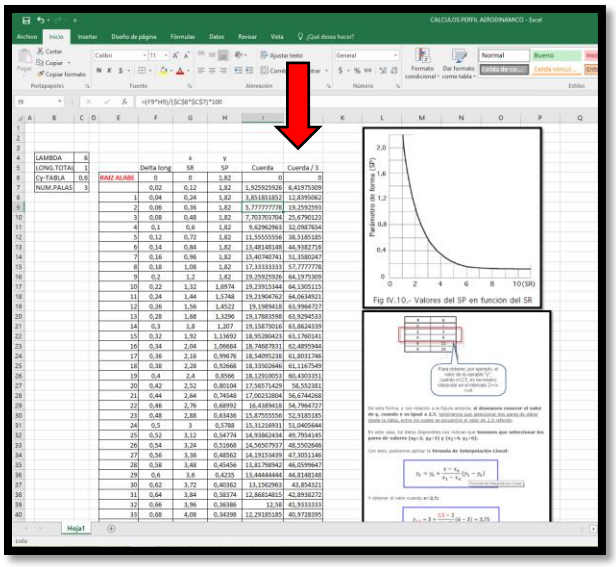


Figura 45 y 46- Fuente: Airfoil tools. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23012-il.

Se genera una tabla donde se efectúa el cálculo de la cuerda teniendo en cuenta los respectivos valores de referencia, como son el delta de longitud de alabe, el coeficiente de sustentación, el valor de lambda y el número de alabes.



Con los valores obtenidos de cuerda, se intercambia este valor en el programa de generación de perfiles airfoiltools, para obtener los diferentes puntos del perfil según su distancia de la raíz del alabe, esto iniciando en cero y terminando con la longitud total del alabe. De acuerdo con la cantidad de secciones en las cuales se allá subdividido el alabe, se obtendrán la misma cantidad de subperfiles, los cuales tendrán como finalidad generar el contorno total del perfil a lo largo del alabe. Para generar un subperfil se debe obtener del programa un archivo de coordenadas en formato CSV.

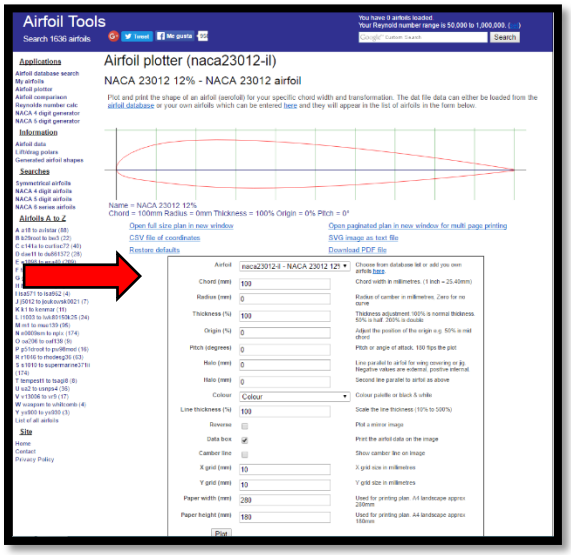
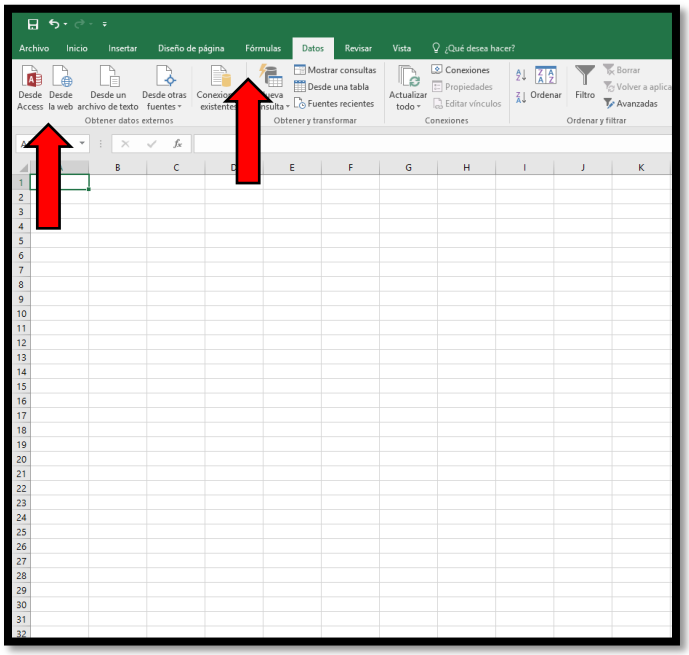


Figura 47 y 48- Fuente: Airfoil tools. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23012-il.

Se abre un archivo nuevo de Excel y sobre la pestaña datos se toma la opción obtener datos desde archivo de texto. A continuación, y con el archivo CSV generado anteriormente se inicia la importación de los puntos de curva del perfil.



En la pantalla se debe tener en cuenta el método de importación, puesto que de esto depende que los datos sean útiles en la generación de la curva mediante el programa de diseño. Como primera medida se debe tildar los índices delimitados y damos en siguiente.

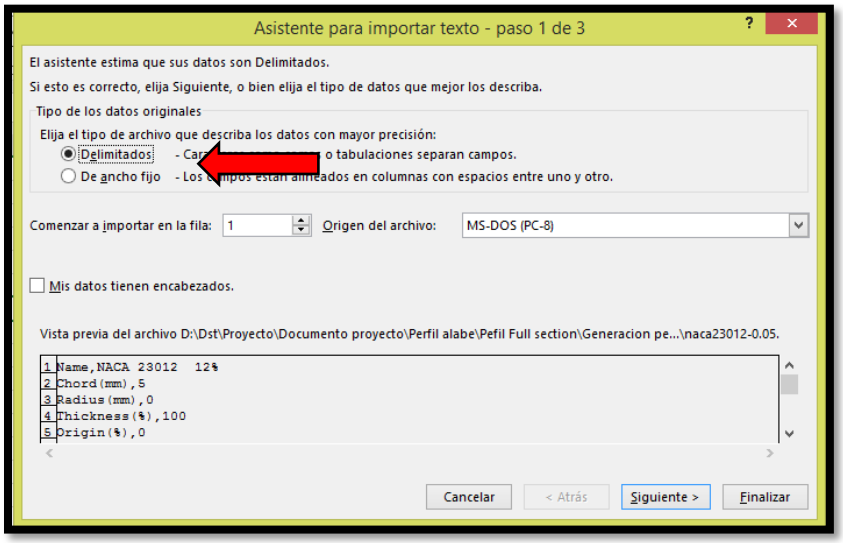
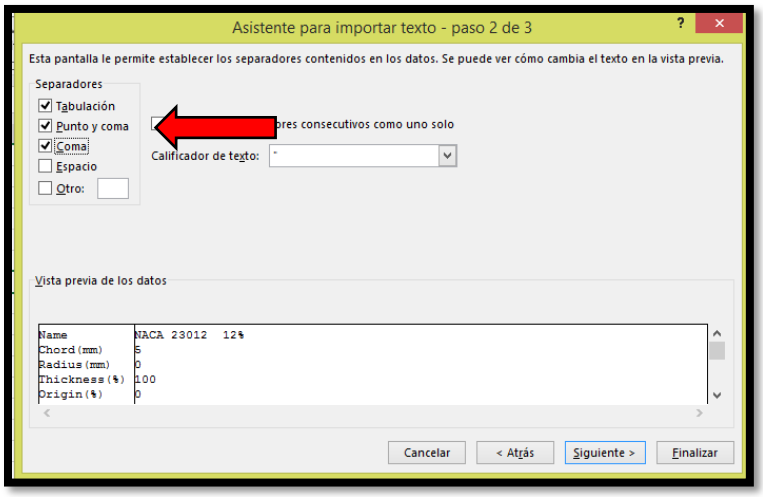


Figura 49 y 50- Fuente Autores Excel 2016.

A continuación, tildamos las opciones tabulación, coma y punto y coma. Enseguida damos en siguiente.



Luego debemos dejar las dos columnas de la nueva pantalla como formato de texto y finalizamos así la importación de nuestro archivo CSV.

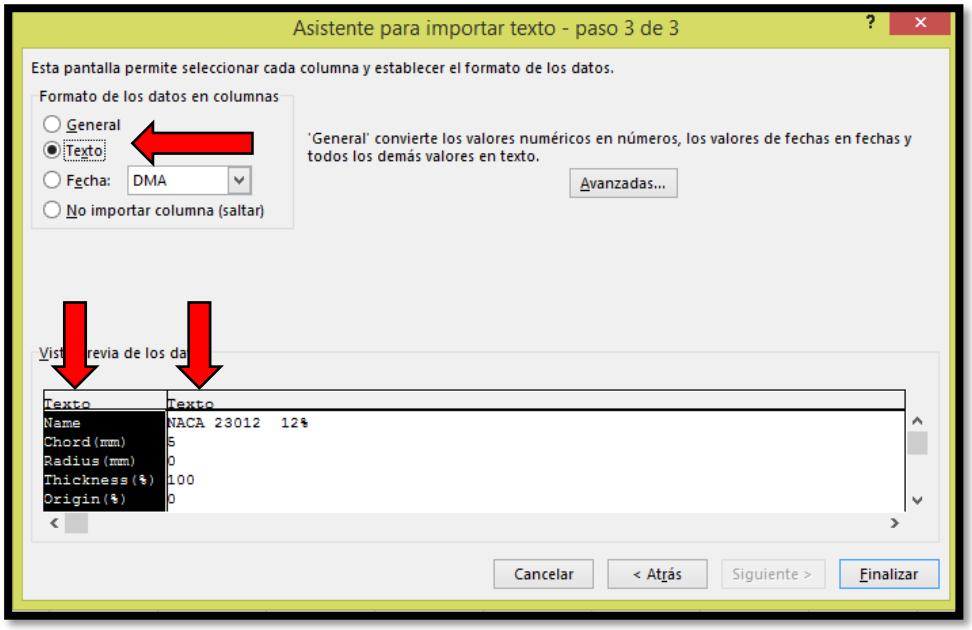
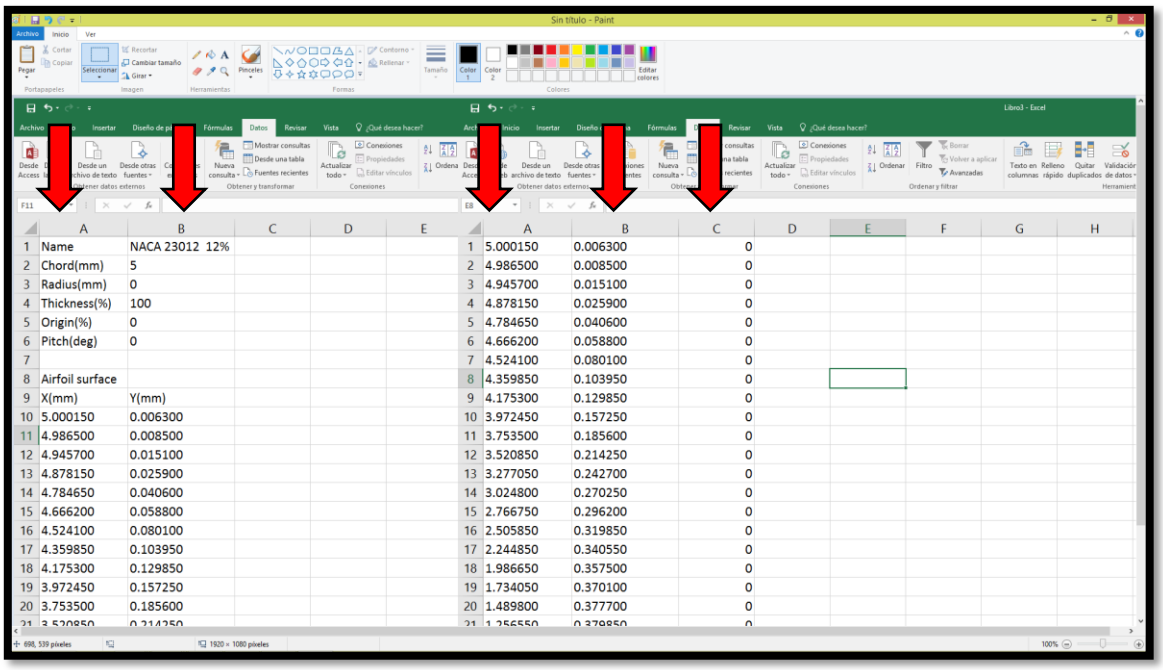


Figura 51 y 52- Fuente Autores Excel 2016.

Culminar nuestra importación se debe tener en cuenta que se debe editar la cantidad de información que este contiene, puesto que el programa airfoiltools exporta gran cantidad de datos que para la generación de la curva perfil en el programa CAD no es necesaria.

En la gráfica siguiente observamos la forma como se presenta la información importada y en la misma grafica en la parte derecha como debemos culminar el archivo. Se debe eliminar el encabezado y anexar una columna con ceros, esta con el fin de adicionar una coordenada en el eje Z, puesto que el archivo importado solo proporciona coordenadas para las componentes X e Y de la curva perfil.



	A	B
1	Name	NACA 23012 12%
2	Chord(mm)	5
3	Radius(mm)	0
4	Thickness(%)	100
5	Origin(%)	0
6	Pitch(deg)	0
7		
8	Airfoil surface	
9	X(mm)	Y(mm)
10	5.000150	0.006300
11	4.986500	0.008500
12	4.945700	0.015100
13	4.878150	0.025900
14	4.784650	0.040600
15	4.666200	0.058800
16	4.524100	0.080100
17	4.359850	0.103950
18	4.175300	0.129850
19	3.972450	0.157250
20	3.753500	0.185600
21	3.520850	0.214250

	A	B	C
1	5.000150	0.006300	0
2	4.986500	0.008500	0
3	4.945700	0.015100	0
4	4.878150	0.025900	0
5	4.784650	0.040600	0
6	4.666200	0.058800	0
7	4.524100	0.080100	0
8	4.359850	0.103950	0
9	4.175300	0.129850	0
10	3.972450	0.157250	0
11	3.753500	0.185600	0
12	3.520850	0.214250	0
13	3.277050	0.242700	0
14	3.024800	0.270250	0
15	2.766750	0.296200	0
16	2.505850	0.319850	0
17	2.244850	0.340550	0
18	1.986650	0.357500	0
19	1.734050	0.370100	0
20	1.489800	0.377700	0
21	1.256550	0.379850	0

Finalizado todo este proceso debemos guardar nuestro archivo como texto delimitado por tabulaciones. Al abrir dicho archivo debemos tener nuestra información de curva perfil tal y como se muestra enseguida.



PERFIL: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
5.000150    0.006300    0
4.986500    0.008500    0
4.945700    0.015100    0
4.878150    0.025900    0
4.784650    0.040600    0
4.666200    0.058800    0
4.524100    0.080100    0
4.359850    0.103950    0
4.175300    0.129850    0
3.972450    0.157250    0
3.753500    0.185600    0
3.520850    0.214250    0
3.277050    0.242700    0
3.024800    0.270250    0
2.766750    0.296200    0
2.505850    0.319850    0
2.244850    0.340550    0
1.986650    0.357500    0
1.734050    0.370100    0
1.489800    0.377700    0
1.256550    0.379850    0
1.036900    0.376200    0
0.830200    0.366000    0
0.636600    0.345750    0
0.461500    0.313250    0
0.310150    0.269100    0
0.186500    0.216200    0
0.093250    0.158800    0
0.031400    0.101500    0
0.000750    0.047800    0
0.000000    0.000000    0
0.026650    -0.039600   0
0.077850    -0.070050   0
0.151450    -0.093500   0
0.245750    -0.112400   0
0.359750    -0.129300   0
0.493400    -0.146100   0
0.647700    -0.164100   0
```

Figura 53 y 54- Fuente Autores Excel 2016.

De esta forma obtenemos todos los datos para generar en CAD nuestra primera curva perfil. Este procedimiento se debe realizar para todos y cada uno de los perfiles que se deseen generar; para el presente caso se generaron 49 archivos diferentes puesto que la longitud total del alabe se dividió en esta cantidad de partes iguales, es decir una curva perfil cada 2 centímetros. En los anexos se adjuntará la información de cada curva perfil generada para concebir el perfil total del alabe.

Para continuar con el proceso de diseño, ahora en el programa CAD que para este caso será SolidWorks, iniciaremos generando un archivo parte en el programa. Luego debemos generar 49 planos paralelos al plano alzado, cada uno con un interespaciado de 2 centímetros y sobre los cuales ira cada uno de los perfiles que se han obtenido en la sección preliminar. A continuación, denotamos la forma en la que se visualizan los planos.

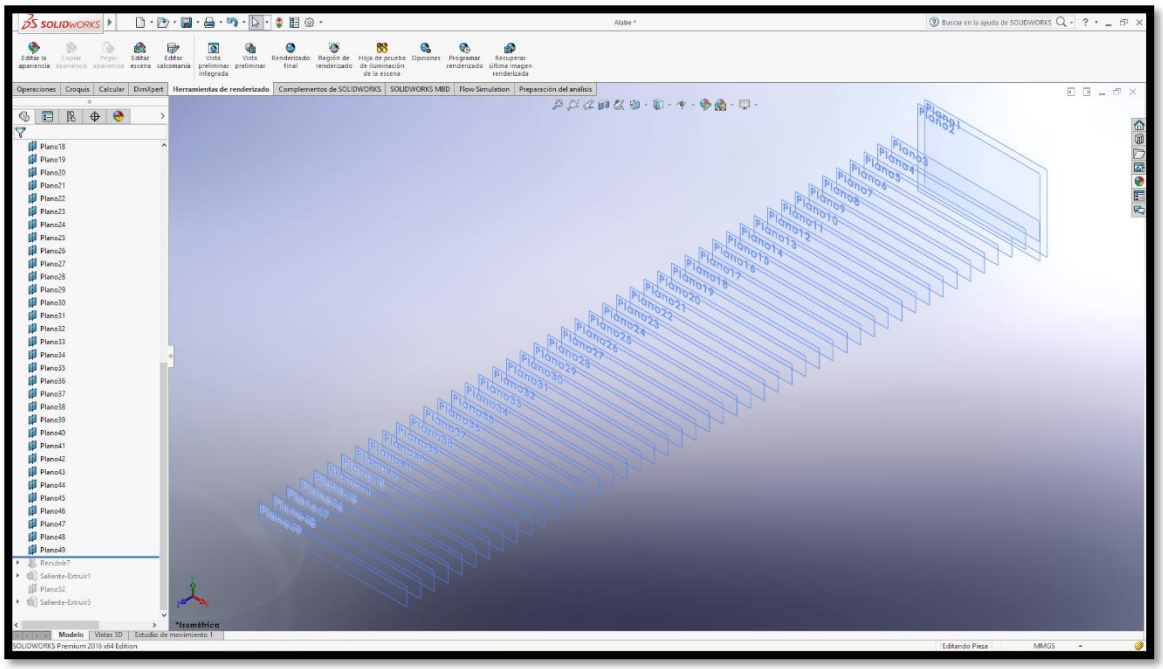


Figura 55- Fuente Autores, longitud del alabe generando 49 planos, solidworks

Luego de creados los planos procedemos con la consecución de las 49 curvas perfil. Adicionalmente se deben producir dos curvas guía, tanto en la cara de ataque del perfil como en la cola del mismo. En seguida se muestra la conformación de los perfiles.

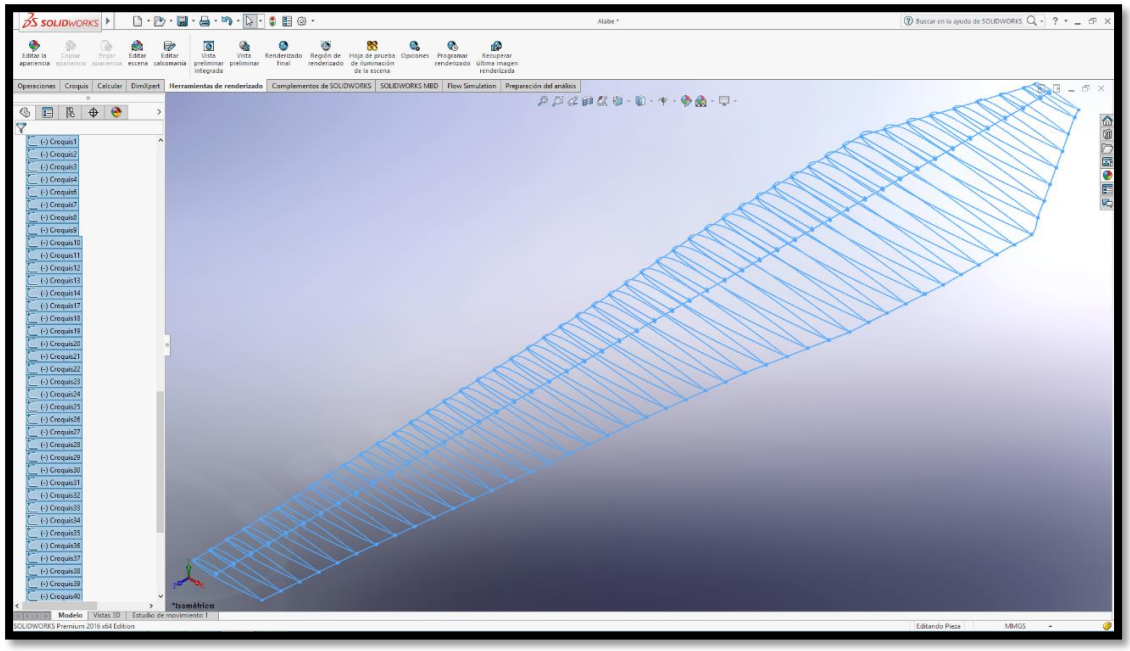


Figura 56- Fuente Autores, longitud del alabe curvas guía, solidworks

Para conformar el sólido del perfil agregamos la operación de recubrimiento, la cual toma el total de los perfiles más las curvas guía y adiciona una superficie que los interconecta generando una pieza sólida.

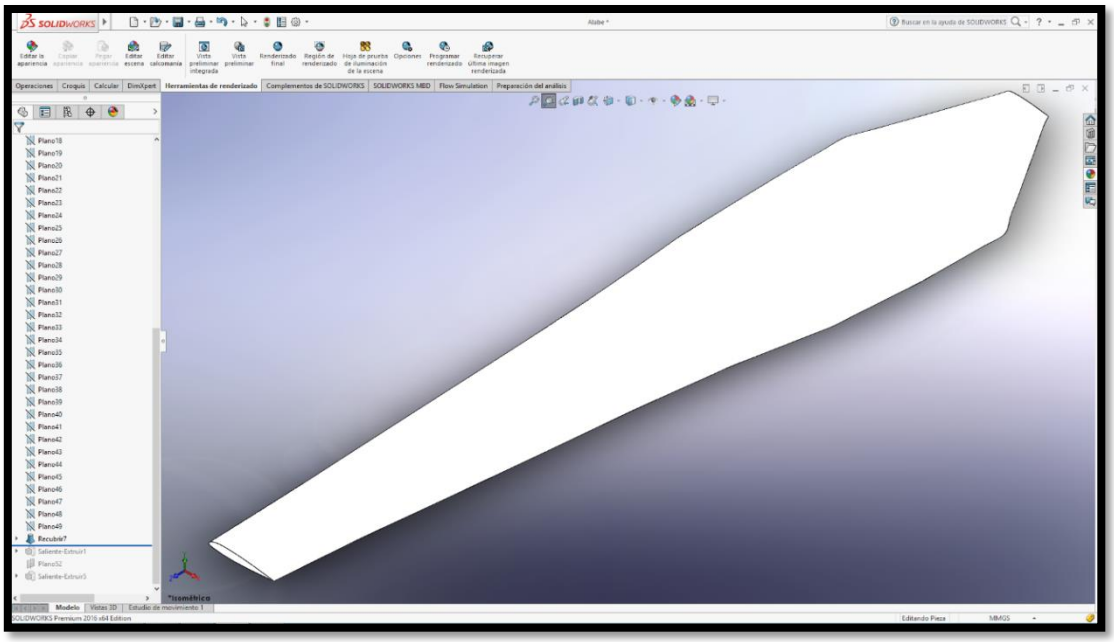


Figura 57- Fuente Autores, perfil sólido, solidworks

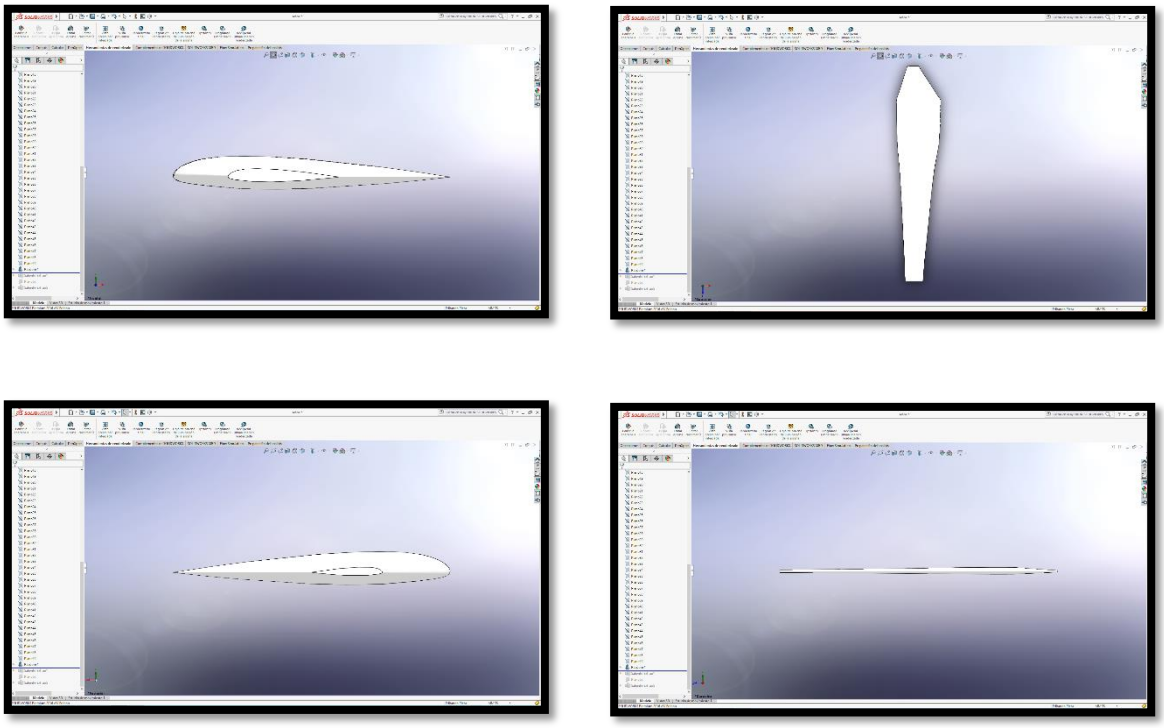


Figura 58- Fuente Autores, perfil, solidworks

De esta manera se concluye la consecución del perfil alar. El proceso continúa adicionando superficies que permitan la sujeción del perfil a piezas conexas conformando el conjunto final. Así mismo adicionaremos una pestaña que tendrá como función facilitar la medición de la inclinación del perfil alar respecto del cabezal. Para el presente diseño denotaremos que este se compone de 3 perfiles alares y una pieza adicional que llamaremos cabezal o buje.

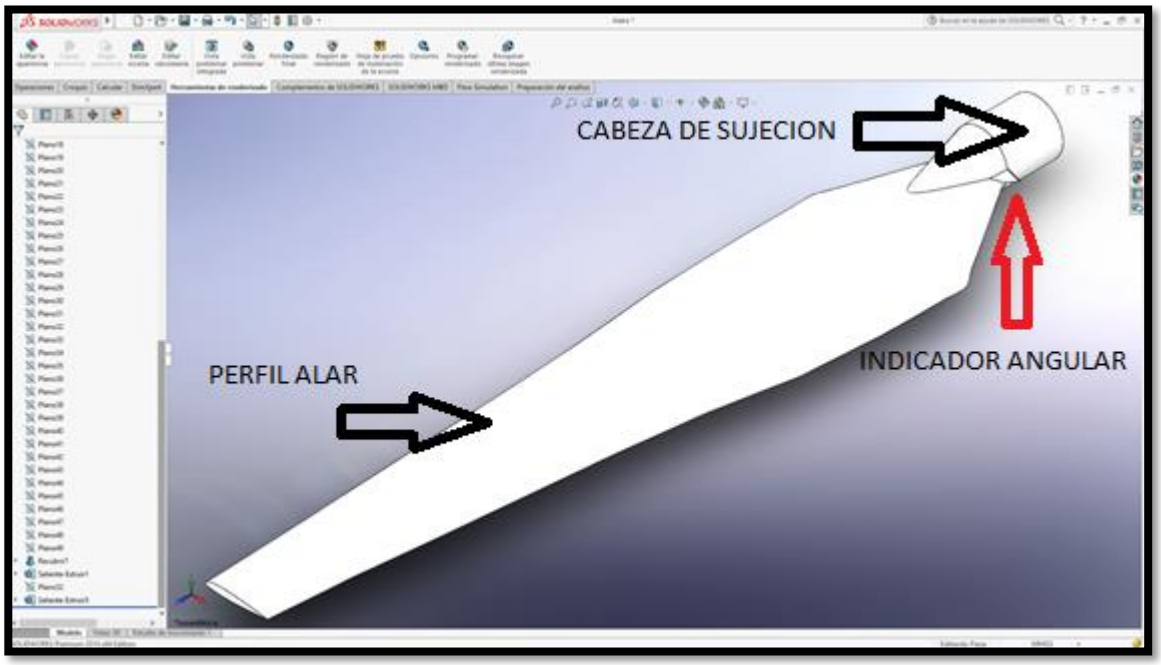
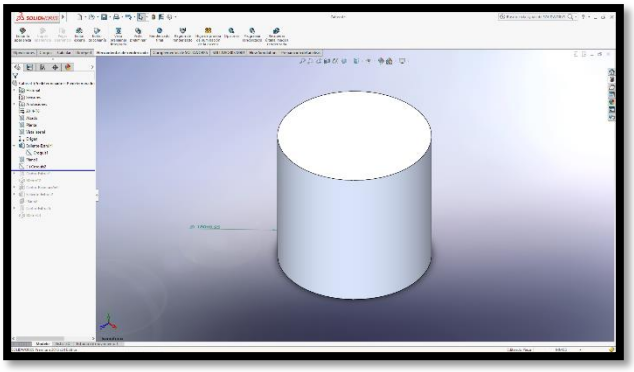
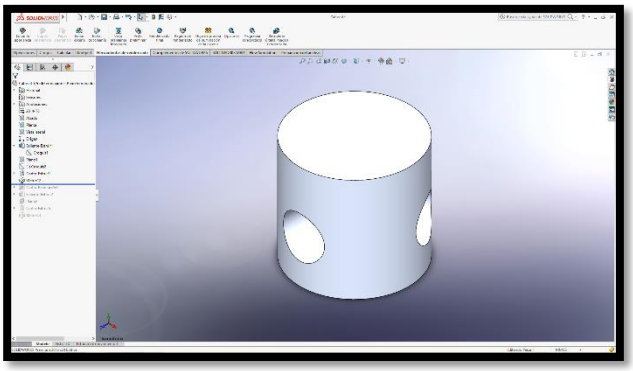


Figura 59- Fuente Autores, perfil alar, solidworks

Para la construcción del bloque central o cabezal, debemos llevar a cabo una extrusión cuyo diámetro tenga la capacidad de contener las cabezas de los tres perfiles alares. Estos tendrán como función obtener la energía de las corrientes de viento y trasmitirlas al buje, que para el caso tendrá la función de tren motriz y soporte de los alabes.



Figuras 60 y 61 Fuente Autores, cabezal, solidworks



Enseguida generamos un corte por revolución sobre la parte superior de la extrusión, esto con el fin de generar un perfil con menor resistencia aerodinámica. Usualmente los cabezales de las turbinas eólicas de eje vertical, tienen sobre su cabezal superficies elipsoides puesto que es una forma que contribuye en el funcionamiento del equipo y adicionalmente brinda características aerodinámicas como son la interrupción suave del flujo de viento sin generar turbulencias y vibraciones.

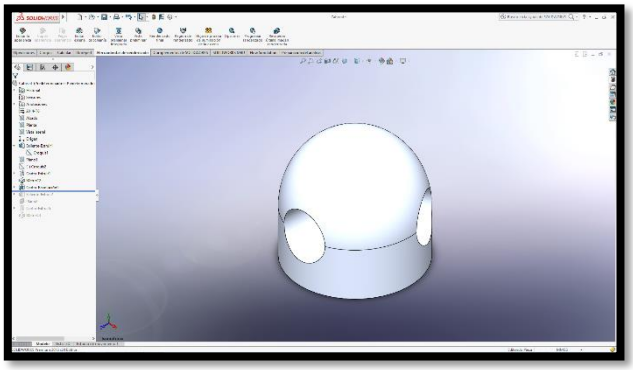
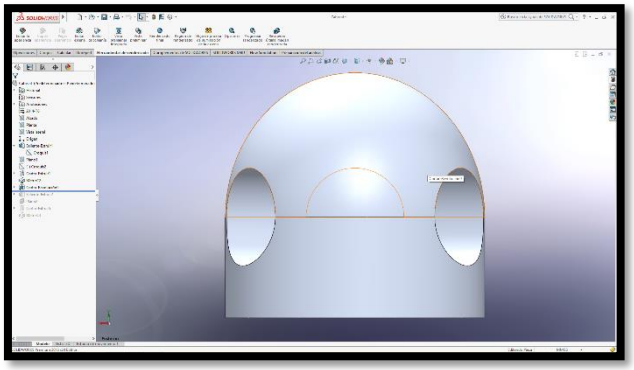
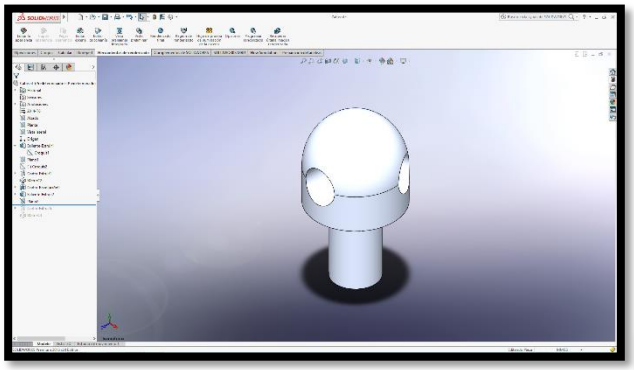


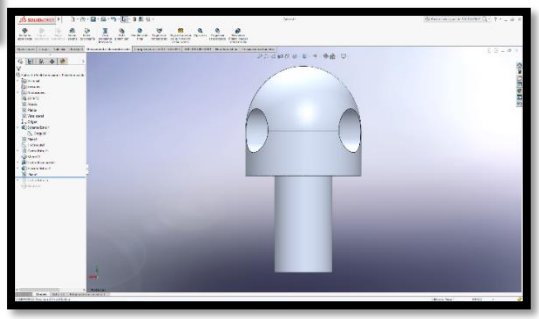
Figura 62, Fuente Autores, solidworks

Figura 63, Fuente Autores, cabezal, solidworks



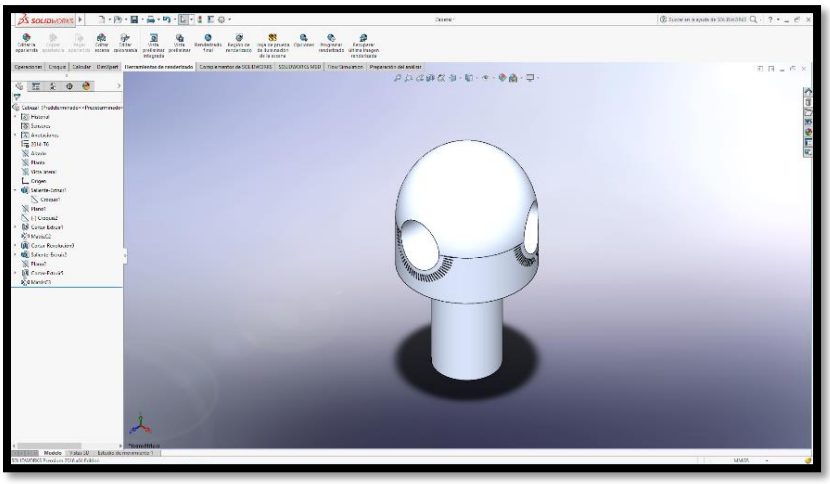
Adicionamos una saliente sobre la cara inferior que será en este caso el eje de soporte y transmisión del movimiento giratorio a un futuro dispositivo eléctrico tipo generador que se desee acoplar.

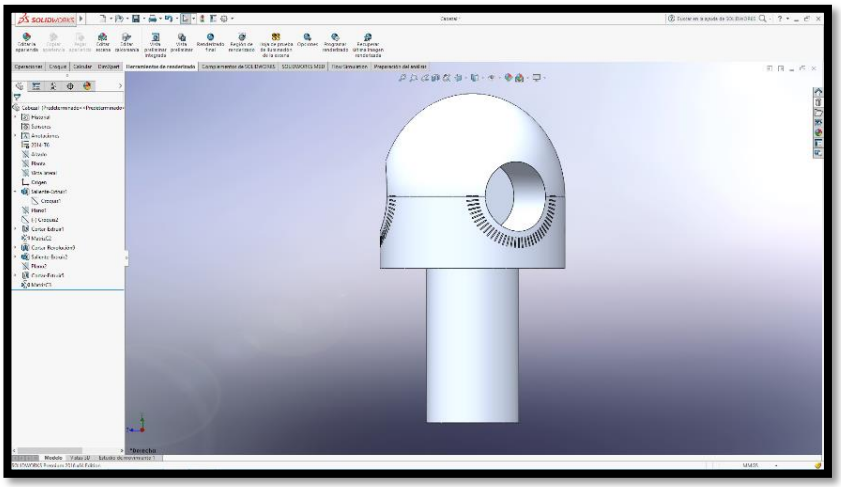


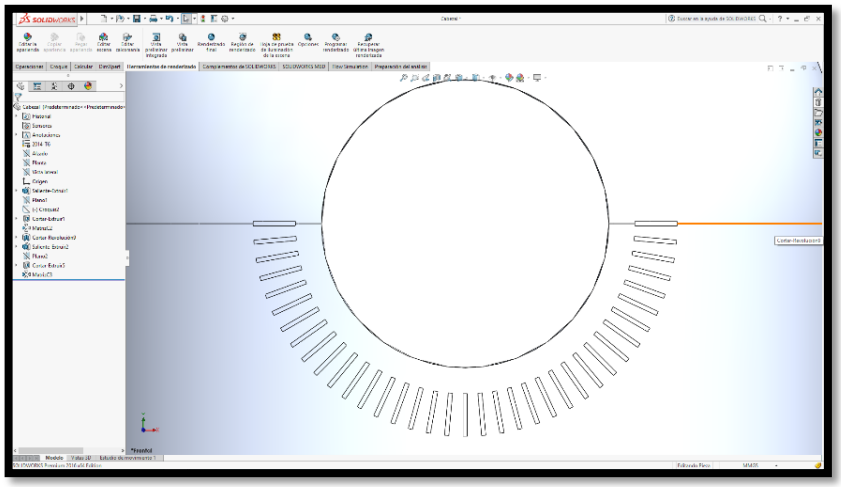


Figuras 64 y 65, Fuente Autores, cabezal, solidworks

Como se indicó durante la construcción del perfil alar, se debe construir un indicador adicional a fin de facilitar la medición del ángulo de inclinación o ángulo de ataque de los alabes. Estos medidores tienen como propósito obtener mediante ensayos en túnel de viento la inclinación bajo la cual el diseño se comporta de mejor forma. Para el presente prototipo se tomará el rango de 0 a 180 grados y se pondrán indicadores cada 5 grados.

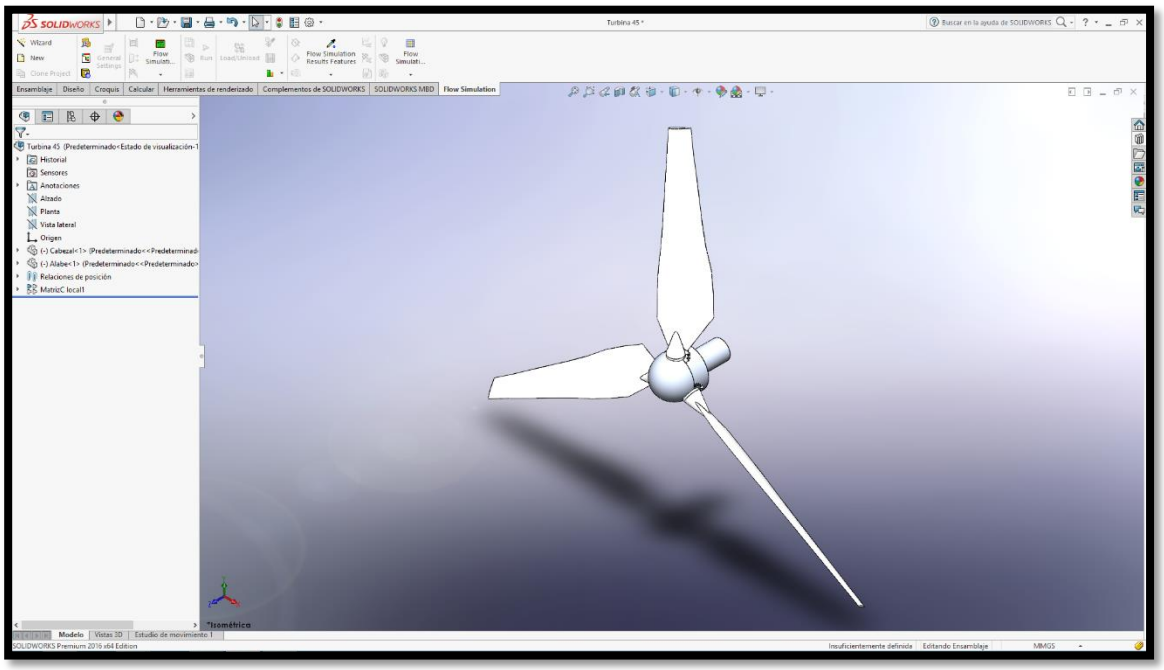


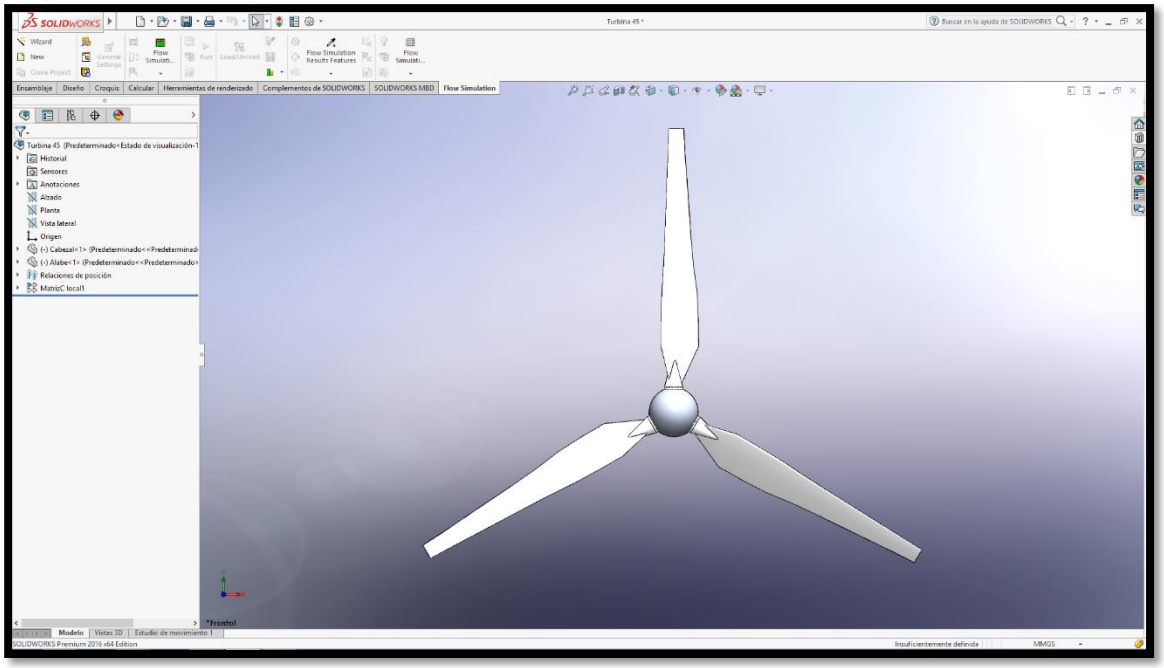




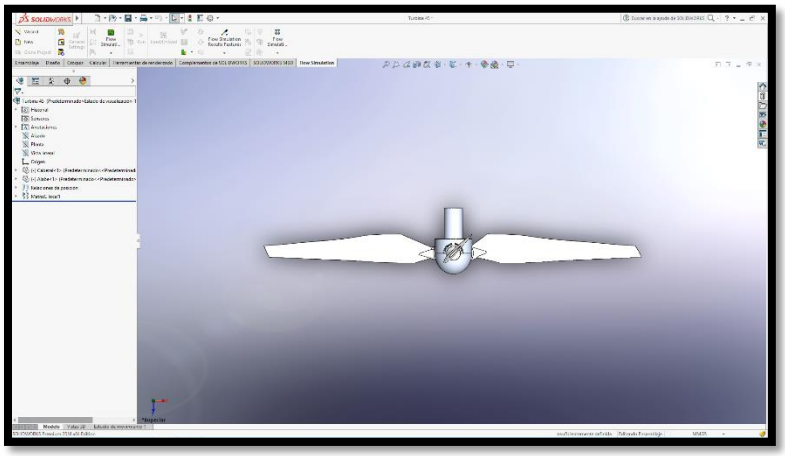
Figuras 66 ,67 y 68, Fuente Autores, indicador de ángulo, solidworks

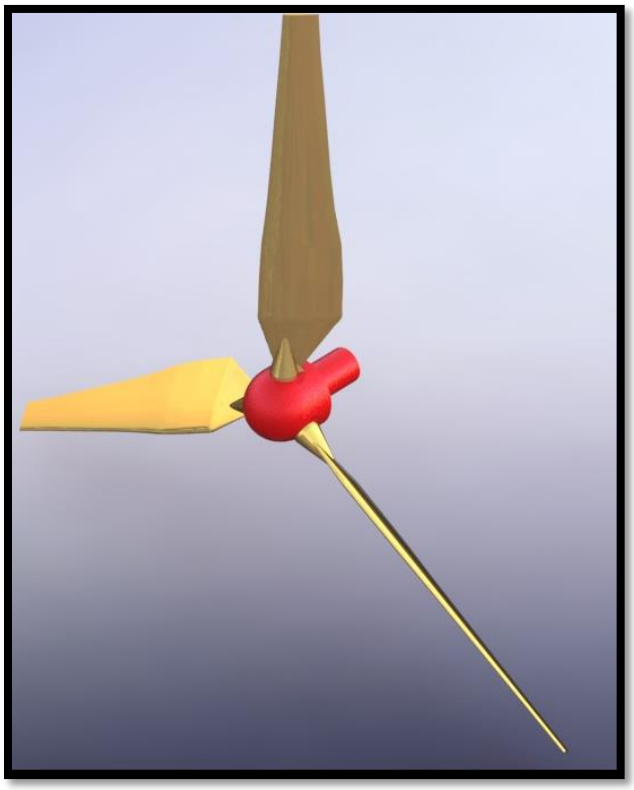
Para culminar con la construcción del prototipo en CAD, se procede con el ensamble del mismo, montando sobre el cabezal los alabes construidos anteriormente. Para este propósito se agregan algunas relaciones de posición, necesarias para el correcto ensamble de las piezas, además de garantizar un comportamiento estándar en los varios entornos a los cuales pueda ser exportado el modelo.





Figuras 69 y 70, Fuente Autores, ensamble prototipo, solidworks





Figuras 71 y 72, Fuente Autores, ensamble alabes, solidworks

Luego de realizado el diseño en CAD procedemos a el proceso de prototipado del diseño. Esto en una máquina de prototipado rápido la cual se encuentra disponible en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad tecnológica, y de la cual los autores hicieron uso para la consecución del modelo a escala. Para el presente modelo se generó un prototipo a una escala de 1:5.

Luego de realizado el diseño en CAD procedemos a el proceso de prototipado del diseño. Esto en una máquina de prototipado rápido la cual se encuentra disponible en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad tecnológica, y de la cual los autores hicieron uso para la consecución del modelo a escala. Para el presente modelo se generó un prototipo a una escala de 1:5. Adicionalmente fue impreso en material ABS como material principal y con un material de soporte denominado por el fabricante como Soluble (SST 1200es), el cual sirve como aporte para piezas y superficies de alta complejidad como es el caso de los perfiles alares que se llevaron a cabo.

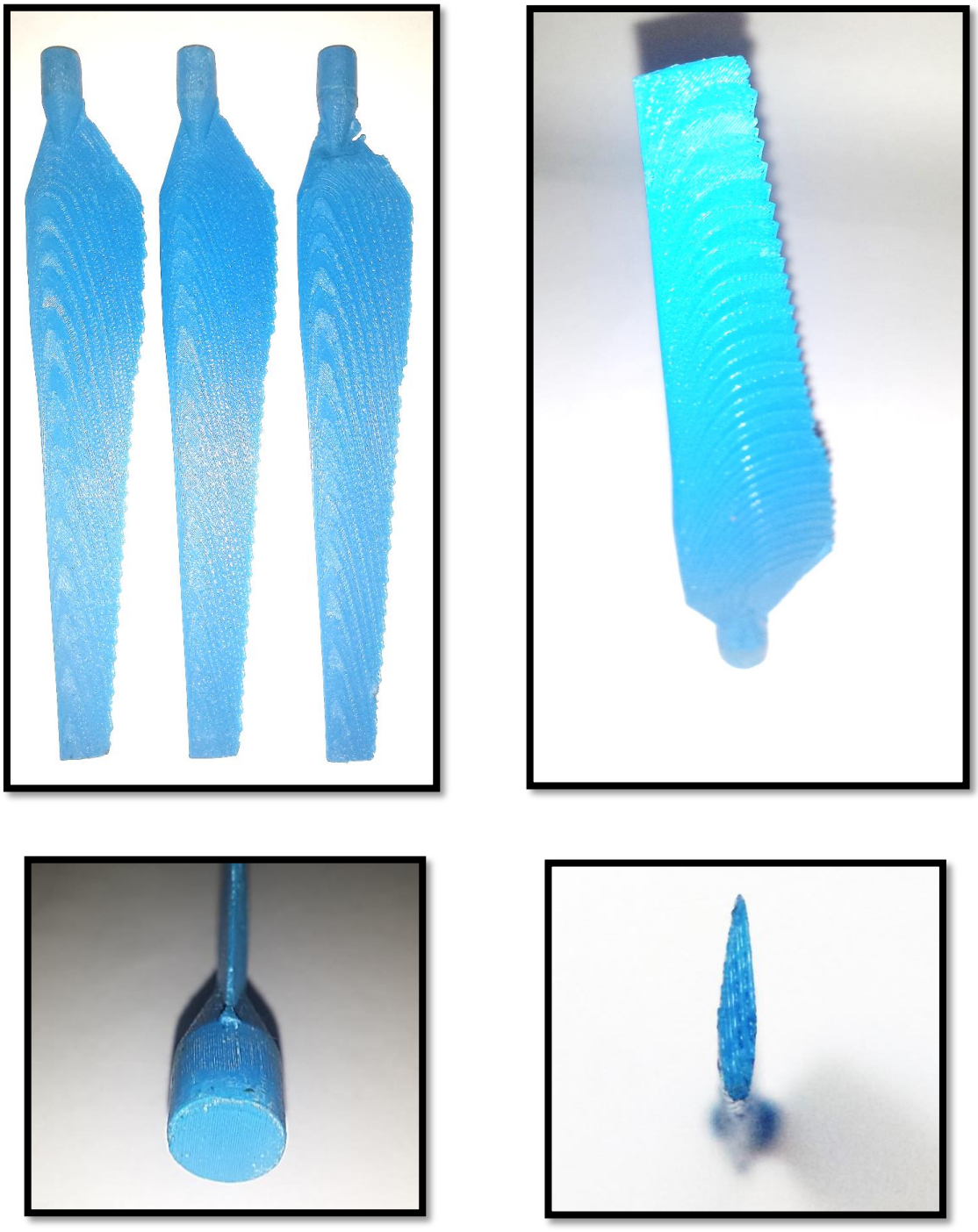
El equipo con el cual se en la facultad es de origen estadounidense y su fabricante es Stratasys; el modelo es el “Dimensión 1200es”. A continuación, se encuentran algunas imágenes del equipo: a la izquierda el dispositivo de prototipado y a la derecha la unidad de lavado junto con los cartuchos de impresión.



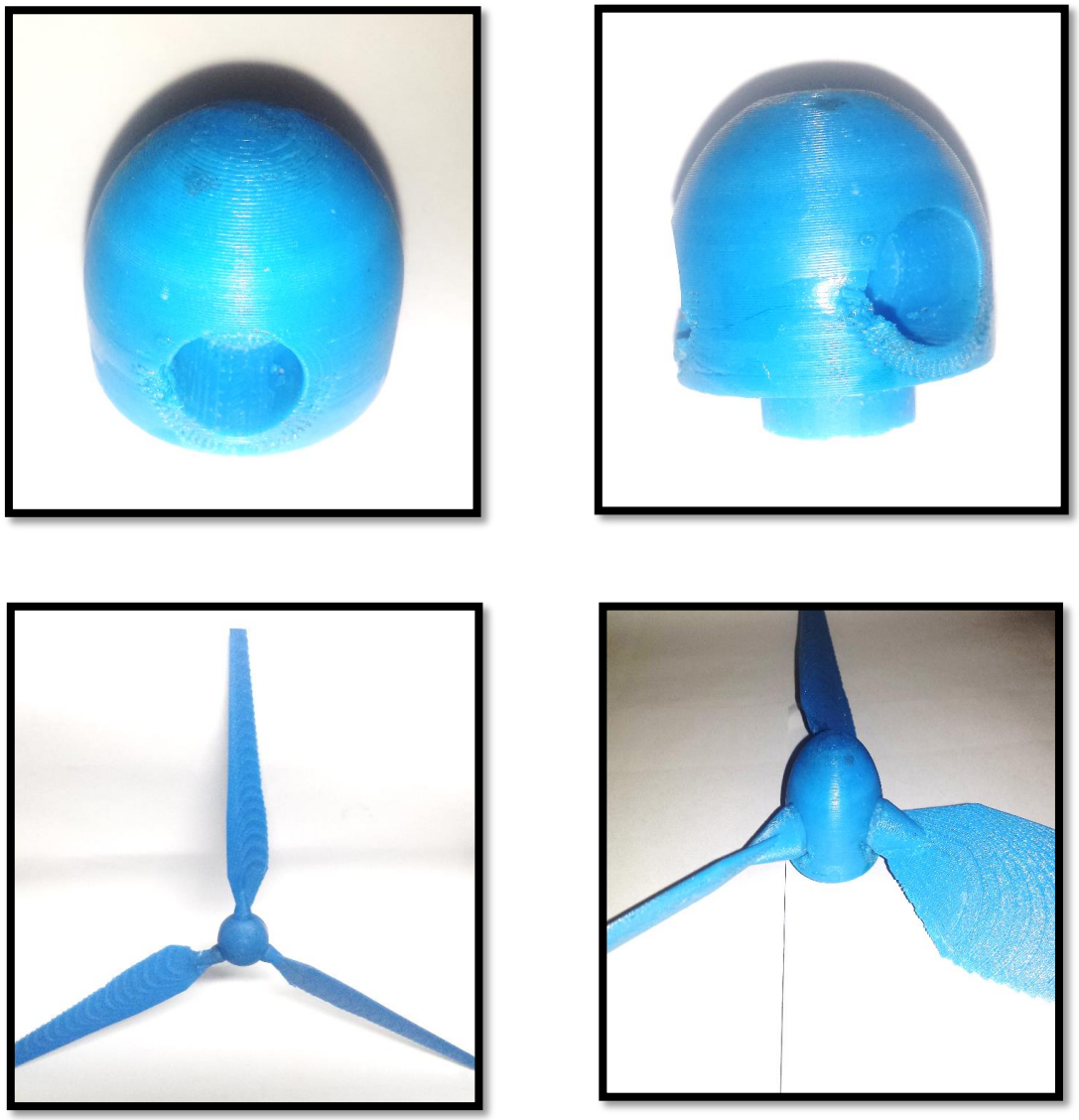


Figuras 73 y 74, Fuente prototipadora dimensión 1200, https://www.google.es/#q=prototipadora+1200+es

El objetivo principal de este prototipo es el de generar un espacio de pruebas real, con el fin de obtener datos reales del funcionamiento del prototipo y por ende tener una aproximación del funcionamiento del prototipo a escala real. Las piezas obtenidas de la máquina de prototipado se pueden observar a continuación.



Figuras 75. Prototipo de los alabes

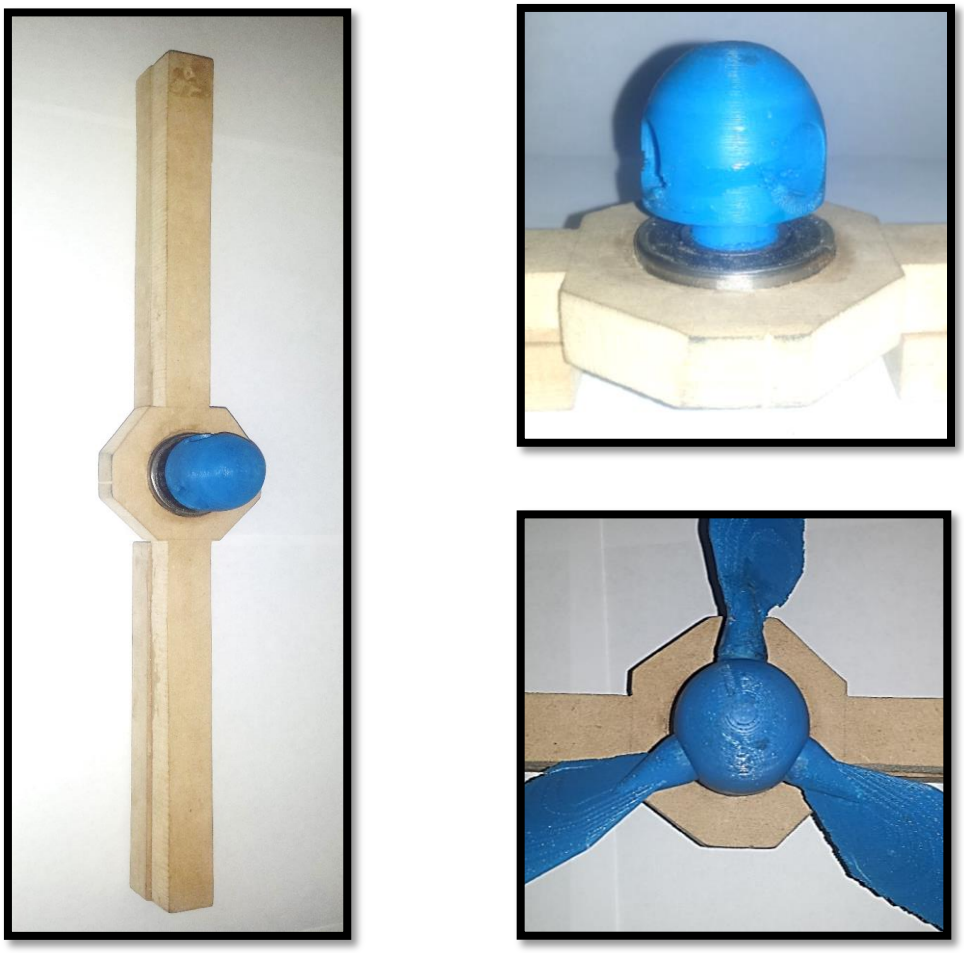


Figuras 76. Prototipo del aerogenerador

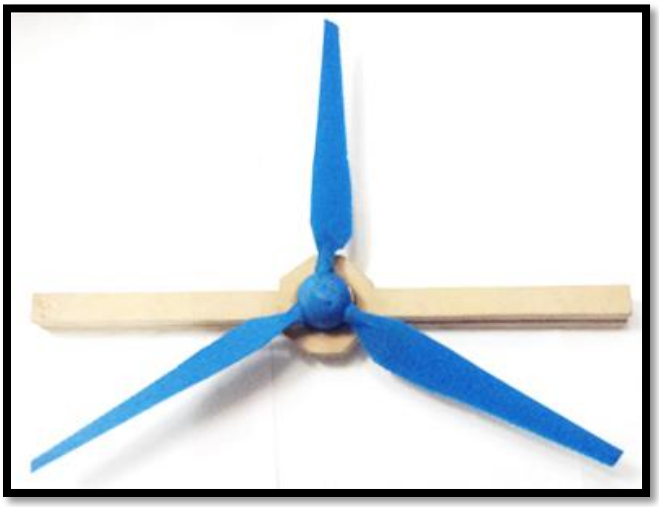
5.4 PRUEBAS EN TUNEL DE VIENTO

Para la realización de estas pruebas se contó con el apoyo de la Universidad Nacional, quienes a manera de préstamo permitieron la realización de dichos ensayos en las instalaciones de la facultad de ingeniería; lo anterior dado que en la facultad no se cuenta con el equipo adecuado e idóneo para la ejecución de dichas pruebas.

Con el fin de llevar a cabo las pruebas del prototipo se debió realizar una visita preliminar a las instalaciones de la Universidad Nacional, esto con el fin de indagar acerca del estado de los equipos de prueba e indagar respecto de sus configuraciones y geometrías, y de esta manera concebir los soportes necesarios para el correcto soporte y sujeción del prototipo sobre el túnel de ensayo de vientos. En seguida se puede observar la configuración utilizada para el acople de las piezas a el túnel de viento.

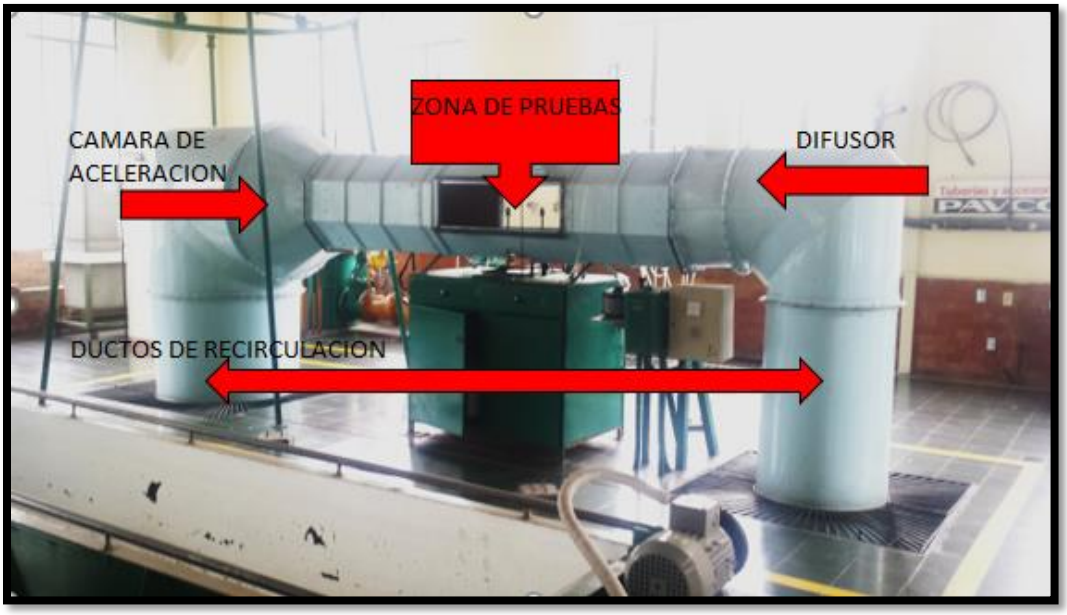


Figuras 77. Acoples de sujeción a túnel del viento



Figuras 78. Acoples de sujeción a túnel del viento

El equipo sobre el cual se realizaron los ensayos, es un túnel de viento de ciclo cerrado, el cual consta de un ventilador, una cámara de aceleración y un difusor, una zona de pruebas, además de los respectivos ductos por los cuales recircula el aire contenido en el circuito de viento. Este túnel de viento proporciona velocidades entre 2 y 30 m/s, lo cual lo posiciona dentro de la gama de túneles de viento subsónicos.

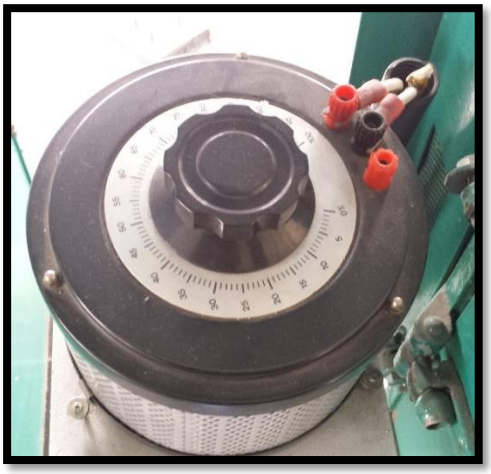


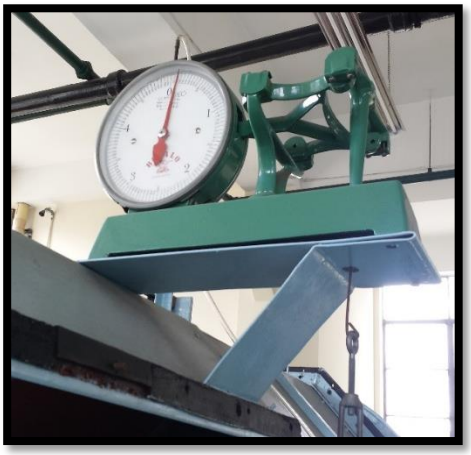
Figuras 79. Túnel de viento Universidad Nacional de Colombia











Figuras 80. Implementos que componen el túnel de viento



Figuras 81. zonas de ensayos túnel de viento

5.5 ANALISIS DE LINEAS DE FLUJO

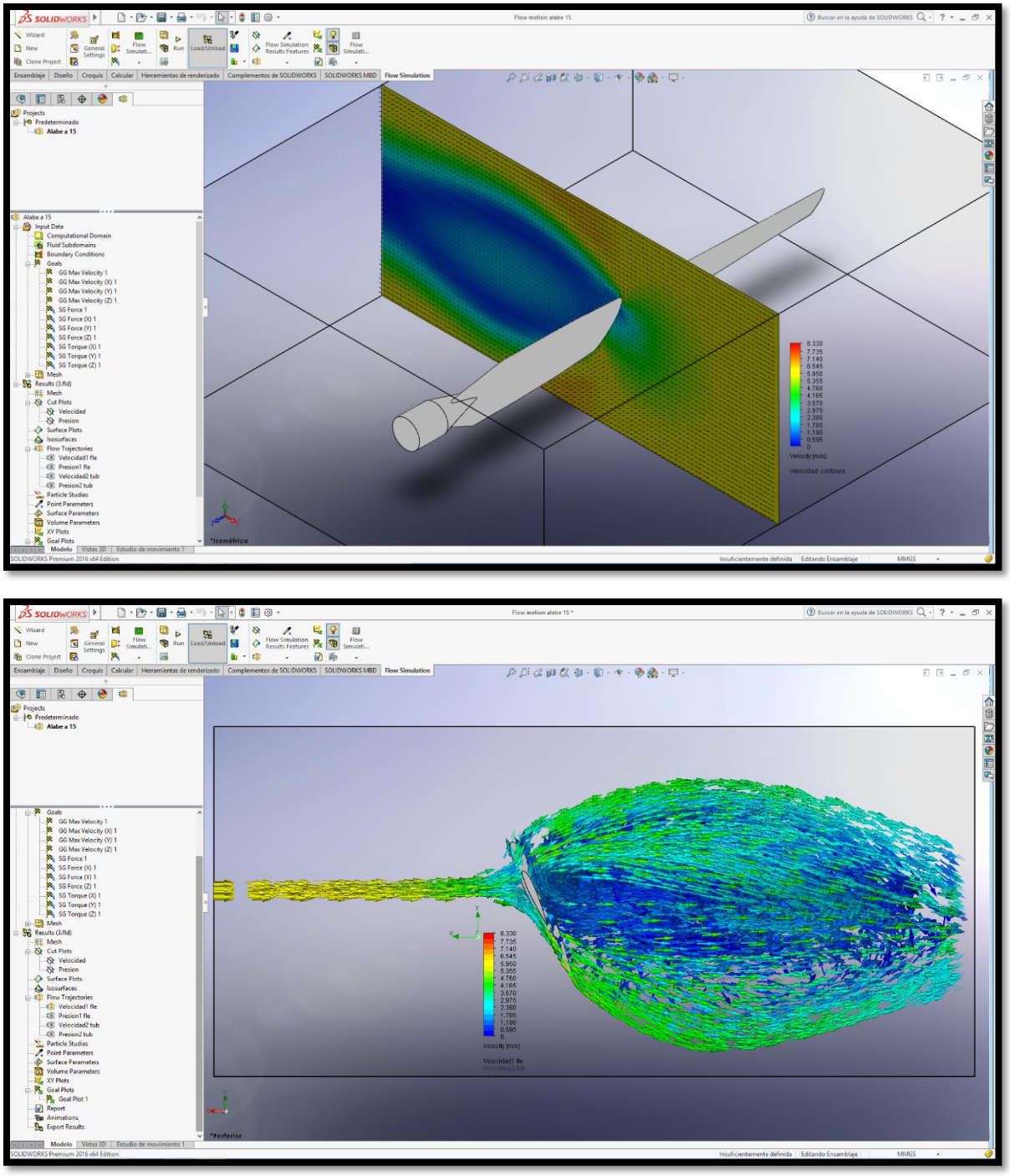
Alabe con inclinación a 10 grados sobre la vertical.

Sobre este perfil se logra observar las líneas de flujo en la superficie superior del alabe, además se puede observar la generación de una pequeña zona de presión baja tanto al final del perfil alar como en la zona posterior de impacto de la corriente de viento.



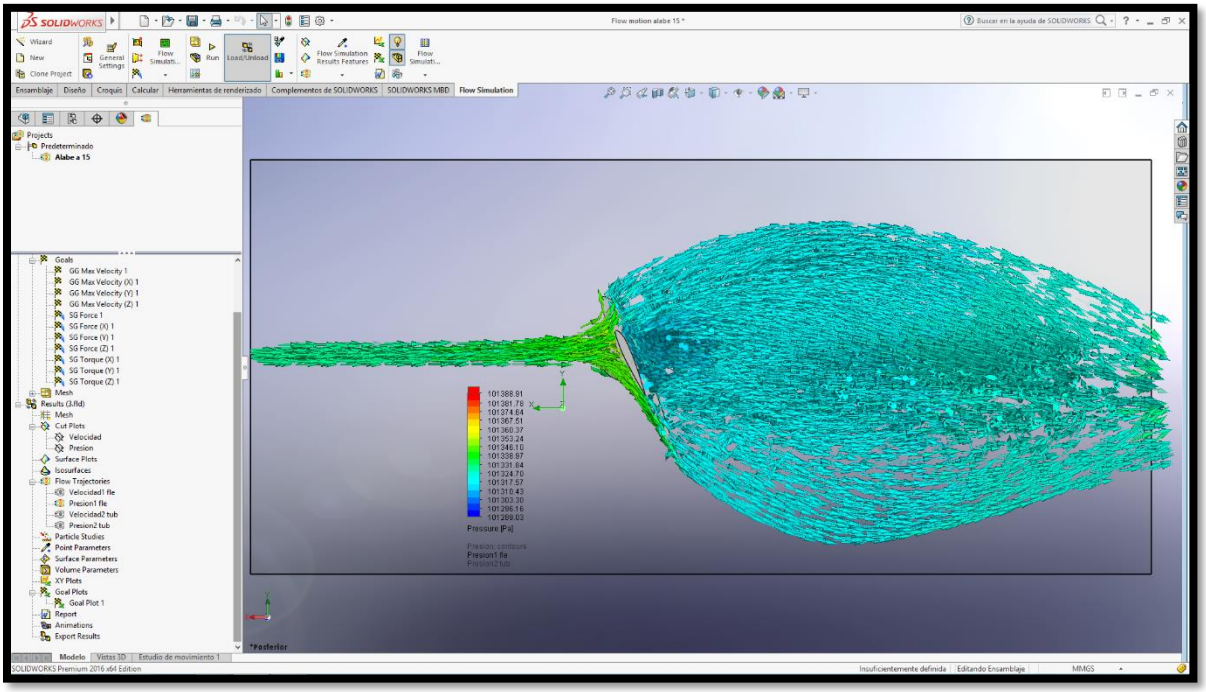
Figuras 82. Ensayo perfil alar túnel de viento.

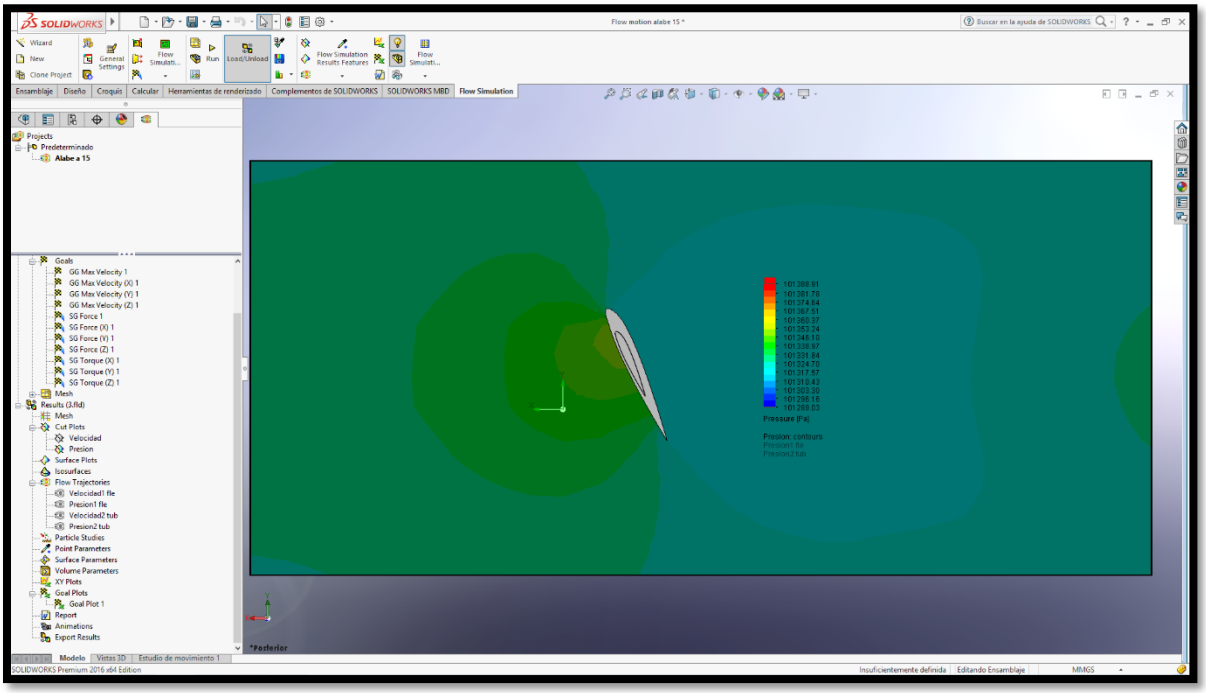
En la siguiente imagen observamos el comportamiento en un entorno simulado CAD del mismo perfil alar, a la misma inclinación y velocidad. Como anotábamos antes en la cola del perfil se logra observar una superficie de baja presión y por ende baja velocidad, lo cual verifica que la apreciación que se hace en el entorno real es veraz y se pudo verificar en el entorno simulado.



Figuras 83 y 84. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

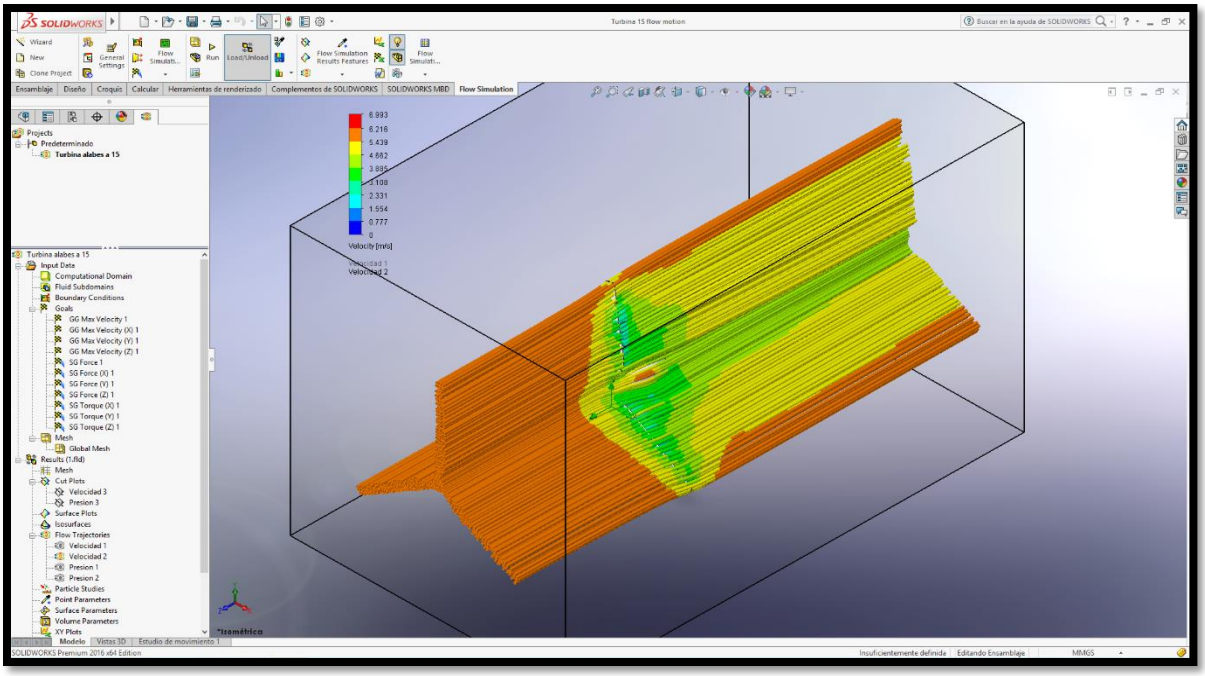
En las siguientes ilustraciones se puede observar un análisis computacional de presiones ejercidas sobre el perfil alar, en las cuales se evidencia claramente una caída de presión entre la zona de impacto de la corriente de viento y la zona de salida o desprendimiento. Estas caídas son consecuencia de la resistencia que ejerce el perfil alar a el flujo continuo del viento, debido a su ángulo de inclinación; adicionalmente observamos la generación de vórtices en la parte posterior del perfil debido a el mismo efecto.

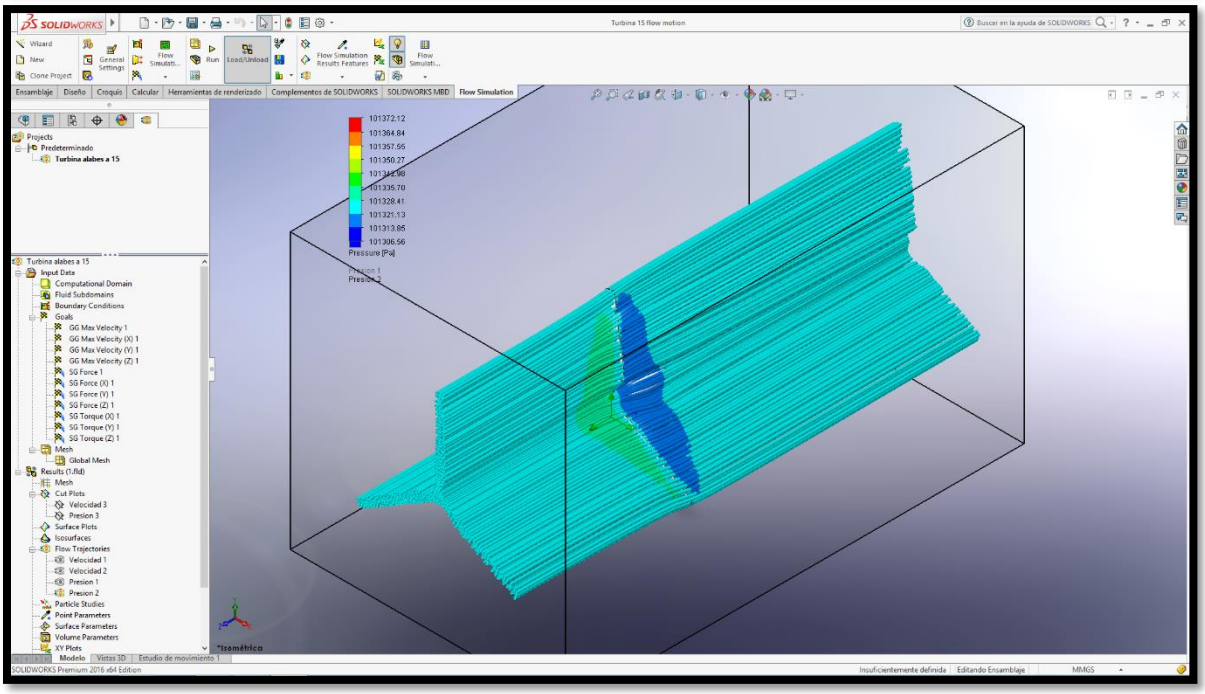




Figuras 83 y 84. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

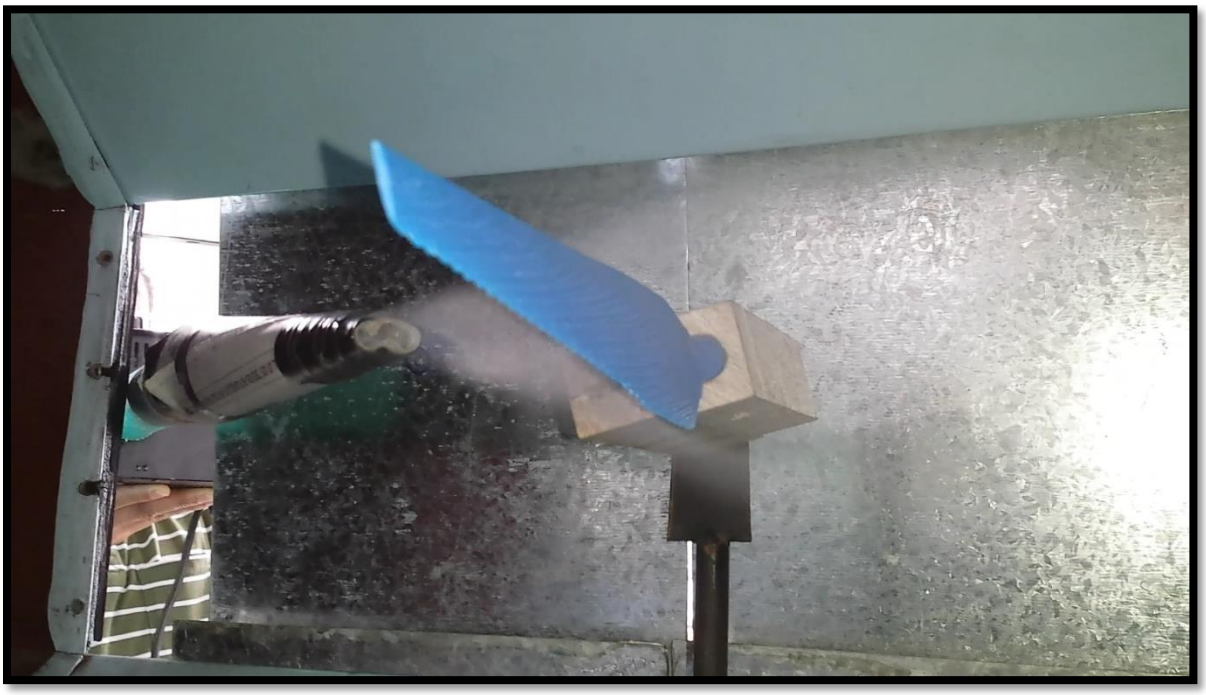
El comportamiento del prototipo ensamblado y con los alabes a 10 grados sobre la vertical, se puede revisar en las siguientes imágenes, en las cuales observamos un flujo constante en la corriente de viento, que luego de ser interrumpido por el modelo tiene una caída de velocidad considerable, pasando de una velocidad de 6 metros por segundo a una velocidad de 3 metros por segundo. Al mismo tiempo en el segundo cromo evidenciamos un efecto similar, pero en este caso es sobre el efecto de la presión en el modelo.



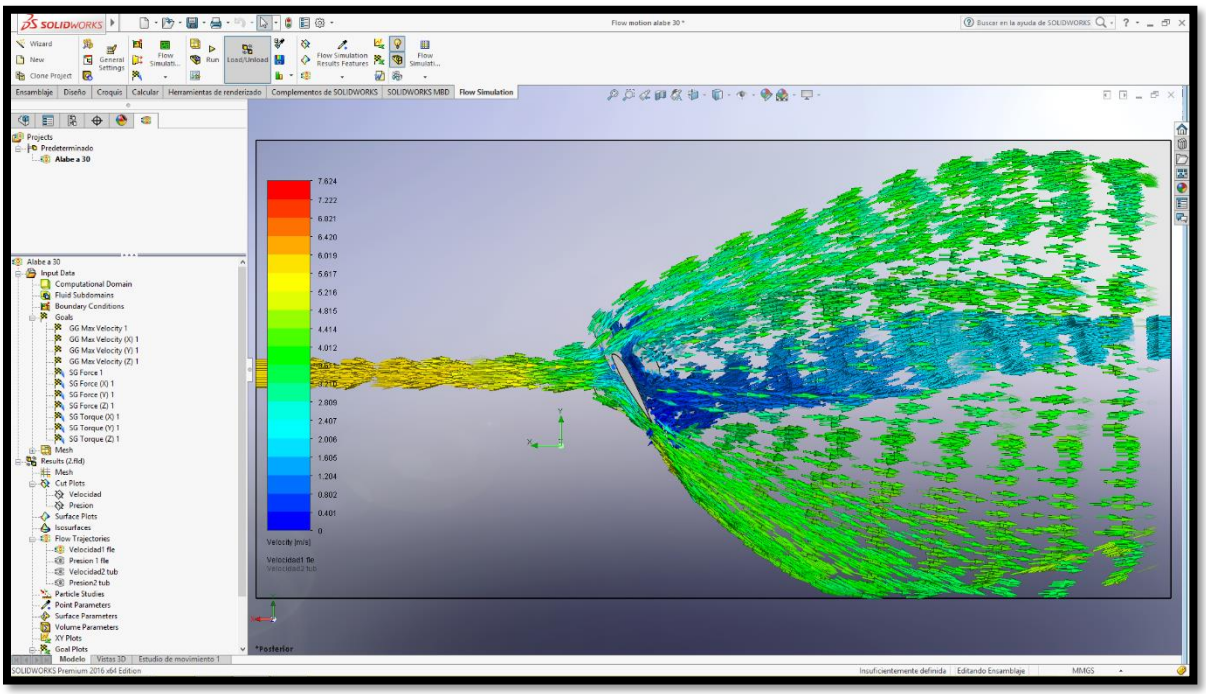


Figuras 85 y 86. Simulación de velocidad y presión mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

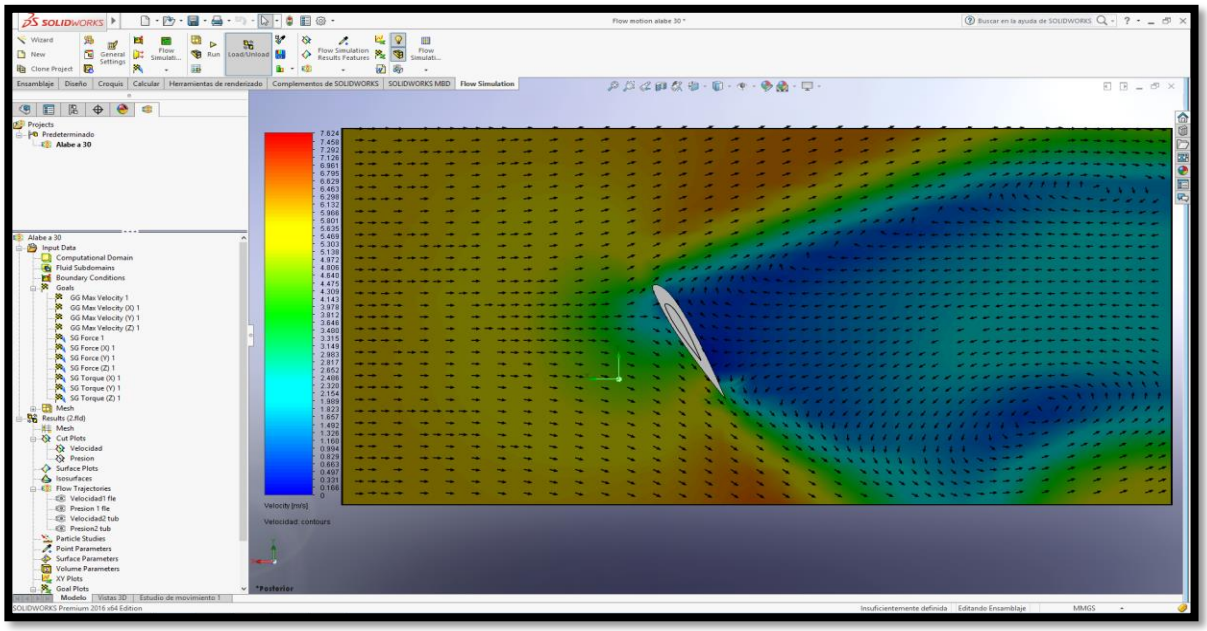
Alabe con inclinación a 30 grados sobre la horizontal.



Figuras 87. Ensayo perfil alar túnel de viento.

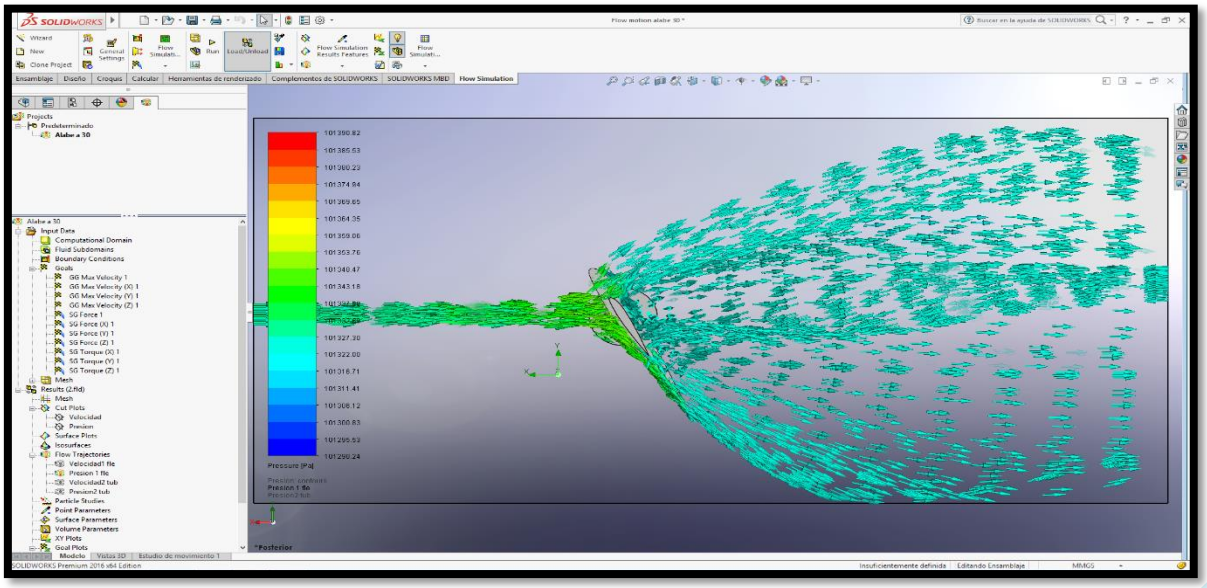


Figuras 88. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

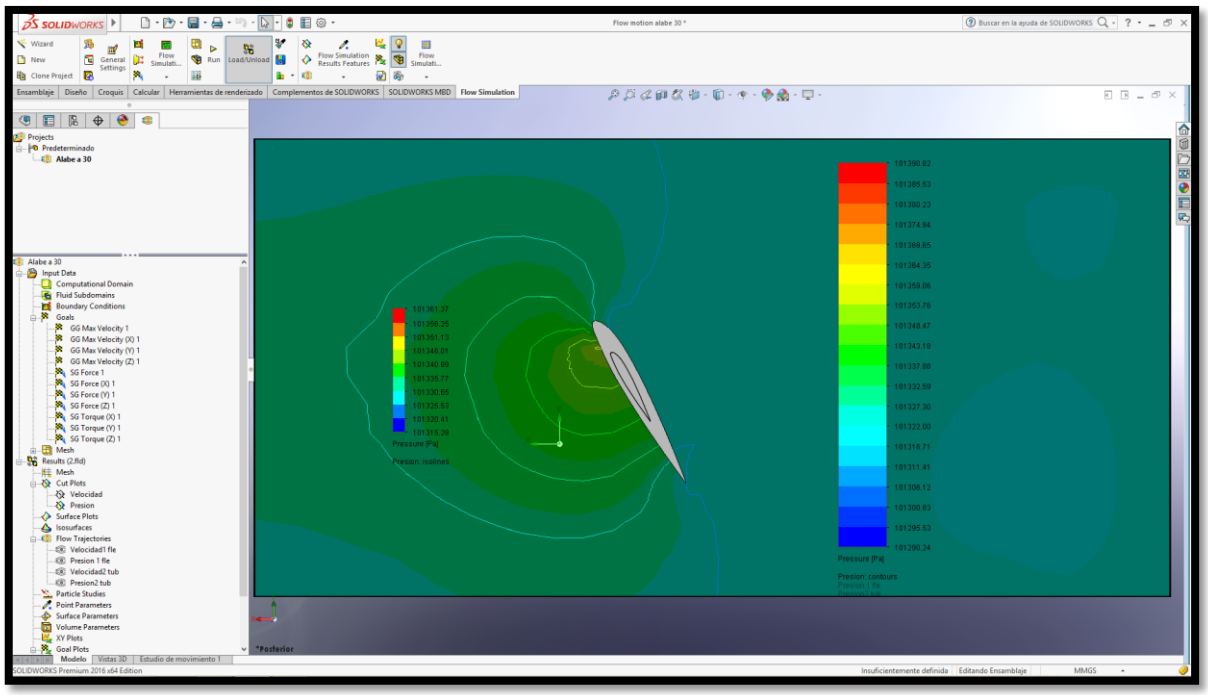


Figuras 89. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

En las anteriores imágenes se puede observar el comportamiento tanto real como virtual de las líneas de flujo generadas por el paso del viento sobre el perfil alar, en ellas se debe prestar atención especial sobre las zonas de color rojo y verde, que demuestran una aceleración del viento al paso sobre el perfil alar; esto es debido a que, si se tiene una mayor inclinación respecto de la vertical, la resistencia a el flujo de la corriente de viento es menor. En consecuencia, la desaceleración de la velocidad al impactar sobre la cara inferior del perfil, es algo más baja en comparación con el ensayo anterior, por el contrario, las líneas de flujo se refuerzan y dan como resultado un aumento de velocidad y presión en las zonas inmediatamente posteriores al borde de ataque y salida del perfil. En seguida podemos evidenciar algunos cromos donde se observa la caída de presión que acotamos anteriormente.

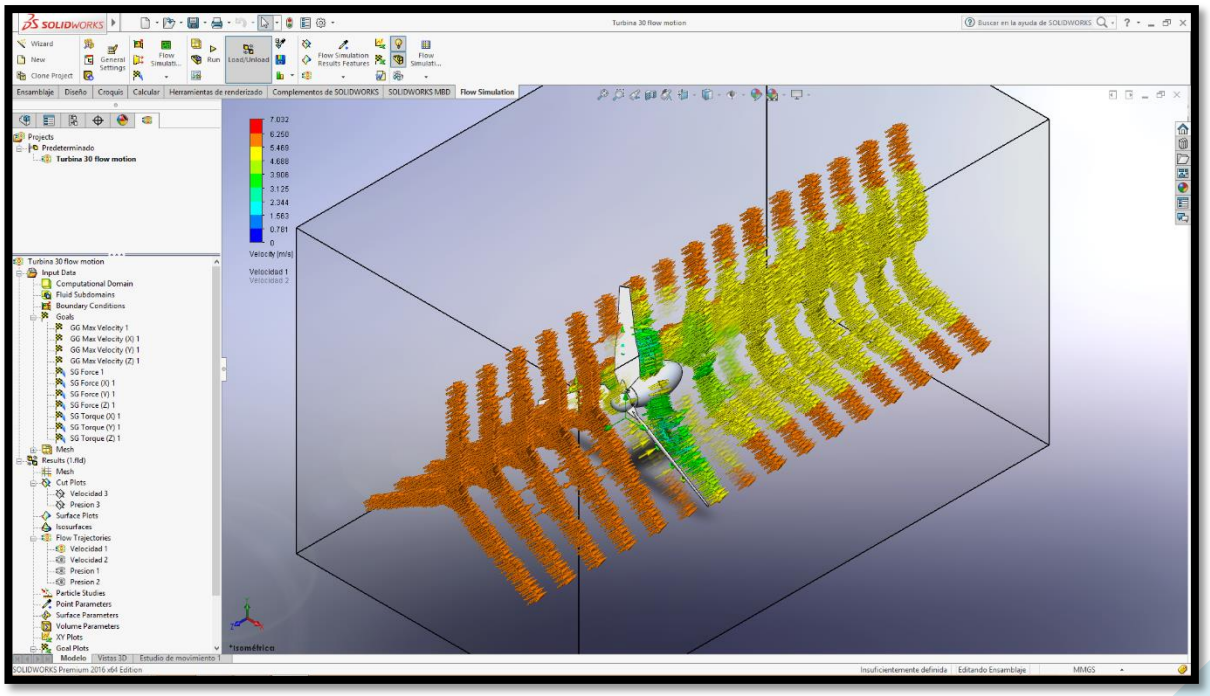


Figuras 90. Simulación de presión mediante elementos finitos. Solidworks-Autores



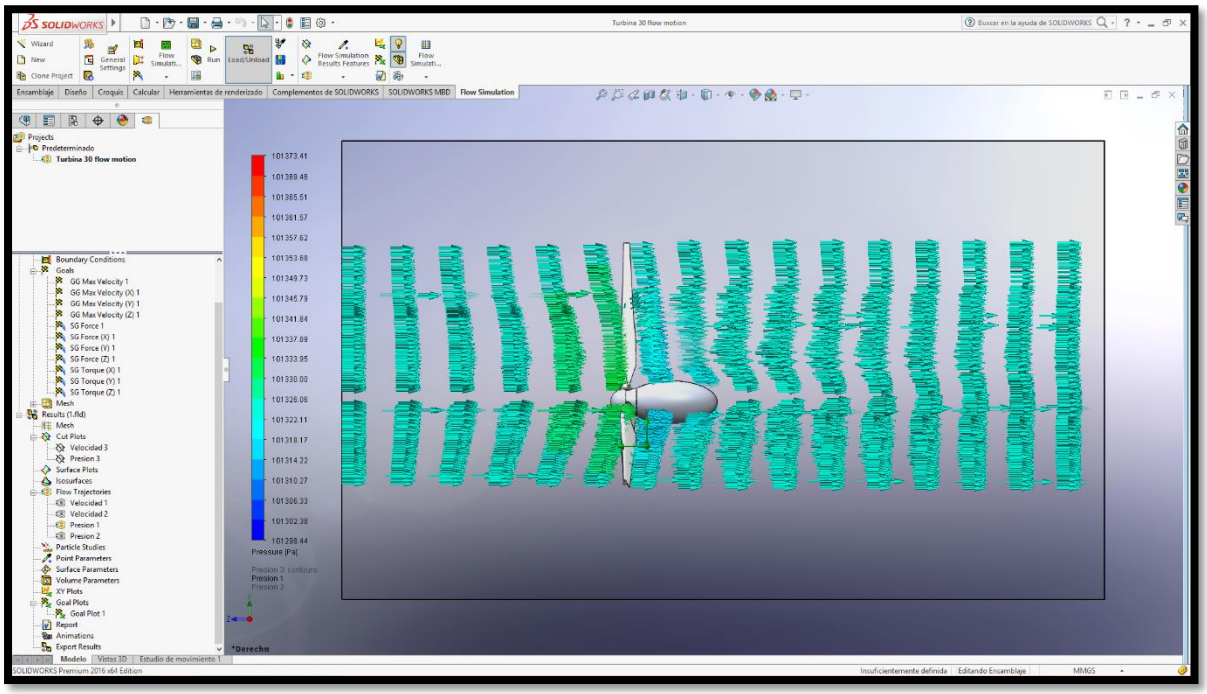
Figuras 91. Simulación de presión mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

En concordancia con las afirmaciones anteriormente hechas, observamos en las imágenes consecutivas que las franjas de baja velocidad azules y verdes son poco evidentes, lo cual indica que las caídas de velocidad no son altas como se indicó anteriormente. Adicionalmente observamos que el rango de caída en las velocidades está entre los 6 metros por segundo y 5 metros por segundo.



Figuras 92. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

Asimismo, en la siguiente figura podemos verificar la afirmación anterior y recordar que a medida que la presión baja la velocidad también lo hace, es decir son directamente proporcionales para el caso presente. De esta forma observamos que la presión es poco más o menos uniforme a lo largo de toda la trayectoria.



Figuras 93. Simulación de presión mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

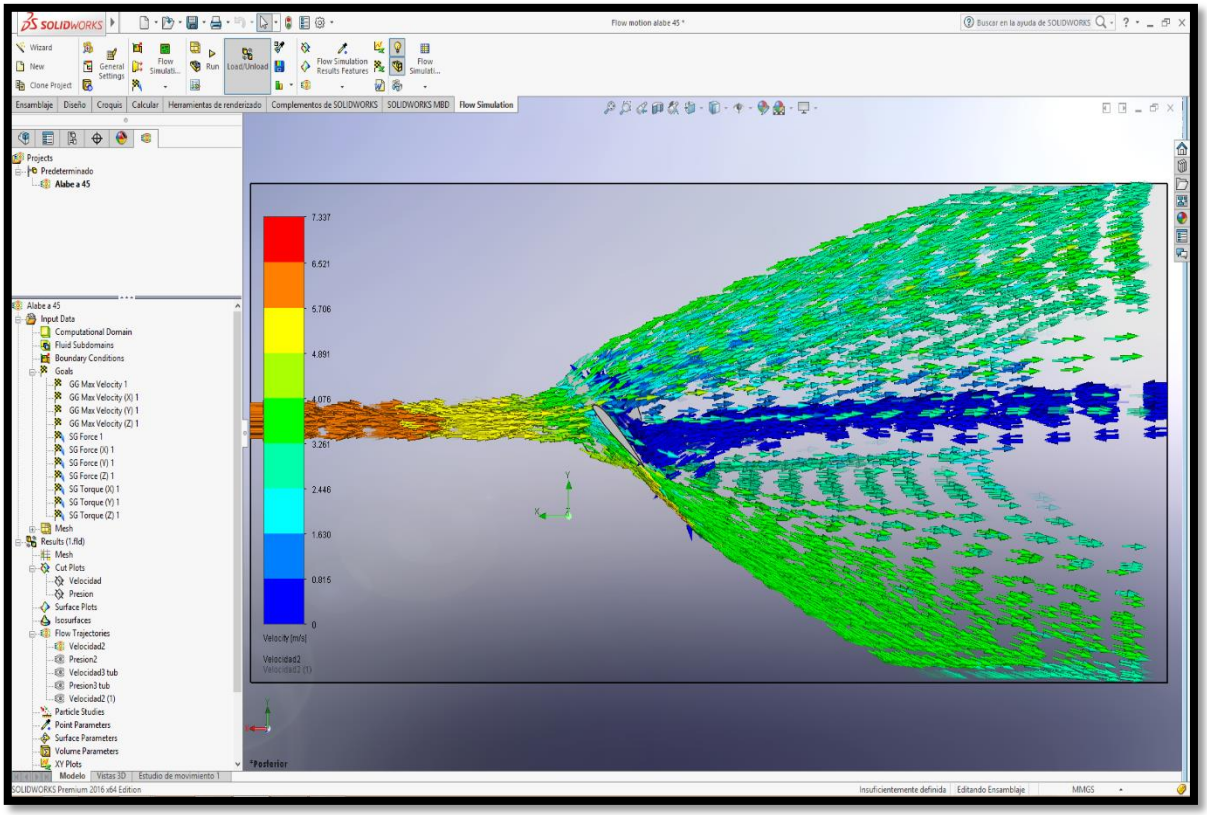
Alabe con inclinación a 45 grados sobre la horizontal.



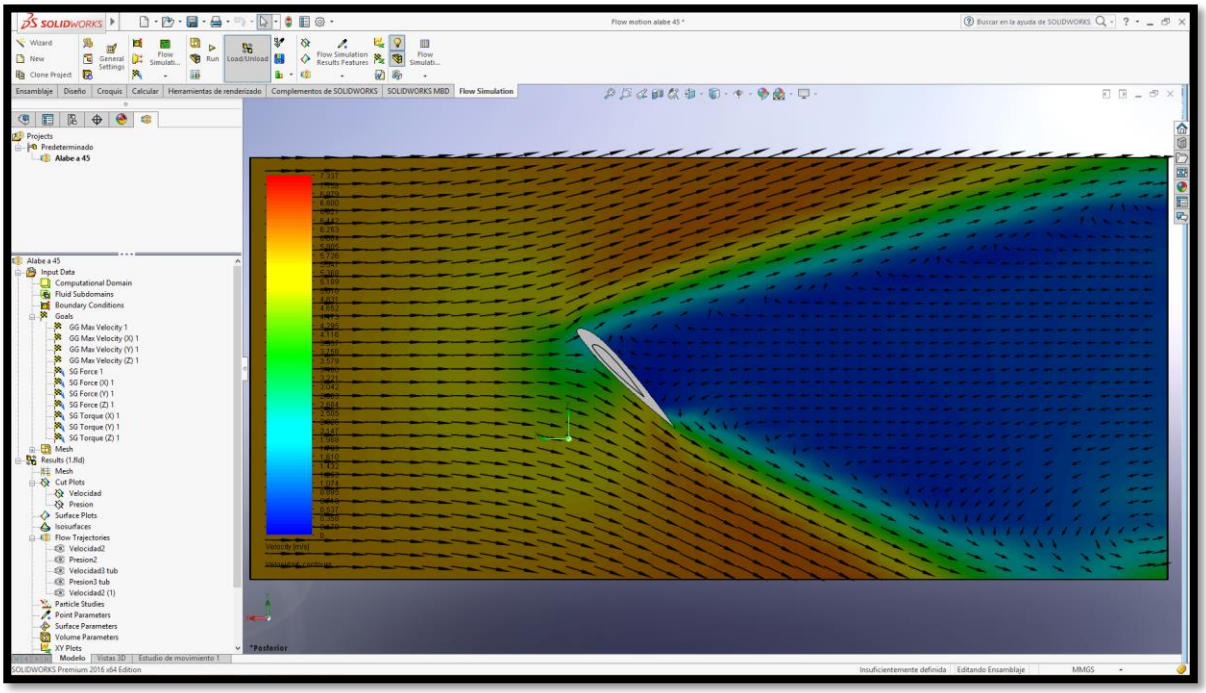
Figuras 94. Ensayo perfil alar túnel de viento.

Para este caso observamos que se genera una gran superficie de desprendimiento sobre la cara superior del perfil alar. Como lo hemos verificado con los ensayos anteriores las superficies sobre las que no incide el flujo de viento generan grandes caídas de presión y por consiguiente grandes caídas de velocidad, esto se denota claramente sobre la cara posterior del perfil.

Al tener un mayor ángulo de ataque las velocidades generadas a lo largo de la superficie de contacto serán mayores, es decir las velocidades que se logran sobre la cara inferior del perfil serán un tanto mayores que las velocidades de entrada sobre el borde de ataque, ello se visualiza en la siguiente imagen donde la cara inferior del alabe muestra tonos verdes intensos que obedecen a velocidades de 4.5 metros por segundo, mientras sobre el borde de ataque se observan azules claros, los cuales representan velocidades de 2 metros por segundo. Adicionalmente sobre el borde de salida notamos tonos de color marrón, que denotan velocidades de hasta 6 metros por segundo.

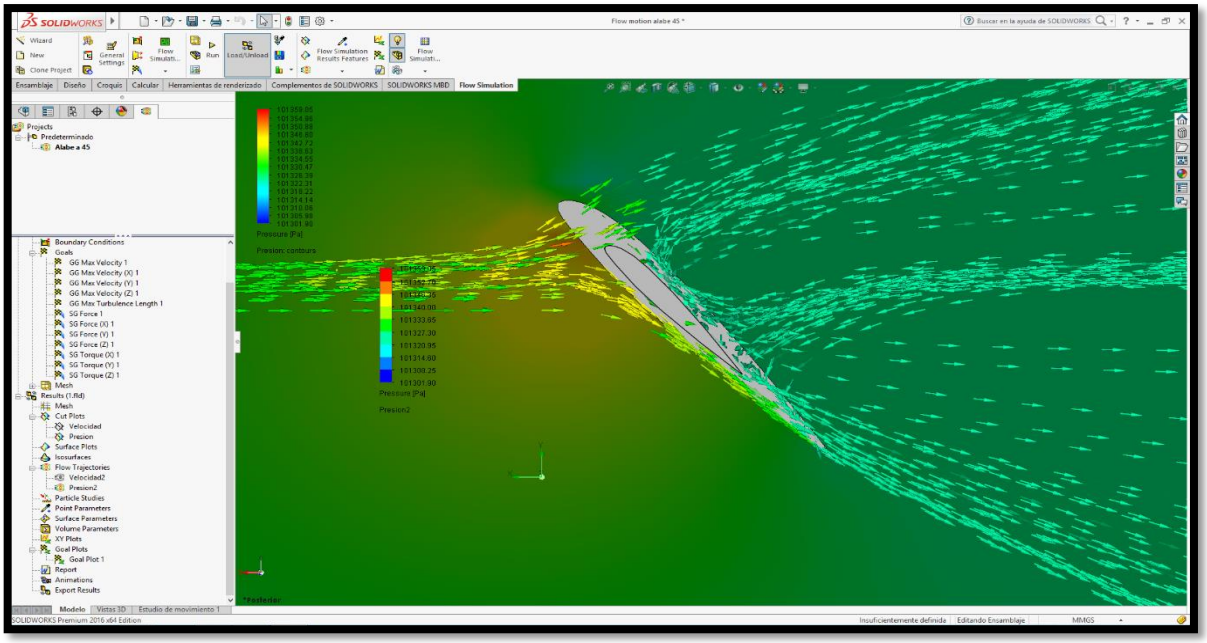


Figuras 95. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores



Figuras 96. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

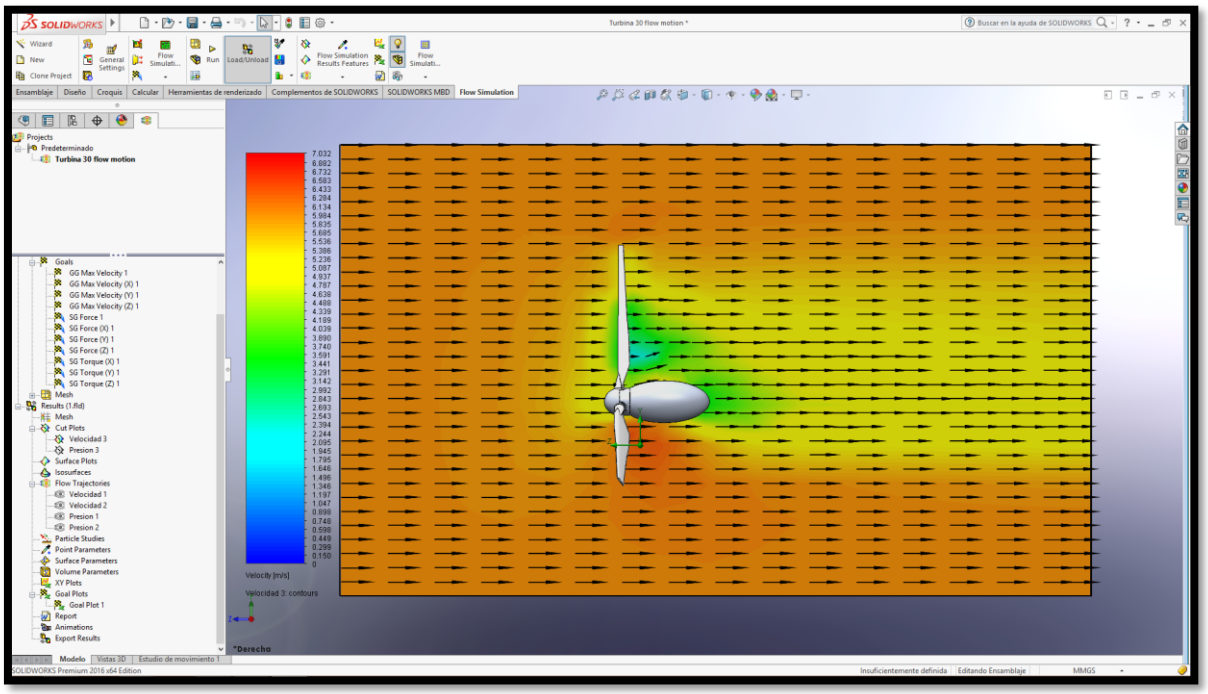
A modo de verificación en la gráfica de presiones del mismo ensayo, observamos una presión alta en la cara inferior y borde de ataque del perfil, y como se ha mencionado anteriormente da como resultado velocidades altas sobre esta superficie, mientras que en la cara superior se evidencia una alta caída de presión y por consecuencia una velocidad muy baja. Para este ejemplo anotamos una caída en la velocidad desde los 6 metros por segundo y hasta velocidades cercanas a 0 (esto sobre la superficie superior del perfil alar).



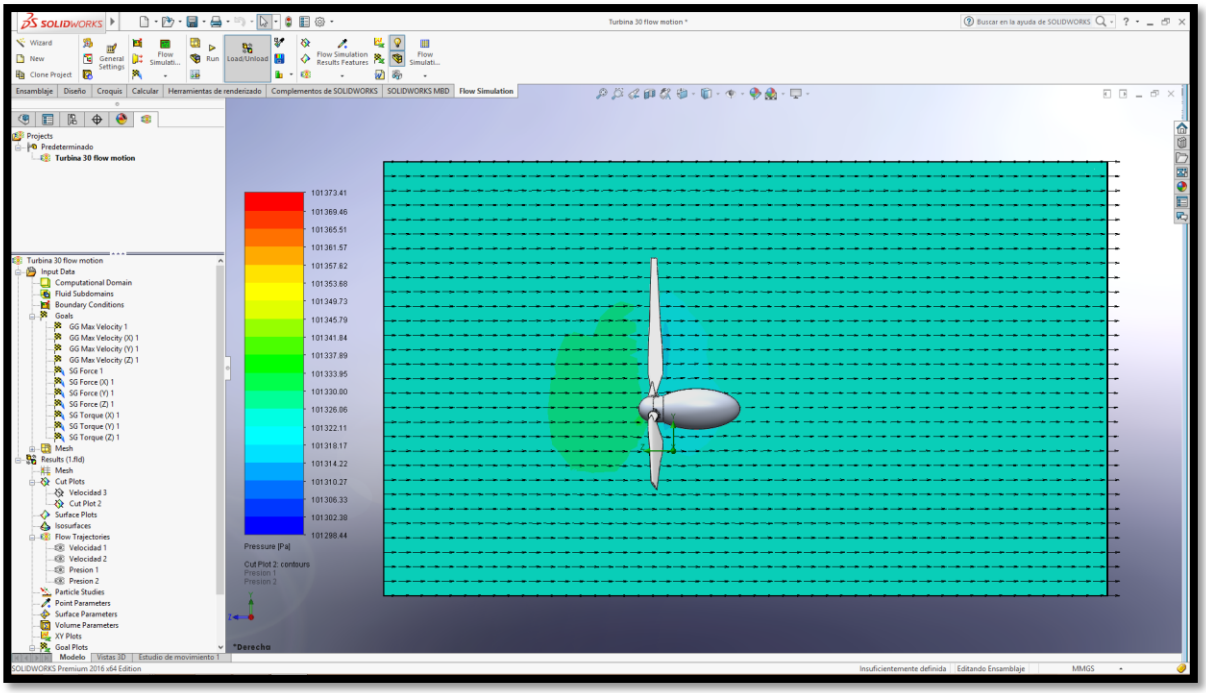
Figuras 97. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

En el ensayo del prototipo general con los alabes en posición de 45 grados, se comprobó que este ángulo de ataque proporciona las mejores cualidades a el modelo a escala y por conclusión al modelo a escala real. Lo anterior dado que la caída en la velocidad para este caso fue la menor entre los tres ensayos, puesto que el aumento en la velocidad de salida del área de barrido es muy similar a la velocidad de entrada, ello debido a que la presión ejercida por el viento sobre la cara inferior del perfil es muy alta y por consiguiente la velocidad que se genera en estas zonas es bastante alta. Al tener una velocidad de paso a través de la superficie de barrido alta, notamos mediante el análisis por elementos finitos que se genera una secuela denominada remolinos relativos y remolinos periféricos.

Esto denota un efecto en el cual iniciamos de una corriente laminar y al paso por el área de barrido se genera una corriente en forma de remolino o hélice tras esta misma, la cual no debe ser confundida con turbulencias, dado que los efectos de las turbulencias son en extremo nocivos en comparación con los anteriormente descritos.

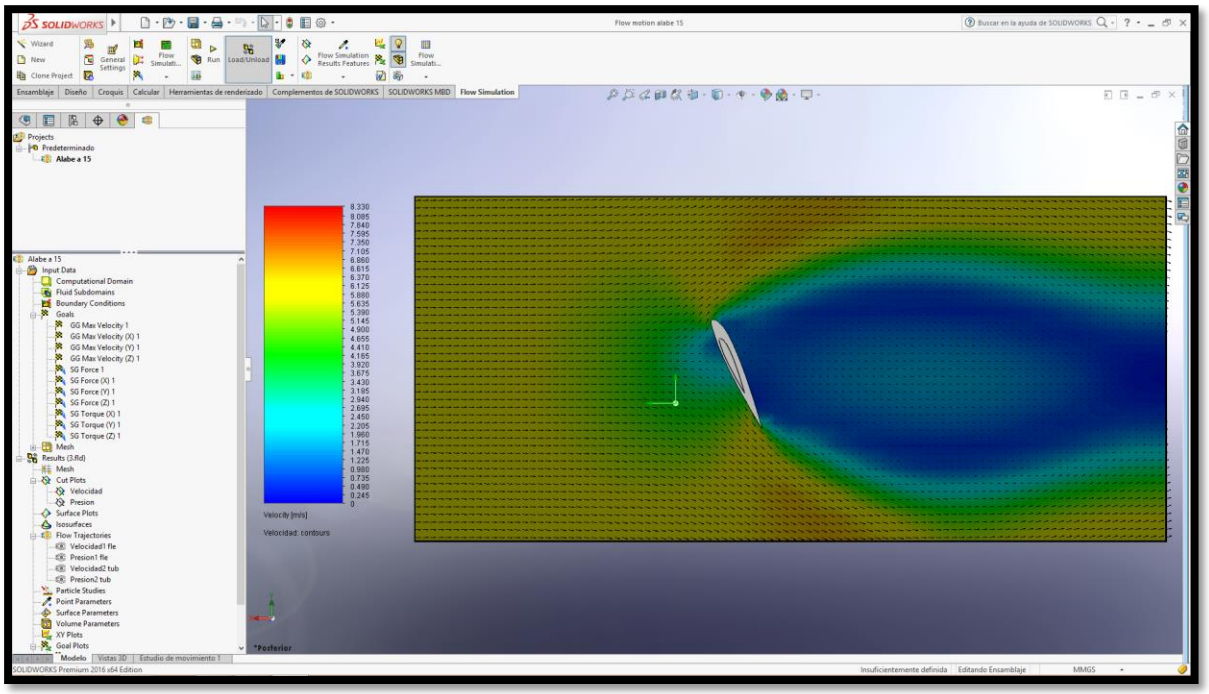


Figuras 98. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

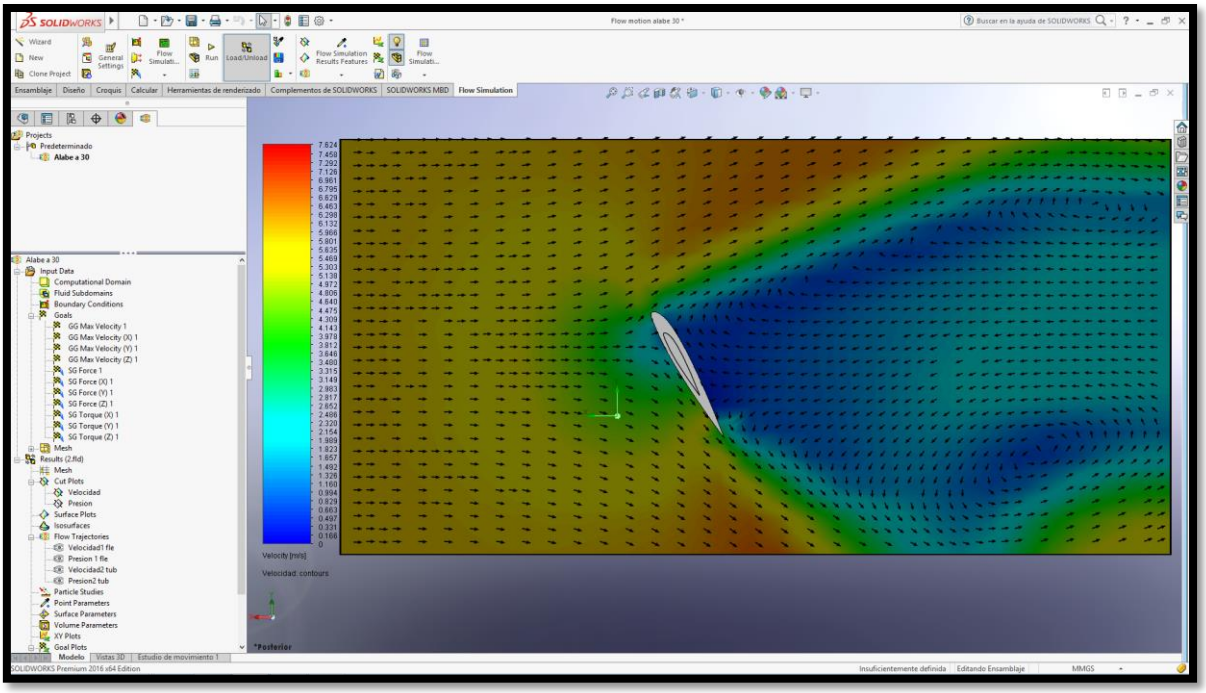


Figuras 99. Simulación de presión mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

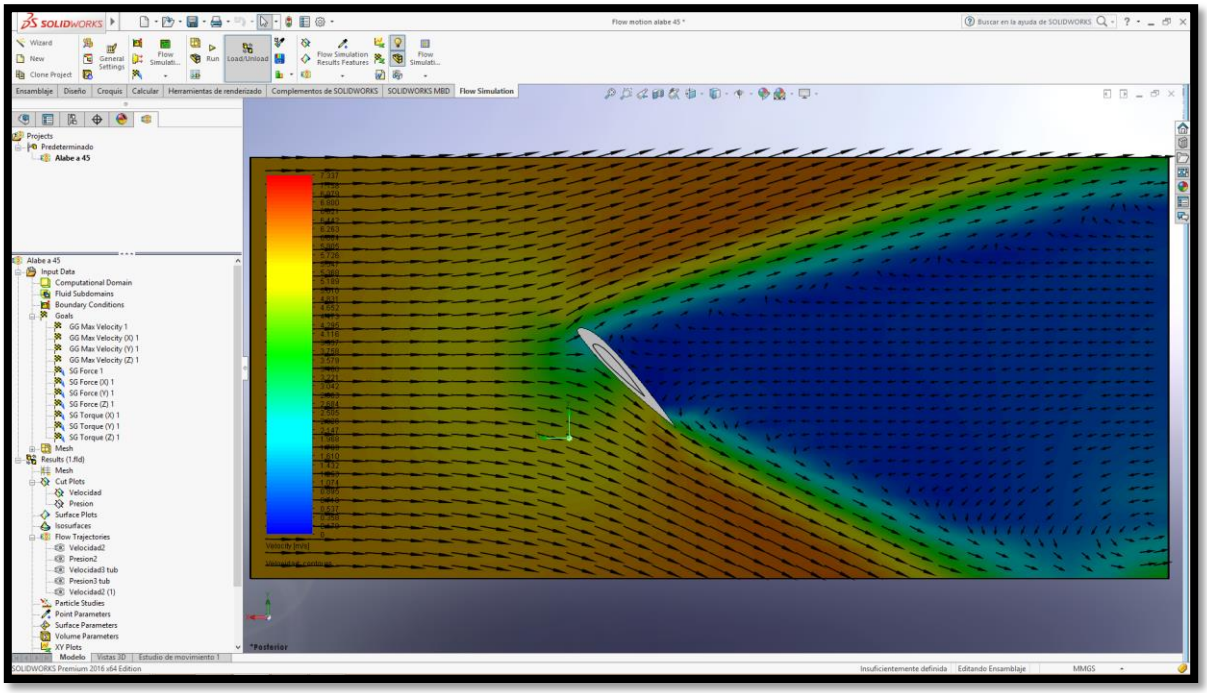
Para finalizar a continuación observamos las 3 graficas conjuntas de velocidades para cada uno de los ensayos que se efectuaron.



Figuras 100. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores



Figuras 101. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores



Figuras 102. Simulación de velocidad mediante elementos finitos. Solidworks-Autores

ANALISIS DE DATOS Y CALCULO DE EL COEFICIENTE DE POTENCIA REAL (EFICIENCIA EN FACTOR DE POTENCIA)

Se procedió a calcular cada una de las variables que inciden en nuestro diseño, a partir de datos y tablas obtenidas en las diferentes simulaciones que se realizaron; estos valores como velocidad, fuerzas, torque, área, se extrajeron con el fin de realizar un análisis cuantitativo para cada cada uno de los ángulos de inclinación que se trabajó en estas simulaciones y llegar a un valor comparativo, con los datos obtenidos a partir del diseño real del prototipo.

$$\lambda = 0.105\frac{rn}{v}$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

$$\lambda = 0.105\frac{1 * 287}{5}$$

$$\lambda = 6.027$$

Se extraen datos de la simulación como es la velocidad que se utilizó de 5 m/s para llegar a determinar nuestra velocidad específica; se puede corroborar que es muy cercana a la obtenida en nuestro diseño real del prototipo; al igual se calculan las RPM y nuestra velocidad angular; esta nos ayudara a determinar de nuevo en el cálculo de la velocidad especifica.

$$RPM = 115\frac{v}{D}$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

$$RPM = 115\frac{5\,\frac{m}{s}}{2\,m}$$

$$RPM = 287.5$$

$$\Omega = \frac{2\pi * RPM}{60}$$

(VILLARRUBIA Miguel, Ingeniería de la energía eólica, 2001)

$$\Omega = \frac{2\pi * 287.5\ RPM}{60}$$

$$\Omega = 30.05 \frac{rad}{s} = V$$

$$\lambda = \frac{V}{v}$$

$$\lambda = \frac{30.05}{5}$$

$$\lambda = 6.01$$

Valores de referencia para los diferentes ángulos de inclinación.

AREA DE CONTACTO PARA CADA ANGULO DE INCLINACION (AREA EN m²)		
15 GRADOS	1 ALABE	0,126504
	3 ALABES	0,379512
	BUJE	0,024
	TOTAL	0,530016
30 GRADOS	1 ALABE	0,113127
	3 ALABES	0,339381
	BUJE	0,024
	TOTAL	0,476508
45 GRADOS	1 ALABE	0,09303972
	3 ALABES	0,27911916
	BUJE	0,024
	TOTAL	0,39615888

Tabla4. Áreas de contacto para diferentes ángulos de ataque

A. Para 15° de inclinación tenemos:

$$A = 0.530016\ m^2$$
$$T = 0.8461\ Newtons * metro$$
$$F_D = 7.2395\ Newtons$$
$$F_L = 0.3402\ Newtons$$
$$F_D/F_L = 21.28$$

Turbina 15 flow motion.SLDASM [Turbina alabes a 15]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Va	Minimum Va	Maximum Va	Progress [%]	Use In Conve	Delta	Criteria
GG Max Velocity 1	[m/s]	7,14542656	7,27318799	7,11226989	7,506452	100	Yes	0,06529717	0,13117273
GG Max Velocity (X) 1	[m/s]	6,35106687	6,14114759	6,00674012	6,35106687	100	Yes	0,07985124	0,29859618
GG Max Velocity (Y) 1	[m/s]	5,34932571	5,58046232	5,34932571	5,76720681	100	Yes	0,15272619	0,36748164
GG Max Velocity (Z) 1	[m/s]	2,27857398	2,06341413	1,388682	3,91706293	100	Yes	0,34830895	0,45730217
SG Force 1	[N]	6,94821422	7,07531815	6,94821422	7,24753046	100	Yes	0,29931624	1,07300453
SG Force (X) 1	[N]	-0,30568946	-0,3172523	-0,33890732	-0,30110545	100	Yes	0,03780187	0,06219584
SG Force (Y) 1	[N]	0,03251248	0,02819572	0,01581381	0,03612911	100	Yes	0,0203153	0,02120023
SG Force (Z) 1	[N]	-6,94141035	-7,06813785	-7,23958393	-6,94141035	100	Yes	0,29817357	1,07283076
SG Torque (X) 1	[N*m]	-2,22705185	-2,31264271	-2,42563437	-2,22705185	100	Yes	0,19752655	0,29382329
SG Torque (Y) 1	[N*m]	0,75465288	0,76663898	0,75063715	0,78375402	100	Yes	0,03187772	0,10828606
SG Torque (Z) 1	[N*m]	0,79607866	0,81338009	0,79117643	0,8461872	100	Yes	0,05501077	0,14589802

Tabla5. Turbina a15 grados

Se toma información de cada uno de los datos obtenidos en la simulación a 15 grados, al igual para los ángulos de 30 y 45 respectivamente. A continuación se realiza un cálculo del área de contacto (no es la misma área de barrido), la cual consiste en el área que está expuesta directamente a la corriente de viento, esto vista desde la posición frontal a la turbina; lo anterior nos lleva a un cálculo acertado de las variables que incidirán en nuestro diseño, al igual que las fuerzas de sustentación y de arrastre que fueron obtenidas atravez del software y así llegar a obtener la eficiencia real para cada caso del ángulo de incidencia del viento.

Calculo del momento par en función del torque y el área de contacto.

$$C_m = \frac{2T}{A\rho v^2 R}$$

(D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

$$C_m = \frac{2 * 0.8461\ N*m}{0.530016\ m^2 * 1\frac{kg}{m^3} * \left(5\frac{m}{s}\right)^2 * 1\ m} \quad ; \quad \frac{\frac{kg\ m}{s^2}\ m}{m^2 \frac{kg\ m^2}{m^3\ s^2}\ m} \quad ; \quad \frac{kg\ m\ m\ m^3 s^2}{m^2\ kg\ m^2\ s^2\ m}$$

$$C_m = \frac{1.6922}{13.25} \quad ; \quad C_m = 0.12$$

Calculo del coeficiente de potencia *Cp* en función de lambda y *Cm*

$$C_p = \lambda * C_m \quad ; \quad C_p = 6.01 * 0.12 \quad ; \quad C_p = 0.72 = 72\%$$

De lo anterior podemos anotar que:

- En este ángulo de inclinación de los alabes obtenemos una eficiencia del 72% con respecto a la potencia real disponible, la cual se había estimado como:

$$Pmax = 0{,}20 D^2 v^3 = 34.3\ W$$

(D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

De esta manera anotamos que para la configuración de 15 grados obtendríamos unos *24.7 Watt* como potencia final de salida.

B. Para 30° de inclinación tenemos:

$$A = 0.476508\ m^2$$
$$T = 1.3283\ Newtons * metro$$
$$F_D = 4.90\ Newtons$$
$$F_L = 0.4970\ Newtons$$
$$F_D / F_L = 9.86$$

Turbina 30 flow motion.SLDASM [Turbina 30 flow motion]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Va	Minimum Va	Maximum Va	Progress [%]	Use In Conve	Delta	Criteria
GG Max Velocity 1	[m/s]	7,10173091	7,19589573	7,02652525	8,27988234	100	Yes	0,12072179	0,13561527
GG Max Velocity (X) 1	[m/s]	5,24286623	5,26568384	5,20873458	5,35879204	100	Yes	0,03746431	0,247438
GG Max Velocity (Y) 1	[m/s]	5,42729565	5,48036434	5,41011759	5,7763266	100	Yes	0,36620901	0,38983733
GG Max Velocity (Z) 1	[m/s]	1,79317222	2,00196214	1,01664707	3,93123136	100	Yes	0,18725599	0,57206448
SG Force 1	[N]	4,91764624	4,90086375	4,86667193	4,93372368	100	Yes	0,06705175	0,87952646
SG Force (X) 1	[N]	-0,47344744	-0,46036309	-0,47344744	-0,44778036	100	Yes	0,02566708	0,07808924
SG Force (Y) 1	[N]	0,16048562	0,16071236	0,15391766	0,16973371	100	Yes	0,01581605	0,04288606
SG Force (Z) 1	[N]	-4,89217093	-4,87654116	-4,90846835	-4,84249212	100	Yes	0,06597623	0,88180834
SG Torque (X) 1	[N*m]	-1,48787948	-1,45793833	-1,48992287	-1,42887601	100	Yes	0,04265619	0,18371212
SG Torque (Y) 1	[N*m]	0,59211342	0,60111583	0,59202816	0,60898425	100	Yes	0,00688892	0,13762006
SG Torque (Z) 1	[N*m]	1,31007915	1,30943511	1,29556937	1,32831078	100	Yes	0,03274142	0,2326743

Tabla6. Turbina a 30 grados

$$C_m = \frac{2T}{A\rho v^2 R}$$

(D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

$$C_m = \frac{2 * 1.3283\ N*m}{0.4765\ m^2 * 1\frac{kg}{m^3} * \left(5\frac{m}{s}\right)^2 * 1\ m} \quad ; \quad \frac{\frac{kg\ m}{s^2}m}{m^2\frac{kg\ m^2}{m^3\ s^2}m} \quad ; \quad \frac{kg\ m\ m\ m^3 s^2}{m^2\ kg\ m^2\ s^2\ m}$$

$$C_m = \frac{2.6566}{11.91} \quad ; \quad C_m = 0.2230$$

$$C_p = \lambda * C_m \quad ; \quad C_p = 6.01 * 0.2230 \quad ; \quad C_p = 1.3405 = 134\%$$

Con base en esto ultimamos que:

- Para este ángulo de inclinación de los alabes obtenemos una eficiencia del 134% con respecto a la potencia real disponible, la cual se había estimado como:

  $$Pmax = 34.3\ W$$

  (D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

  De esta manera anotamos que para la configuración de 30 grados obtendríamos unos *45.96 Watt* como potencia final de salida.

C. Para 45° de inclinación tenemos:

$$A = 0.396158\ m^2$$
$$T = 1.09558\ Newtons * metro$$
$$F_D = 3.3352\ Newtons$$
$$F_L = 0.10056\ Newtons$$
$$F_D/F_L = 33.16$$

Turbina 45 flow motion.SLDASM [Turbina 45 flow motion]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Va	Minimum Va	Maximum Va	Progress [%]	Use In Conve	Delta	Criteria
GG Max Velocity 1	[m/s]	6,90810516	6,9709033	6,89205117	7,12965509	100	Yes	0,07018181	0,13739278
GG Max Velocity (X) 1	[m/s]	4,49974481	4,51738337	4,47263608	4,54534517	100	Yes	0,07270909	0,11181149
GG Max Velocity (Y) 1	[m/s]	4,29334987	4,20885018	4,08511379	4,36052449	100	Yes	0,16431523	0,17342489
GG Max Velocity (Z) 1	[m/s]	1,68198308	1,56727851	1,20431737	2,39753479	100	Yes	0,20338171	0,43148754
SG Force 1	[N]	3,32905228	3,32169609	3,30657218	3,33950891	100	Yes	0,03293673	0,66068621
SG Force (X) 1	[N]	-0,01005047	-0,01228532	-0,02058547	-0,00084702	100	Yes	0,01508411	0,11671124
SG Force (Y) 1	[N]	0,08596439	0,09293959	0,08357317	0,0984318	100	Yes	0,01485862	0,0791925
SG Force (Z) 1	[N]	-3,32792701	-3,32036642	-3,33819009	-3,30513546	100	Yes	0,03305463	0,65239696
SG Torque (X) 1	[N*m]	-0,79270554	-0,7905205	-0,79631396	-0,78211688	100	Yes	0,01419708	0,11220734
SG Torque (Y) 1	[N*m]	0,38054315	0,38378624	0,37778389	0,38894535	100	Yes	0,00585079	0,11682318
SG Torque (Z) 1	[N*m]	1,08400371	1,09013318	1,08331664	1,09558767	100	Yes	0,01227104	0,22789633

Tabla7. Turbina a 45 grados

$$C_m = \frac{2T}{A\rho v^2 R}$$

(D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

$$C_m = \frac{2 * 1.09558\ N*m}{0.3961\ m^2 * 1\frac{kg}{m^3} * \left(5\frac{m}{s}\right)^2 * 1\ m} \quad ; \quad \frac{\frac{kg\ m}{s^2}\ m}{m^2 \frac{kg\ m^2}{m^3\ s^2}\ m} \quad ; \quad \frac{kg\ m\ m\ m^3 s^2}{m^2\ kg\ m^2\ s^2\ m}$$

$$C_m = \frac{2.19116}{9.90} \quad ; \quad C_m = 0.2213$$

$$C_p = \lambda * C_m \quad ; \quad C_p = 6.01 * 0.2213 \quad ; \quad C_p = 1.3301 = 133\%$$

Con respecto a lo anterior decimos que:

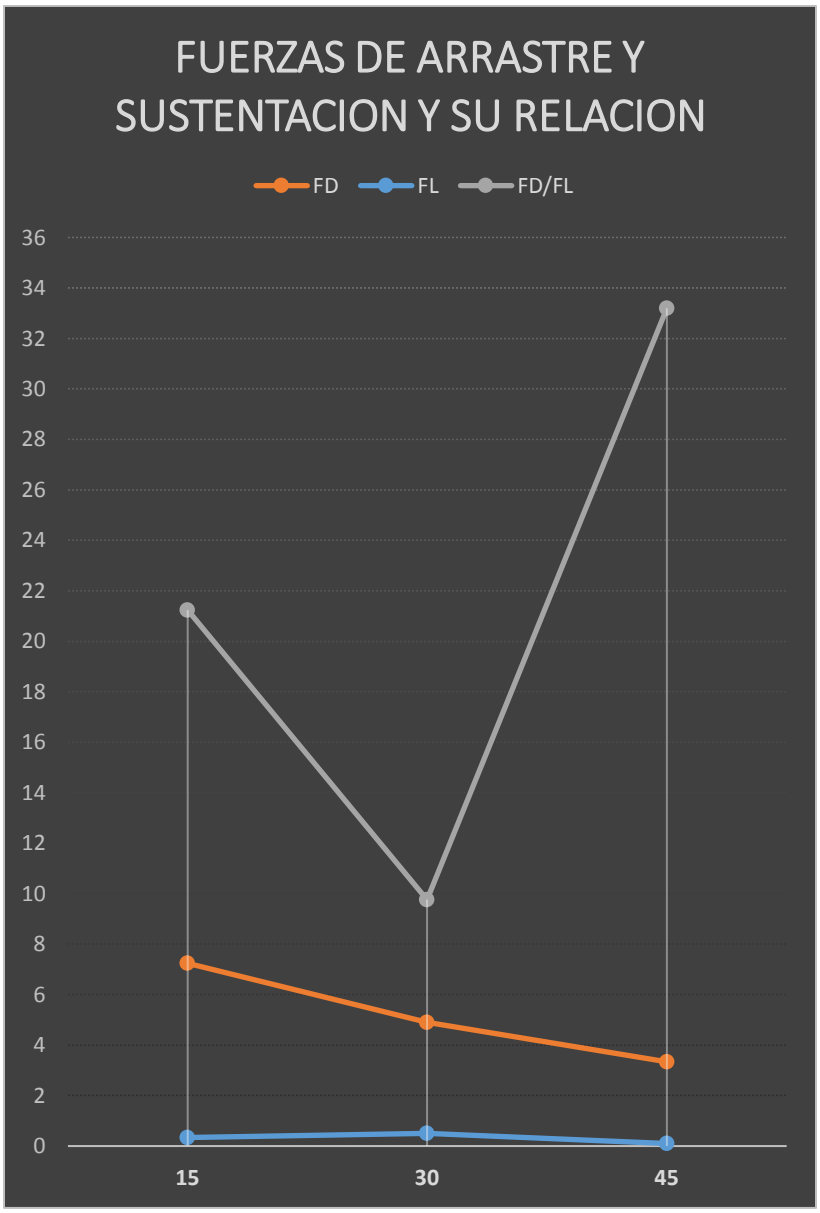
- Con este ángulo de inclinación de los alabes obtenemos una eficiencia del 133% con respecto a la potencia real disponible, la cual se había estimado como:

$$Pmax = 34.3\ W$$

(D. LE GOURIERES, energía eólica, 1983)

De esta manera anotamos que para la configuración de 45 grados obtendríamos unos *45.62 Watt* como potencia final de salida.

Enseguida y para finalizar nuestra parte de análisis tenemos una tabla de referencia donde se puede evidenciar la tendencia de las fuerzas tanto de arrastre como de sustentación y se respectiva relación, todo esto a los diferentes ángulos de inclinación.


FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACION Y SU RELACION
FD
FL
FD/FL
36
34
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
15
30
45

5.6. TORRES DE SUSTENTACIÓN

Se emplean dos tipos de torres de sustentación para los aerogeneradores:

- Torres de celosía
- Torres tubulares

Tabla8. Ventajas y desventajas en torres de sustentación

Torre	Ventajas	Inconvenientes
Celosía	• Costo más bajo. • Fácil montaje en perfiles angulares de aceró. • Facilidad de transporte.	• Mayor mantenimiento • Limitada a pequeña y mediana potencia
Tubular	• Mayor seguridad para personas y equipos. • Buen comportamiento dinámico ante vibraciones. • Mejor aspecto estético. • Se usa en aerogeneración de gran potencia.	• Mayor dificultad para transporte y fabricación.

Fuente: Elaborada por los autores.

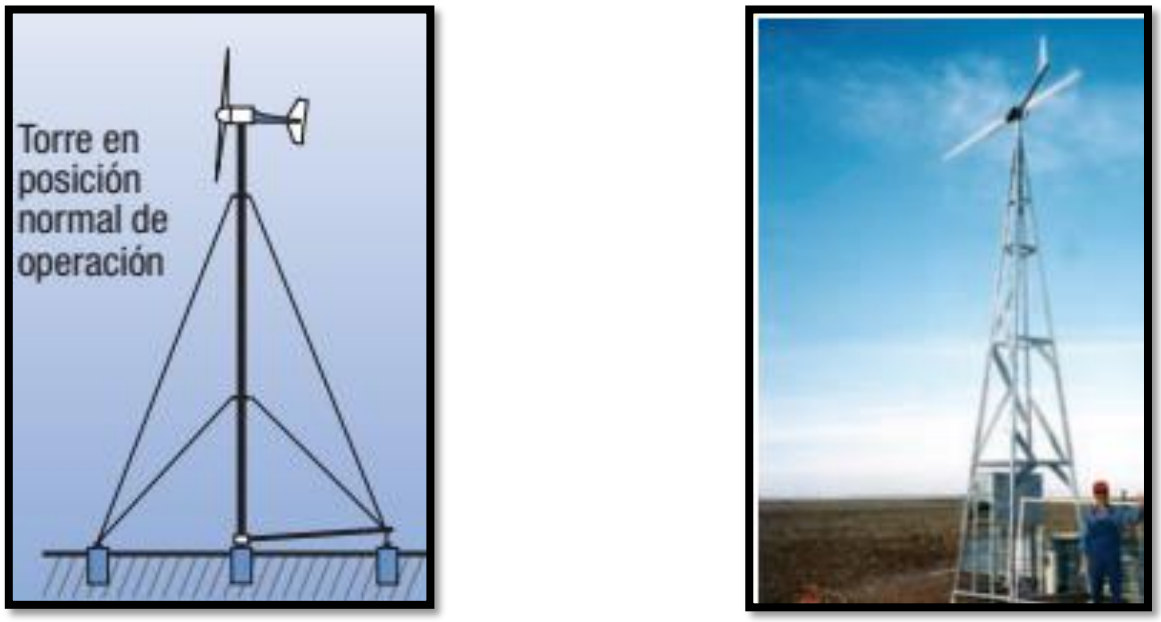


Figura 103- Torre tubular y celosía, Energía eólica Fuente (Fernández Diez 2007)

5.7 MATERIALES DE CONSTRUCCION

Al momento de fabricar una pala desde el punto de vista estructural, se debe tener en cuenta que las palas están sometidas a esfuerzos de torsión, flexión, condiciones de trabajo bastante exigentes en los que se pueden encontrar corrosión erosión, dilataciones y contracciones del material por las altas y bajas temperaturas, vibraciones lo que conlleva a la fatiga del material de allí la importancia del material. Existen diversas construcciones como se puede observar a continuación.

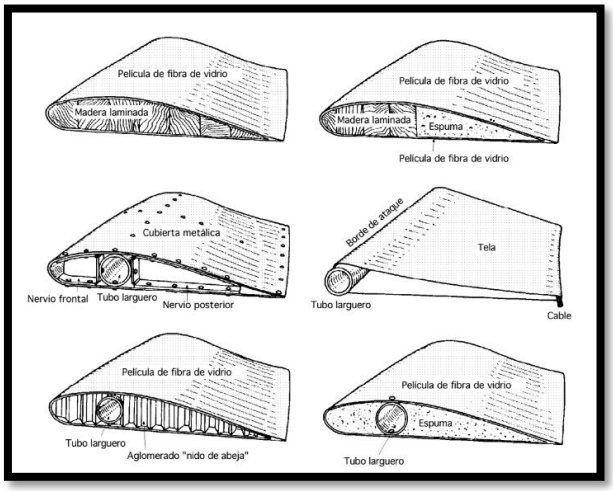


Figura 104-Construcciones antiguas para la fabricación de palas, Energía eólica Fuente (Fernández Diez 2007)

La solución más acorde para fabricación de las palas consiste en utilizar aleaciones de aluminio (duraluminio), realizar costillas por secciones y un larguero central resistente para dar mayor rigidez como se observa en la figura, seguido de algunas capas de en fibra de vidrio más resinas epoxi o poliéster para su posterior recubrimiento.

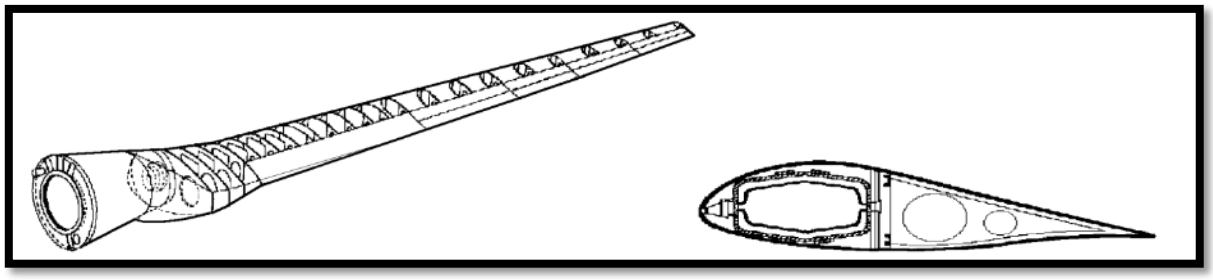


Figura 105-Construccione moderna para la fabricación de palas, Energía eólica Fuente (Fernández Diez 2007)

6. ESTIMACIÓN DE COSTOS Y FUENTES DE FINANCIACIÓN.

FASES DEL PROCESO	*DESCRIPCIÓN*	*VALOR APROXIMADO DEL PROCESO*
Identificación de los principios básicos de mecánica de fluidos.	*Consulta de fuentes bibliográficas físicas y de internet.*	*$*
	Indagar con docentes de las áreas afines.	*$*
Establecimiento del caso aerodinámico a trabajar.	*Recopilación de información acerca de los casos a estudiar*	*$*
	Generar cálculos de evaluación acerca del caso particular a aplicar.	*$*
Valoración del potencial energético del recurso eólico.	*Indagar en proyectos anteriores acerca de las propiedades del viento en el área.*	*$*
	Uso de software de diseño mecánico bajo licenciamiento de la UDFJC.	*$*
Caracterización de las hélices.	*Estimación de la potencia disponible.*	*$*
	Uso de software de diseño mecánico bajo licenciamiento de la UDFJC.	*$100000*
Cálculo y diseño de la hélice.	*Obtener los modelos aerodinámicos apropiados al caso.*	*$*
Cálculo y diseño de la hélice.	*Evaluar los perfiles aerodinámicos en las teorías que correspondan a cada caso.*	*$*
	Uso de software de diseño mecánico bajo licenciamiento de la UDFJC.	*$*
Fabricación del prototipo a escala.	*Fabricación de partes susceptibles de diseño del modelo a escala.*	*$50000*
	Selección y compra de partes no susceptibles de diseño.	*$10000*
	Insumos, herramienta y accesorios.	*$300000*
Pruebas del prototipo.	*Selección de lugar o laboratorio para pruebas.*	*$80000*
	Adecuación y montajes de escenario de pruebas	*$100000*
	Recolección de datos	*$30000*
Otros.	*Consultorías, asesorías y otros gastos, documento final.*	*$300000*

Fuente: Elaborada por los autores.

- Los valores mostrados en la tabla anterior, corresponden a una aproximación de lo que podría costar el alcanzar los objetivos propuestos. Así mismo no se tiene en cuenta el valor de la propiedad intelectual de cada uno de los

contribuyentes, los costos de servicios básicos que intervienen el desarrollo del proyecto, el costo por ocupación o consumo de locaciones y material de la UDFJC, entre otros.

- La financiación del proceso investigativo será financiada por los proponentes de la iniciativa; aunque se debe tener en cuenta el hecho en el cual los costos pueden variar; tal vez parte de la investigación y fabricación del modelo a escala no sea asumido en su totalidad por lo ponentes del proyecto y es posible que sea necesario buscar el financiamiento por parte de un ente interesado o por la UDFJC misma.

- Los costos de manufactura del prototipo serán una aproximación a la realidad, esto de acuerdo a las posibilidades comerciales que se encuentren en Colombia; así mismo de no encontrarse o no poderse construir en el país algunos de los componentes, se realizara un estimativo del costo de estas con un proveedor en el exterior.

- Es importante anotar que lo que se obtendrá al final del proyecto será un modelo o prototipo a escala, puesto que no se construirá el prototipo a escala real.

7. CONCLUSIONES

- Los factores que produjeron mayor incidencia en el diseño de la turbina eólica tipo multipalas fueron el coeficiente de potencia y la velocidad específica, puesto que estos dos factores son determinantes a la hora de la definición de la geometría, el tipo de aerogenerador, el perfil aerodinámico y el diseño del mismo.

- Luego de concluir los ensayos con el prototipo a escala y con base en la observación anotamos que: para el caso en particular el ángulo que genero la mayor eficiencia de forma cualitativa, en el prototipo de aerogenerador fue el de 45 grados, dado que utilizando esta configuración el modelo iniciaba su funcionamiento a menor velocidad de viento respecto de otros ángulos de ataque experimentados.

- Aunque el ángulo de ataque de 45 grados proporciona grandes ventajas en cuanto a eficiencia del modelo, vale la pena mencionar que también puede llegar a ser nocivo para el prototipo, dado que en la experimentación se observó que velocidades mayores a las establecidas como rango de seguridad pueden causar daños en el aerogenerador. Por lo tanto, se hace necesario un sistema de regulación y control de potencia, el cual tenga como propósito mantener el equipo dentro de los rangos de operación segura.

- De los análisis por elementos finitos y para el caso de 15 grados concluimos que: al tener una fuerza de sustentación muy baja y una de arrastre muy alta notamos que la eficiencia cae hasta valores por debajo de los mínimos esperados, en cuanto se refiere a potencia obtenida. Esto es debido a que la mayor cantidad de la energía se concentra en el efecto de flexión de los alabes puesto que, dado su alto ángulo de incidencia no permite una fuerza de sustentación que ayude a romper la inercia a bajas velocidades y por el contrario la energía se disipe en fuerzas parasitas sobre el alabe.

- Luego de las simulaciones de fluidos y respecto al ensayo de 45 grados ultimamos que: para esta configuración el modelo da como resultado fuerzas de arrastres altas, pero en contramedida fuerzas de sustentación muy bajas, incluso al punto de estar cerca de cero. Lo cual en referencia con la teoría es desfavorable, puesto que velocidades de sustentación tan bajas no ayudan a que el equipo logre una velocidad alta, es decir el equipo lograra una velocidad media pero difícilmente conseguirá llegar a la velocidad de giro y de generación nominal. Adicionalmente hay que denotar que una velocidad de sustentación baja genera una perdida aerodinámica alta, lo cual para efectos prácticos generaría una especie

de freno aerodinámico o fuerza parasita como se menciona anteriormente.

- Para culminar denotaremos que la configuración de 30 grados es la que ofrece los mejores datos en cuanto a fuerzas y torques. La fuerza de sustentación fue la más alta de los ensayos, adicionalmente la fuerza de arrastre estuvo en el orden del 70% de la mayor velocidad de arrastre registrada. La relación entre estas velocidades fue la mejor teniendo en cuenta que el valor de 1 a 9 es mucho menor y lo cual denota mayor eficiencia teniendo en cuenta que para los demás ensayos se obtuvieron relaciones de 1 a 21 y de 1 a 33.

- En conclusión y en vista de un futuro proyecto anotamos que la configuración de ángulo de ataque de 30 grados es muy buena para efectos de tener alabes fijos, pero para el caso de lograr concebir alabes que permitan ángulos de ataque variables, debemos afirmar que para el arranque del equipo se debería utilizar un ángulo de incidencia de 45 grados y luego de a fin de obtener una velocidad nominal este se puede variar a 30 grados para así obtener velocidades mayores de giro y fuerzas equilibradas.

8. BIBLIOGRAFIA.

[1] Libro
CARMONA Aníbal. Selección de perfil de un alabe; Aerodinámica y actuaciones del avión; 12va. Editorial Paraninfo edición (2004).

[2] Norma
UPME. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-10-01. Tomado de internet en: http://www.upme.gov.co/

[3] Artículo de internet.
ANELION. Especificaciones técnicas de aerogeneradores mini eólicos. Tomado de internet en: http://www.anelion.com/es/productos/aerogenerador-mineolica-sin-mantenimiento/

[4] Catalogo en internet.
QUIET REVOLUTION. Especificaciones de producto qr5 Wind Turbine. Tomado de internet en: http://www.quietrevolution.com/qr5/index.html

[5] Libro
VAN DE WYNGARD HUGH RUDNICK. Energía eólica. La generación eólica. Pontificia Universidad Católica de Chile. Capítulo 4. Libro electrónico disponible en: http://web.ing.puc.cl/power/paperspdf/CapituloEolico.pdf

[6] Artículo de internet.
CLASSIFICATION SYSTEM FOR WIND TURBINES. Scale of Wind Electricity Generation. Tomado de internet en:
http://ase.kuas.edu.tw/green/info/rcady/0818_b_rcady.pdf

[7] Libro
BASTANION Ricardo. Energía del viento y diseño de turbinas eólicas. 2da edición. Tiempo de cultura ediciones. 1994.

[8] Artículo de internet.
WWEA. The World Wind Energy Association. Reporte anual 2012. Tomado de internet en: http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2012_final.pdf

[9] Normas Técnicas
INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Trabajos escritos: presentación y referencias bibliográficas, actualización. Bogotá: ICONTEC, 2014

[10] Catalogo en internet.
AEOLOS. Wind turbine. Aeolos H-500W. Tomado de internet en:
http://www.windturbinestar.com/500wh-wind-turbines.html

[11] Tesis
SIZA Gabriel. Diseño simulación construcción de un prototipo de aerogenerador de eje horizontal. Universidad pontificia bolivariana. Escuela de ingeniería y administración. Bucaramanga. 2009.

[12] Artículo de internet.
AMPAIR. Ampair 100. Tomado de internet en: http://www.ampair.com/wind-turbines/ampair-100

[13] Tesis
BASTANION Ricardo. Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas. Tomado de internet en:
http://www.infoweb2.unp.edu.ar/posgrado/Documentos/materias2011../Innovaciones%20tecnologicas%20en%20maquinas%20eolicas/C%C3%A1lculo_y_Dise%C3%B1o_de_la_H%C3%A9lice_%C3%93ptima_para_Turbinas_E%C3%B3licas2.pdf

[14] Tesis
ORDUZ Oscar. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías. Bucaramanga. 2011.

[15] Artículo de internet.
Pinilla Álvaro. El poder del viento - Wind power. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. Colombia. 2008. Tomado de internet en:
https://revistaing.uniandes.edu.co/index.php?idr=36&ids=48&ida=413&l=en

[16] Revista
A. Pinilla, L. Rodríguez y R. Trujillo. "Performance Evaluation of Jepirachi Wind Park", Renewable Energy Journal, Vol. 34, No. 1, 2009, pp. 48-52.

[17] Artículo de internet.
Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Atlas de viento y energía eólica en Colombia. Bogotá: 2006.

[18] Artículo de internet
LYSEN Emily. Introduction to Wind Energy. Consultancy Services Wind Energy Developing Countries. Segunda Edición, Mayo. Holanda.1983.

[19] Revista
GARCÍA Carlos. Problemas de Meteorología I. Estática y Termodinámica de la Atmósfera. Instituto Nacional de Meteorología. Publicación B-22. Madrid, España. Págs. 141 y 142. 1986.

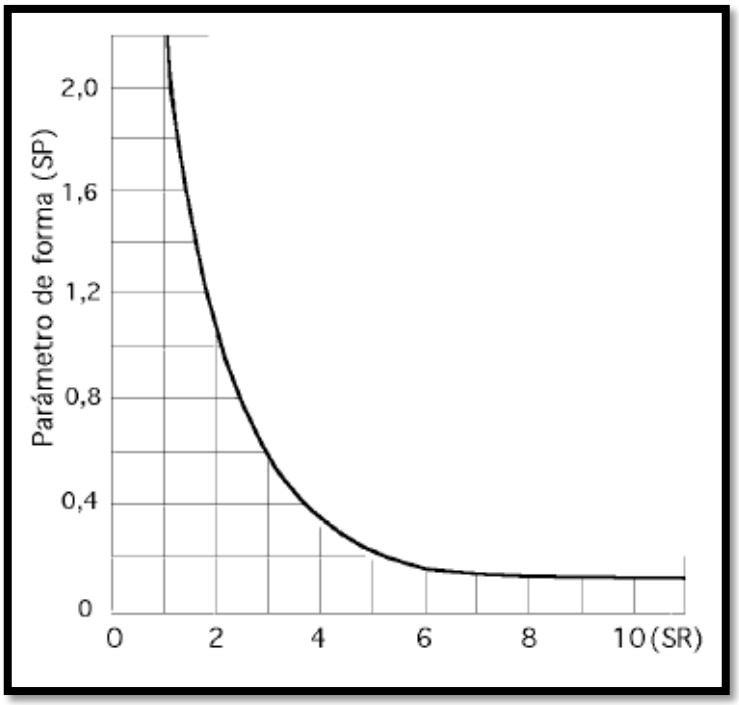
[20] Libro
Wind turbines (HAU Erich)

8 ANEXOS

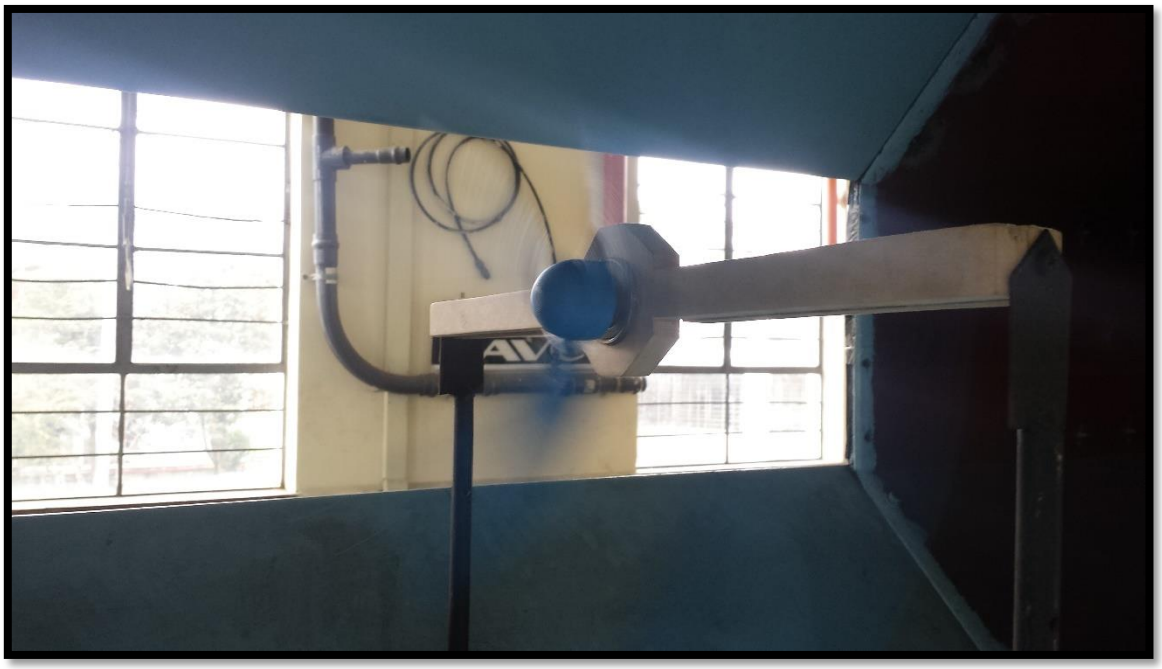
TABLA DE CALCULO DE CUERDA Y CENTRO DE PERFIL PARA LONGITUD DELTA=1METRO

LAMBDA	6			x	y		
LONG.TOTAL	1	RAIZ ALABE	Delta long	SR	SP	Cuerda	Cuerda / 3
Cy-TABLA	0,6		0	0	1,82	0	0
NUM.PALAS	3		0,02	0,12	1,82	1,925925926	6,41975309
		1	0,04	0,24	1,82	3,851851852	12,8395062
		2	0,06	0,36	1,82	5,777777778	19,2592593
		3	0,08	0,48	1,82	7,703703704	25,6790123
		4	0,1	0,6	1,82	9,62962963	32,0987654
		5	0,12	0,72	1,82	11,55555556	38,5185185
		6	0,14	0,84	1,82	13,48148148	44,9382716
		7	0,16	0,96	1,82	15,40740741	51,3580247
		8	0,18	1,08	1,82	17,33333333	57,7777778
		9	0,2	1,2	1,82	19,25925926	64,1975309
		10	0,22	1,32	1,6974	19,23915344	64,1305115
		11	0,24	1,44	1,5748	19,21904762	64,0634921
		12	0,26	1,56	1,4522	19,1989418	63,9964727
		13	0,28	1,68	1,3296	19,17883598	63,9294533
		14	0,3	1,8	1,207	19,15873016	63,8624339
		15	0,32	1,92	1,13692	18,95280423	63,1760141
		16	0,34	2,04	1,06684	18,74687831	62,4895944
		17	0,36	2,16	0,99676	18,54095238	61,8031746
		18	0,38	2,28	0,92668	18,33502646	61,1167549
		19	0,4	2,4	0,8566	18,12910053	60,4303351
		20	0,42	2,52	0,80104	17,56571429	58,552381
		21	0,44	2,64	0,74548	17,00232804	56,6744268
		22	0,46	2,76	0,68992	16,4389418	54,7964727
		23	0,48	2,88	0,63436	15,87555556	52,9185185
		24	0,5	3	0,5788	15,31216931	51,0405644
		25	0,52	3,12	0,54774	14,93862434	49,7954145
		26	0,54	3,24	0,51668	14,56507937	48,5502646
		27	0,56	3,36	0,48562	14,19153439	47,3051146
		28	0,58	3,48	0,45456	13,81798942	46,0599647
		29	0,6	3,6	0,4235	13,44444444	44,8148148

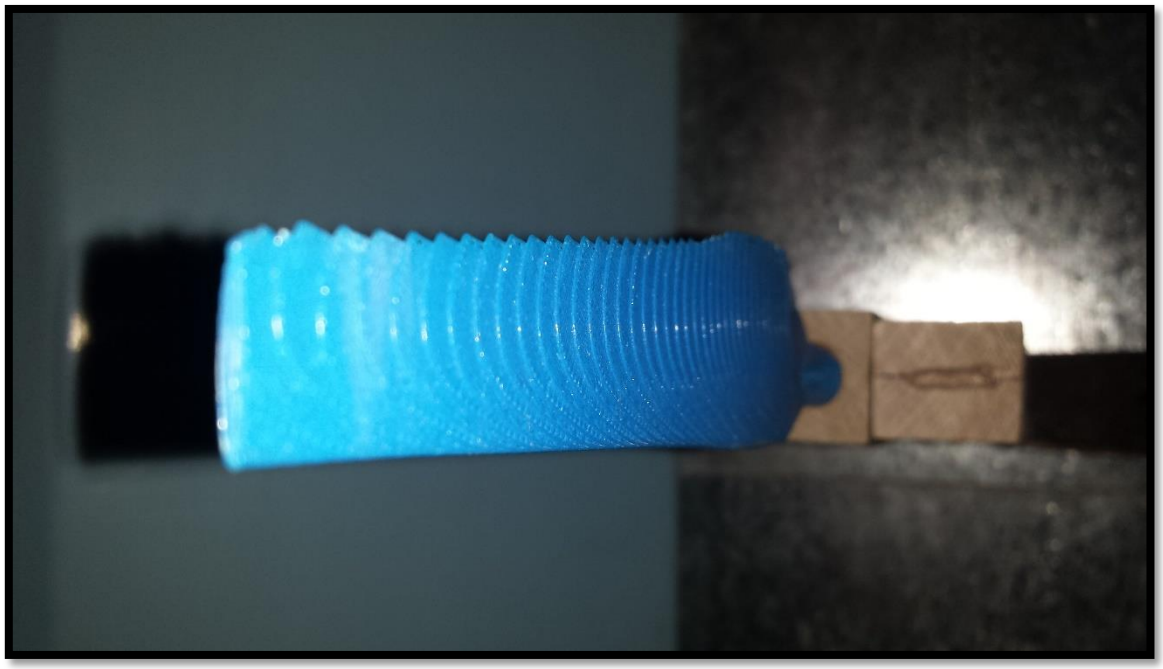
30	0,62	3,72	0,40362	13,1562963	43,854321
31	0,64	3,84	0,38374	12,86814815	42,8938272
32	0,66	3,96	0,36386	12,58	41,9333333
33	0,68	4,08	0,34398	12,29185185	40,9728395
34	0,7	4,2	0,3241	12,0037037	40,0123457
35	0,72	4,32	0,30892	11,70412698	39,0137566
36	0,74	4,44	0,29374	11,40455026	38,0151675
37	0,76	4,56	0,27856	11,10497354	37,0165785
38	0,78	4,68	0,26338	10,80539683	36,0179894
39	0,8	4,8	0,2482	10,50582011	35,0194004
40	0,82	4,92	0,23588	10,18179894	33,9393298
41	0,84	5,04	0,22356	9,857777778	32,8592593
42	0,86	5,16	0,21124	9,533756614	31,7791887
43	0,88	5,28	0,19892	9,20973545	30,6991182
44	0,9	5,4	0,1866	8,885714286	29,6190476
45	0,92	5,52	0,1786	8,65989418	28,8663139
46	0,94	5,64	0,1706	8,434074074	28,1135802
47	0,96	5,76	0,1626	8,208253968	27,3608466
48	0,98	5,88	0,1546	7,982433862	26,6081129
FINAL ALABE	1	6	0,1466	7,756613757	25,8553792




GRAFICA APROXIMACION VALOR SP-SR
y = 0,0015x⁶ - 0,0336x⁵ + 0,2993x⁴ - 1,3992x³ + 3,7639x² - 6,0987x + 5,5941
R² = 0,9999
5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
1
2
3
4
5
6
7
1,82
1,207
0,85
0,578
0,4235
0,3241
0,2482
0,1866
0,1466

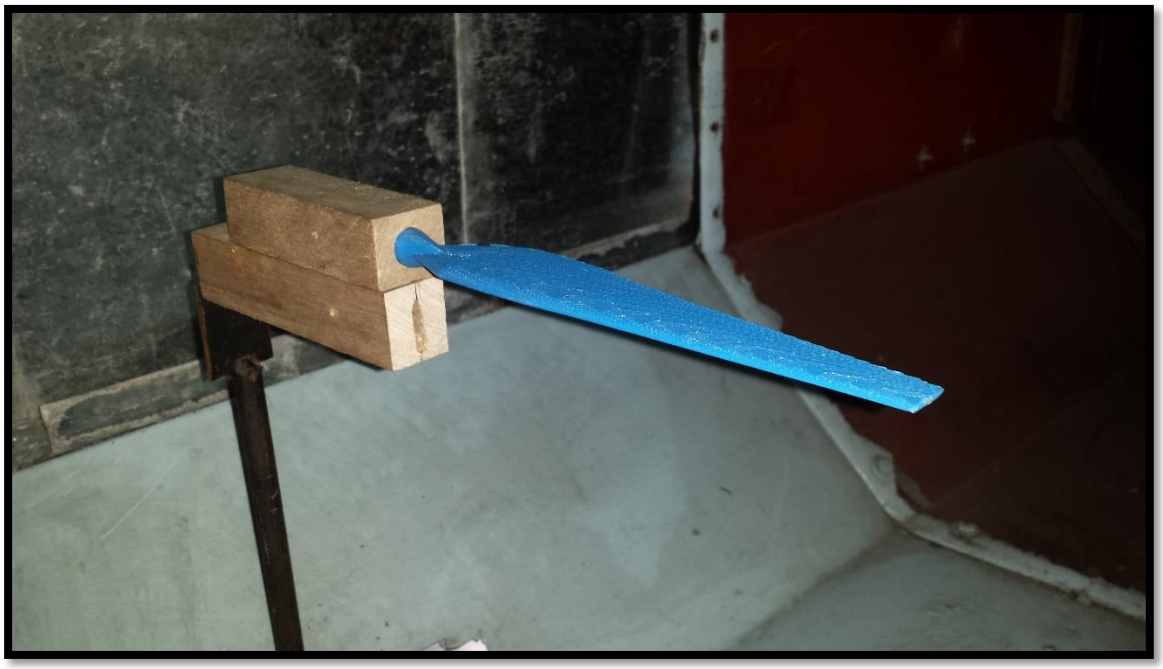




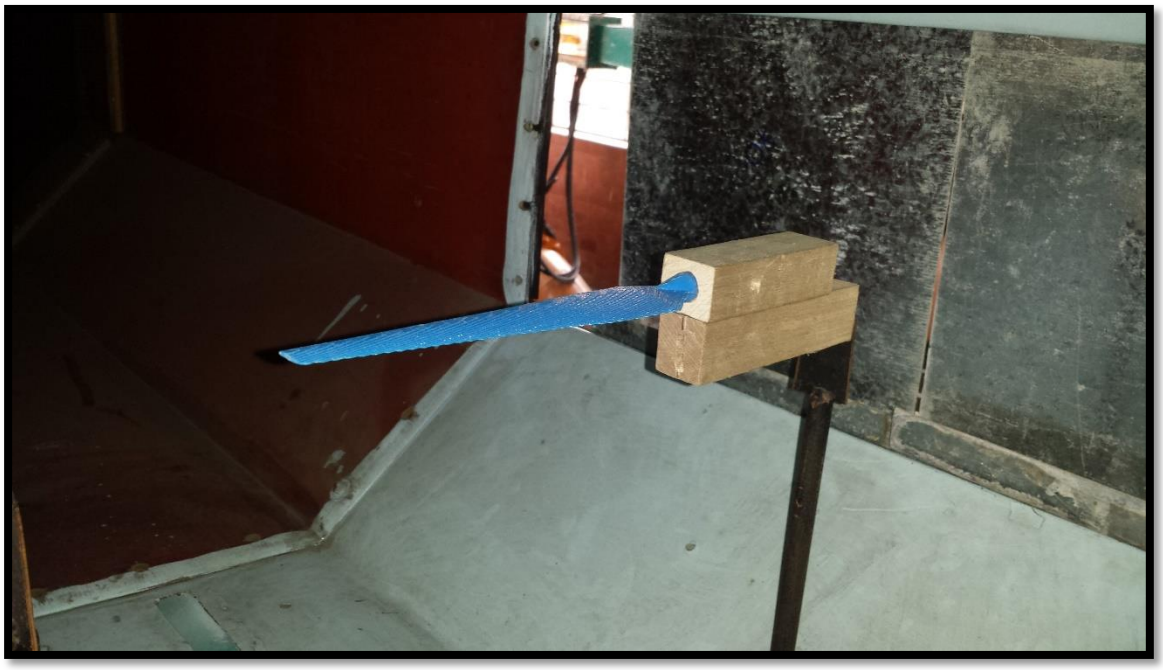




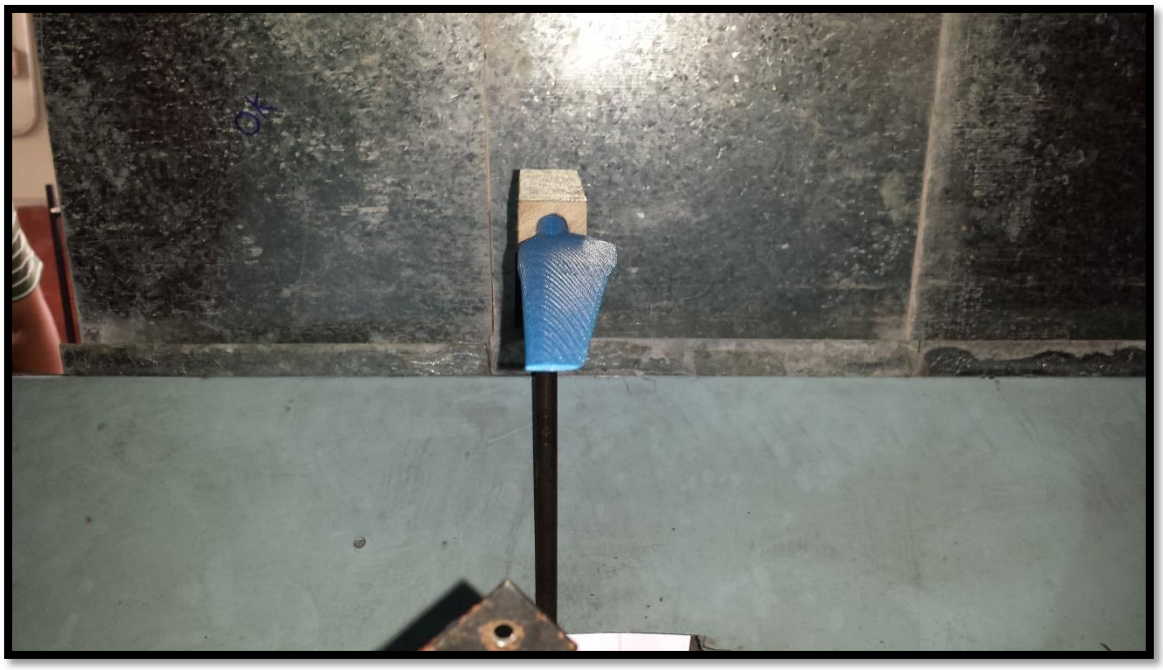


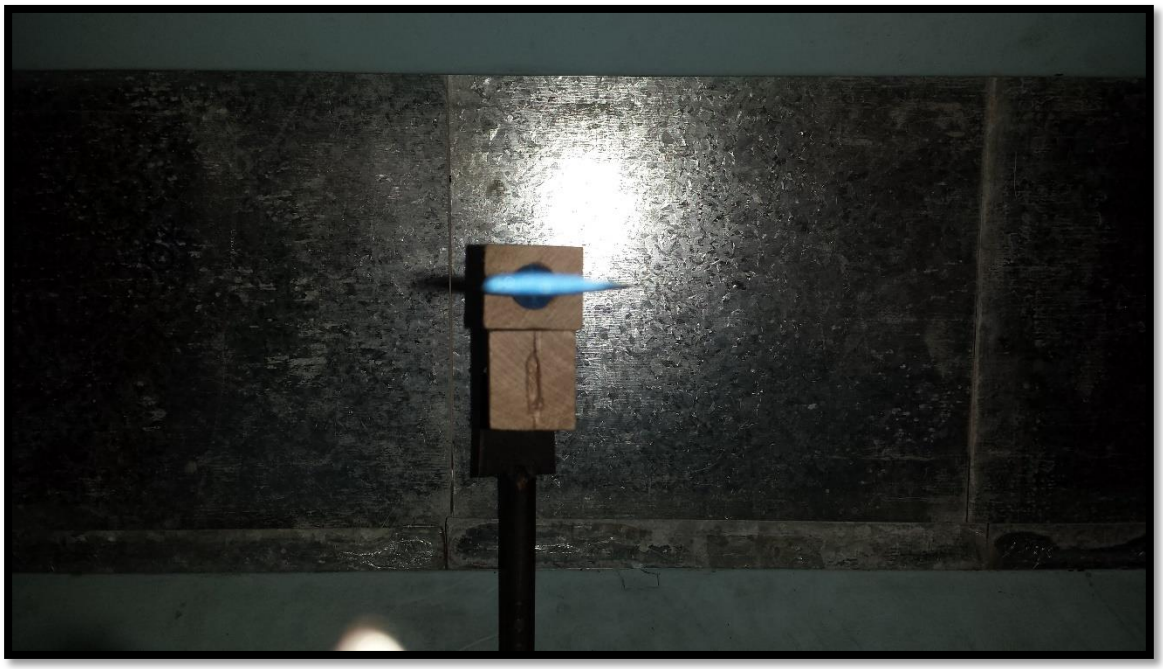


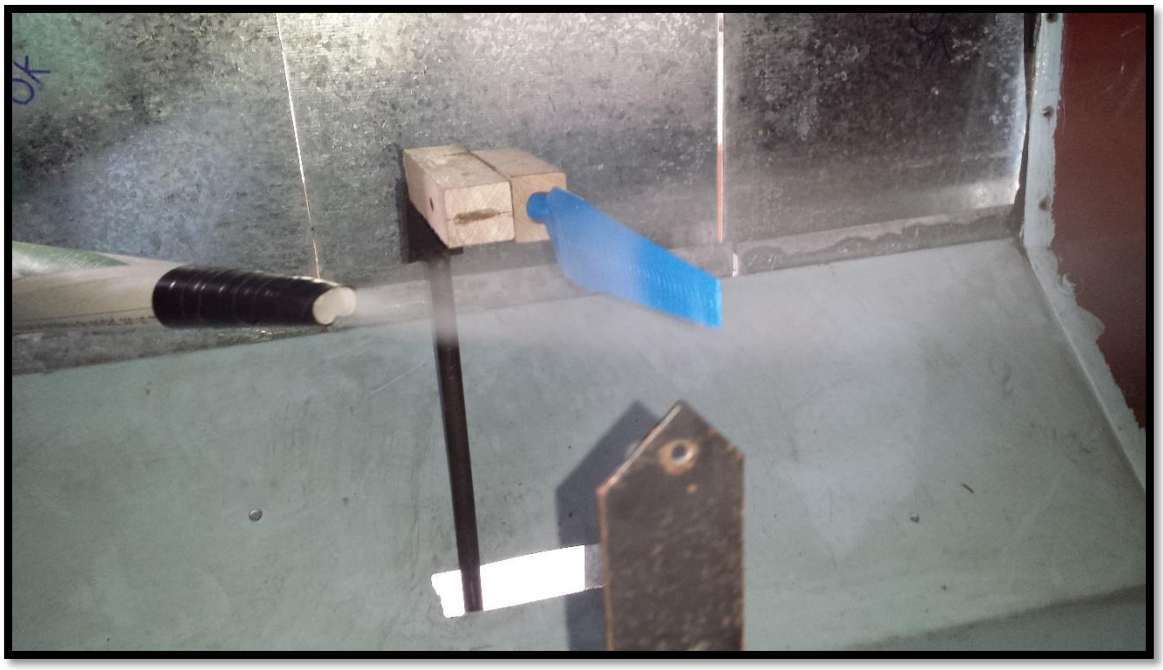


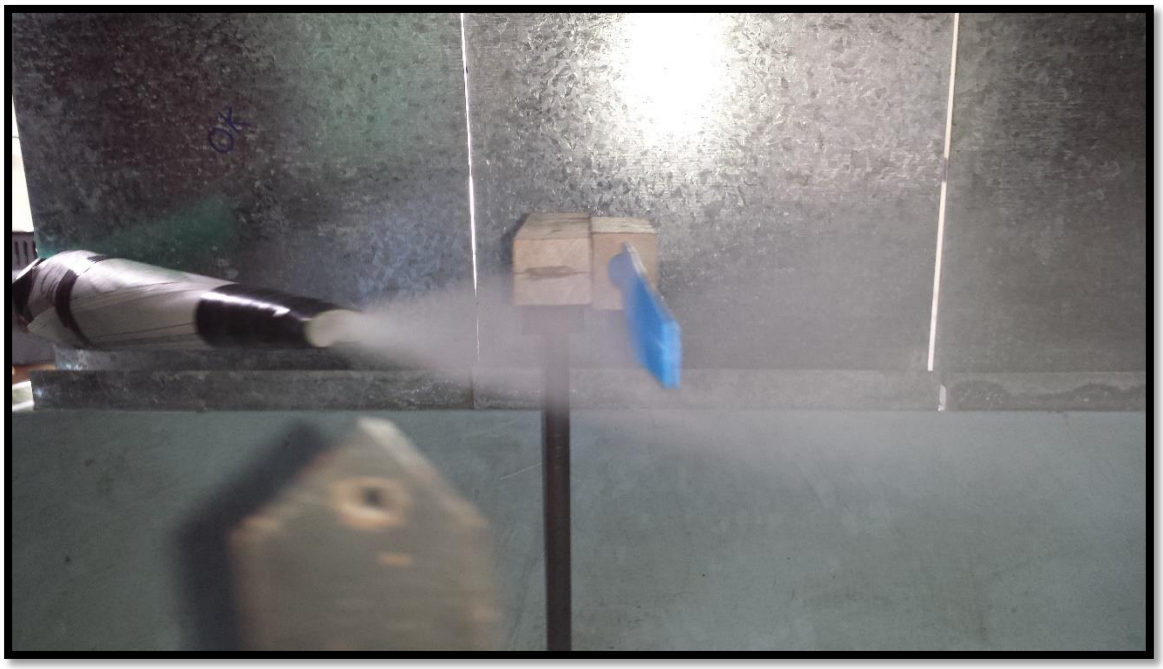





OK




OK


OK







