



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL PERFIL
AERODINÁMICO DEL HUB PARA UNA TURBINA
DE VIENTO DE BAJA CAPACIDAD**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

ALAN JIMÉNEZ RAMÍREZ

ASESORES:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA
VICTOR LÓPEZ GARZA.**

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN
METALÚRGIA Y MATERIALES
GILDARDO SOLORIO DÍAZ**

MORELIA, MICH. JUNIO 2015





Agradecimientos

A Conacyt y a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por los apoyos otorgados para la realización de mis estudios de Maestría.

A mis asesores M.C. Victor López Garza y Dr. Gildardo Solorio Díaz por la oportunidad que se me dio para participar en el presente proyecto de tesis, y por los conocimientos y consejos para la terminación del mismo.

A los miembros de mi mesa sinodal y a los profesores que de manera directa o indirecta me apoyaron para poder progresar en el desarrollo de mi formación.

Al Ing. Jesús Villalón López por la asesoría en la manufactura por medio de CNC.

A mis amigos y compañeros de Posgrado que sirvieron de apoyo durante el transcurso de mi maestría para enriquecer mi conocimiento tanto científico como personal.

A mis amigos fuera del ámbito académico que siempre han hecho más amena mi vida.

A Miguel Palmerin, Angel Carreon, Alejandro Aguilar compañeros y amigos de licenciatura que me motivaron a mejorar cada vez más como ingeniero y animarme a estudiar un posgrado.

A mi familia, piedra angular en mi formación y crecimiento como persona y estudiante, porque siempre brindaron lo necesario para poder dedicarme plenamente a cultivarme.



Dedicatoria

A mi madre, abuela, hermanos y tíos.

A todo aquel que come del fruto del árbol del conocimiento.

“To these memories I will hold
With your blessing I will go
To turn at last to paths that lead home
And though where the road then takes me
I cannot tell
We came all this way
But now comes the day
To bid you farewell”
-BILLY BOYD



Tabla de contenido

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tablas	ix
Lista de Símbolos y Abreviaturas	x
Resumen	xii
Abstract	xii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificación	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Metodología	4
Capítulo 2 El Viento	6
2.1 ¿Qué es el viento?	6
2.1.1 La atmósfera	6
2.1.2 El clima	7
2.2 Dirección y velocidad del viento	7
2.2.1 Medición de la dirección y velocidad del viento	8
2.3 Masas de aire	10
2.3.1 ¿Cómo se desarrolla el viento?	11
2.4 Energía del viento	12
Capítulo 3 Generadores Eólicos	15
3.1 Introducción	15
3.2 Generadores eólicos	16
3.2.1 Rotor	17
3.2.2 Góndola	17
3.2.3 Torre	18
3.3 Funcionamiento de un aerogenerador	18
3.4 Potencia generada y pérdidas	18
3.5 Clasificación de los aerogeneradores	21
3.5.1 Clasificación según el eje de rotación de las hélices	21
3.5.2 Clasificación según el número de palas	22
3.5.3 Clasificación según la posición del rotor en la máquina	23
3.5.4 Clasificación según el anclaje de las hélices al buje	23
3.5.5 Clasificación según el tamaño y potencia	23
3.6 Elección de la zona para una turbina eólica	24
3.7 Situación de la energía eólica en el mundo	25
3.8 Situación de la energía eólica en México	25
Capítulo 4 Aerodinámica de turbinas de vientos de eje horizontal	27
4.1 Introducción	27
4.2 El concepto del disco actuador	28

4.3 Teoría de la cantidad de movimiento	29
4.4 Coeficiente de potencia	31
4.5 El límite de Betz	31
4.6 Teoría del elemento pala	32
4.7 Teoría cantidad de movimiento en el elemento pala (BEM)	35
Capítulo 5 Marco Teórico	37
5.1 Diseño de perfiles	37
5.2 Ecuaciones Necesarias	38
5.2.1 Resolución de la ecuación de Laplace mediante la superposición de soluciones elementales	41
5.2.2 Función potencial correspondiente a un torbellino	42
5.3 Patrón de flujo de viento	43
5.4 Perfiles De Prueba Iniciales	44
5.4.1 Creación de los perfiles	45
Capítulo 6 Simulación, Experimentación y Diseño	46
6.1 Parámetros de las simulaciones	46
6.2 Comparación modelo con álabes completos y seccionados	47
6.2.1 Importancia aerodinámica del HUB	50
6.3 Simulación de los perfiles básicos seleccionados	57
6.3.1 Contorno de presiones a 8m/s	57
6.3.2 Contorno de velocidad a 8m/s	63
6.4 Experimentación en el túnel de viento	68
6.5 Método de Diseño	71
6.5.1 Selección de las características para el diseño	73
6.6 Comparación entre una turbina con HUB semicircular y el HUB S-C2.	77
6.6.1 Comparación con una turbina con modificación de la posición de la raíz, utilizando el perfil S-C2 para el HUB.	81
6.7 Pruebas realizadas en un aerogenerador.	84
6.7.1 Manufactura del HUB S-C2	84
6.7.2 Resultados obtenidos de la experimentación	85
Capítulo 7 Conclusiones	88
Trabajo futuros	90
Acciones de difusión	91
Bibliografía	92
Anexos	95
A.1 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 8m/s	95
A.2 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 10.6 m/s	99
A.3 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 13.3 m/s	103
A.4 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 6.6 m/s	107
A.5 Imágenes relacionadas a la sección 6: simulaciones y experimentación.	111
A.6 Instrumentos empleados en la experimentación en el túnel de viento	118
A.7 Modelo κ - ϵ estándar (FLUENT User's Guide)	121



Lista de Figuras

Figura- 1.1: Diagrama de flujo para el diseño de perfiles _____	5
Figura- 2.1: Estructura de la atmósfera [2] _____	6
Figura- 2.2: Ejemplo de Rosa de los vientos.[1] _____	8
Figura- 2.3: Anemómetro de rotación [22] _____	9
Figura- 2.4: Anemómetro de tubo de pitot. _____	9
Figura- 2.5: Dirección de la brisa marina diurna y nocturna.[6] _____	12
Figura- 2.6: Gráfica de la potencia por unidad de área con respecto a la velocidad del viento.[21] _____	14
Figura- 3.1: Marcellus Jacobs y su turbina.[5] _____	16
Figura- 3.2: Molino de viento.[5] _____	16
Figura- 3.3 Esquema de un generador eólico. _____	17
Figura- 3.4: Fuerza de sustentación en un perfil aerodinámico.[22] _____	18
Figura- 3.5: Curva del coeficiente de potencia de un aerogenerador de .44 para diferentes velocidades del viento. [5] _____	21
Figura- 3.6: a)Turbina Savonius b)Turbina Darrieus.[21] _____	21
Figura- 3.7: Generador eólico monopala, bipala y tripala. _____	22
Figura- 3.8: Aerogenerador a)barlovento; b)sotavento.[6] _____	23
Figura- 3.9: Representación según el tamaño, altura y diámetro de una turbina eólica.[5] _____	24
Figura- 4.1: Extracción de energía del tubo de corriente de una turbina de viento.[10] _____	27
Figura- 4.2: Extracción de energía del disco actuador y el tubo de corriente.[10] _____	28
Figura- 4.3: Variación del C_p y C_T respecto al factor de inducción axial.[10] _____	32
Figura- 4.4: Elemento pala haciendo un barrido de anillo anular.[10] _____	33
Figura- 4.5: Velocidades y Fuerzas del Elemento Pala.[10] _____	34
Figura- 5.1: Diagrama de diseño directo de perfiles aerodinámicos.[8] _____	37
Figura- 5.2: Diagrama de diseño inverso de perfiles aerodinámicos.[8] _____	38
Figura- 5.3: Perfil aerodinámico y su flujo relativo.[9] _____	39
Figura- 5.4: Esquema de la capa límite y la estela alrededor de un perfil aerodinámico.[9] _____	40
Figura- 5.5: Definición de las coordenadas (r, ϑ) y de los vectores unitarios e_r, e_ϑ de un sistema polar.[9] _____	43
Figura- 5.6: a) Campo de velocidades y valores de la función potencial adimensional b) Representación del módulo del vector velocidad en función de la distancia adimensional al origen de coordenadas r/a . [9] _____	43
Figura- 5.7: Patrón de flujo del viento alrededor de un edificio aislado.[11] _____	44
Figura- 5.8 Patrón de Flujo en un HUB de geometría semicircular _____	44
Figura- 5.9: Medidas de las geometrías de perfiles simulados _____	45
Figura- 6.1: Contorno de presión: comparación diferente longitud de los álabes; vista lateral _____	48
Figura- 6.2: Contorno de presión: comparación diferente longitud de los álabes; vista frontal _____	49
Figura- 6.3: Energía cinética turbulenta: comparación HUB plano y semicírculo; vista lateral _____	51
Figura- 6.4: Energía cinética turbulenta: comparación HUB plano y semicírculo; vista frontal _____	52
Figura- 6.5: Contorno de presiones: comparación HUB plano y semicírculo; vista lateral _____	53
Figura- 6.6: Contorno de presiones: comparación HUB plano y semicírculo; vista frontal _____	54
Figura- 6.7: Contorno de velocidades: comparación HUB plano y semicírculo; vista lateral _____	55
Figura- 6.8: Contorno de velocidades: comparación HUB plano y semicírculo; vista frontal _____	56
Figura- 6.9: Disposición de la góndola y HUB en el túnel de viento virtual _____	57
Figura- 6.10: Contorno de presiones: semicírculo _____	58
Figura- 6.11: Contorno de presiones: cono _____	59
Figura- 6.12: Contorno de presiones: elíptica _____	59
Figura- 6.13: Contorno de presiones: parábola _____	60
Figura- 6.14: Contorno de presiones: HUB plano _____	61
Figura- 6.15: Contorno de presiones: ojiva tangente _____	61
Figura- 6.16: Contorno de presiones: ojiva secante 1 _____	62
Figura- 6.17: Contorno de presiones: ojiva secante 2 _____	62
Figura- 6.18: Contorno de velocidades: semicírculo _____	63

Figura- 6.19: Contorno de velocidades: cono	64
Figura- 6.20: Contorno de velocidades: elíptica	65
Figura- 6.21: Contorno de velocidades: parábola	65
Figura- 6.22: Contorno de velocidades: HUB plano	66
Figura- 6.23: Contorno de velocidades: ojiva tangente	67
Figura- 6.24: Contorno de velocidades: ojiva secante 1	67
Figura- 6.25: Contorno de velocidades: ojiva secante 2	68
Figura- 6.26: Sección media del túnel de viento	69
Figura- 6.27: Fotografía del túnel de viento en la cual se muestra el experimento montado, conectado a un control de velocidad para hacerlo girar a las rpm deseadas. En el lado derecho se muestra el generador de humo empleado para trazar las líneas de corriente.	69
Figura- 6.28: Líneas de corriente sobre un perfil semicircular, en la que se puede apreciar el flujo por sobre el perfil, los vórtices que se crean en la parte trasera del perfil, en la parte de enfrente como se desvía el flujo del viento.	70
Figura- 6.29: Comparación de las regiones obtenidas en simulación con la experimentación, obteniendo un patrón de flujo con las zonas: A) Zona de aumento del flujo y flujo sobre el perfil, B) Punto de estancamiento, Flujo desde el punto de estancamiento sobre el perfil, C) Vórtices, zona de recirculación y desprendimiento del fluido.	70
Figura- 6.30: Curva de presiones a través del contorno del HUB	71
Figura- 6.31: Curvas de presión de los diferentes perfiles de HUB simulados	72
Figura- 6.32: Contornos de presión del perfil con su optimización, comparada con el contorno de presiones de la ojiva secante1. A) Primer propuesta llamada S-C1, B) Primera Optimización llamada S-C2, C) Segunda Optimización llamada S-C3, D) Ojiva secante1.	74
Figura- 6.33: Curvas de presión para las diferentes modificaciones de la propuesta de HUB comparadas con las curvas de la geometría tipo secante y cono.	75
Figura- 6.34: Contorno de energía cinética turbulenta de los perfiles A)S-C1, B)S-C2, C)S-C3 y D)secante1.	76
Figura- 6.35: Contorno de presiones de la vista lateral de la comparación entre una turbina con HUB semi circular y con el HUB denominado S-C2.	78
Figura- 6.36: Contorno de presiones de la vista frontal de la comparación entre una turbina con HUB semicircular y con el HUB denominado S-C2; a la izquierda HUB semi circular, a la derecha HUB S-C2.	79
Figura- 6.37: Contorno de velocidades para una turbina con HUB semicircular y con el HUB denominado S-C2; a la izquierda HUB semi circular, a la derecha HUB S-C2.	80
Figura- 6.38: Contorno de presiones entre una turbina con modificación de la longitud de separación de los álabes con respecto a el HUB y la góndola (derecha) contra una turbina con la posición típica de los álabes (izquierda), ambas usando el perfil de HUB S-C2.	82
Figura- 6.39: Contorno de velocidades entre una turbina con modificación de la longitud de separación de los álabes con respecto a el HUB y la góndola (derecha) contra una turbina con la posición típica de los álabes (izquierda), ambas usando el perfil de HUB S-C2	83
Figura- 6.40: Croquis del perfil S-C2, unidades en mm y vista renderizada del mismo.	85
Figura- 6.41: Curvas del comportamiento para las diferentes geometrías de HUB. En la cual se aprecia como el perfil S-C2 hace que el aerogenerador empiece a girar antes que con el perfil original o sin él.	87
Figura- 7.1: Parábola	95
Figura- 7.2: Cono	95
Figura- 7.3: Ojiva tangente	96
Figura- 7.4: Elíptica	96
Figura- 7.5: Ojiva secante 1	97
Figura- 7.6: Ojiva secante 2	97
Figura- 7.7: Plano	98
Figura- 7.8: Semicírculo	98
Figura- 7.9: Semicírculo	99
Figura- 7.10: Parábola	99
Figura- 7.11: Cono	100
Figura- 7.12: Ojiva tangente	100

Figura- 7.13: Elíptica	101
Figura- 7.14: Secante 1	101
Figura- 7.15: Secante 2	102
Figura- 7.16: Plano	102
Figura- 7.17: Semicírculo	103
Figura- 7.18: Parábola	103
Figura- 7.19: Cono	104
Figura- 7.20: Tangente	104
Figura- 7.21: Elíptica	105
Figura- 7.22: Secante 1	105
Figura- 7.23: Secante 2	106
Figura- 7.24: Plano	106
Figura- 7.25: Semicírculo	107
Figura- 7.26: Parábola	107
Figura- 7.27: Cono	108
Figura- 7.28: Tangente	108
Figura- 7.29: Elíptica	109
Figura- 7.30: Secante 1	109
Figura- 7.31: Secante 2	110
Figura- 7.32: Plano	110
Figura- 7.33: isométrico, malla modelo turbina álabes seccionados.	111
Figura- 7.34: Frontal, malla modelo turbina álabes seccionados	111
Figura- 7.35: lateral y acercamiento de la malla, modelo turbina álabes seccionados.	112
Figura- 7.36: Isométrico frontal energía cinética turbulenta	112
Figura- 7.37: Isométrico trasero energía cinética turbulenta	113
Figura- 7.38: Isométrico frontal presiones	113
Figura- 7.39: Isométrico trasero presiones	114
Figura- 7.40: Modelo del ensamble de la turbina empleada en la simulación	114
Figura- 7.41: Modelo del ensamble de la turbina con el HUB SC-2	115
Figura- 7.42: Modelo del perfil S-C2	115
Figura- 7.43: Modelo de la turbina con HUB S-C1 y posición de los álabes modificada (más cerca de la Góndola).	116
Figura- 7.44: Diferencia en la modificación de la posición de los álabes.	116
Figura- 7.45: Turbina de viento con diferentes HUB, empezando por izquierda, perfil S-C2, perfil de fábrica, sin HUB aerodinámico	117
Figura- 7.46: Control de velocidad para un motor de 24V 4A	118
Figura- 7.47: Generador de humo a base de aceite mineral	119
Figura- 7.48: Ampliación Imagen 6.28	120




Lista de Tablas

<i>Tabla 2.1: Escala de Beaufort [3]</i>	10
<i>Tabla 2.2: Tabla de la rugosidad relativa del suelo.[4]</i>	13
<i>Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de los aerogeneradores de eje vertical y horizontal.[6]</i>	25
<i>Tabla 3.2: Principales países con producción de energía eólica.[7]</i>	25
<i>Tabla 3.3: Proyectos de parques eólicos en México.[26]</i>	26
<i>Tabla 6.1: Cálculo del número de Reynolds y velocidades de viento</i>	46
<i>Tabla 6.2: Información de interés correspondiente a las Figuras 6.1 y 6.2</i>	47
<i>Tabla 6.3: Información de interés correspondiente a las Figuras 6.3 a la 6.8</i>	50
<i>Tabla 6.4: Relación entre la velocidad real y la del túnel de viento</i>	57
<i>Tabla 6.5: Características de la máquina empleada para las simulaciones</i>	57
<i>Tabla 6.6: Relación de velocidad de viento y rpm de un aerogenerador eólico</i>	68
<i>Tabla 6.7: Frecuencia Generada en el generador eléctrico para los 3 casos de configuración del aerogenerador, con nuestra propuesta de perfil, el perfil de fábrica y el caso en el que no se le ponga un perfil aerodinámico. *** no había arrancado la máquina eólica.</i>	86



Lista de Símbolos y Abreviaturas

a	Factor de inducción axial.
a'	Factor de inducción tangencial.
c	Factor de escala, longitud de cuerda.
c_u	Longitud de cuerda optimizada.
e_c	Espesor de laminado.
f	Fuerza de Coriolis.
h	Altura de la capa límite.
k	Factor de forma, energía cinética turbulenta.
m	Masa.
\dot{m}	Flujo másico
p	Distribución de probabilidad.
r	Radio de un elemento.
t	Tiempo, espesor.
u^*	Velocidad de fricción.
v	Volumen.
z	Altura
z_0	Longitud de rugosidad
A	Área.
C_D	Coeficiente de arrastre.
C_L	Coeficiente de sustentación.
C_P	Coeficiente de potencia.
C_T	Coeficiente de empuje.
E	Módulo de elasticidad.
F	Fuerza.
G	Producción de energía cinética turbulenta, módulo de corte.
I	Intensidad de turbulencia, momento de inercia.
J	Momento polar de inercia.
K_u	Factor
M	Momento flector.
M_s	Peso por unidad de área.
N	Número de álabes.
P	Potencia, presión.
Q	Torque.
R	Radio del rotor.
T	Tiempo en que sopla el viento, empuje, momento torsor.



\bar{U}	Velocidad media de viento.
U_N	Velocidad nominal.
U_∞	Velocidad del viento.
V	Fracción volumétrica.
W	Velocidad relativa de viento.
Y	Disipación de energía cinética turbulenta.
α	Ángulo de ataque.
β	Ángulo de asiento.
γ	Deformación cortante unitaria.
ϵ	Razón de disipación turbulenta, deformación normal unitaria.
η_{elec}	Eficiencia eléctrica.
η_{mec}	Eficiencia mecánica.
θ	Ángulo de giro.
κ	Constante de von Karman.
λ	Latitud, velocidad específica.
λ_0	Velocidad específica local.
μ	Viscosidad molecular.
μ_t	Viscosidad turbulenta.
ν	Coefficiente de Poisson.
ρ	Densidad.
σ	Desviación estándar, número de Prandtl turbulento, esfuerzo normal.
τ	Esfuerzo cortante.
u	Ángulo de torsión.
ω	Razón de disipación específica.
Ω	Velocidad angular de rotación de la Tierra, velocidad angular del rotor.



Resumen

El HUB, localizado en el rotor de las turbinas de viento, es el encargado de sujetar los álabes y conectarlos con el eje principal del generador eléctrico, también de desviar el flujo de aire; que impacta en el rotor, hacia la raíz de los álabes (sección encargada de hacer que las turbinas giren con bajas velocidades de viento). En el presente trabajo se analizan diferentes geometrías para el HUB de una turbina de viento de baja capacidad de eje horizontal, para determinar cómo afecta en la eficiencia aerodinámica; geometrías tales como un HUB en forma de cono, semicírculo, entre otras, y en comparación con una turbina con HUB plano. Esto se realizó mediante simulaciones en CFD (dinámica de fluidos por computadora) y posteriormente se obtuvieron las curvas de presión de cada geometría y se dio una propuesta de HUB con determinadas características.

PALABRAS CLAVE: Energía Eólica, Turbina de viento, HUB, Aerodinámica

Abstract

The HUB, located in the rotor of the wind turbines, is the one in charge of holding the blades and to connect them with the principal axis of the electric generator, also of deviating the air flow; that impacts the rotor, towards the blades (section in charge of making the turbines spin with low speeds of wind). In the present work different geometries for the HUB are analyzed to determine how they affect the aerodynamics efficiency of the wind turbine; geometries like the nose cone, semicircle, between others, in comparison with a turbine with a flat HUB. This was simulated with CFD.

KEYWORDS: Wind Energy, Wind turbine, HUB, Aerodynamics



Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Energías alternas

La demanda de energía eléctrica es un reto constante en la sociedad en la que vivimos actualmente. Esto nos obliga a buscar diferentes maneras de abastecer esa necesidad, intentando mantener bajos los niveles de contaminación (que se generan al producir electricidad). Las energías alternas representan una alternativa limpia para el suministro de la demanda eléctrica y la solución al problema de contaminación.

Energía eólica. Un tipo de energía alterna es la eólica, la cual utiliza la energía obtenida de las corrientes de aire. Dicha energía es de carácter inagotable, ya que es cíclica (el aire siempre está en movimiento). Esta energía se genera por las variaciones de temperatura en la atmósfera del planeta.

La forma de obtener la energía del viento más común es utilizando generadores eólicos, también conocidos como turbinas de viento. Éstas turbinas están integradas por componentes tales como: el rotor; que es el que convierte la fuerza del viento en energía rotatoria; un generador encargado de transformar la energía de rotación en energía eléctrica; una caja de engranes para aumentar la relación de velocidad entre el rotor y el generador; y el HUB, localizado en el rotor que es el encargado de sostener los álabes y de direccionar las líneas de corriente del aire; entre otros.

Turbinas de viento de baja capacidad. En la energía eólica, el tamaño del aerogenerador y en especial del diámetro del rotor se ha convertido en un factor clasificatorio. Aunque el principio de funcionamiento y diseño es similar, su construcción, concepción y aplicaciones son totalmente distintas. Dando como resultado turbinas de baja potencia como las empleadas para hogares individuales, hasta las de alta potencia empleadas para suministrar la demanda de energía a una parte del país.

Como en los aerogeneradores se quiere obtener la mayor cantidad de energía posible del viento, es necesario tomar diferentes factores, como son las características del viento de cada región, así como también un buen diseño de la turbina de viento, para tener un dispositivo que tenga las eficiencias más altas posibles. En cuanto al diseño de la turbina de viento, se puede optar por el diseño de sus partes mecánicas encargadas de transmitir la energía extraída viento, al generador eléctrico, o por el lado del diseño aerodinámico, que es el encargado de extraer la energía del viento.

En diseño aerodinámico se han estudiado de forma más amplia las geometrías de los álabes, dejando en un segundo plano de importancia la aerodinámica de las demás partes que lo conforman, como es el caso del HUB y la góndola.

Diseño de perfiles aerodinámicos (método directo y método inverso)

Cada perfil aerodinámico tiene diferentes propiedades, totalmente distinta a otros perfiles, lo cual hace que la aerodinámica se centre en detectar y definir los factores que contribuyen a perfeccionar estos perfiles de manera más precisa. (Flores Galindo et al. 2006)

Los métodos de diseño de perfiles se pueden clasificar en dos tipos: Diseño directo y diseño mediante ingeniería inversa. El diseño directo parte de tener las especificaciones de la geometría, el cálculo de presiones y rendimiento. Se evalúa la geometría y se modifica de tal forma que se pueda mejorar el rendimiento mediante procesos de optimización. (Flores Galindo et al, 2006)

El diseño inverso se realiza en sentido contrario al diseño directo, en este se debe llegar a determinar una geometría partiendo de las distribuciones de presión de superficie, dicha presión integra el rendimiento el perfil que se desea ya con sus características mejoradas. (Flores Galindo et al, 2006)

Para reducir los tiempos de diseño, construcción y pruebas de cualquier dispositivo, se ha hecho muy común el uso de la tecnología, en particular, el uso del poder computacional, ya que este nos permite hacer cambios en un modelo virtual que, de otra forma, llevaría mucho tiempo y uso de material si se realizara en el modelo real, ya que para cada cambio la mayoría de las veces habría que realizar la creación de una nueva pieza desde cero.

Una de las formas utilizadas para realizar este tipo de trabajos es mediante el uso de CFD.

Dinámica de fluidos computacional (CFD). Utiliza métodos numéricos y algoritmos para analizar el flujo de fluidos. Éste trata de dar una solución aproximada a las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido confinado, incompresible y newtoniano, ecuaciones (1.1).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu s_{ij}) \quad | \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.1.1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad \frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (1.1.2)$$

Donde \mathbf{u} y \mathbf{x} son vectores de velocidad instantánea y posición, p es la presión instantánea, θ es la temperatura instantánea, t es el tiempo, ρ es la densidad, ν es la viscosidad cinemática molecular, c_p es el coeficiente de transferencia de calor, k la conductividad térmica, s_{ij} son los tensores de deformación, c es la concentración instantánea y D es la difusividad molecular. (B. Blocken, 2014)

Función de corriente. Esta función de corriente define la dirección de las líneas de corriente, que a su vez representa el flujo alrededor de un sólido, las cuales son importantes porque permiten determinar la distribución de presiones

sobre el sólido. Una línea de corriente es aquella curva del espacio tangente al campo de velocidad \mathbf{u} ; los cuales cumplen que el vector $d\mathbf{x}$ es paralelo a $\mathbf{u}(x)$ y, por tanto, $\mathbf{u}(x) \cdot \mathbf{n}(x) = 0$, donde $\mathbf{n}(x)$ es el vector normal a la línea de corriente \mathbf{x} . (Gordillo Arias de Saavedra, 2012)

$$dx_2 \frac{\partial \phi}{\partial x_1} - dx_1 \frac{\partial \phi}{\partial x_2} = 0 \quad (1.2)$$

Donde ϕ es una función escalar denominada potencial de velocidades. La solución a la ecuación (1.2) es una función ψ denominada función de corriente.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y optimizar el perfil aerodinámico del HUB de una turbina de viento de baja capacidad.

1.2.2 Objetivos específicos

1.- Diseñar y manufacturar el HUB aerodinámico de una turbina de baja capacidad.

2.- Proponer una lista de perfiles aerodinámicos del HUB para turbinas de baja capacidad que sirvan de referencia para los diseñadores de este tipo de turbinas.

1.3 Justificación

Existe la necesidad de lograr un aumento en la eficiencia de las turbinas de viento para hacer aún más rentable su uso. Es necesario proponer una familia de perfiles aerodinámicos para el HUB de turbinas de baja capacidad. Así mismo, proponer tecnología adecuada a las necesidades del país y las diferentes necesidades de las regiones del mismo.

1.4 Hipótesis

Es posible mediante el uso de tecnología propia del país, diseñar y optimizar el perfil aerodinámico del HUB de una turbina de viento de baja capacidad, así como proponer una lista de perfiles aerodinámicos de HUB para turbinas de baja capacidad.



1.5 Metodología

Se diseñan los perfiles aerodinámicos para el HUB partiendo de la ecuación de corriente.

Se seleccionarán los perfiles aerodinámicos del HUB a ser simulados para su optimización.

Mediante el uso del software ANSYS, se realizarán pruebas de simulación de dichos perfiles para determinar la idoneidad de los mismos, y posteriormente si es un perfil adecuado, pasar a su manufactura.

Se hará la manufactura de las propuestas de los perfiles en madera, para realizar las pruebas pertinentes en el túnel de viento. Si las pruebas resultan satisfactorias, se realizará la manufactura de dicho perfil en fibra de vidrio.

Se compararán los datos obtenidos de las pruebas con los obtenidos en la simulación, si los datos experimentales validan los de simulación, se integrarán a una lista de perfiles para su uso en el HUB de turbinas de viento.

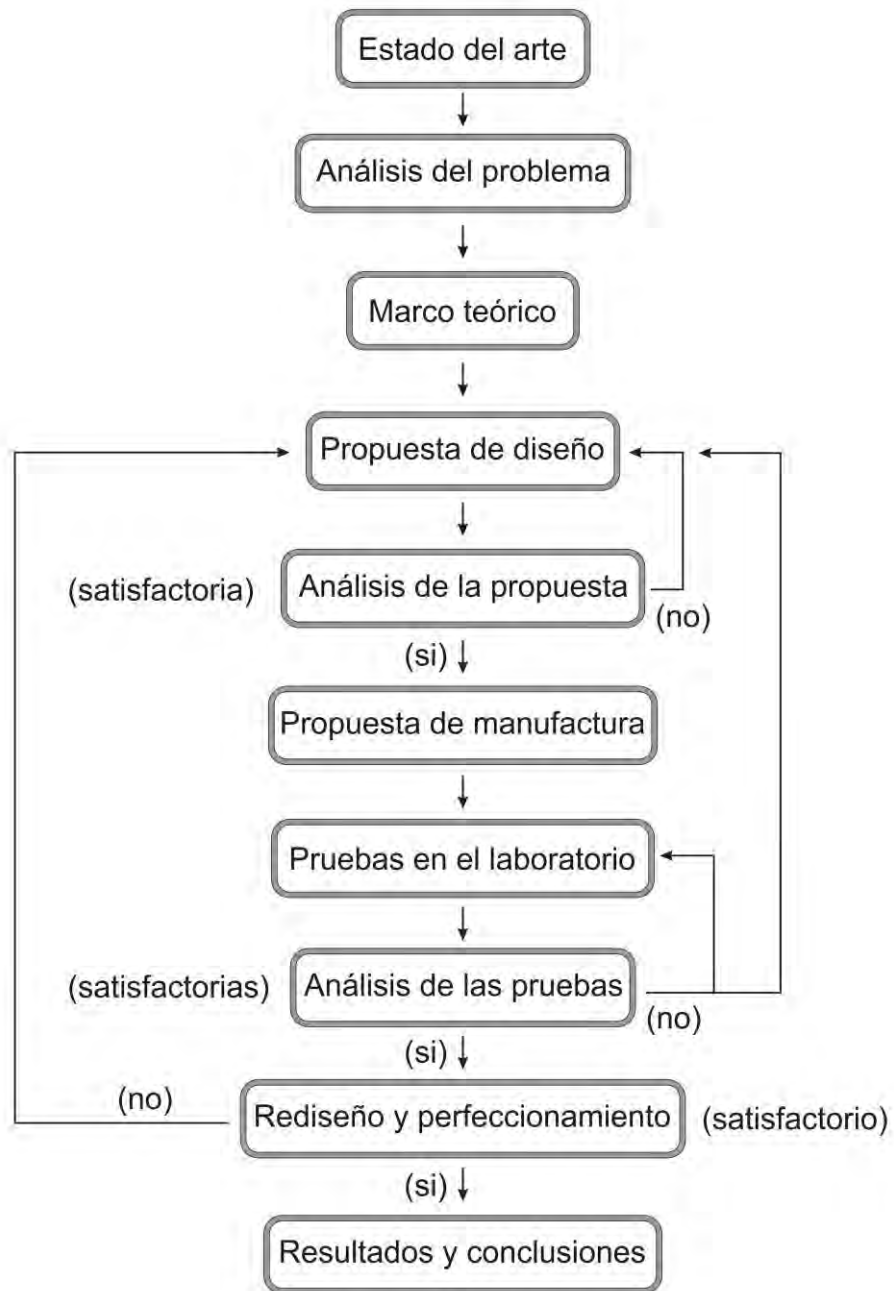


Figura- 1.1: Diagrama de flujo para el diseño de perfiles



Capítulo 2 El Viento

2.1 ¿Qué es el viento?

“El viento es la variable de estado de movimiento del aire”

El viento es aire en movimiento y aunque en general su movimiento es tridimensional, normalmente sólo se considera la velocidad y dirección de su componente horizontal. Puede verse como una corriente de aire que se genera en la atmósfera por diferentes causas naturales.

2.1.1 La atmósfera

La atmósfera es una capa de gas que envuelve algunos planetas y cuerpos celestes, en el caso de la tierra, ésta consta de una mezcla de gases que constituyen el aire, los cuales son: Nitrógeno (78%), oxígeno (21%), gases inertes e hidrógeno (5×10^{-5} %) y cantidades pequeñas y variables de dióxido de carbono y vapor de agua. El aire es un fluido transparente, incoloro e inodoro. Con un peso de 1.29g por litro, en condiciones promedio.

La atmósfera se divide en: tropósfera, estratósfera, mesósfera y termósfera [Figura 2.1]. La tropósfera o capa inferior es en la que tienen lugar los fenómenos meteorológicos, siendo esta de interés desde el punto de vista de las instalaciones eólicas.

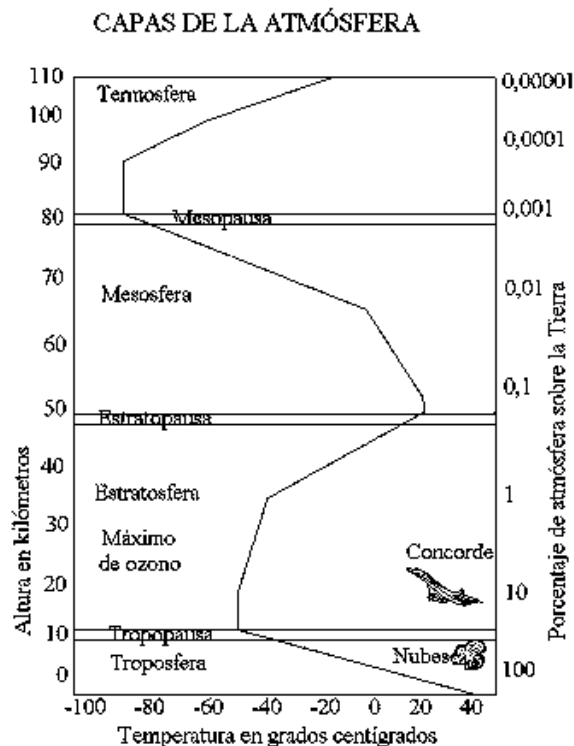


Figura- 2.1: Estructura de la atmósfera [2]



2.1.2 El clima

Para el análisis del viento en una zona determinada, es importante considerar el clima existente, definido como el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región. Los elementos que componen el clima son: la radiación solar, que incide de forma fundamental en la temperatura, la precipitación y los vientos, los cuales se ven afectados notablemente por las oscilaciones térmicas. El clima de una región geográfica es en su mayor parte consecuencia de los vientos generales que la afectan.

Los climas se pueden clasificar en:

- El clima tropical lluvioso, característico de bajas latitudes, con temperaturas elevadas, lluvias abundantes y carencia de invierno.
- El clima seco árido, correspondiente a la estepa y a los desiertos.
- El clima templado lluvioso.
- El clima frío, correspondiente a latitudes elevadas, con bajas temperaturas medias y variantes, continental u oceánico, de inviernos secos o con lluvia todo el año.

2.2 Dirección y velocidad del viento

El viento sopla en principio desde las zonas de presiones altas hacia las zonas de bajas presiones. En las latitudes medias y altas, su dirección se modifica por la rotación de la tierra. El viento entonces toma una dirección paralela a las isobaras.

Una isobara, es una línea que en un mapa atmosférico une los puntos que presentan la misma presión atmosférica.

La dirección del viento viene definida por el punto del horizonte del observador desde el cual sopla. En la actualidad, se usa internacionalmente la rosa dividida en 360° o rosa de los vientos [Figura 2.2]. El cálculo se realiza tomando como origen el norte y contando los grados en el sentido de giro del reloj.

Los registros diarios permiten establecer para cada lugar un diagrama polar. Esta clase de diagrama puede establecerse para un año o para cada mes, incluso para cada hora del día. La longitud de los vectores representados, es proporcional a la velocidad media del viento en la dirección considerada. De este modo se puede seguir la variación de la dirección media del viento durante el año y a lo largo de un día.

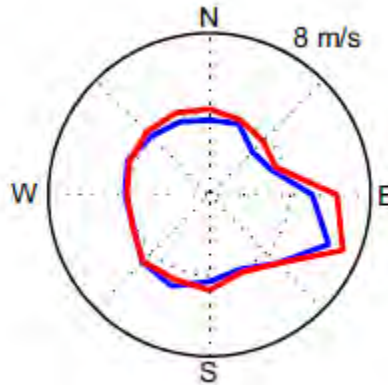


Figura- 2.2: Ejemplo de Rosa de los vientos.[1]

La velocidad del viento se mide en náutica en nudos y mediante la escala de Beaufort. Esta descripción es inexacta pues varía en función del tipo de aguas donde se manifiesta el viento. En la meteorología moderna, la escala de Beaufort tiende a sustituirse por las mediciones precisas en nudos. Para los análisis de viento dirigidos a su utilización energética, se emplea como unidad de velocidad m/s.

La velocidad del viento es un vector. La unidad de velocidad del viento en el sistema internacional es m/s, sin embargo, aún se usan los nudos (kt) y km/h.

$$1 \text{ kt} = 1.8 \text{ km/h} \text{ ó } 1 \text{ kt} = 0.5 \text{ m/s}$$

2.2.1 Medición de la dirección y velocidad del viento

El aparato tradicionalmente empleado para medir la dirección del viento es la veleta, que marca la dirección en grados en la propia rosa. La velocidad del viento se mide con el anemómetro, el más utilizado es un molinete de tres brazos, separados por ángulos de 120° , que se mueve alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y permiten medir su velocidad.

Existen varios tipos de anemómetros, algunos enlistados a continuación:

-Anemómetros de rotación [Figura 2.3], de los cuales los más conocidos son los anemómetros de cucharilla de Papillon y Robinson, el anemómetro de aletas oblicuas de Jules Richard y el anemómetro de canalones de Ailleret.



Figura- 2.3: Anemómetro de rotación [22]

-El anemómetro de canalones, se proyectó expresamente para la medida de la energía eólica. Se le puede acoplar un contador o un registrador que indique las potencias explotables directamente.

-Anemómetros de presión, tales como el anemómetro de bola y de cuadrante, los anemómetros de tubo de Pitot [Figura 2.4].

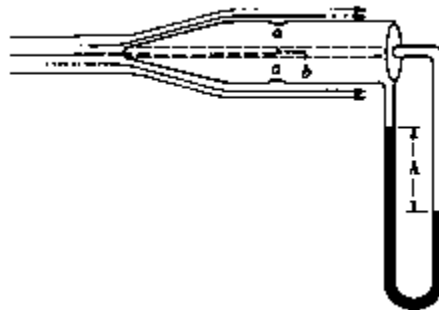


Figura- 2.4: Anemómetro de tubo de pitot.

-Anemómetro de sección variable, como son los ventímetros y rotámetros.

-Anemómetro de hilo caliente. Lo que se mide en este tipo de instrumento es la disipación de calor desde un conductor metálico de diámetro muy pequeño, cuando es expuesto al viento. El conductor se integra en un circuito eléctrico por el cual circula corriente. Si se mantiene constante la temperatura del conductor, la corriente eléctrica es una función conocida de la velocidad del viento.

En cuanto a la velocidad del viento, se mencionó la escala de Beaufort, que clasifica los vientos en función de su velocidad, en 17 categorías, como se ilustra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Escala de Beaufort [3]

Grados Beaufort	Nudos		m/s		km/h		Descripción	Presión s/superficie Plano en daN/m ²	
	de	a	de	a	de	a		de	a
0	<	1	0	0.2	<	1	Calma		
1	1	3	0.3	1.5	1.0	3.0	Ventolina	0.0	0.3
2	4	6	2.1	3.1	7.4	11.1	Brisa Suave	0.6	1.2
3	7	10	3.6	5.1	13.0	18.5	Brisa Leve	2	3
4	11	16	5.7	8.2	20.4	29.7	Brisa Moderada	4	9
5	17	21	8.8	10.8	31.5	38.9	Viento Refrescante	10	15
6	22	27	11.3	13.9	40.8	50.0	Viento Fuerte	17	25
7	28	33	14.4	17.0	51.9	61.2	Viento muy Fuerte	27	38
8	34	40	17.5	20.6	63.0	74.1	Temporal	40	55
9	41	47	21.1	24.2	76.0	87.1	Temporal Fuerte	58	76
10	48	55	24.7	28.3	89.0	101.9	Temporal muy Fuerte	79	104
11	56	63	28.8	32.4	103.8	116.8	Tempestad	108	137
12	64	71	32.9	36.5	118.6	131.6	Huracán	141	174
13	72	80	37.1	41.2	133.4	148.3		179	220
14	81	89	41.7	45.8	150.1	164.9		226	273
15	90	99	46.3	51.0	166.8	183.5		279	338
16	100	108	51.5	55.6	185.3	200.1		344	402
17	109	118	56.1	60.7	202.0	218.7	Ciclón	409	480

2.3 Masas de aire

Una masa de aire, se define como un volumen de aire de gran extensión cuyas propiedades físicas, sobre todo temperatura y humedad, son uniformes en el plano horizontal. Su tamaño cubre por lo general centenares e incluso miles de kilómetros cuadrados, verticalmente puede alcanzar espesores de varios kilómetros.

Las masas de aire se clasifican según su temperatura y por la humedad del aire en:

Masas de aire ártico y antártico. Se originan en la proximidad de los polos, se caracterizan por sus bajas temperaturas y su débil contenido de humedad, la nubosidad es escasa y el riesgo de precipitaciones muy reducido.

Masas de aire polar. Se sitúan en zonas alejadas de los polos, son frías, secas y de estratificación estable.

Masas de aire tropical. Sus manantiales son las células oceánicas y continentales de altas presiones en las latitudes tropicales.

Masas de aire ecuatorial. Se caracteriza por tener elevadas temperaturas, alto contenido en humedad y una elevada inestabilidad.



2.3.1 ¿Cómo se desarrolla el viento?

Debido a la acción de las diferencias de presión atmosférica, continuamente variables, que existen sobre nuestro planeta, el aire no puede estar nunca en reposo y se desplaza prácticamente sin cesar. La corriente correspondiente constituye el viento.

El viento es causado por las diferencias de temperatura existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la tierra y de la atmósfera. Las masas de aire más caliente tienden a ascender, y su lugar es ocupado entonces por las masas de aire circundante, más frío y por ende más denso.

Se denomina viento a la corriente de aire que se desplaza en sentido horizontal, los movimientos de aire en sentido vertical son denominados como corriente de convección.

Para las aplicaciones eólicas, el conocimiento de la presión atmosférica resulta de vital importancia. Ésta es la presión que ejerce la atmósfera sobre los cuerpos sumergidos en ella. El aire frío pesa más que el caliente, y éste es uno de los factores que influyen en las diferencias de presión atmosférica a un mismo nivel. Los anticiclones y las borrascas, generan corrientes de aire en sentido vertical que modifican sustancialmente el valor de la presión atmosférica, circunstancia que afecta de forma notable la potencia de generación de un aerogenerador.

La disposición que adoptan las isobaras configuran unas formas denominadas campos de presión. Los campos de presión estables en el tiempo, o poco variables, se denominan centros de acción, ya que son los que regulan las masas de aire y la circulación de los vientos. El viento está definido por dos parámetros: dirección horizontal y la velocidad, y se usarán más frecuentemente al tratar el potencial eólico disponible en un emplazamiento.

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos; se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones) y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones. En su movimiento, el viento se ve alterado por diversos factores, tales como el relieve y la aceleración de Coriolis.

Debido a la rotación de la tierra, el viento que entra en un ciclón es desviado hacia la derecha en su trayectoria inicial en el hemisferio septentrional y hacia la izquierda en el meridional. Los ciclones extra tropicales son perturbaciones de las latitudes medias y altas, integradas por uno o varios frentes calientes o fríos o por frentes ocluidos asociados a un mínimo barométrico móvil.

Frente es una superficie de discontinuidad que separa dos masas de aire de distinta densidad o temperatura. Los frentes provocan a su paso diversas modificaciones de los factores meteorológicos, según su naturaleza, a saber: frente cálido, frente frío, frente ocluido, frente estacionario, la borrasca, la brisa.

Las brisas es un viento suave, local y periódico que sopla en aquellos lugares en los que se producen alternancias periódicas del gradiente térmico, a

causa de una desigual acción de la radiación solar. La brisa de mar y tierra se produce debido al mayor calentamiento de la tierra durante el día, el viento sopla del mar a la costa en las costas bajas, por la noche el mar mantiene una temperatura más elevada que la tierra, por lo que sopla un viento suave del continente hacia el mar. Las brisas de valle y montaña siguen un ciclo semejante.[Figura 2.5]

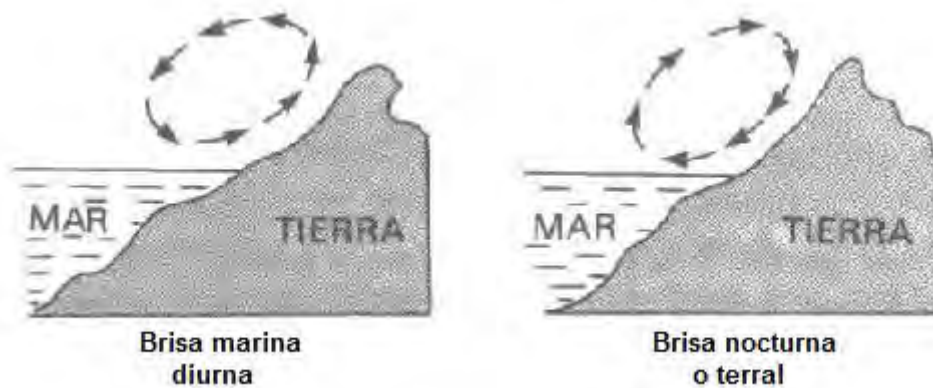


Figura- 2.5: Dirección de la brisa marina diurna y nocturna.[6]

2.4 Energía del viento

Aparentemente la primera aplicación práctica de la energía del viento fue la navegación; el primer molino de viento del que se tiene noticia histórica aparece en Persia, y se utilizó para pulverizar granos. La rica historia de los molinos de viento se desenvuelve hasta nuestros días a través de distintas religiones y culturas.

La era moderna de los molinos de viento, viene de la mano del desarrollo de la teoría de la aerodinámica, que primeramente encontraron aplicaciones en la fabricación de alas y hélices utilizadas en aviación y posteriormente en las palas de los rotores de los molinos.

Actualmente, la energía cinética contenida en el viento se utiliza fundamentalmente en la generación de energía eléctrica. Una vez transformada en energía eléctrica puede consumirse directamente, en tiempo real o acumularse para su posterior consumo o transporte.

La energía contenida en el viento es inagotable debido a su carácter cíclico. Para obtener el máximo aprovechamiento energético del viento, es de vital importancia una correcta evaluación y caracterización del mismo.

Para ello se utilizan estaciones de medida y torres de medición provistas de sensores en diferentes alturas, lo cual permite conocer los siguientes aspectos:

- Velocidad media del viento.
- Distribución de frecuencias en las diferentes direcciones.
- Variación del viento con respecto a la altura y posición.

- Estadísticas de ráfagas.
- Velocidad máxima.
- Distribución del día típico medio, etcétera.

El aumento de la velocidad del viento crece a medida que nos separamos del suelo, esto se debe a la frenada que experimenta el aire debido a la vegetación, las construcciones y obstáculos de toda clase. Diferentes autores han propuesto una expresión para representar la ley de variación de la velocidad del viento.

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^n \quad (2.1)$$

Donde V_0 es la velocidad observada a la altura H_0 y V la velocidad observada a la altura H ; n varía desde 0.10 a 0.40 como se muestra en la Tabla 2.2 [4].

También es posible representar la variación de la velocidad con la altura en términos de una ley logarítmica:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\text{Log}(H/z_0)}{\text{Log}(H/z)} \quad (2.2)$$

Donde z_0 es la longitud relativa a la rugosidad del suelo. Algunos de estos valores se enlistan en la Tabla 2.2

Tabla 2.2: Tabla de la rugosidad relativa del suelo.[4]

Tipo de terreno	z_0 en m	n
Liso (mar, arena, nieve)	0.01 – 0.02	0.10 – 0.13
Moderadamente rugoso (hierba corta, campos de trigo u otros cereales, regiones rurales)	0.02 – 0.3	0.13 – 0.20
Rugoso (bosques, barrios)	0.03 - 2	0.20 – 0.27
Muy rugoso (ciudades, altos edificios)	2 - 10	0.27 – 0.40

Como la energía susceptible de ser captada es proporcional al cubo de la velocidad;

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.3)$$

donde P es la potencia, A el área, V la velocidad y ρ la densidad;[Figura 2.8]

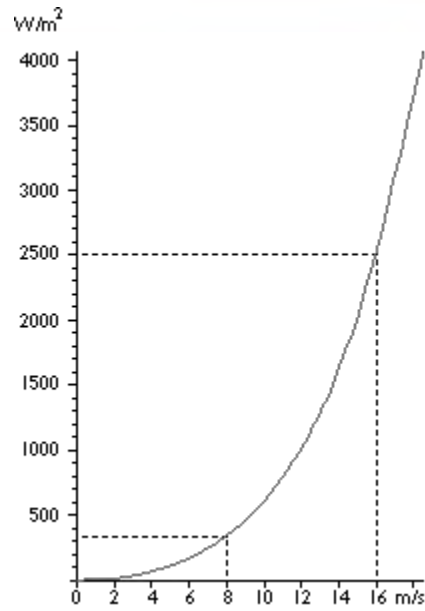


Figura- 2.6: Gráfica de la potencia por unidad de área con respecto a la velocidad del viento.[21]

Se deduce que la relación entre la energía disponible a H metros y a H_0 metros sobre el suelo viene dada por la expresión

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3n} \quad \text{con } 0.30 < 3n < 1.20 \quad (2.4)$$

Donde E es la energía a la altura H y E_0 es la energía a la altura H_0

Por lo tanto, será de gran importancia para recoger el máximo de potencia colocar el generador eólico lo más alto posible respecto al suelo.



Capítulo 3

Generadores Eólicos

3.1 Introducción

Una turbina eólica es una máquina capaz de convertir la energía del viento en cualquier otro tipo de energía, puede ser mecánica o eléctrica. Estas han evolucionado a través de las épocas, teniendo así diferentes formas, tamaños, usos y tecnología que las conforman.

El pionero más notable en estos pequeños generadores fue Marcellus Jacobs. Su turbina era representativa por tener un rotor con tres palas, con una forma aerodinámica que semejan mucho a las turbinas de hoy en día [Fig 3.1].

Los primeros usos que se les dieron eran mecánicos, en Persia eran utilizados para moler grano y la riega de cultivos. Estos molinos eran de eje vertical y la rueda que sujetaba las aspas era horizontal. En Europa, en el siglo XII, los primeros molinos tenían como característica común, que de la parte superior del molino sobresalía un eje horizontal del cual partían de 4 a 8 aspas [Figura 3.2]. Estas se cubrían con telas o planchas de madera y la energía generada por el giro del eje se transmitía a través de un sistema de engranajes.

Sus usos empezaron a diversificarse entre los siglos XV y XIX, siendo utilizados para aplicaciones como el bombeo de agua, aserraderos de madera, fábricas de papel, prensado de semillas para la elaboración de aceites, entre otros.

En el siglo XVIII las turbinas de viento empezaron a experimentar serias mejoras, pero pronto se abandonó su investigación, debido a la aparición de motores de combustión durante la revolución industrial. No fue hasta el siglo XX, que los avances eléctricos y técnicos llevaron a la aparición del primer generador eólico, que era el primer molino con alto régimen de giro; aunque no se les prestó interés a estos hasta la primera crisis del petróleo en 1973, debido a que cuenta además con el incentivo de ser una fuente de energía no contaminante.



Figura- 3.1: Marcellus Jacobs y su turbina.[5]

Aún cuando el término “máquina eólica” abarca a cualquiera capaz de transformar la energía cinética del viento en energía útil, se puede hacer distinción y clasificarlas en distintos grupos de acuerdo a sus características, por ejemplo, de eje horizontal o de eje vertical, etc.



Figura- 3.2: Molino de viento.[5]

3.2 Generadores eólicos

Un generador eólico está integrado por varios componentes. El rotor que convierte la fuerza del viento en energía rotatoria del eje, una caja de engranajes que aumenta la velocidad y un generador que transforma la energía del eje en energía eléctrica.

El aerogenerador más empleado en la actualidad es el de eje horizontal, considerado el más eficiente.

Los aerogeneradores extraen la energía del viento utilizando una tecnología parecida a la de los aviones o helicópteros. Sus componentes fundamentales son: el rotor; integrado por los álabes y el HUB, y la góndola; que incluye la transmisión y el generador eléctrico, ilustrados en la Figura 3.3

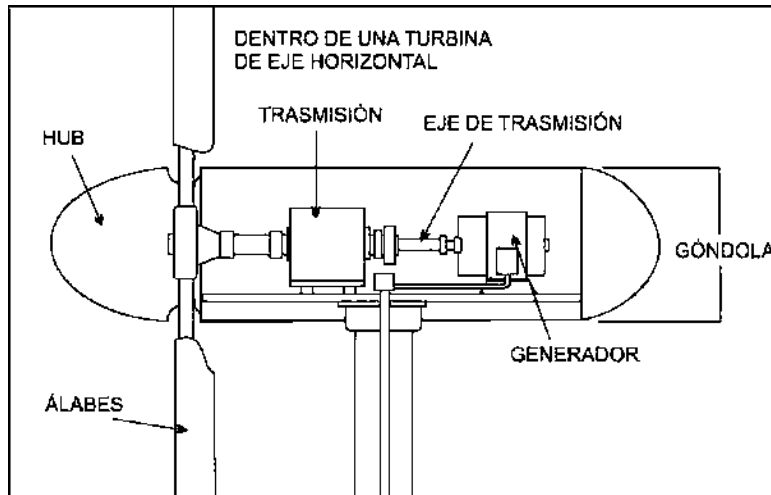


Figura- 3.3 Esquema de un generador eólico.

3.2.1 Rotor

Incluye el buje y las palas; las palas capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje que está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador; ese eje, a su vez conecta el buje del rotor al multiplicador.

Cuando las palas se disponen ancladas rígidamente al buje, el aerogenerador se denomina de paso fijo y cuando éstas pueden regular el paso, se denomina de paso variable. En este último caso, el anclaje al buje se realiza mediante unos rodamientos que permiten su giro.

3.2.2 Góndola

Contiene el generador eléctrico, el multiplicador y los sistemas hidráulicos de control, orientación y frenos, entre otros.

El multiplicador tiene por el lado del rotor el eje de baja velocidad, que es el eje de entrada, y al otro lado un eje de salida de velocidad alta, el cual gira a 1500 revoluciones por minuto, para permitir el funcionamiento del generador eléctrico en condiciones de conexión a la red eléctrica; en este eje se incorpora el sistema de freno del rotor.

Una veleta situada en la parte posterior de la góndola, mide la velocidad del viento en cada instante y manda órdenes a los sistemas de control, que accionan los equipos de orientación del aerogenerador, de forma que el rotor y las palas se sitúen en la posición óptima contra el viento.

Las máquinas sin multiplicador se denominan aerogeneradores multipolo.



3.2.3 Torre

La torre es la encargada de soportar la góndola y el rotor. Así como a su vez posicionar la turbina de viento a una altura adecuada para captar los vientos de la mejor forma, tratando de sortear obstáculos que puedan reducir la cantidad de viento que pueda llegar a ésta.

3.3 Funcionamiento de un aerogenerador

Podemos distinguir dos formas de funcionamiento en las turbinas eólicas, el arrastre; en el que el viento empuja las aspas, y la sustentación, en el que las aspas se mueven de un modo parecido a las alas de un avión a través de una corriente de aire. Siendo estas últimas las que giran a mayor velocidad y por su diseño son más eficientes.

Los aerogeneradores modernos comienzan a funcionar cuando el viento alcanza velocidades alrededor de los 19 km/h, logrando su máximo rendimiento con vientos entre 40 y 48 km/h y por razones de seguridad dejan de operar cuando los vientos alcanzan los 100 km/h; siendo así los lugares con velocidades promedio de 21 km/h anuales, los ideales para la instalación de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores de eje horizontal además de trabajar con el empuje del viento, utilizan la fuerza de sustentación para obtener un mejor rendimiento. Y en el diseño de los aerogeneradores, se busca la combinación de ángulos y formas para evitar turbulencias y sacar el máximo partido a la combinación de las fuerzas del viento [Figura 3.4].

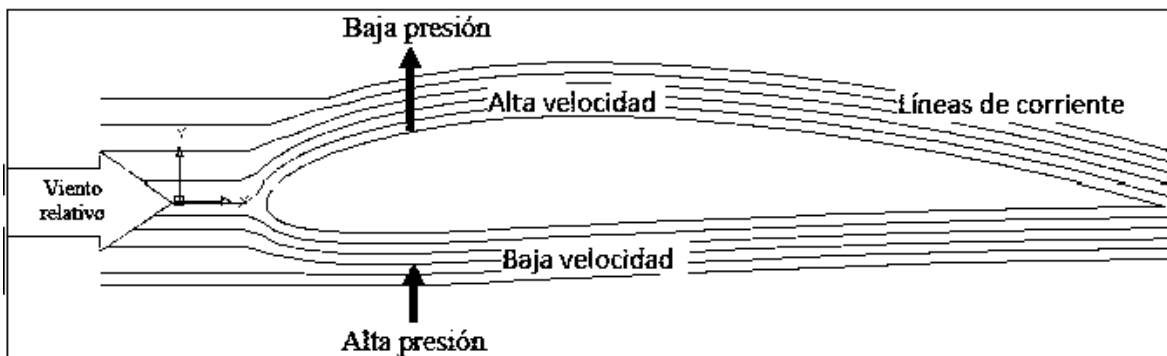


Figura- 3.4: Fuerza de sustentación en un perfil aerodinámico.[22]

3.4 Potencia generada y pérdidas

La potencia suministrada por un aerogenerador depende de la superficie barrida por la hélice y, por lo tanto, de la longitud de las palas, y es independiente del número de palas. La energía que origina el viento es energía cinética, la cual es causada por la masa del aire en movimiento, expresada en la Ecuación 3.1

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Donde m es la masa del aire en kilogramos y v es la velocidad instantánea del viento en m/s. La masa de aire la podemos definir como:

$$m = \rho \cdot V \quad (3.2)$$

Donde ρ es la densidad del aire (1.0151 kg/m³) y V es el volumen del cilindro barrido. A su vez podemos definir al volumen como $V = A \cdot L$ donde A es la superficie barrida y L la longitud del cilindro, que da como resultado un espacio y, por tanto, es igual a una velocidad, en este caso la del viento; en un intervalo de tiempo dado en segundos.

$$L = v \cdot t \quad (3.3)$$

Así podemos definir la energía igual a

$$E_c = \frac{1}{2}\rho \cdot V \cdot v^2 \quad (3.4)$$

$$E_c = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot L \cdot v^2 \quad (3.5)$$

$$E_c = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v \cdot t \cdot v^2 = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3 \cdot t \quad (3.6)$$

Y la potencia teórica del viento como

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.7)$$

Como el área barrida de un generador eólico de eje horizontal es circular $A = \pi D^2/4$, donde D es el diámetro, podemos reescribir la potencia disponible como

$$P = \frac{\pi}{8}\rho \cdot D^2 \cdot v^3 \quad (3.8)$$

Desafortunadamente no se puede extraer toda la energía del viento. Albert Betz, demostró en 1919 que para extraer la energía del viento debemos reducir su velocidad, en otras palabras, deberíamos detener completamente el aire en movimiento. Pero al hacer esto, el aire estaría parado e impediría la entrada de más aire al rotor de la turbina y no podríamos captar más energía.

Según el teorema de Betz, la energía máxima que podrá captarse del viento para que el rendimiento sea máximo es del 59% ($C_p = 16/27$). Lo cual equivaldría a reducir la velocidad del viento que pasa a través de las hélices hasta 1/3 de su velocidad inicial, y solo podríamos aprovechar hasta un máximo de 2/3 de la energía del viento, siendo esta la primer gran pérdida del rendimiento de la turbina.

Toda máquina en movimiento tiene pérdidas mecánicas, las cuales en el generador, trabajando a altas velocidades, no son muy importantes, pero con vientos de menor velocidad, las pérdidas se hacen significativas.

Al ser un generador eléctrico, también se debe tener en mente que cualquier máquina eléctrica produce pérdidas en forma de calor.

Los componentes electrónicos que adecuan la electricidad para el consumo, tales como rectificadores, transformadores e inversores, causan más pérdidas, pero no suelen ser tan elevadas como las anteriores.

Si tomamos todas estas pérdidas en cuenta, podemos definir una ecuación para determinar la potencia que podemos extraer del viento

$$P = C_p \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v^3 \quad (3.9)$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia, el cual varía en función de la calidad y diseño del aerogenerador, alcanzando en un generador de altas prestaciones un valor de 0.25.

Así se puede apreciar como la potencia producida va aumentando en función del diámetro, en otras palabras, si el diámetro se duplica la potencia se cuadruplica. Dando como resultado que los factores que más influyen para determinar la potencia que podemos esperar de una turbina eólica son el diámetro del rotor y la velocidad del viento.

El C_p nos indica con que eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en energía eléctrica. En la Figura 3.5 se muestra la curva del coeficiente de potencia de 0.44 para un aerogenerador danés.

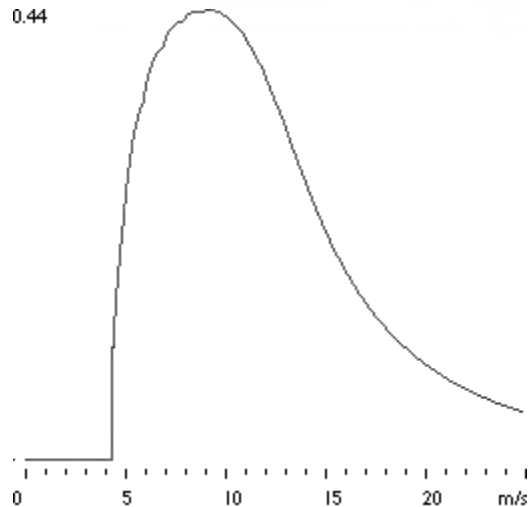


Figura- 3.5: Curva del coeficiente de potencia de un aerogenerador de .44 para diferentes velocidades del viento. [5]

3.5 Clasificación de los aerogeneradores

3.5.1 Clasificación según el eje de rotación de las hélices

Este puede ser de eje horizontal o de eje vertical. Los aerogeneradores de hélices de eje vertical son muy poco usados para la generación de electricidad, debido a que su diseño no les permite girar a altas velocidades, por lo tanto su rendimiento es muy bajo para la generación de electricidad.

Los tipos de aerogeneradores de eje vertical más extendidos son el Savonius y el Darrieus.

El aerogenerador Savonius, cuyo máximo rendimiento se alcanza a bajas revoluciones, debido a la gran resistencia que ofrece al viento, por sus bajas revoluciones debe acoplarse a un multiplicador si se quiere utilizar para la generación de electricidad, dando como resultado una enorme pérdida en el rendimiento. El otro tipo de generador de eje vertical más usado es el de tipo Darrieus.[Fig3.6]

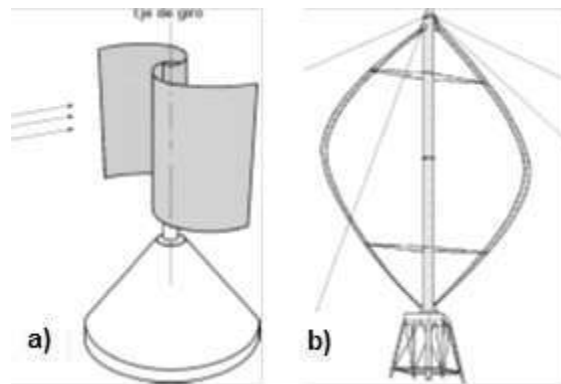


Figura- 3.6: a)Turbina Savonius b)Turbina Darrieus.[21]

Los generadores de eje vertical cuentan con ventajas, como la ausencia de orientación y la posibilidad de instalarse en el suelo. Pero sus inconvenientes los hacen inviables.

Los aerogeneradores de eje horizontal son los más usados, ya que con esta configuración se ha alcanzado el mayor rendimiento de captación energética del viento y se pueden clasificar en lentas o multipala y rápidas.

3.5.2 Clasificación según el número de palas

Una turbina eléctrica no por tener más álabes dará una mayor potencia. Los aerogeneradores necesitan girar a altas velocidades, sin embargo no generan par motor por la resistencia de oposición al aire, sino por el perfil aerodinámico de las palas. Los rotores multipala ofrecen regímenes de giro lento, pero con mucho par, debido a la resistencia que oponen al paso del viento.

Las máquinas multipala se utilizaron principalmente para la extracción de agua, ya que arrancan con velocidades de viento muy bajas con alto par de arranque. Su tamaño está limitado por el gran peso del material de las palas.

Las máquinas rápidas, no utilizan tantas palas. Se ha experimentado con 4, hasta con 1 pala y se ha llegado a la conclusión de que el mejor rendimiento se alcanza con 3 palas.

Un rotor de 3 palas no presenta las desventajas de un bipala. En un rotor bipala las fuerzas que experimentan las palas no están compensadas en todo su radio de giro. Cuando las palas están en posición vertical, la inferior sufre un menor empuje debido a las turbulencias provocadas por la misma torre.

Todos estos problemas se pueden evitar si se añade una tercera pala, las fuerzas experimentadas se distribuyen y se compensan mejor entre ellas, son más silenciosas, con mayor par de arranque y más estable en la rotación para su orientación.[Fig 3.7]

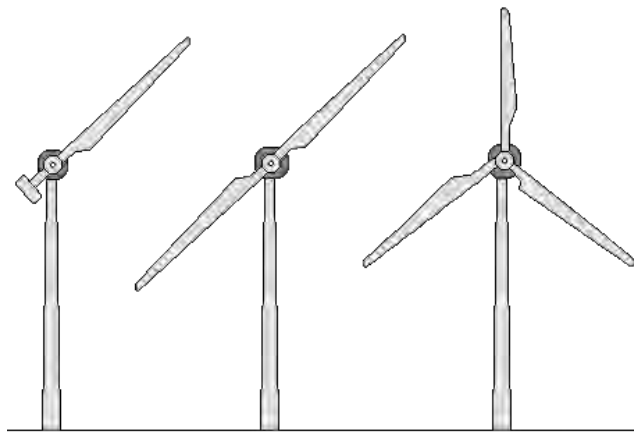
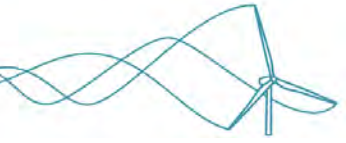


Figura- 3.7: Generador eólico monopala, bipala y tripala.



3.5.3 Clasificación según la posición del rotor en la máquina

Los aerogeneradores se clasifican en máquinas de Barlovento o Sotavento, dependiendo en la incidencia del viento sobre el rotor. Esta disposición influye en el sistema de orientación, control de frenado, y diseño general de la máquina.

En los aerogeneradores de barlovento, el viento llega al rotor por su parte anterior. En los de sotavento el viento incide sobre las hélices por la parte posterior de la góndola y son fácilmente identificables por la forma cónica con la que se instalan las hélices; cuentan con la ventaja de orientarse automáticamente, pero el rotor al estar a sotavento, se ve influenciado por las turbulencias que crea la torre [Figura 3.8].

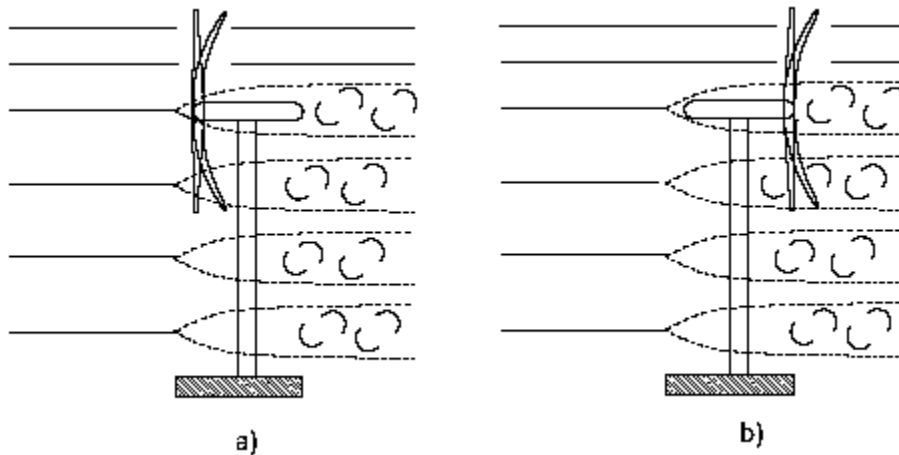


Figura- 3.8: Aerogenerador a)barlovento; b)sotavento.[6]

3.5.4 Clasificación según el anclaje de las hélices al buje

Los aerogeneradores cuyas hélices pueden rotar sobre su eje longitudinal se denominan de paso variable. Esta opción facilita la regulación de la velocidad de rotación en caso de fuertes vientos. Sus resultados son excelentes, pero complicados.

3.5.5 Clasificación según el tamaño y potencia

En la energía eólica, el tamaño del aerogenerador y en especial del diámetro del rotor se ha convertido en un factor clasificatorio. Aunque el principio de funcionamiento y diseño es similar, su construcción, concepción y aplicaciones son totalmente distintas [Figura 3.9].

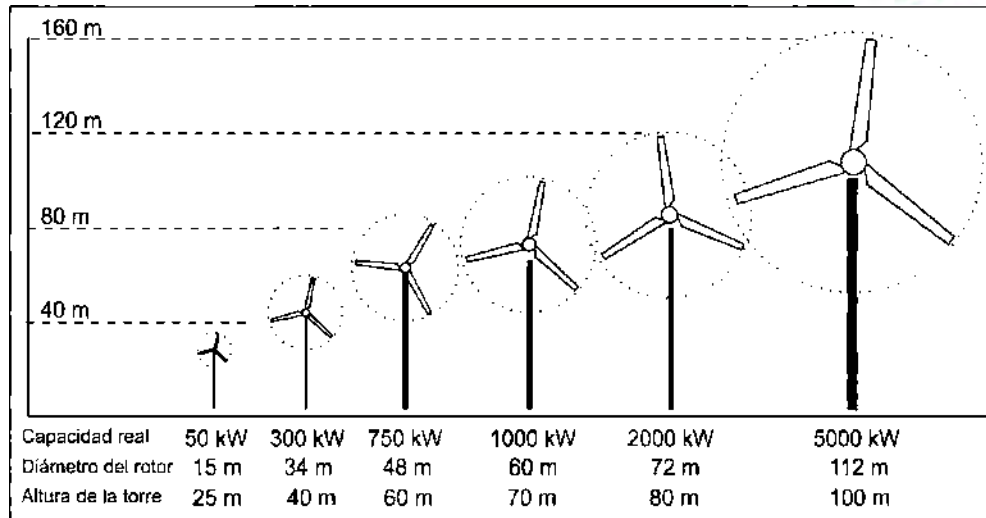


Figura- 3.9: Representación según el tamaño, altura y diámetro de una turbina eólica.[5]

3.6 Elección de la zona para una turbina eólica

El parámetro más significativo en la elección de una zona para instalar una máquina eólica, es la velocidad del viento. Una buena turbina eólica comienza a funcionar con una velocidad de viento de 2 a 2.5 m/s, para accionar bombas o elevadores de agua, y a partir de 3 a 4 m/s si se trata de aerogeneradores. Con dispositivos especiales, se mantiene constante la potencia para velocidades comprendidas dentro de un amplio intervalo y se interrumpe su funcionamiento para velocidades del viento superiores a los 18 a 20 m/s.

En el caso de aerogeneradores de gran potencia, la velocidad necesaria para que inicie la producción eléctrica se sitúa en el umbral de 3.5 a 4.5 m/s y alcanza su potencia nominal entre los 12 y los 15 m/s con una velocidad de corte entre los 20 y 25 m/s.

Debido a que la energía que se puede captar del viento es proporcional al cubo de su velocidad, nos interesa instalar el aerogenerador en un lugar donde el viento sople con la mayor velocidad y constancia posible.

La velocidad del viento depende en gran parte (como se mencionó en el capítulo anterior), de las condiciones del terreno sobre el que se mueve; por lo tanto de la vegetación, las construcciones cercanas, el tipo de terreno, etc. Ya que estas frenan el paso del viento y producen turbulencias. Siendo así el lugar más idóneo para un aerogenerador una zona libre de obstáculos y lo más alto posible respecto a los obstáculos.

Otro factor a considerar, es el ruido producido por el aerogenerador, las vibraciones, el impacto visual y la distancia al lugar de almacenamiento y consumo de la electricidad.

En la Tabla 3.1, se enlistan las principales ventajas y desventajas de los aerogeneradores de eje vertical y eje horizontal.



Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de los aerogeneradores de eje vertical y horizontal.[6]

Tipo de eje de trabajo de la turbina	Ventajas	Desventajas
De eje vertical	<ul style="list-style-type: none"> -Máximo rendimiento alcanzable a bajas velocidades de viento. -Ausencia de orientación. -Posibilidad de ser instalados en el suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> -No pueden girar a altas velocidades. -Rendimiento bajo para la generación de electricidad. -Necesidad de un multiplicador para la producción de energía eléctrica. -Sufre descompensación de los esfuerzos provocada por el viento
De eje horizontal	<ul style="list-style-type: none"> -Mayor rendimiento de captación energética del viento. -Mejor distribución de los esfuerzos provocados por el viento. -Orientación automática en la configuración de sotavento 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesidad de instalarse una altura elevada por encima de los obstáculos. -Influenciado fácilmente por turbulencias.

3.7 Situación de la energía eólica en el mundo

Los principales países con producción de energía eólica (año 2013), se enlistan en la Tabla 3.2

Tabla 3.2: Principales países con producción de energía eólica.[7]

Alemania	Estados unidos	España	India	China
28 GW	43 GW	21 GW	14 GW	45 GW
Dinamarca	Italia	Francia	Reino Unido	Portugal
3384 MW	4547 MW	4655 MW	4015 MW	3374 MW

3.8 Situación de la energía eólica en México

Debido a la gran extensión del territorio del país, México cuenta con un gran potencial de generación de energía eólica a nivel mundial. La región donde presenta la mejor zona para instalación de parques eólicos está comprendida en los estados de Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz.

Los proyectos instalados hasta el 2012 son los mostrados en la Tabla 3.3



Tabla 3.3: Proyectos de parques eólicos en México.[26]

proyecto	La Venta I	La Venta II	La Venta III	Oaxaca I	Oaxaca II,III y IV	Piedra Larga	La Providencia
Capacidad	1.575 MW	83.3 MW	103 MW	102 MW	304 MW	90 MW	28.8 MW
Turbinas	7	100	120	51	303	45	18
Ubicación	Oaxaca	Oaxaca	Oaxaca	Oaxaca	Oaxaca	Oaxaca	Chiapas
Situación	Operación comercial	Operación comercial	Etapa de pruebas	Etapa de pruebas	Operación comercial		



Capítulo 4

Aerodinámica de turbinas de vientos de eje horizontal

4.1 Introducción

Para estudiar la aerodinámica de las turbinas de viento, se requiere un poco de conocimiento de dinámica de fluidos en general y en particular. Conocimiento de aerodinámica de aeronaves. Conocimiento sobre el teorema de Bernoulli para flujo estable e incompresible junto con el concepto de continuidad.

Como se mencionó en capítulos anteriores, una turbina de viento es un dispositivo que extrae energía cinética del viento. Al remover una parte de su energía cinética el viento debe detenerse, pero sólo la parte de aire que pasa a través del disco rotor es afectado. Asumiendo que la masa de aire afectada permanece separada del aire que no pasa a través del disco rotor y que no se disminuye su velocidad, se puede dibujar una superficie de frontera que contiene la masa de aire afectado, esta frontera se puede extender aguas arriba al igual que aguas abajo, formando un tubo circular de corriente de sección circular transversal [Figura 4.1].

Como el aire dentro del tubo de corriente disminuye su velocidad, pero no se hace compresible, la sección transversal del área del tubo de corriente se debe expandir para acomodar el aire que se mueve a una menor velocidad.

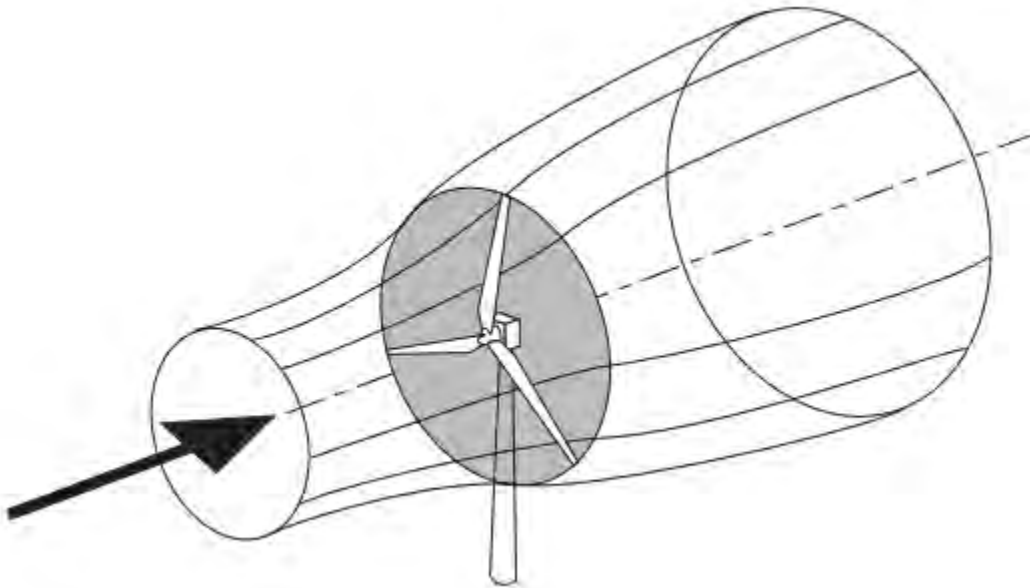


Figura- 4.1: Extracción de energía del tubo de corriente de una turbina de viento.[10]

La presencia de la turbina, causa que el aire aproximándose aguas arriba, gradualmente disminuya su velocidad, de tal forma que el aire al llegar al disco rotor tiene una velocidad menor que el aire que fluye libremente. El tubo de corriente se expande como resultado de la disminución de velocidad y, debido a

que no se ha producido hasta ahora trabajo por éste, la presión estática del aire aumenta para absorber el decremento en su energía cinética. Eventualmente, aguas abajo la presión del aire regresa a los niveles atmosféricos para alcanzar el equilibrio.

4.2 El concepto del disco actuador

Lo descrito anteriormente describe la extracción de energía cinética, pero de ninguna forma explica que pasa con esa energía, la cual pudo haber sido utilizada para producir trabajo y una parte pudo haber regresado al viento como turbulencia y eventualmente disiparse como calor. Sin embargo, se puede realizar un análisis del comportamiento aerodinámico de la turbina de viento sin ningún diseño específico, sólo considerando el proceso de extracción de energía. El dispositivo general que realiza esta tarea es llamado “disco actuador” [Figura 4.2].

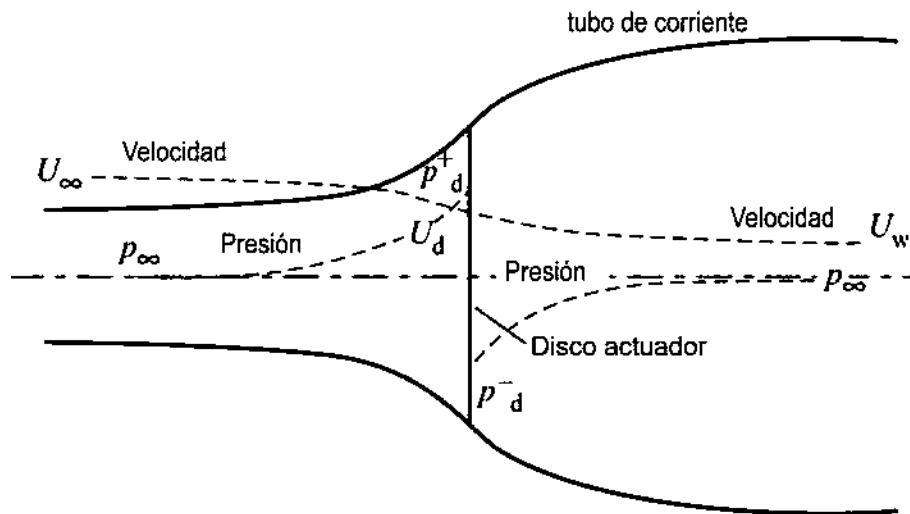


Figura- 4.2: Extracción de energía del disco actuador y el tubo de corriente.[10]

Aguas arriba del disco, el tubo de corriente tiene un área transversal menor que la del disco y un área mayor aguas abajo a la del disco. La expansión del tubo de corriente es debida a que el flujo de masa debe ser el mismo en todas partes. La masa de aire que pasa a través del área transversal de una sección del tubo de corriente por unidad de tiempo es ρAU , donde ρ es la densidad del aire, A es el área de sección transversal y U es la velocidad del flujo. El flujo másico debe ser el mismo en todo el tubo de corriente, por lo tanto:

$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (4.1)$$

El símbolo ∞ se refiere a las condiciones muy aguas arriba, d se refiere a las condiciones en el disco y w a las condiciones muy aguas abajo.

Es usual considerar, que el disco actuador induce una variación de velocidad que debe ser superpuesta a la velocidad de corriente libre. El componente de la corriente racional de este flujo inducido viene dado por $-aU_{\infty}$, donde a es llamado el factor de inducción axial del flujo. En el disco, por lo tanto, la velocidad de la corriente neta es

$$U_d = U_{\infty}(1 - a) \quad (4.2)$$

4.3 Teoría de la cantidad de movimiento

El aire que pasa a través del disco sufre un cambio de velocidad $U_{\infty} - U_w$ y un cambio de cantidad de movimiento igual al cambio total de la velocidad multiplicada por el flujo másico, por lo tanto

$$\text{cambio de cantidad de movimiento} = (U_{\infty} - U_w)\rho A_d U_d \quad (4.3)$$

La fuerza que causa este cambio de cantidad de movimiento proviene totalmente de la diferencia de presión a través del disco actuador, porque la corriente del tubo es de otra manera completamente rodeada por el aire a la presión atmosférica, lo que da fuerza neta cero. Por lo tanto:

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_{\infty} - U_w)\rho A_d U_{\infty}(1 - a) \quad (4.4)$$

Para obtener la diferencia de presiones $(p_d^+ - p_d^-)$, la ecuación de Bernoulli se aplica de forma separada a las secciones aguas arriba y aguas abajo del tubo de corriente, se requieren ecuaciones separadas, porque la cantidad de energía aguas arriba y aguas abajo es diferente. La ecuación de Bernoulli indica que, en

condiciones estables, la energía total en el flujo, comprendida por la energía cinética, la energía de presión estática y la energía potencial gravitatoria, permanece constante siempre que no se realiza trabajo sobre o por el fluido. Por lo tanto, para una unidad de volumen de aire

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = \text{constante} \quad (4.5)$$

Aguas arriba, por lo tanto, se tiene

$$\rho_{\infty} + \frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 + \rho_{\infty}gh_{\infty} = \frac{1}{2}\rho_d U_d^2 + p_d^+ + \rho_d gh_d \quad (4.6)$$

Asumiendo flujo incompresible ($\rho_{\infty} = \rho_d$) y horizontal ($h_{\infty} = h_d$) tenemos

$$\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^+ \quad (4.7)$$

De igual forma para el flujo aguas abajo

$$\frac{1}{2}\rho U_w^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^- \quad (4.8)$$

Restando ambas ecuaciones, obtenemos

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (4.9)$$

La ecuación (4.4) nos da

$$\frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_w^2)A_d = (U_{\infty} - U_w)\rho A_d U_{\infty}(1 - a) \quad (4.10)$$

Entonces

$$U_w = (1 - 2a)U_{\infty} \quad (4.11)$$

Lo que significa que la mitad de la pérdida de la velocidad axial en el tubo de corriente tiene lugar aguas arriba del disco actuador y la mitad aguas abajo.

4.4 Coeficiente de potencia

A partir de la Ecuación (4.4) obtenemos la fuerza del aire como

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a) \quad (4.12)$$

Al ser una fuerza concentrada en el disco actuador la tasa de trabajo hecha por éste es FU_d y por lo tanto la extracción de potencia del aire está dada por

$$potencia = FU_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (4.13)$$

Y el coeficiente de potencia se define como

$$Cp = \frac{potencia}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} \quad (4.14)$$

Donde el denominador representa la potencia disponible en el aire, en ausencia del disco actuador, por lo tanto

$$Cp = 4a(1 - a)^2 \quad (4.15)$$

4.5 El límite de Betz

El valor máximo del coeficiente de potencia ocurre cuando

$$\frac{dCp}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (4.16)$$

Lo que da como resultado $a = 1/3$, al evaluar Cp para este valor de a obtenemos que

$$Cp_{max} = \frac{16}{27} = 0.596 \quad (4.17)$$

Éste es el máximo valor posible del coeficiente de potencia, conocido como el límite de Betz, nombrado así por Albert Betz, que estudió la aerodinámica, hasta

la fecha, no se ha podido desarrollar ninguna turbina de viento que sea capaz de exceder tal límite. Como el análisis no parte de ningún diseño en particular, éste límite no se debe a deficiencias del diseño, debe ser entendido de la siguiente manera; la única forma de extraer la potencia máxima del viento es frenándolo por completo para convertir toda su energía cinética en trabajo, pero esto involucraría frenar una masa de aire por completo, lo cual a su vez no permitiría el paso de más aire a través del disco actuador, por lo tanto, ya no se podría obtener más energía. [10]

Lo que indica, que si una turbina de viento estuviera operando a $2/3$ de la velocidad del flujo de aire libre, entonces estaría operando en el punto de máxima producción de potencia.

De igual forma para el coeficiente de empuje C_T tenemos

$$C_T = \frac{\text{potencia}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_d} \quad (4.18)$$

ó

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (4.19)$$

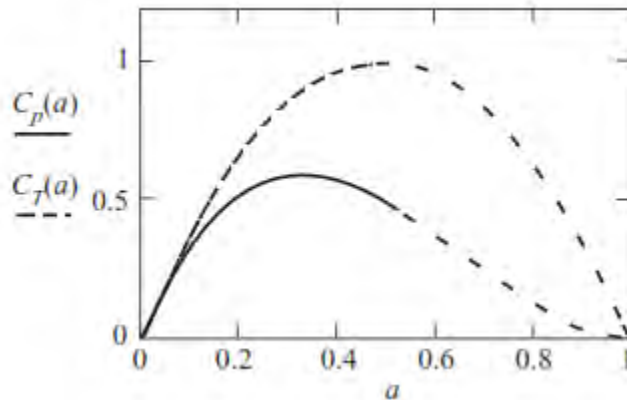


Figura- 4.3: Variación del C_p y C_T respecto al factor de inducción axial.[10]

4.6 Teoría del elemento pala

Primero debemos definir el cambio en la velocidad tangencial en términos del factor de inducción tangencial a' . Aguas arriba del disco la velocidad tangencial es cero. Inmediatamente aguas abajo del disco la velocidad tangencial es $2\Omega r a'$. En el medio del espesor del disco, a una distancia radial r desde el eje de rotación, la velocidad tangencial inducida es $\Omega r a'$. Debido a que se produce en reacción al par que la velocidad tangencial ejerce opuesta al movimiento del rotor.

Se asume que las fuerzas en el elemento pala pueden ser calculadas por promedio de características de perfiles aerodinámicos de dos dimensiones usando

el ángulo de ataque determinado a partir de la velocidad resultante incidente en el plano de la sección transversal del elemento, la componente de la velocidad en la dirección a lo largo de la envergadura es ignorada. También se ignoran los efectos tridimensionales.

Las componentes de la velocidad en una posición radial sobre la pala expresada en términos de la velocidad del viento, los factores de flujo y la velocidad de rotación del rotor determinarán el ángulo de ataque.

Considérese una turbina con N número de palas de radio a la punta R cada una, con cuerda c y un ángulo de inclinación dado β medido entre la línea de sustentación nula del perfil aerodinámico y el plano del disco. Tanto la longitud de la cuerda y el ángulo de inclinación puede variar a lo largo de la envergadura de la pala. Sea la velocidad de rotación de las palas una velocidad angular Ω y la velocidad del viento U_∞ . La velocidad tangencial Ωr del elemento pala mostrado en la Figura 4.4 combinada con la velocidad tangencial de la estela $\Omega r a'$ significa que la velocidad neta del flujo tangencial experimentada por el elemento pala es $(1 - a')\Omega r$. La Figura 4.5 muestra todas las velocidades y fuerzas relativas a la cuerda de la pala en el radio r . [10]

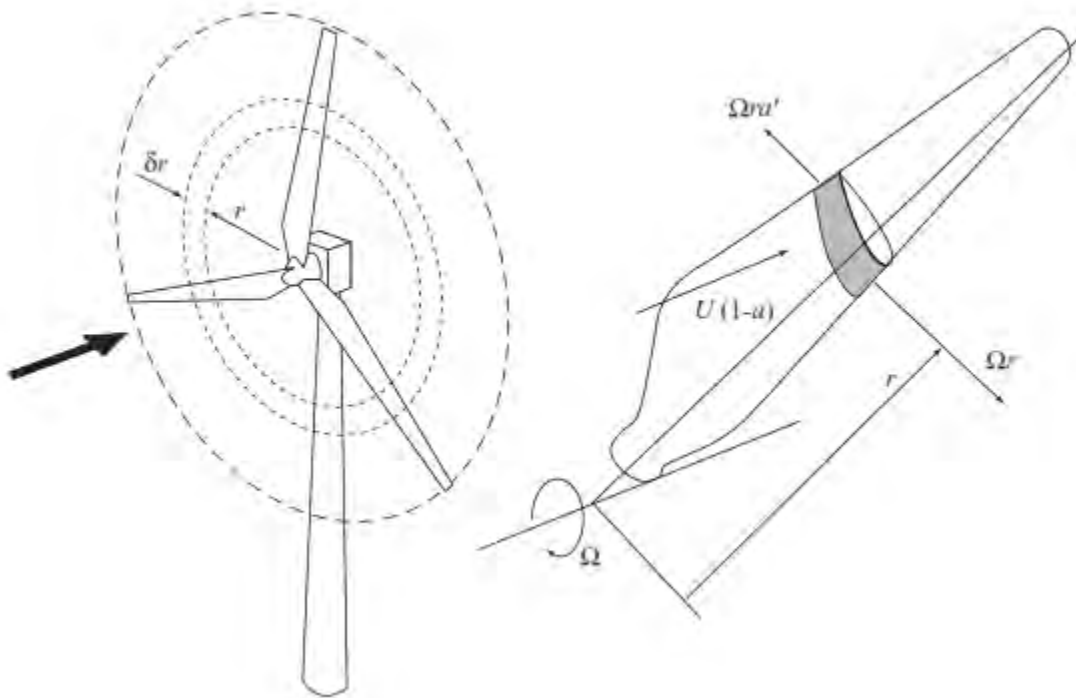


Figura- 4.4: Elemento pala haciendo un barrido de anillo anular.[10]

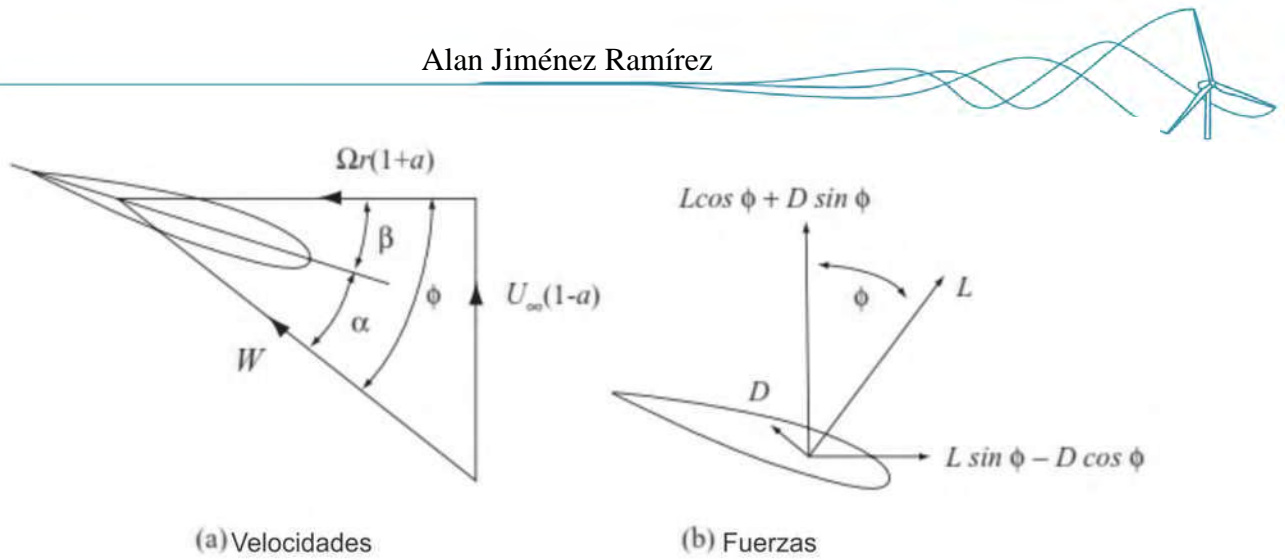


Figura- 4.5: Velocidades y Fuerzas del Elemento Pala.[10]

La velocidad resultante relativa en la pala se puede obtener de la Figura 4.5 como

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (4.20)$$

La cual actúa a un ángulo ϕ respecto al plano de rotación, tal que

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W} \quad (4.21a)$$

Y

$$\cos \phi = \frac{\Omega r(1-a')}{W} \quad (4.21b)$$

El ángulo de ataque α está dado por

$$\alpha = \phi - \beta \quad (4.22)$$

La fuerza de sustentación a lo largo de la envergadura δr de cada pala, normal a la dirección de W , es por lo tanto

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 c C \delta r \quad (4.23)$$

Y el coeficiente de arrastre paralelo a W es



$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_{d_r} \delta r \quad (4.24)$$

4.7 Teoría cantidad de movimiento en el elemento pala (BEM)

El supuesto básico de la teoría BEM es que la fuerza de un elemento pala es la única responsable del cambio de cantidad de movimiento del aire que pasa a través de la anillo barrido por el elemento. Por lo tanto, es de suponer que no hay interacción radial entre los flujos a través de anillos contiguos; una condición que es cierta, estrictamente sólo si el factor de inducción de flujo axial no varía radialmente.

Los componentes de la fuerza aerodinámica en N elementos pala resuelto en la dirección axial es

$$\delta L \cos \phi + \delta D \sin \phi = \frac{1}{2} \rho W^2 N c (C_L \cos \phi + C_d \sin \phi) \delta r \quad (4.25)$$

La tasa de cambio de cantidad de momento axial del aire que pasa a través del anillo de barrido es

$$\rho U_\infty (1 - a) 2\pi r \delta r 2a U_\infty = 4\pi \rho U_\infty^2 a (1 - a) r \delta r \quad (4.26)$$

La caída de presión en la estela aguas abajo es

$$\frac{1}{2} \rho (2a' \Omega r)^2 \quad (4.27)$$

Por lo tanto la fuerza axial adicional en el anillo barrido es

$$\frac{1}{2} \rho (2a' \Omega r)^2 2\pi r \delta r \quad (4.28)$$

Así

$$\frac{1}{2} \rho W^2 N c (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) = 4\pi (U_\infty^2 a (1 - a) + (a' \Omega r)^2) r \delta r \quad (4.29)$$

Simplificando

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) = 8\pi(a(1-a) + (a'\Omega r)^2)\mu \quad (4.30)$$

El elemento del par de rotor axial causado por las fuerzas aerodinámicas del elemento pala es

$$(\delta L \sin \phi + \delta D \cos \phi)r = \frac{1}{2}\rho W^2 N c (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)r \delta r$$

La tasa de cambio de cantidad de movimiento angular del aire que pasa a través del anillo barrido es

$$\rho U_\infty (1-a)\Omega r 2a' r 2\pi r \delta r = 4\pi \rho U_\infty (\Omega r) a' (1-a)r^2 \delta r \quad (4.31)$$

Igualando las dos ecuaciones de cantidad de movimiento, tenemos

$$\frac{1}{2}\rho W^2 N c (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)r \delta r = 4\pi \rho U_\infty (\Omega r) a' (1-a)r^2 \delta r \quad (4.32)$$

Simplificando

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) = 8\pi \lambda \mu^2 a' (1-a) \quad (4.33)$$

Donde $\mu=r/R$

Resolviendo la ecuación 4.30 y 4.33 para obtener los valores del flujo de inducción a y a' usando características de perfiles aerodinámicos de dos dimensiones requiere de un proceso iterativo.[10]

Capítulo 5

Marco Teórico

5.1 Diseño de perfiles

Cada perfil tiene diferentes propiedades, total mente distinta a otros perfiles, lo cual hace que la aerodinámica se centre en detectar y definir los factores que contribuyen a perfeccionar estos perfiles de manera más precisa.

Los métodos de diseño de perfiles se pueden clasificar en dos tipos: Diseño directo y diseño mediante ingeniería inversa.

Diseño directo: el diseño directo parte de tener las especificaciones de la geometría, el cálculo de presiones y rendimiento. Se evalúa la geometría y se modifica de tal forma que se pueda mejorar el rendimiento mediante procesos de optimización. Esta optimización se realiza teniendo como meta la minimización de alguna función objetivo que caracterice el rendimiento del perfil. Así el diseño directo parte de una geometría ya establecida y se debe calcular su distribución de presiones en la superficie de dicha geometría. Posteriormente se ajusta sucesivamente la forma hasta que se obtienen los resultados de rendimiento deseados [Figura 5.1][8].

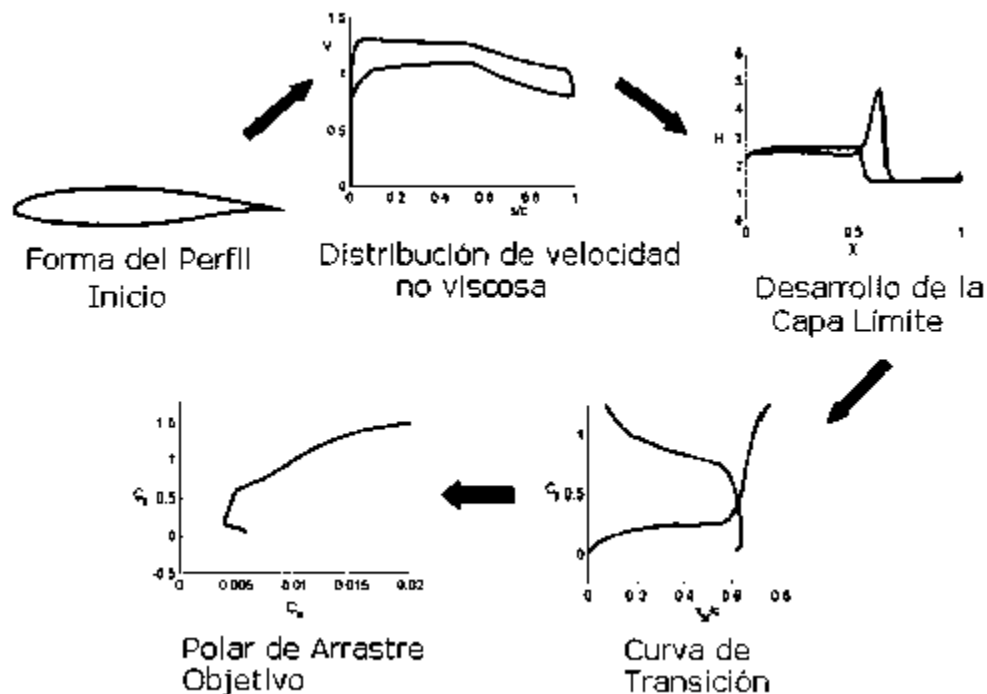


Figura- 5.1: Diagrama de diseño directo de perfiles aerodinámicos.[8]

Diseño inverso: El diseño inverso se realiza en sentido contrario al diseño directo, en este se debe llegar a determinar una geometría partiendo de las distribuciones de presión de superficie, dicha presión integra el rendimiento el

perfil que se desea ya con sus características mejoradas. Estas condiciones ya están diseñadas de tal forma que por ejemplo se evite cavitaciones, velocidades no deseadas, desprendimiento de la capa límite, incluso que dicho perfil satisfaga especificaciones de carácter aerodinámico y geométrico, como tamaños y espesores de materiales. Así el rendimiento final de los perfiles diseñados con ingeniería inversa puede ser controlado de manera indirecta mediante el control directo en las distribuciones de velocidad y especificaciones en el desarrollo de capa límite [Figura 5.2][8].

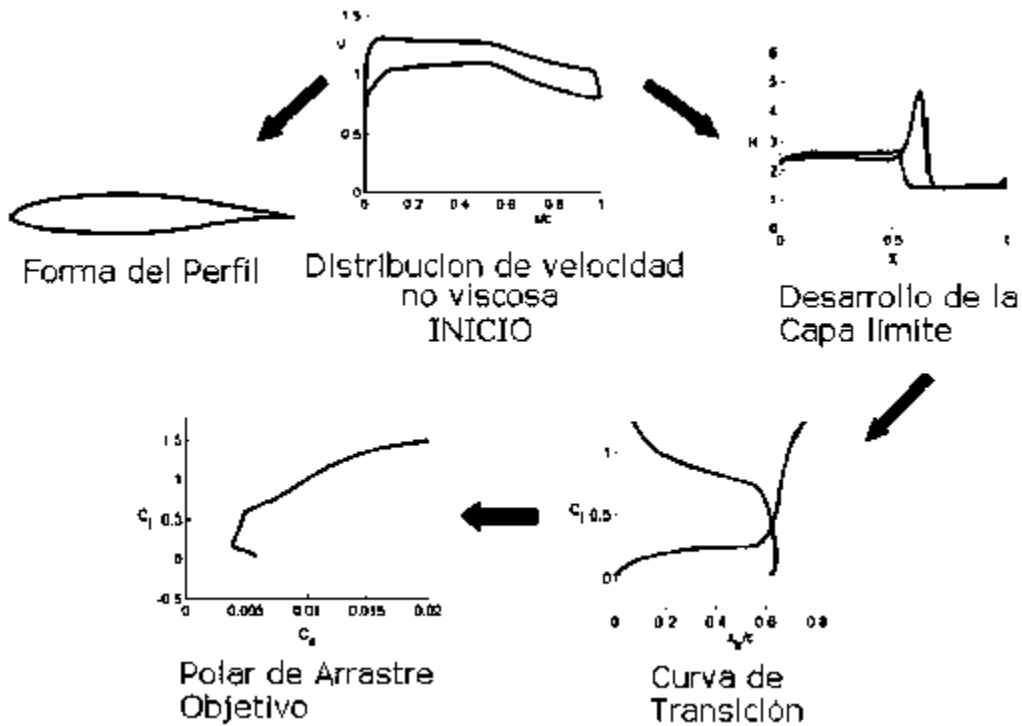


Figura- 5.2: Diagrama de diseño inverso de perfiles aerodinámicos.[8]

La siguiente etapa del diseño consiste en cambiar la forma del perfil para mejorar aún más el rendimiento ya sea usando conocimientos de los efectos de los cambios de geometría sobre la distribución de presiones, y a su vez los cambios en la distribución de presión sobre el rendimiento o por medio de la optimización numérica, haciendo que la computadora realice los procesos de modificación necesarios para mejorar el diseño a partir de algoritmos previamente establecidos.

5.2 Ecuaciones Necesarias

Las ecuaciones de Navier-Stokes modelan con gran precisión el flujo de gases en las condiciones de interés para la Aerodinámica. Donde el objetivo es darles solución para la superficie del perfil, Σ_s , a las fuerzas, F_{fs} , y a los

momentos, M_{fs} que ejerce el fluido en movimiento con respecto al sólido.[Figura 5.3]

$$F_{fs} = \int_{\Sigma_s} (p - p_{\infty})(-\mathbf{n}_s) + \int_{\Sigma_s} \mathbf{n}_s \cdot \boldsymbol{\tau}' d\sigma \quad (5.1)$$

$$M_{fs} = \int_{\Sigma_s} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \times (-\mathbf{n}_s \cdot \boldsymbol{\tau}') d\sigma + \int_{\Sigma_s} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \times (-\mathbf{n}_s)(p - p_{\infty}) d\sigma \quad (5.2)$$

donde p es la presión, p_{∞} es la presión de referencia (muy aguas arriba), \mathbf{n}_s es la normal exterior al sólido, $\boldsymbol{\tau}' = 2\mu\boldsymbol{\gamma} + \mathbf{I}(\mu_v - \frac{2}{3}\mu)\nabla \cdot \mathbf{v}$ es el tensor de esfuerzos, dado por la ley de Navier-Poisson para fluidos Newtonianos, \mathbf{x}_0 es el vector posición del punto respecto al que se toman los momentos, μ y μ_v son los coeficientes de viscosidad y viscosidad volumétrica respectivamente, \mathbf{v} es el vector que denota el campo de velocidades, \mathbf{I} es la matriz identidad, $\boldsymbol{\gamma} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{v} + (\nabla\mathbf{v})^T)$ es el tensor de velocidad de deformación.[9]

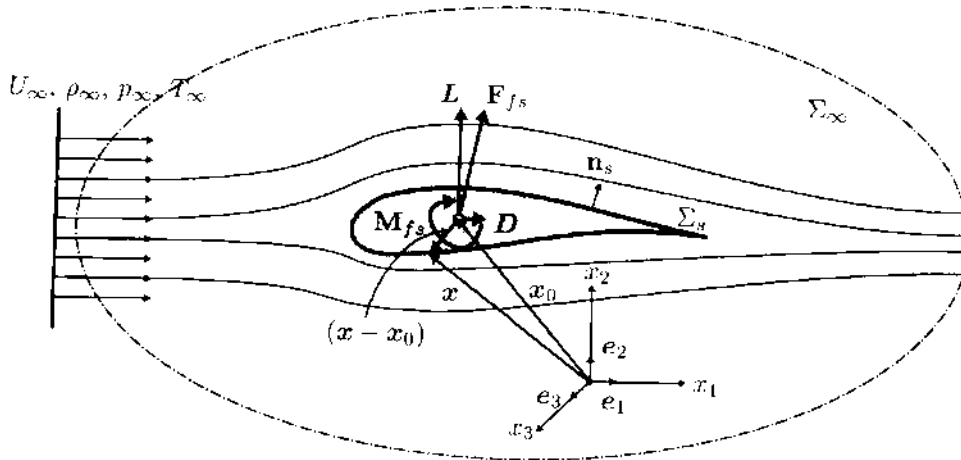


Figura- 5.3: Perfil aerodinámico y su flujo relativo.[9]

Los valores de presión y del tensor de esfuerzos sobre la superficie necesarios para calcular la ecuación 4.1 y necesarios para calcular los coeficientes C_d y C_l pueden encontrarse de forma experimental o bien dando solución a las ecuaciones de Navier-Stokes sujetas a las condiciones iniciales y de contorno adecuadas. Si no se quiere recurrir a la experimentación para solucionar la ecuación 4.1, se debe resolver el sistema de ecuaciones no lineal en derivadas parciales de Navier-Stokes, integrado por:

La ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (5.3)$$



La ecuación de cantidad de movimiento

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' + \rho \mathbf{f}_m \quad (5.4)$$

La ecuación de la energía

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v \mathbf{v} \cdot \nabla T = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \boldsymbol{\tau}' : \nabla \mathbf{v} + Q_r + Q_q + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5.5)$$

Donde t denota el tiempo, \mathbf{f}_m es el vector de fuerzas másicas, c_v es la capacidad calorífica del gas a volumen constante, k es su conductividad térmica, $\boldsymbol{\tau}' : \nabla \mathbf{v} > 0$ es el término de disipación de energía cinética e interna y Q_r y Q_q son las potencias caloríficas. Todo esto considerando el gas como perfecto. Por lo que este sistema de ecuaciones debe ser completado con la ecuación de estado de los gases perfectos.

$$\frac{p}{\rho} = R_g T \quad (5.6)$$

Cuando el número de Reynolds es lo suficiente elevado, existen dos regiones bien diferenciadas dentro del dominio fluido; una región en la que el efecto viscoso y de conducción de calor puede ser despreciado, que se encuentra a distancias de la pared del solido tales que $y \gg \delta$, $\delta \ll c_0$, donde c_0 es una longitud característica, y siendo y la coordenada que mide la distancia normal a la pared y una segunda región situada a una distancia de la pared $y \sim \delta$ en la que tanto los términos de convección de cantidad de movimiento y de convección de la energía interna son comparables a los viscosos y a los de conducción de calor en sus ecuaciones respectivamente. Esta última región que tiene un espesor característico δ de tamaño mucho menor que la longitud del objeto es llamada capa límite.[Figura 5.4]

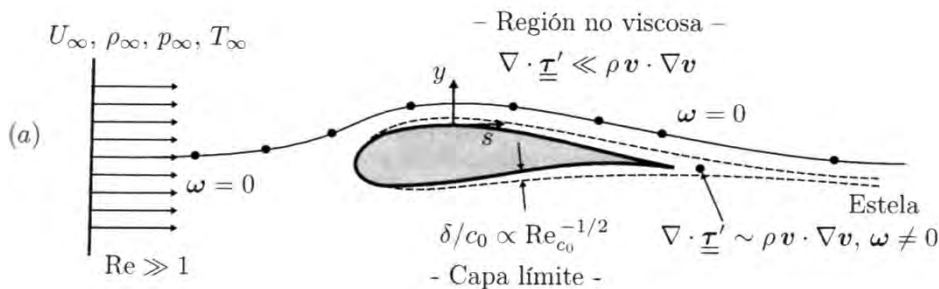


Figura- 5.4: Esquema de la capa límite y la estela alrededor de un perfil aerodinámico.[9]

Como $\delta/c_0 \ll 1$ las ecuaciones 5.3-5.5 se pueden simplificar de tal manera que permiten describir el flujo en la región de capa límite de manera más fácilmente abordable. De esta forma la ecuación de cantidad de movimiento proyectada en dirección transversal de y y longitudinal de s al objeto indican que sus gradientes respectivos, ∇T y ∇c_0 de presión han de ser, respectivamente

$$\Delta_T p \sim \rho(\Delta V)^2, \Delta_{c_0} p \sim \rho U_\infty \Delta(U_\infty) \quad (5.7)$$

Donde ΔV es la velocidad transversal del fluido a distancias del orden δ del objeto y ΔU_∞ es el incremento de velocidad longitudinal que experimenta el flujo en la región no viscosa.

Como la aproximación a fluido incompresible para números de mach menores a 0.3 la ecuación de continuidad se reduce al caso incompresible a

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5.8)$$

Y como $\mathbf{v} = \nabla \phi$, donde ϕ es una función escalar denominada potencial de velocidades, la ecuación para ϕ para una densidad constante es la de Laplace, $\nabla^2 \phi = 0$. Se procederá a resolver las ecuaciones de Laplace para las condiciones de contorno

$$x \rightarrow \infty, \nabla \phi \rightarrow U_\infty, a^2 \rightarrow a_\infty^2 = \frac{\gamma p_\infty}{\rho_\infty} \quad (5.9)$$

$$x \in \Sigma_s, n_s \cdot \nabla \phi = 0 \quad (5.10)$$

Donde $a^2 = \frac{\gamma p}{\rho}$ es el cuadrado de la velocidad del sonido. El resolver la ecuación de Laplace facilita los cálculos de la región exterior a la capa límite, porque es una ecuación lineal.[9]

5.2.1 Resolución de la ecuación de Laplace mediante la superposición de soluciones elementales

Se analiza el flujo bidimensional de fluidos a bajos números de Mach ($M_\infty^2 = U_\infty^2 / (\gamma R_g T_\infty) \ll 1$) en las regiones exteriores a la capa límite. Este fenómeno esta gobernado por la ecuación de Laplace $\nabla^2 \phi = 0$, que se debe resolver con las condiciones de contorno adecuadas. Asi la función potencial se expresará como

$$\phi = \sum_{i=1}^{i=N} \phi_i \quad (5.11)$$

Donde las funciones ϕ_i satisfacen la ecuación de Laplace, $\nabla^2 \phi_i = 0$. Así se puede escribir un sistema de la siguiente forma

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad (5.12a)$$

$$|x| \rightarrow \infty, \nabla(\sum \phi_i) = \sum(\nabla \phi_i) \rightarrow U_\infty \quad (5.12b)$$

$$x \in \Sigma_s, n \cdot \nabla(\sum \phi_i) = n \cdot (\sum \nabla \phi_i) = 0 \quad (5.12c)$$

+Condición de Kutta – Joukowski

5.2.2 Función potencial correspondiente a un torbellino

La solución elemental de la ecuación de Laplace en dos dimensiones que se busca es una que no dependa de la distancia al origen [Figura 5.5], dicha solución debe satisfacer la ecuación

$$\nabla^2 \phi_3 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi_3}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_3}{\partial \theta^2} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_3}{\partial \theta^2} = 0 \quad (5.13)$$

En otras palabras

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial \theta} = C \Leftrightarrow \phi_3 = C\theta \quad (5.14)$$

Así el campo de velocidades creado por dicha solución es

$$v_3 = \nabla \phi_3 = \nabla(C\theta) = e_r \frac{\partial \phi_3}{\partial r} + \frac{e_\theta}{r} \frac{\partial \phi_3}{\partial \theta} = e_\theta \frac{C}{r} = C \frac{-x_2 e_1 + x_1 e_2}{x_1^2 + x_2^2} \quad (5.15)$$

Donde

$$e_\theta = \frac{-x_2 e_1 + x_1 e_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \quad (5.16)$$

La cual es la solución con nombre de “torbellino” o torbellino puntual, ya que los puntos materiales giran en torno del origen de coordenadas, que es donde se encuentra el torbellino

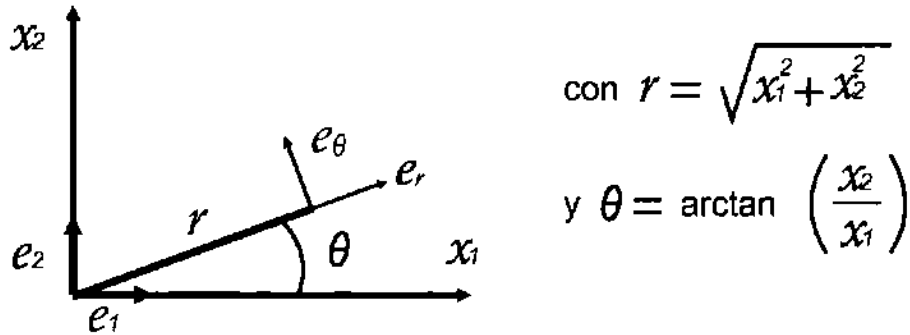


Figura- 5.5: Definición de las coordenadas (r,θ) y de los vectores unitarios e_r, e_θ de un sistema polar.[9]

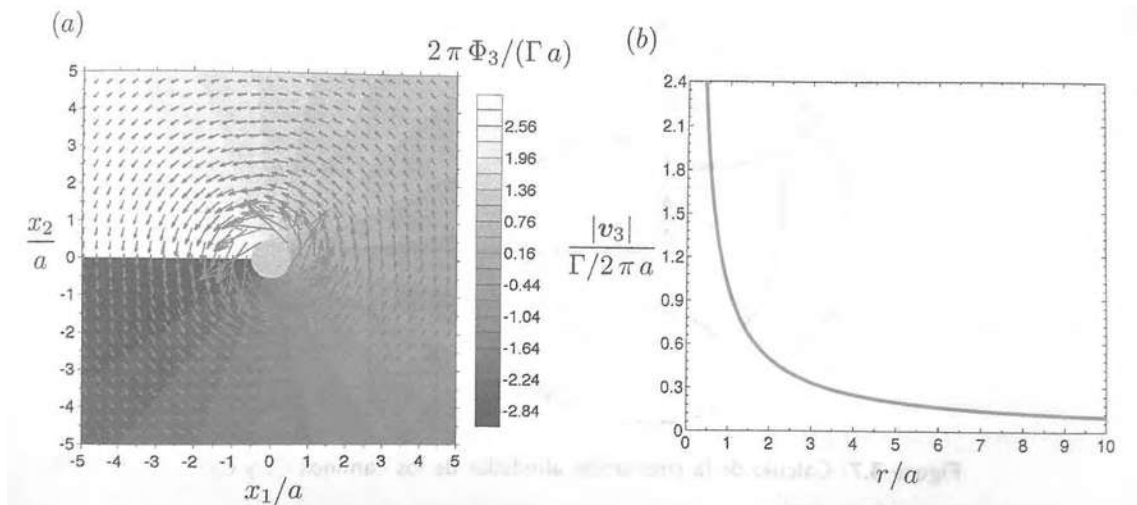


Figura- 5.6: a) Campo de velocidades y valores de la función potencial adimensional b) Representación del módulo del vector velocidad en función de la distancia adimensional al origen de coordenadas r/a .[9]

5.3 Patrón de flujo de viento

Ya que es necesario validar las simulaciones para asegurar que se está obteniendo una solución correcta, se debe tener una idea de que es lo que se espera obtener en los resultados que se obtienen mediante CFD.

Partiendo de la teoría de flujo de aire en cuerpos romos; Figura 5.7 (Bert Blocken, 2014), se puede determinar qué tipo de comportamiento se espera sobre nuestros perfiles a ser analizados.[11][5]

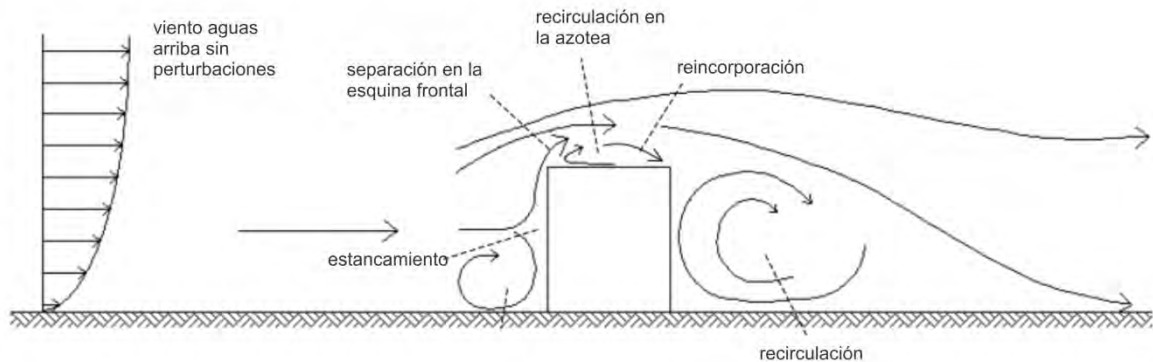


Figura- 5.7: Patrón de flujo del viento alrededor de un edificio aislado.[11]

En la Figura 5.8 se presenta el patrón de flujo que se espera ver en la experimentación y simulaciones con un perfil de HUB semicircular. Siendo los patrones más representativos: el flujo por sobre el perfil, los puntos de estancamiento y los vórtices en la parte trasera.

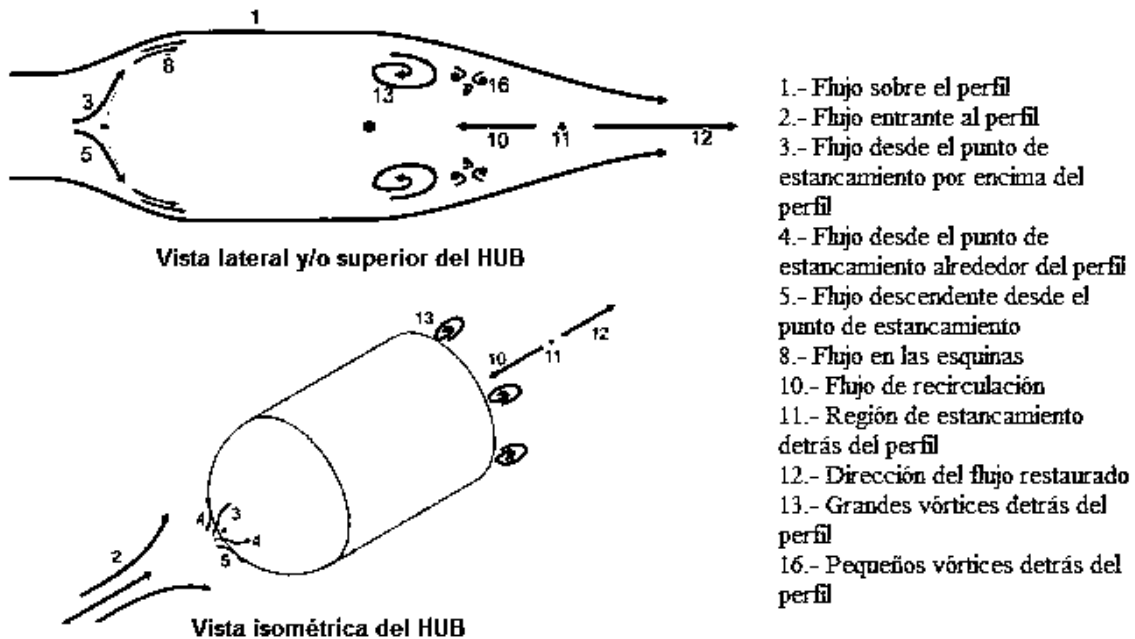


Figura- 5.8 Patrón de Flujo en un HUB de geometría semicircular

5.4 Perfiles De Prueba Iniciales

Como se debe determinar una geometría para el HUB, es necesario conocer primeramente cómo se comporta el viento y las distribuciones de presión

con diferentes geometrías más sencillas, con el fin de tener un punto de partida para determinar la geometría de un perfil deseado.

Los perfiles seleccionados son de semicírculo, elíptico, parábola, ojiva secante y una variación, ojiva tangente, cono y HUB plano.

5.4.1 Creación de los perfiles

Los perfiles probados, se crearon utilizando el software de dibujo incluido en ANSYS, partiendo de un tamaño de góndola en forma de cilindro de 10cm de radio y 25cm de largo, mediante un sólido de revolución. Siendo estas las medidas del generador eléctrico de una turbina de 600w (baja capacidad) comercial, la que fue seleccionada para en un futuro realizar pruebas de generación eléctrica [Figura 5.9] (Wang et al. 2006) [13].

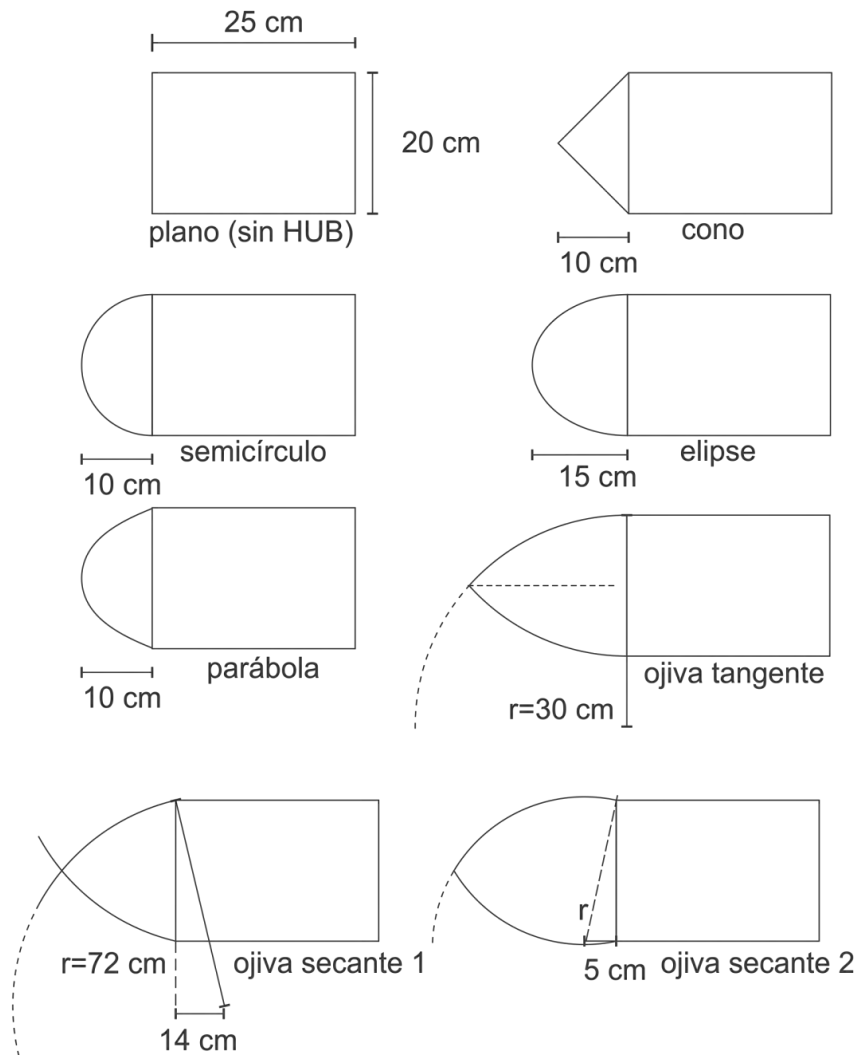


Figura- 5.9: Medidas de las geometrías de perfiles simulados



Capítulo 6 Simulación, Experimentación y Diseño

6.1 Parámetros de las simulaciones

Las simulaciones se realizaron tomando en cuenta el área de barrido de una turbina de 1.6 metros de diámetro, de aquí, tomando en cuenta que la experimentación se realizó en un túnel de viento físico de medidas de 60cm*60cm*90cm, se diseñó un túnel de viento virtual para contrastar las simulaciones con pruebas físicas y poder validar resultados.

Así se tienen las condiciones de viento importantes para una turbina eólica real; como son, velocidad de arranque, velocidad nominal y velocidad de paro, siendo aproximadamente 3 m/s, 12 m/s y 24 m/s respectivamente.

Para realizar una correcta experimentación y asegurar que se encuentra en el mismo régimen (turbulento) que existe bajo condiciones reales, se tomó el número de Reynolds para la sección transversal de la turbina eólica y se utilizó para recalcular las velocidades de viento del túnel de viento real, las cuales se muestran en la Tabla 6.1.

Donde μ es la viscosidad dinámica, D es el diámetro del área barrida por los álabes de la turbina y para recalcular la velocidad en el túnel de viento se utiliza el diámetro hidráulico de la sección transversal del túnel.

Las condiciones de frontera son, una velocidad de entrada, presión de salida, y paredes alrededor del túnel, así como en el HUB. En las simulaciones que incluyen los álabes, el modelo de la turbina es una pared giratoria (opción que integra ANSYS) a las rpm de la Tabla 6.1., en todas las demás simulaciones el modelo es estático.

Tabla 6.1: Cálculo del número de Reynolds y velocidades de viento

velocidad de viento (m/s)	Reynolds	velocidad túnel (m/s)	rpm
0	0.00E+00	0	0
2.5	2.22E+05	6.666666667	716.1972439
3	2.67E+05	8	859.4366927
4	3.56E+05	10.666666667	1145.91559
5	4.45E+05	13.333333333	1432.394488
6	5.34E+05	16	1718.873385
7	6.23E+05	18.666666667	2005.352283
8	7.12E+05	21.333333333	2291.831181
9	8.01E+05	24	2578.310078
10	8.90E+05	26.666666667	2864.788976
11	9.79E+05	29.333333333	3151.267873

12	1.07E+06	32	3437.746771
14	1.25E+06	37.33333333	4010.704566
15	1.33E+06	40	4297.183463

Las demás condiciones para la simulación son: Densidad del aire de 1.0151 kg/m³, Temperatura 25°C, Viscosidad dinámica 1.83E-05, Viscosidad cinemática 1.57e-05, Modelo de turbulencia k-ε estándar. (Apartado A.7)

6.2 Comparación modelo con álabes completos y seccionados

Se simuló una turbina con los álabes completos para descartar que los contornos de presión, velocidad y energía cinética turbulenta cambien dependiendo del largo de los álabes sobre la raíz de estos; siendo ésta la sección encargada del arranque de las turbinas de viento.

De los resultados obtenidos se puede concluir que no es necesario simular todo el largo de los álabes, ya que prácticamente los contornos de presión son iguales. Las pequeñas diferencias que se observan son debidas a que el mallado de los elementos no es exactamente igual, al haber utilizado la herramienta de mallado automático del software ANSYS.

El no tener que simular la turbina eólica completa es favorable, porque los tiempos de simulación se incrementan a más del doble al tener un mayor número de elementos involucrados en la malla.

En las Figuras 6.1 y 6.2, se muestran los contornos de presiones en una vista frontal (todas las vistas frontales de las simulaciones están tomadas de un plano a 45 cm de la entrada del túnel de viento) y lateral para una turbina con los álabes enteros y con los álabes seccionados. Se observa que los contornos de presión tienen la misma distribución para ambos casos, lo cual es señal de que en nuestra región de interés, ubicada en el HUB y la raíz de los álabes, no se ve afectada por el largo de los mismos, permitiéndonos hacer simulaciones con un menor número de elementos en la malla (Anexo A.5). Reduciendo así los tiempos de simulación entre análisis aerodinámicos.

Tabla 6.2: Información de interés correspondiente a las Figuras 6.1 y 6.2

Velocidad de entrada del viento:	12 m/s	Características de la máquina utilizada	
Número de elementos:	6460038	Procesador:	AMD Phenom II X6 3.20 GHZ
Número de nodos:	1280950	Memoria RAM:	16 Gb
Tipo de elemento:	tetraedros	Tarjeta de video:	AMD Radeon HD 6900 Series 2Gb GDDR5
Tiempo de simulación aproximado:	120 min (álabes completos); Procesamiento en paralelo con 4 núcleos		

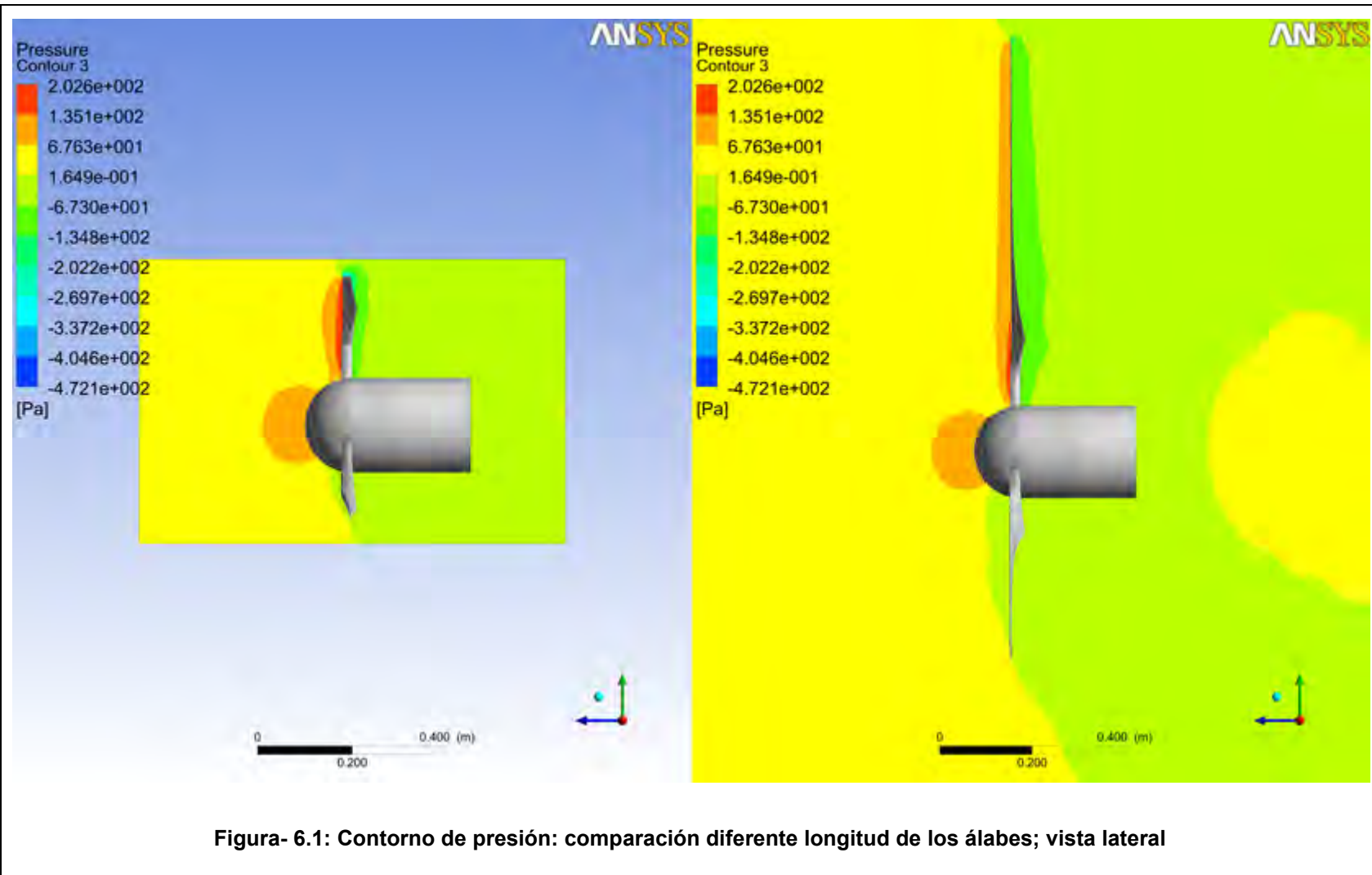
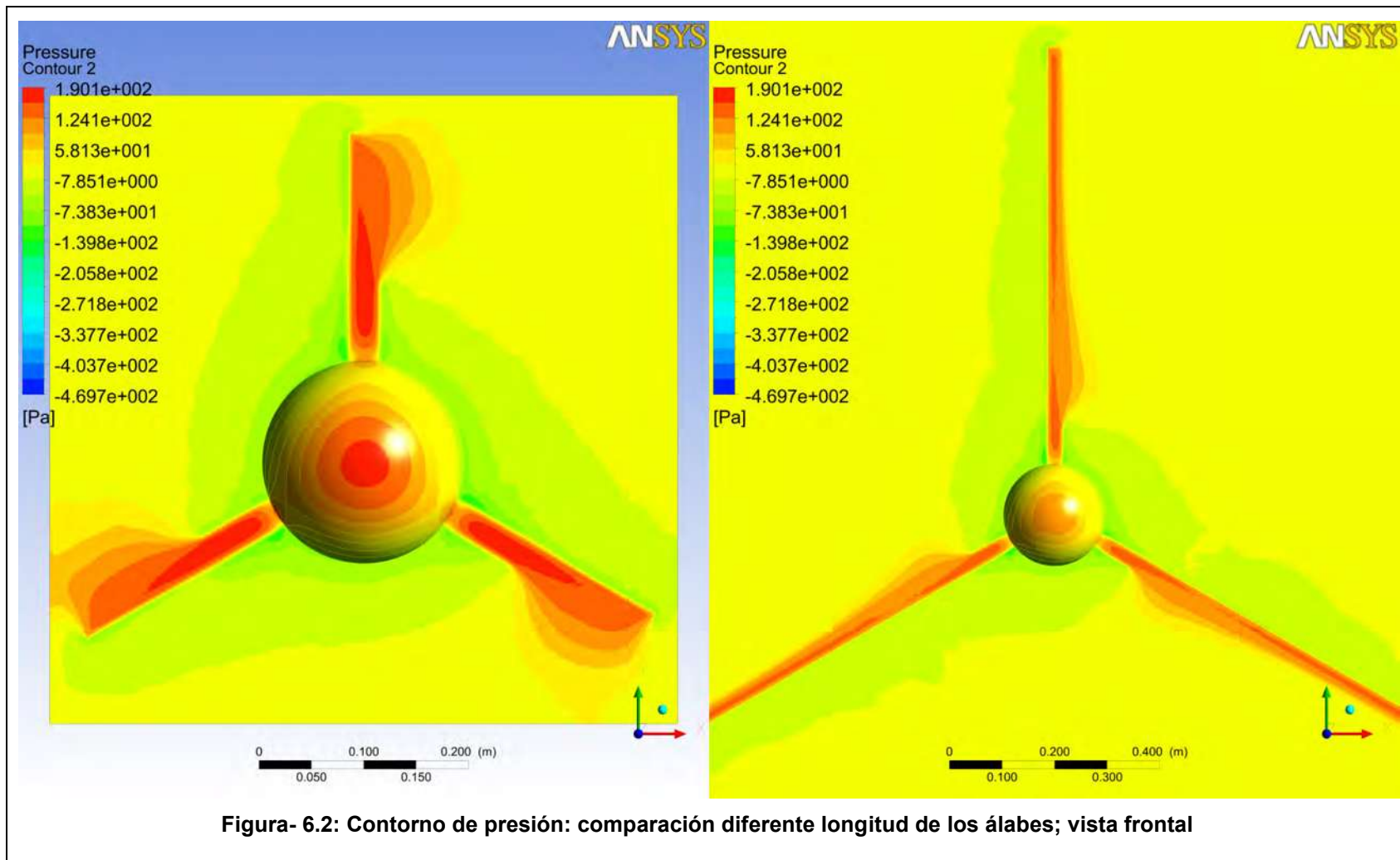


Figura- 6.1: Contorno de presión: comparación diferente longitud de los álabes; vista lateral



6.2.1 Importancia aerodinámica del HUB

Para entender la importancia de tener un HUB aerodinámico, se realizaron simulaciones para comparar una turbina con un perfil de HUB plano y otro con uno semicircular, para una velocidad de 12 m/s. Los resultados presentados son los contornos de velocidad, presión y energía cinética turbulenta.

En las Figuras 6.3 y 6.4, se aprecia la disipación de energía cinética turbulenta en la vista lateral y frontal de ambas turbinas. En donde se muestran más regiones de turbulencia con el HUB plano en comparación con el HUB semicircular, debido al cambio tan brusco que debe realizar el viento, por la cara plana con la que tiene contacto.

En las Figuras 6.5 y 6.6, se muestra el contorno de presiones de la vista frontal y lateral de la comparación de las turbinas para un HUB plano y uno semicircular, en donde se aprecia que al tener una geometría plana se estanca más fluido en la parte de la nariz del aerogenerador.

En las Figuras 6.7 y 6.8, se muestra el contorno de velocidades en vista frontal y lateral de las turbinas. En la Figura 6.8 se pueden apreciar regiones de aumento de velocidad justo enfrente de los álabes de la turbina con HUB semicircular que no se presentan en la que tiene un HUB plano, si tomamos en cuenta que un aumento de velocidad es una disminución de presión, se esperaría que esto ayude a hacer girar el generador eólico, ya que los álabes funcionan por una diferencia de presiones [Figura 3.4].

Tabla 6.3: Información de interés correspondiente a las Figuras 6.3 a la 6.8

Velocidad de entrada del viento:	12 m/s	Características de la máquina utilizada	
Número de elementos:	~3M	Procesador:	AMD Phenom II X6 3.20 GHZ
Número de nodos:	~600000	Memoria RAM:	16 Gb
Tipo de elemento:	tetraedros	Tarjeta de video:	AMD Radeon HD 6900 Series 2Gb GDDR5
Tiempo de simulación aproximado:	40 min c/u; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos		

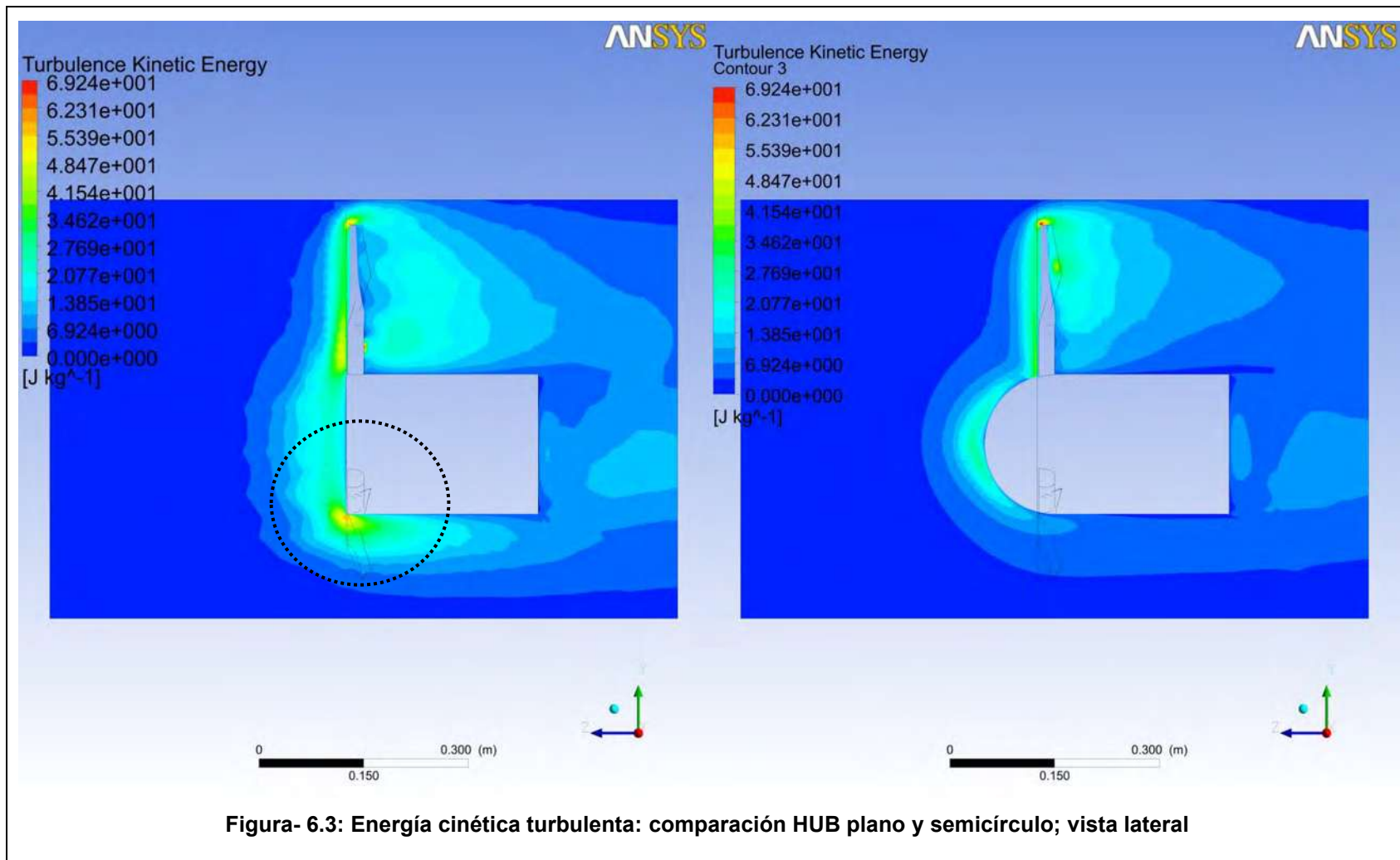
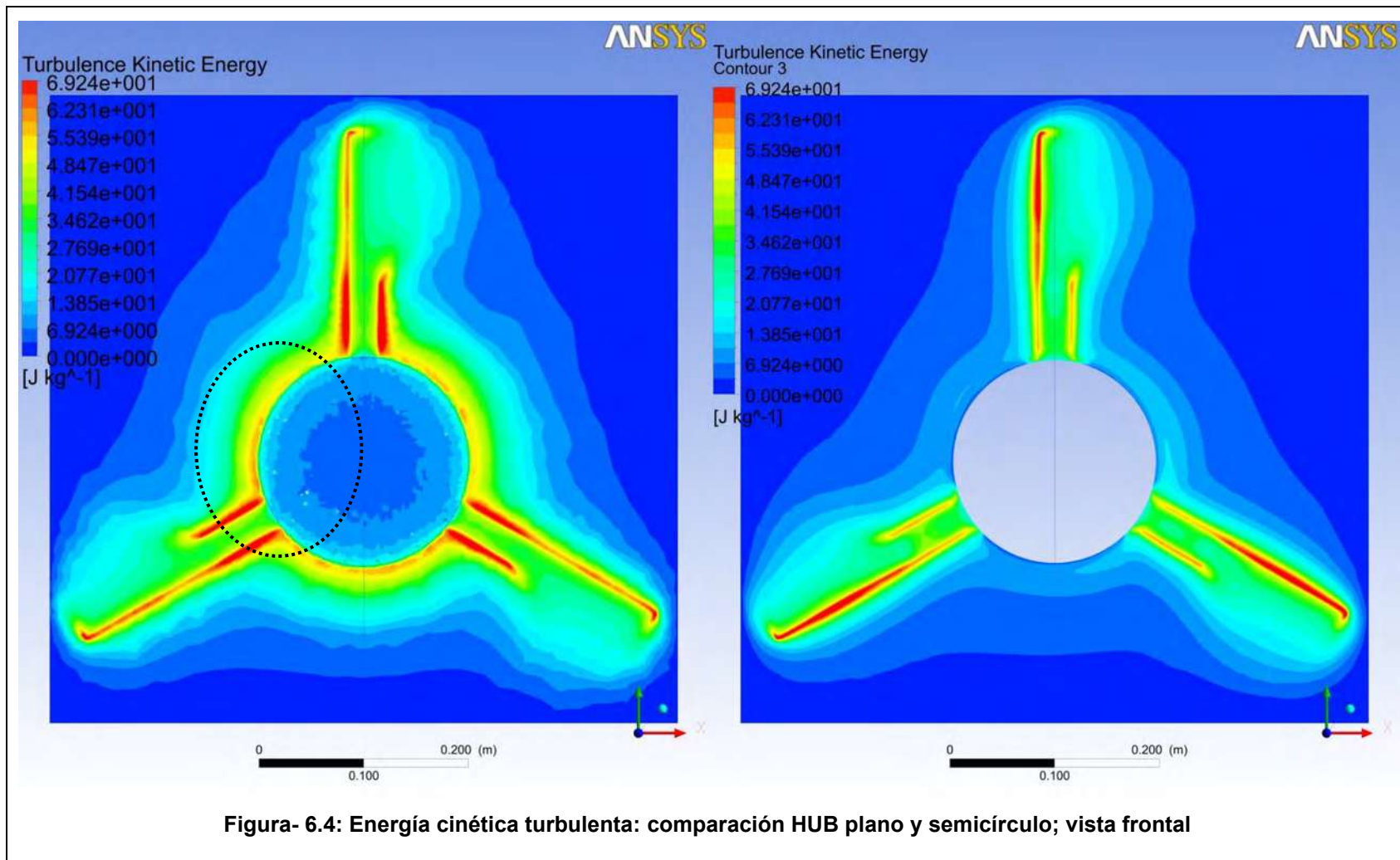
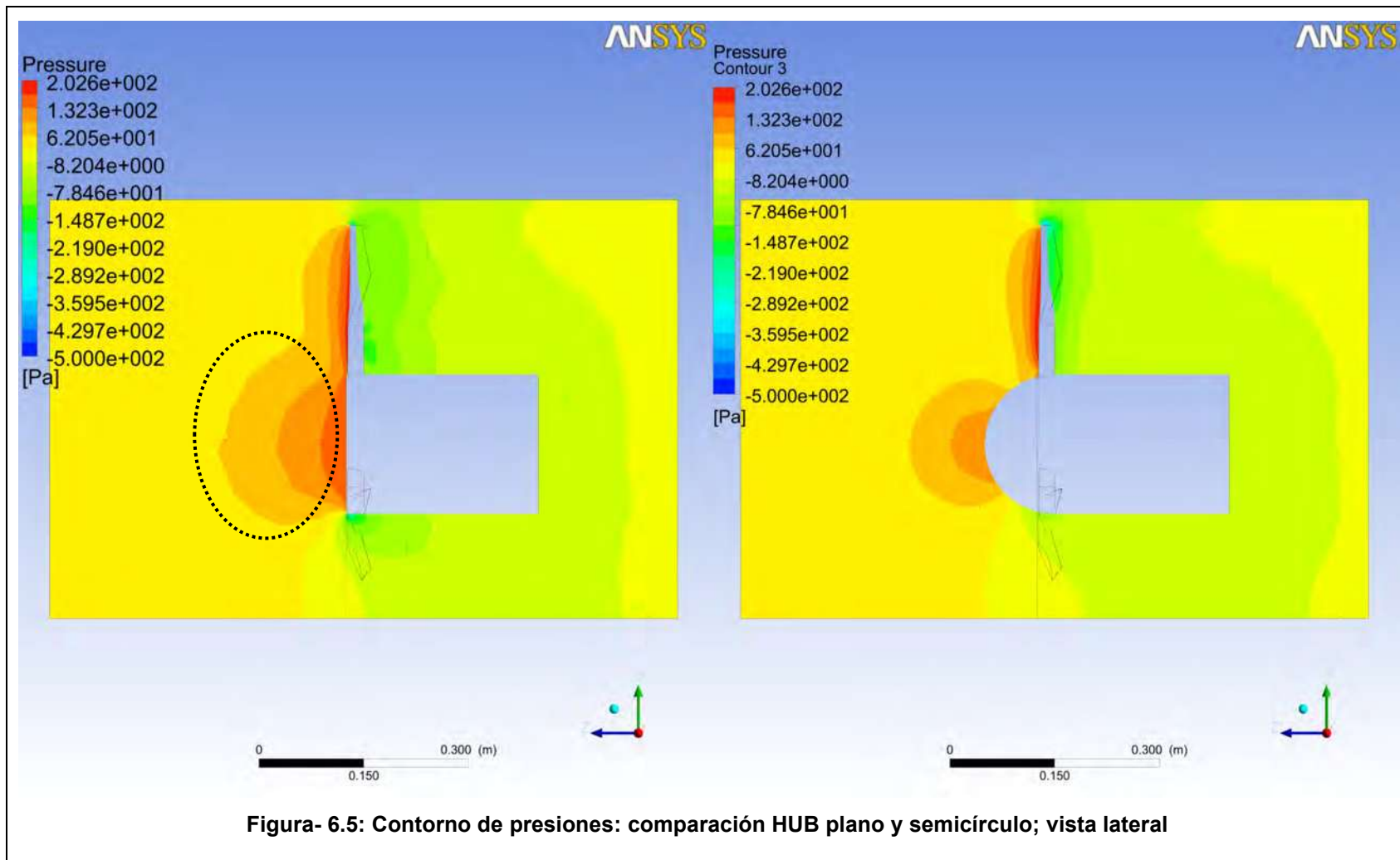
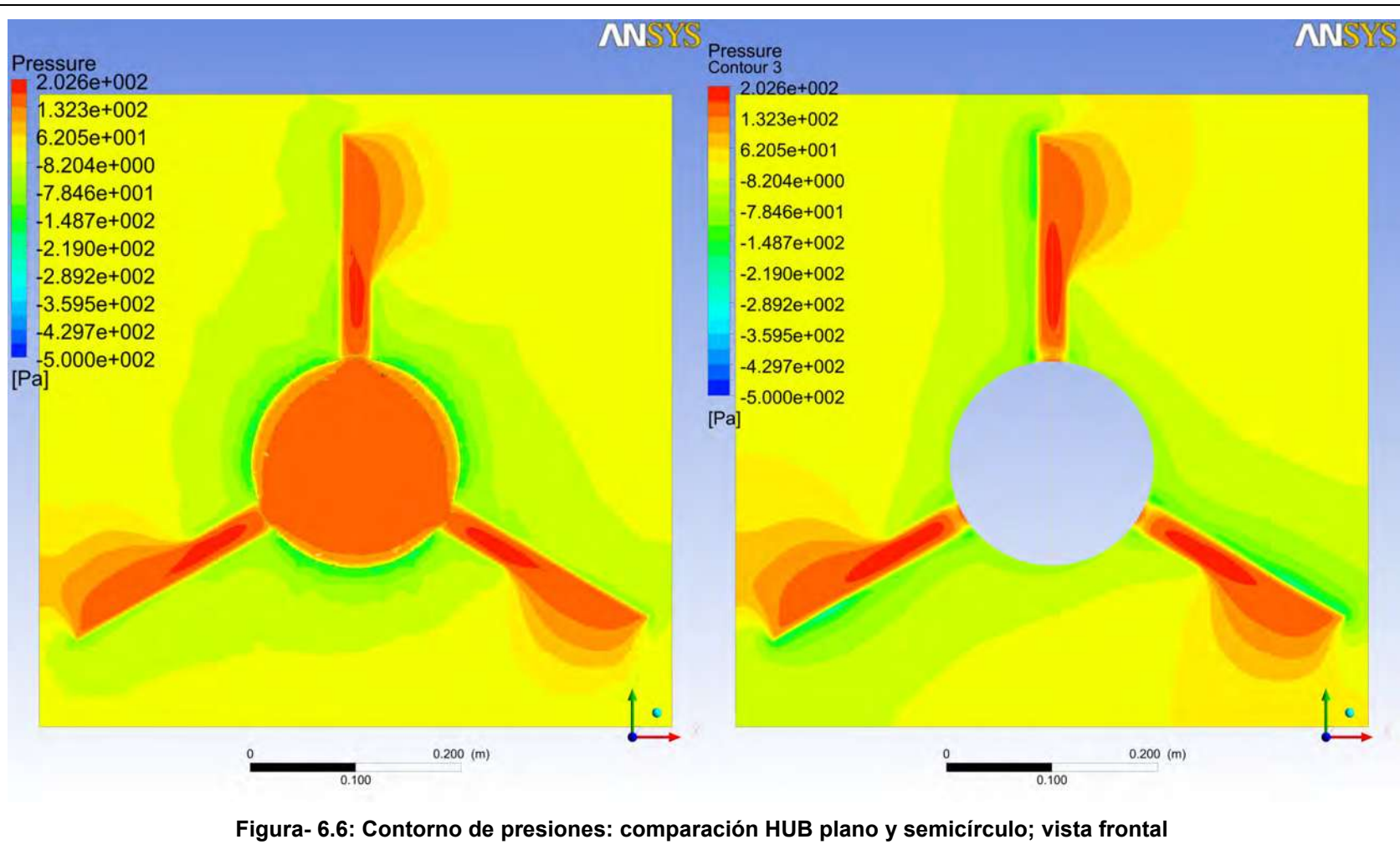
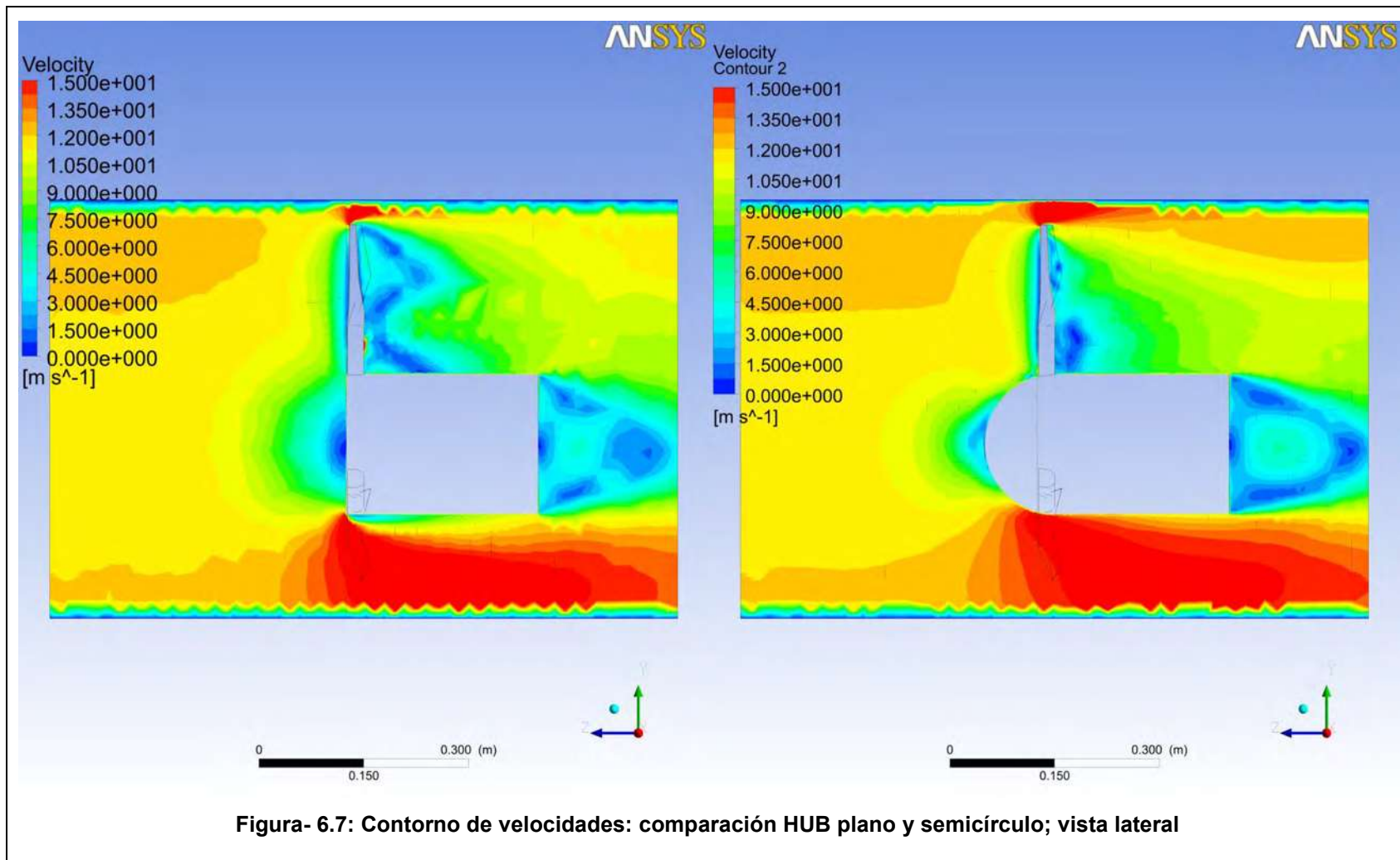


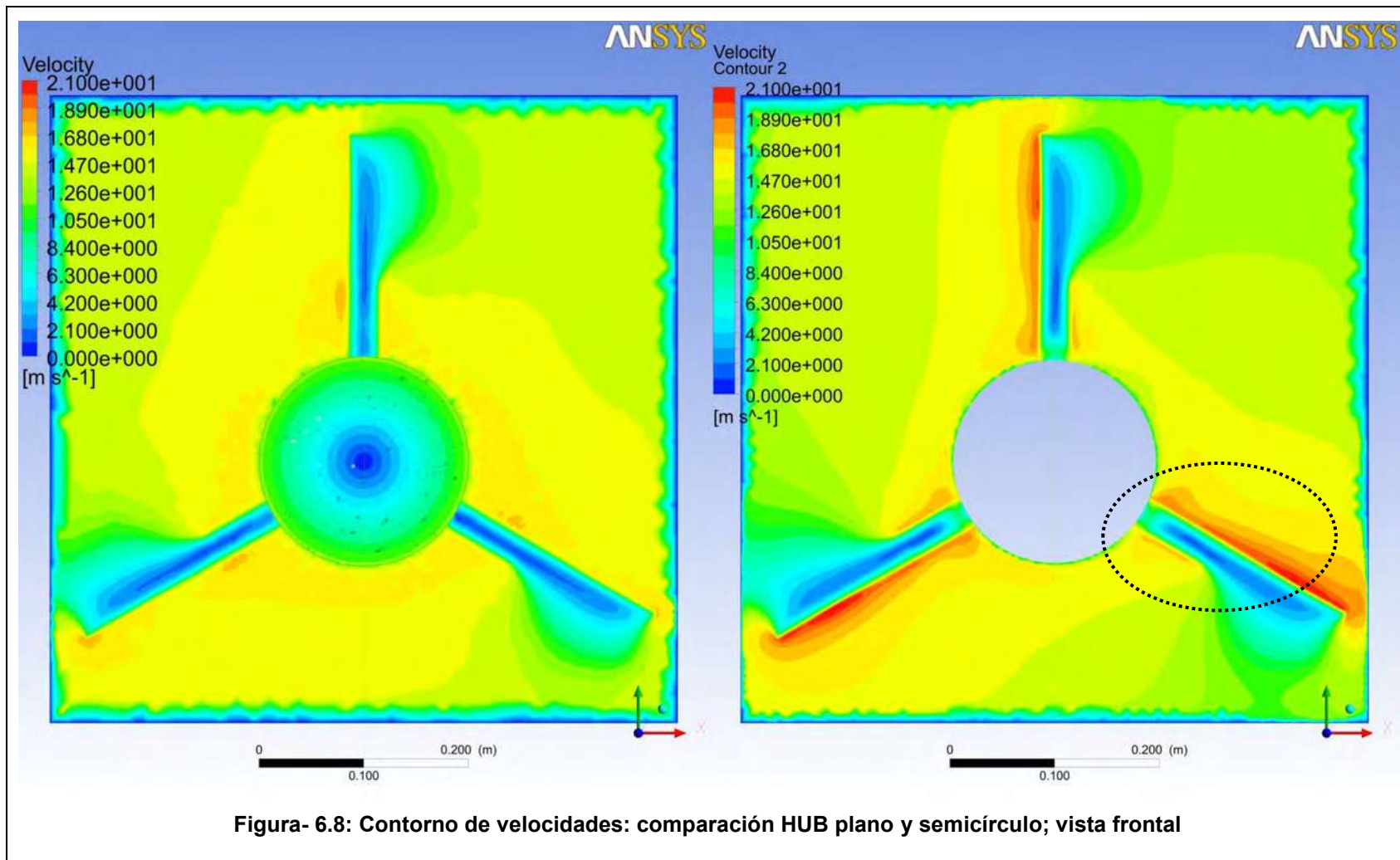
Figura- 6.3: Energía cinética turbulenta: comparación HUB plano y semicírculo; vista lateral











6.3 Simulación de los perfiles básicos seleccionados

Las velocidades usadas en la simulación para coincidir con las empleadas en el túnel de viento son:

Tabla 6.4: Relación entre la velocidad real y la del túnel de viento

Velocidad real	Velocidad túnel
3 m/s	8 m/s
4 m/s	10.66 m/s
5 m/s	13.33 m/s

Por cuestiones de seguridad en el túnel de viento, no podemos pasar de una velocidad de 13 m/s, lo cual nos deja solo las velocidades de arranque para simular y validar con los experimentos físicos, pero una vez validados, podemos tener la seguridad de que si se hace una simulación para una velocidad de viento real de 12 m/s, ésta estará correcta.

Cabe mencionar que los contornos tanto de presión como de velocidad son idénticos para las velocidades de túnel de viento de 6.6 m/s, 8 m/s, 10.6 m/s y 13.33 m/s, por lo que sólo se reportarán los de 8m/s, que es la velocidad equivalente a 3 m/s o velocidad en la que arrancan la turbina de la que se dispone para pruebas físicas.

Tabla 6.5: Características de la máquina empleada para las simulaciones

Procesador:	AMD Phenom II X6 3.20 GHZ
Memoria RAM:	16 Gb
Tarjeta de video:	AMD Radeon HD 6900 Series 2Gb GDDR5

6.3.1 Contorno de presiones a 8m/s

La disposición del modelo para las simulaciones de los diferentes HUBs se muestra en la Figura 6.9. En la Figura 6.10, se presenta el contorno de presiones para una geometría en forma de semicírculo a una velocidad de viento de entrada en el túnel de 8m/s, correspondiente a la velocidad de arranque (3m/s).

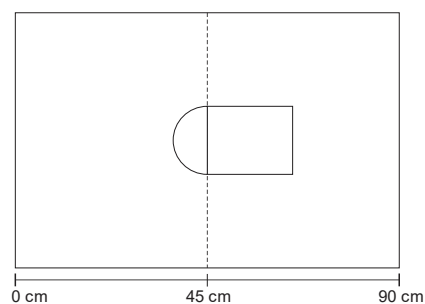


Figura- 6.9: Disposición de la góndola y HUB en el túnel de viento virtual

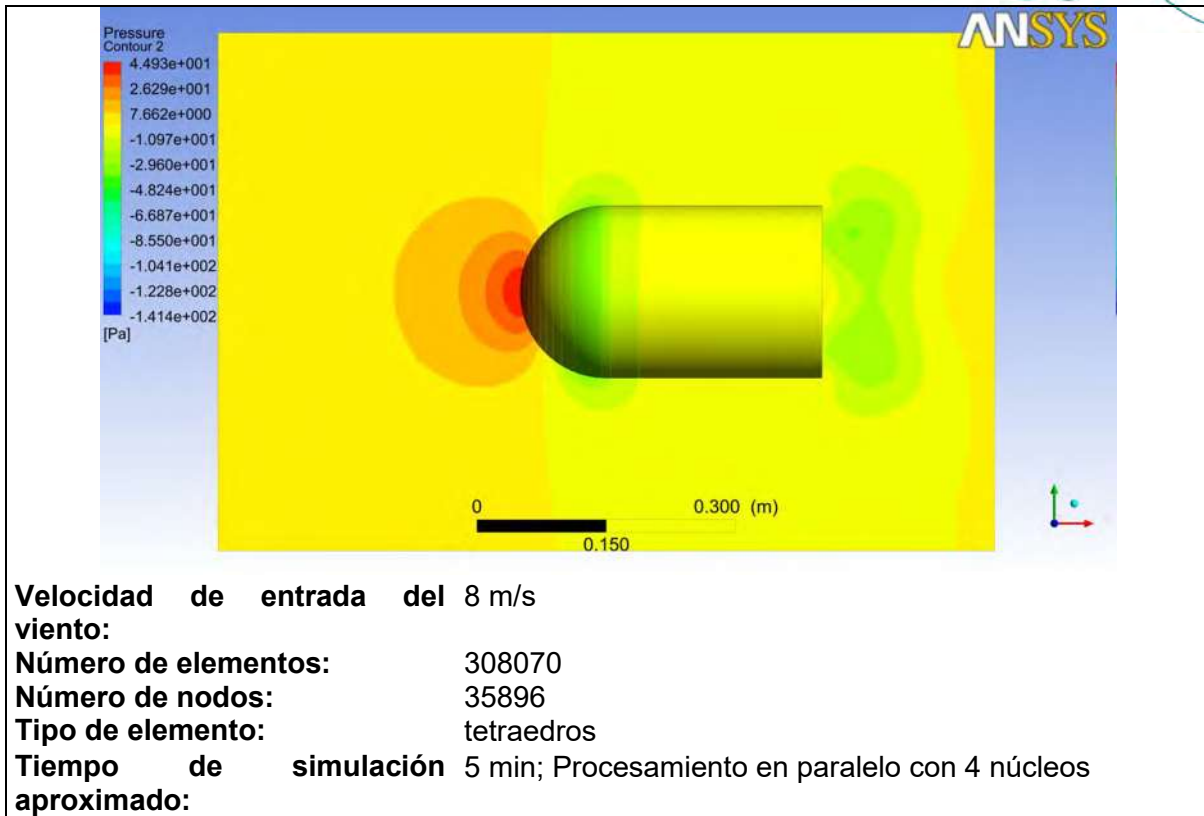
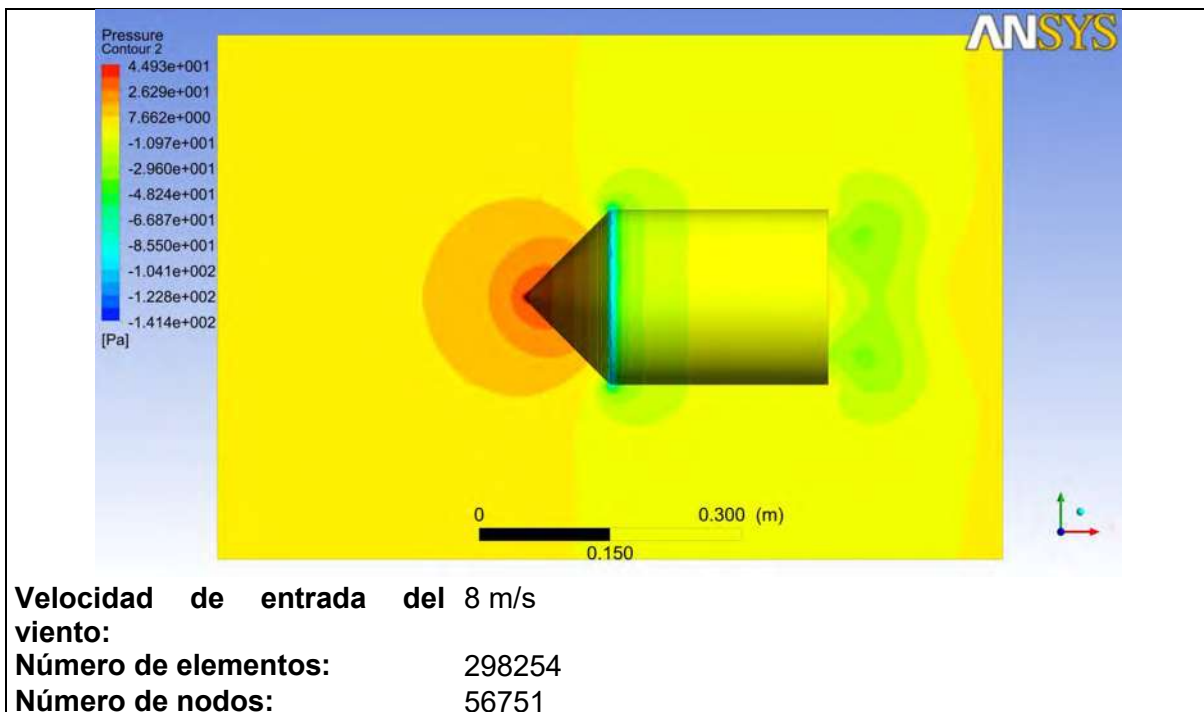


Figura- 6.10: Contorno de presiones: semicírculo

En la Figura 6.11 se muestra el contorno de presiones para una geometría en forma de cono, en ésta se aprecian unas regiones de baja presión debidas a el ángulo con el que pasa del HUB a la parte de la góndola.



Tipo de elemento: tetraedros
Tiempo de simulación aproximado: 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos

Figura- 6.11: Contorno de presiones: cono

En la Figura 6.12 se muestra el contorno de presiones para una geometría en forma elíptica, muy parecida a la que se presenta con un semicírculo, como si se estirara el contorno de presiones de este último hacia la parte de enfrente.

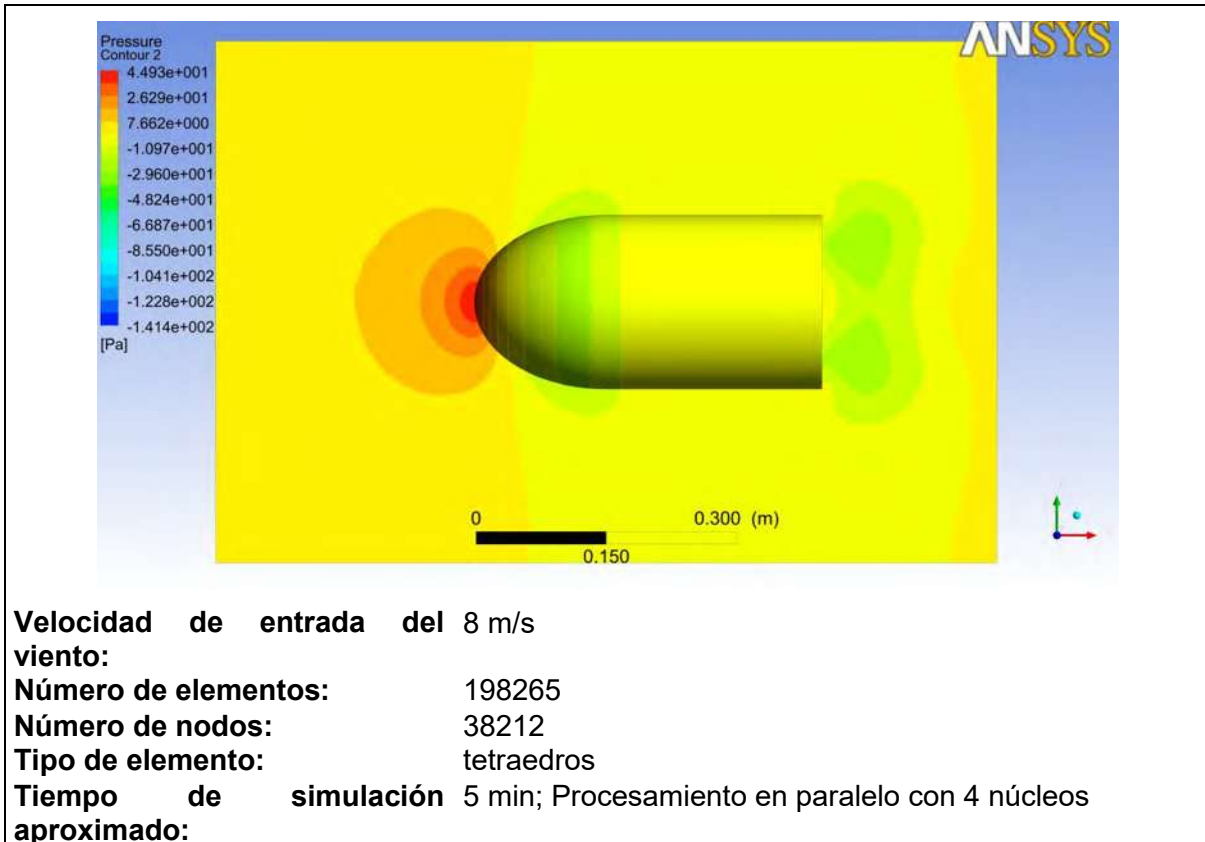


Figura- 6.12: Contorno de presiones: elíptica

En la Figura 6.13 se presenta el contorno de presiones para una geometría en forma de parábola, de igual forma que el cono presenta una región de baja presión entre el HUB y la góndola debida al ángulo con el que pasa de una geometría a otra.

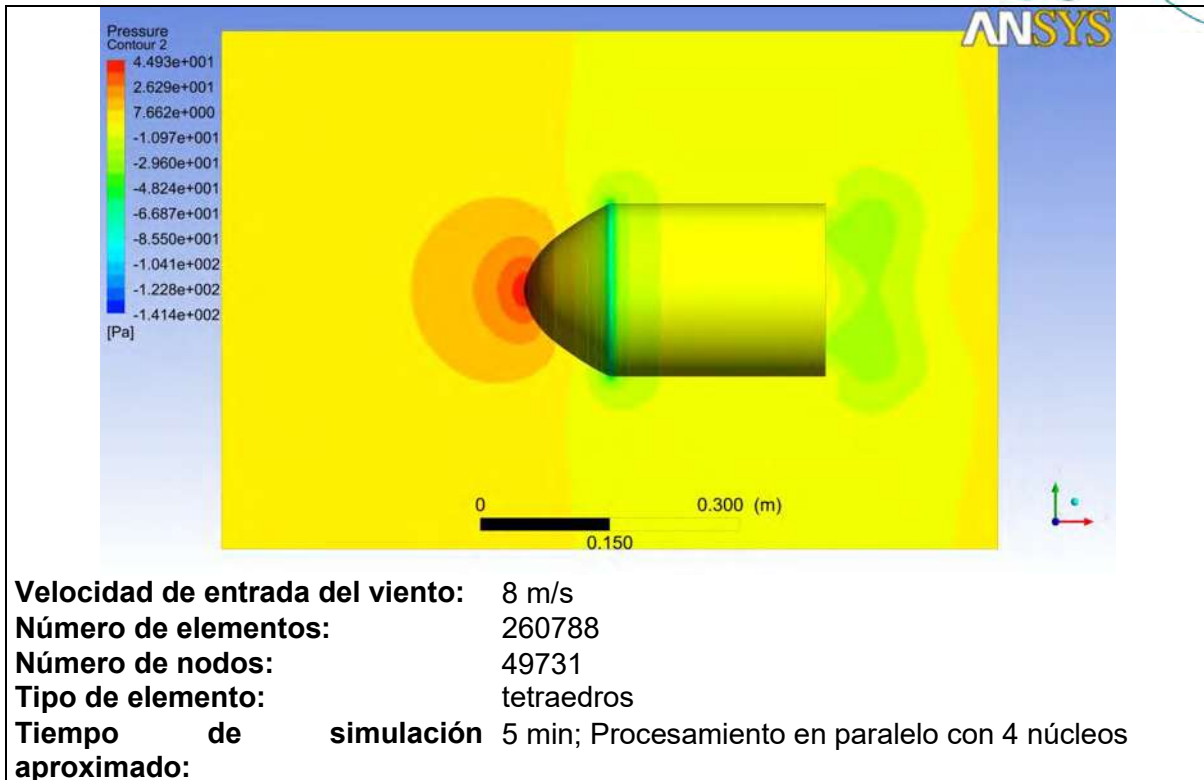
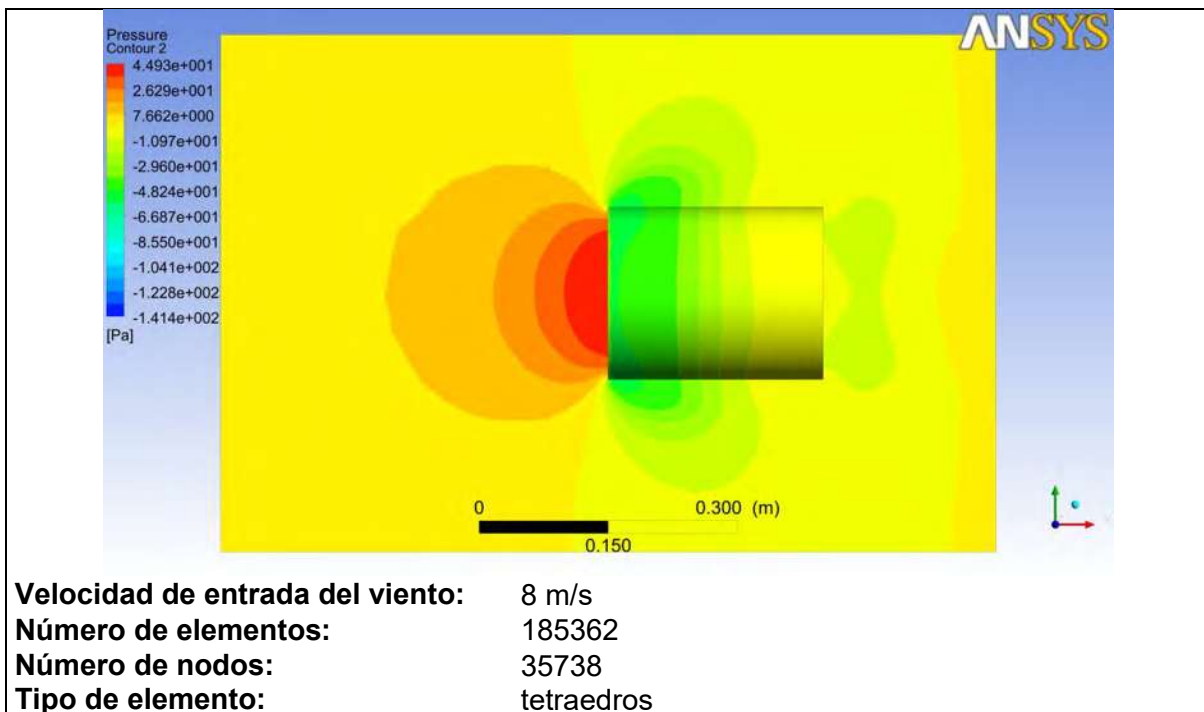


Figura- 6.13: Contorno de presiones: parábola

En la Figura 6.14 se presenta el contorno de presiones para un HUB plano, se aprecian regiones de alta presión, equivalentes a regiones de baja velocidad en la parte frontal, lo cual se ve reflejado en un punto de estancamiento más grande que en los demás perfiles.



Tiempo de simulación 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos aproximado:

Figura- 6.14: Contorno de presiones: HUB plano

En la Figura 6.15 se presenta el contorno de presiones para un HUB de ojiva tangente, a una velocidad de viento de 8m/s.

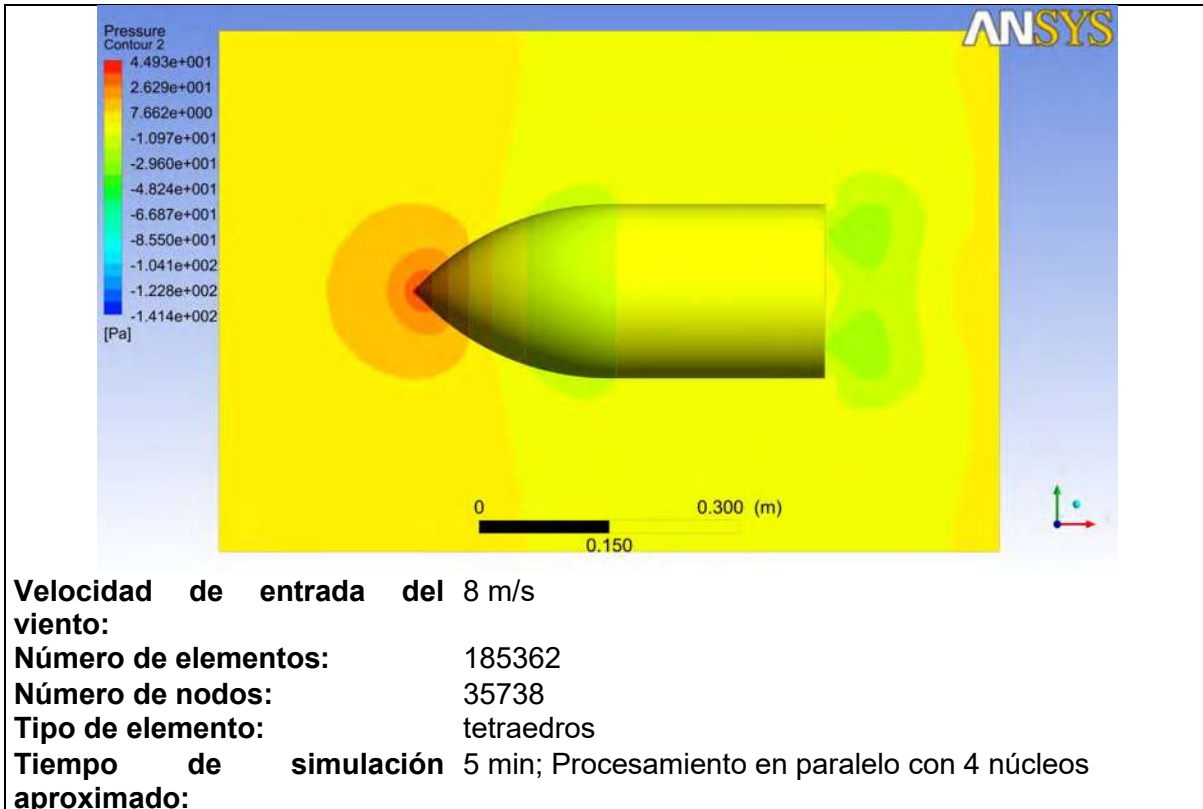
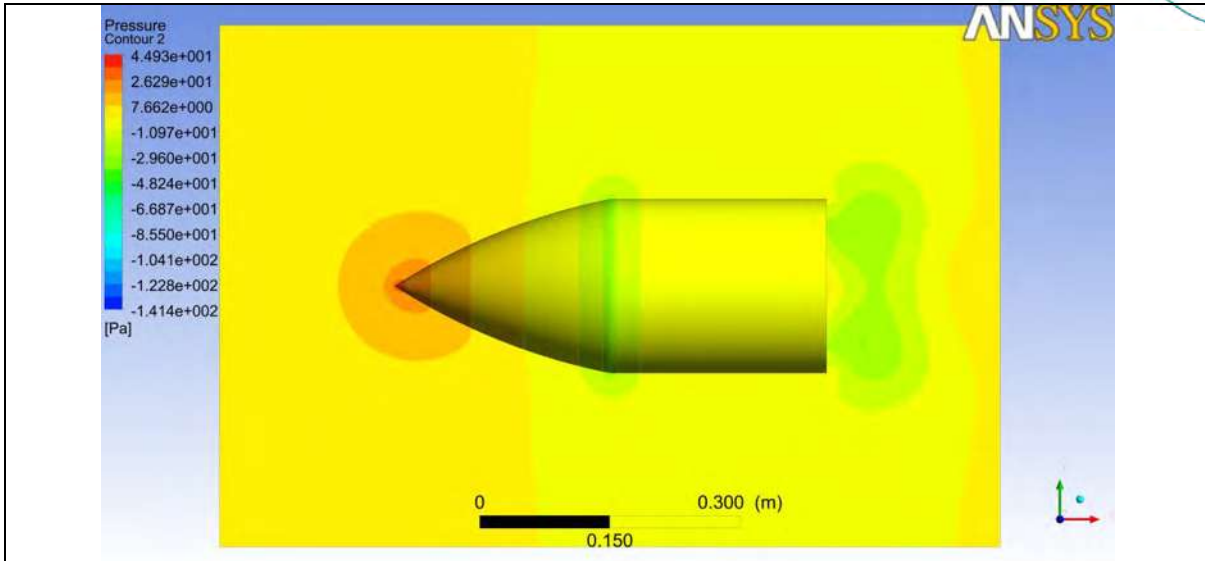


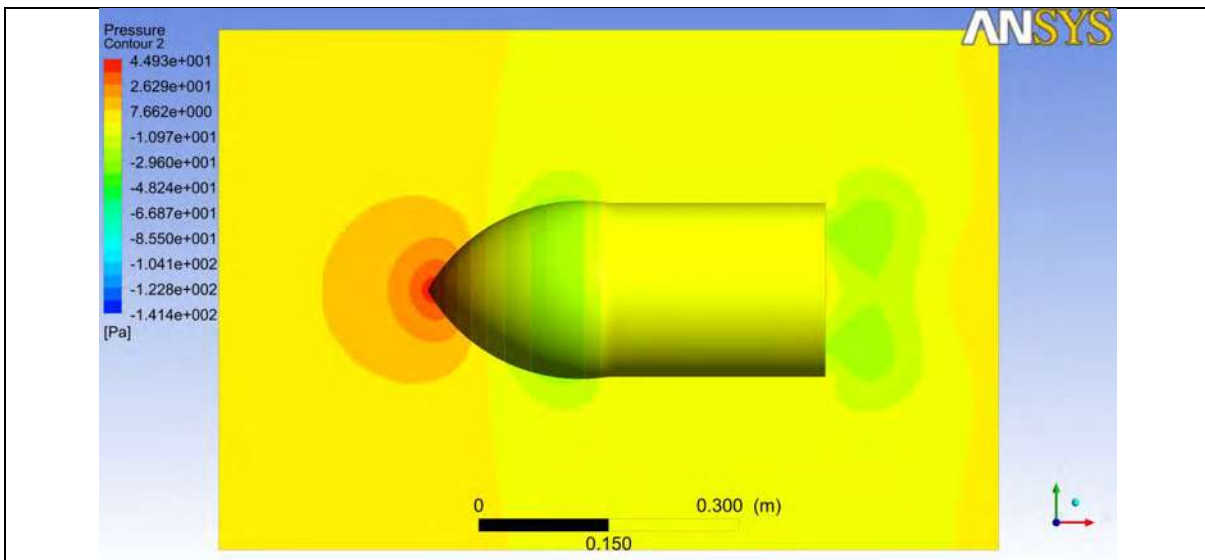
Figura- 6.15: Contorno de presiones: ojiva tangente

En la Figura 6.16 y 6.17, se presenta el contorno de presiones para dos tipos de HUB en forma de ojiva secante, respectivamente, la ojiva secante1 presenta regiones de menor presión que la secante 2 en la parte frontal, debido a la forma en la que el perfil llega a la punta.



Velocidad de entrada del 8 m/s
 viento:
 Número de elementos: 338599
 Número de nodos: 64284
 Tipo de elemento: tetraedros
 Tiempo de simulación 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos aproximado:

Figura- 6.16: Contorno de presiones: ojiva secante 1



Velocidad de entrada del 8 m/s
 viento:
 Número de elementos: 291328
 Número de nodos: 55466
 Tipo de elemento: tetraedros
 Tiempo de simulación 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos aproximado:

Figura- 6.17: Contorno de presiones: ojiva secante 2



6.3.2 Contorno de velocidad a 8m/s

En la Figura 6.18, se aprecia el contorno de velocidades para un perfil semicircular de HUB con un pequeño aumento de velocidad en parte donde se junta el HUB con la góndola.

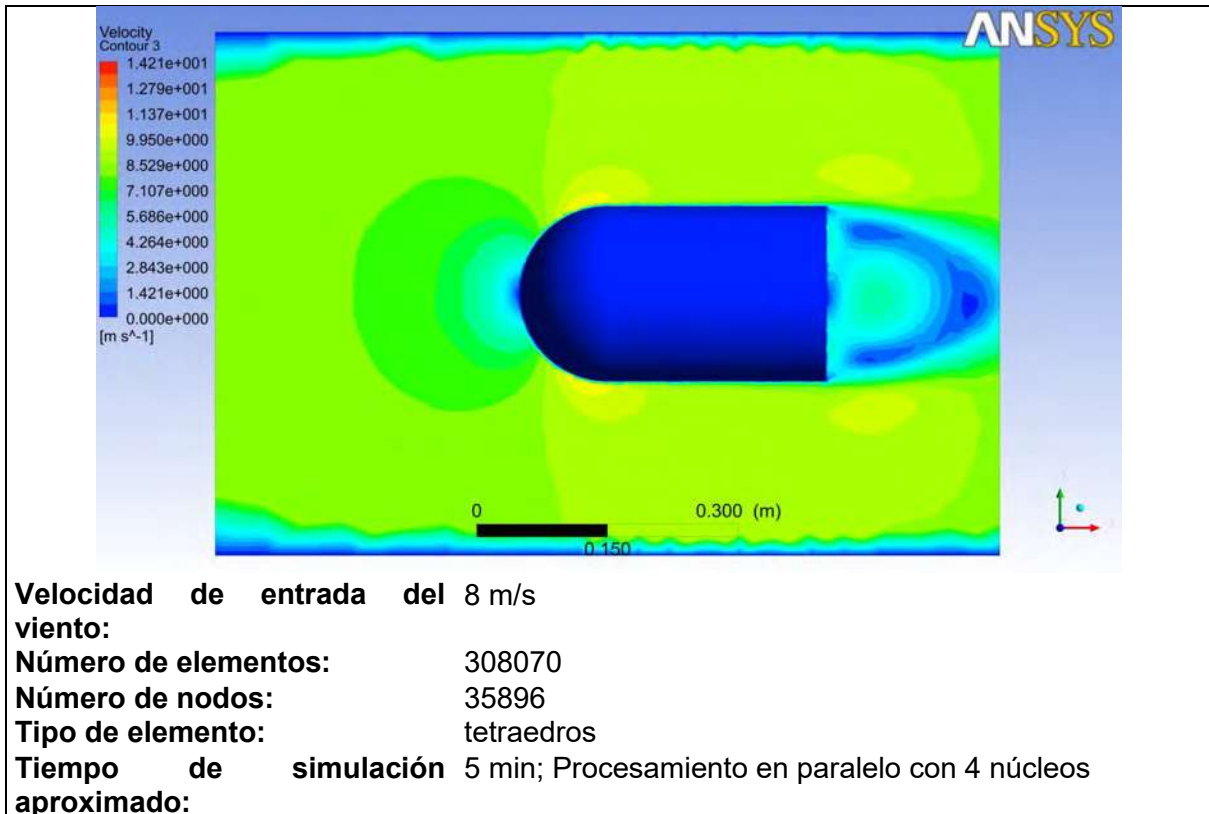


Figura- 6.18: Contorno de velocidades: semicírculo

En la Figura 6.19, se presenta el contorno de velocidades para el perfil en forma de cono, este presenta una pequeña región de un aumento de velocidad mayor que la del semicircular.

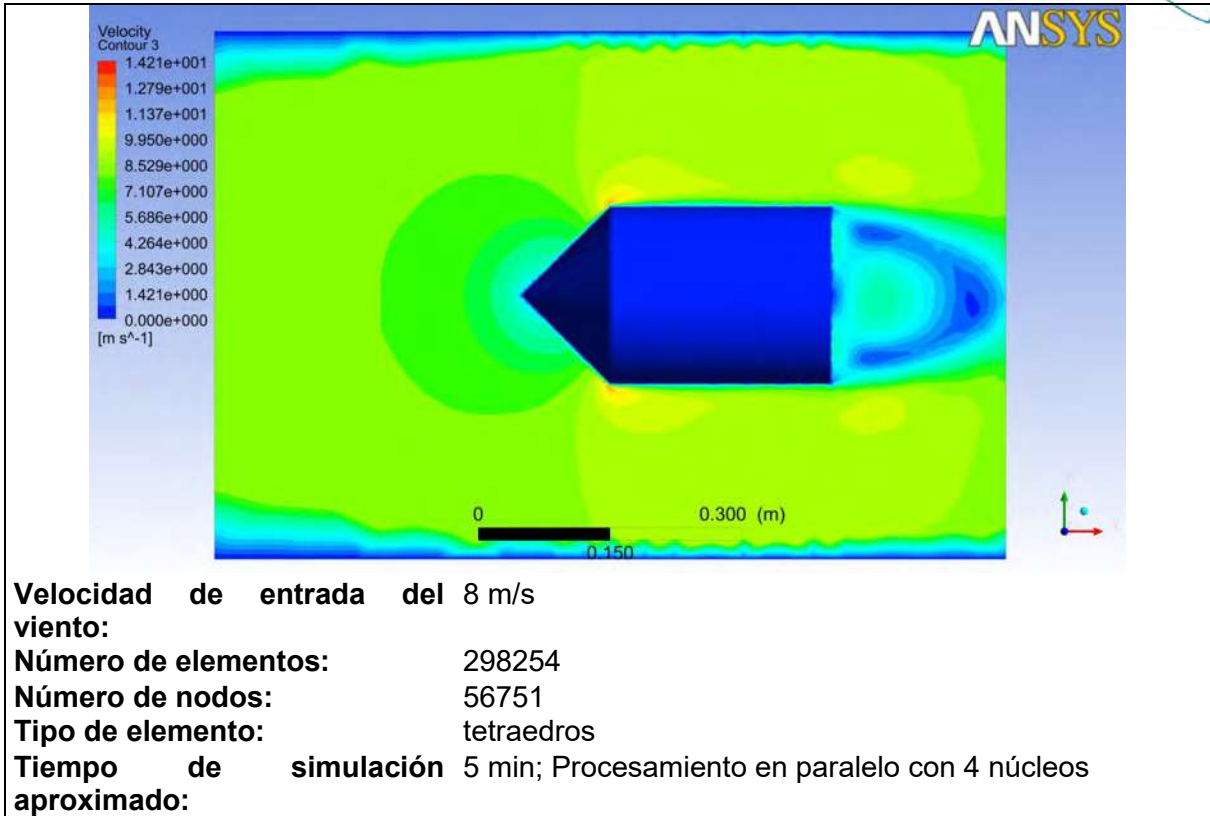
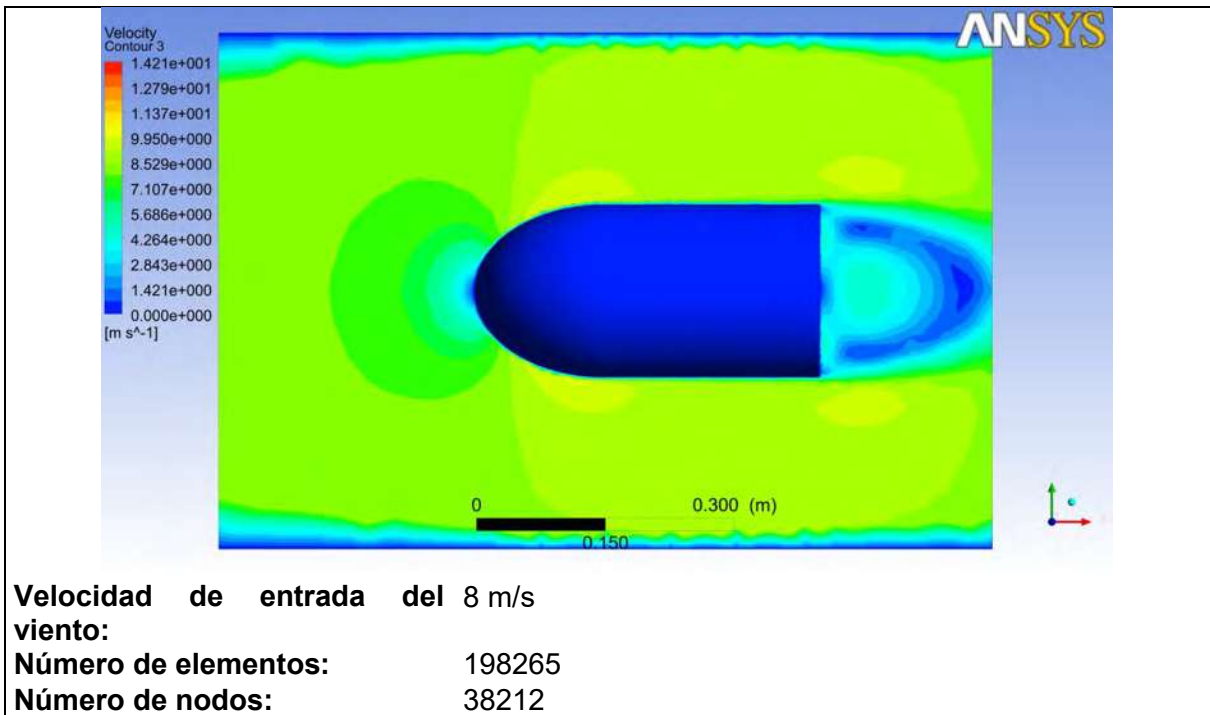


Figura- 6.19: Contorno de velocidades: cono

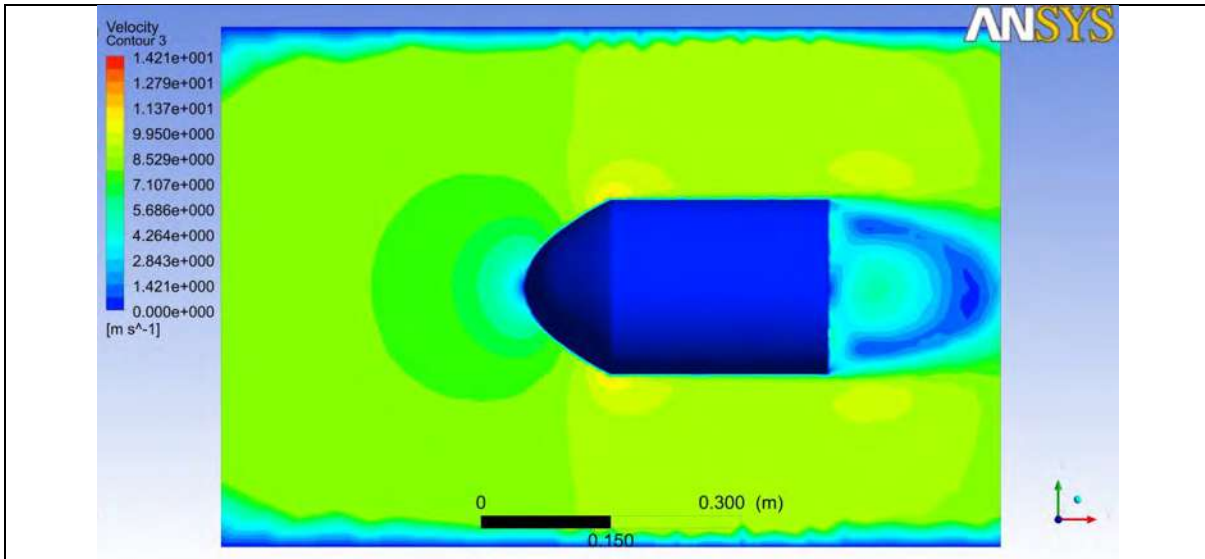
En la Figura 6.20, se presenta el contorno de velocidades para una geometría elíptica, de igual forma que su contorno de presiones es muy semejante al del semicircular.



Tipo de elemento: tetraedros
Tiempo de simulación aproximado: 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos

Figura- 6.20: Contorno de velocidades: elíptica

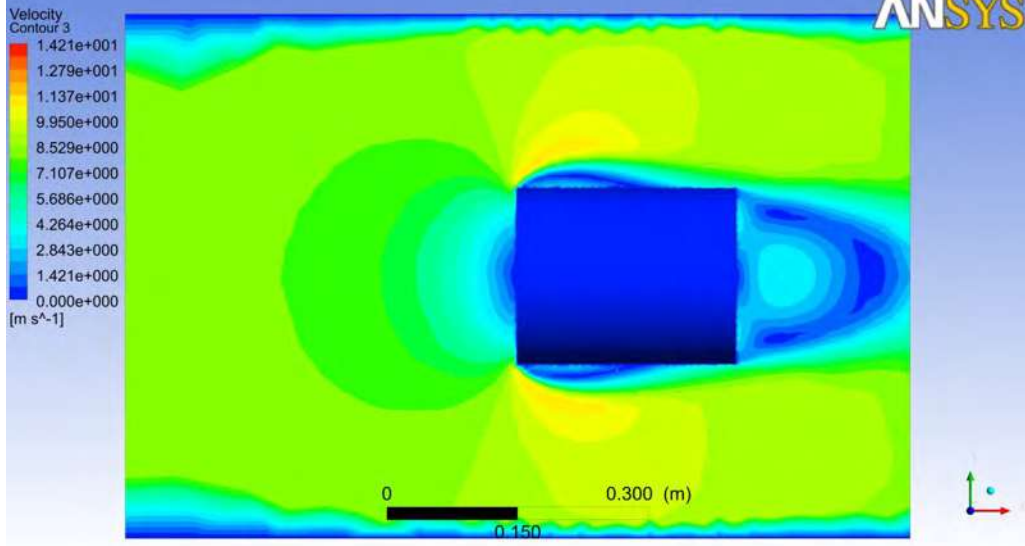
La Figura 6.21, presenta el contorno de velocidades para una geometría en forma de parábola. La cual presenta la región parecida a la del cono en la transición del HUB a la góndola y en la punta parecida a la del semicírculo.



Velocidad de entrada del viento: 8 m/s
Número de elementos: 260788
Número de nodos: 49731
Tipo de elemento: tetraedros
Tiempo de simulación aproximado: 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos

Figura- 6.21: Contorno de velocidades: parábola

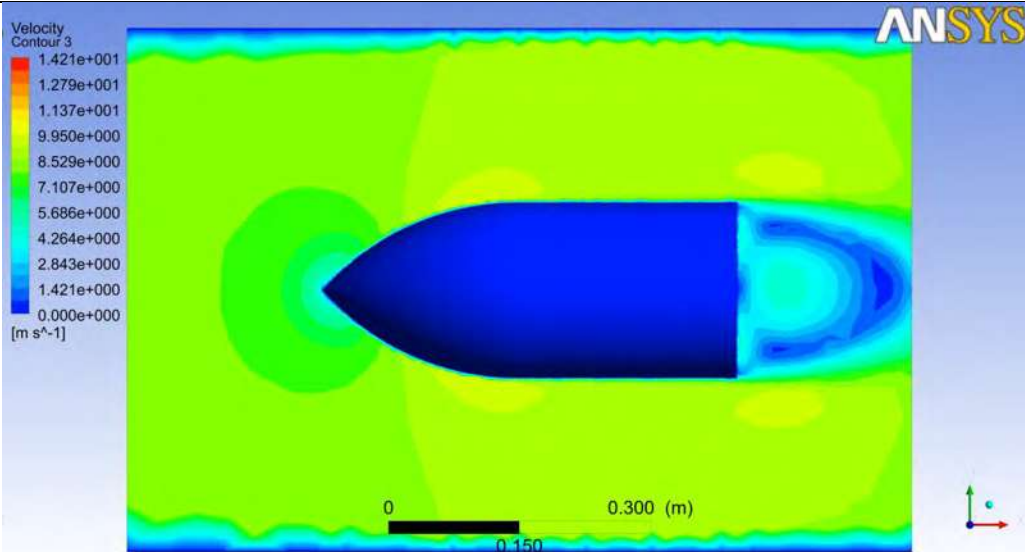
En la Figura 6.22, se presenta el contorno de velocidades para un HUB plano. Se aprecian zonas de baja velocidad por la parte superior del perfil, las cuales están asociadas con pérdidas en turbulencia y recirculación como se ve en la Figura 5.7 debidas a la separación del fluido.



Velocidad de entrada del viento: 8 m/s
Número de elementos: 185362
Número de nodos: 35738
Tipo de elemento: tetraedros
Tiempo de simulación: 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos aproximado:

Figura- 6.22: Contorno de velocidades: HUB plano

La Figura 6.23, muestra el contorno de velocidades para el perfil de ojiva tangente a una velocidad de entrada de 8m/s.



Velocidad de entrada del viento: 8 m/s
Número de elementos: 185362
Número de nodos: 35738
Tipo de elemento: tetraedros
Tiempo de simulación: 5 min; Procesamiento en paralelo con 4 núcleos

aproximado:

Figura- 6.23: Contorno de velocidades: ojiva tangente

Las Figuras 6.24 y 6.25, muestran el contorno de presiones de los perfiles secante1 y secante 2, para una velocidad de viento de entrada de 8 m/s los cuales por la forma en su punta y en la unión con la góndola, permiten el flujo del viento casi sin afectarlo en su velocidad, esto es sin tener puntos de estancamiento significativos y de desprendimiento del fluido.

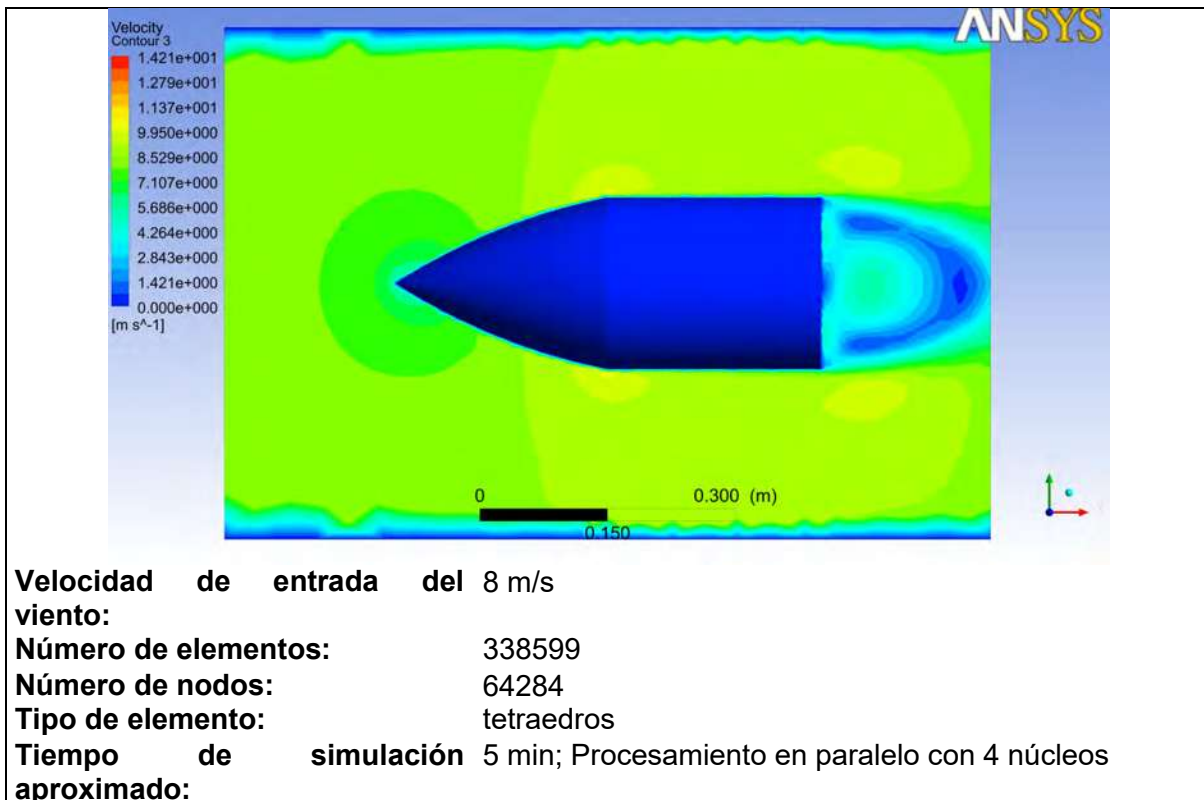


Figura- 6.24: Contorno de velocidades: ojiva secante 1

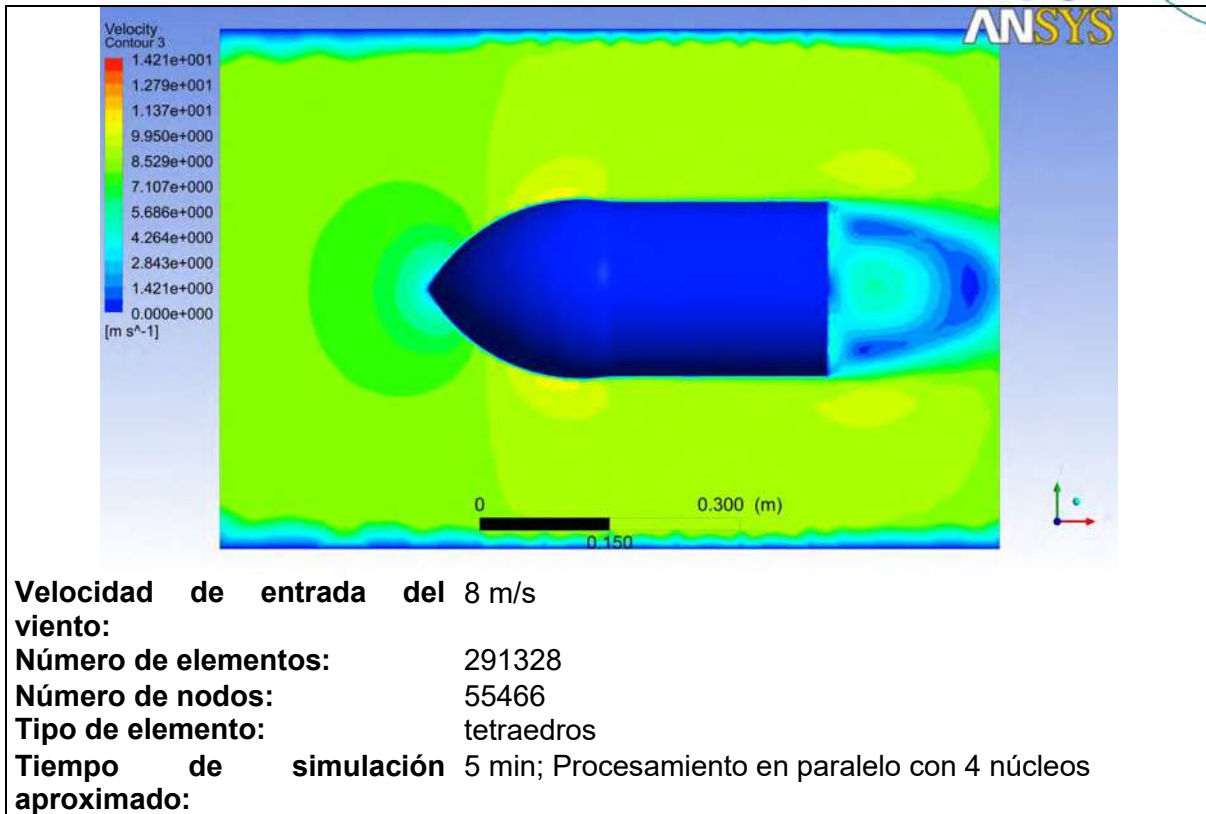


Figura- 6.25: Contorno de velocidades: ojiva secante 2

6.4 Experimentación en el túnel de viento

Los experimentos realizados en el túnel de viento fueron para un perfil de HUB semicircular. Para posteriormente contrastar lo obtenido en las pruebas con la simulación del mismo perfil.

Se realizaron dos tipos de pruebas, la primera considerando que el HUB no gira, y la segunda considerando el giro del mismo, a las revoluciones correspondientes al giro de un generador eólico para la velocidad de viento dada. Las rpm a las que debe girar el HUB, para las velocidades de viento consideradas para las pruebas, se muestran en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Relación de velocidad de viento y rpm de un aerogenerador eólico

Velocidad de viento en el túnel (m/s)	rpm
6.6 $\bar{6}$	716.19
8	859.43
10.6 $\bar{6}$	1145.91
13.3 $\bar{3}$	1432.39

Como se mencionó en las secciones anteriores, el túnel de viento tiene una sección media de 60cmx60cmx90cm, siendo ésta donde se coloca el perfil del HUB de interés para las pruebas, El túnel de viento se muestra en las Figura 6.26 y Figura 6.27.

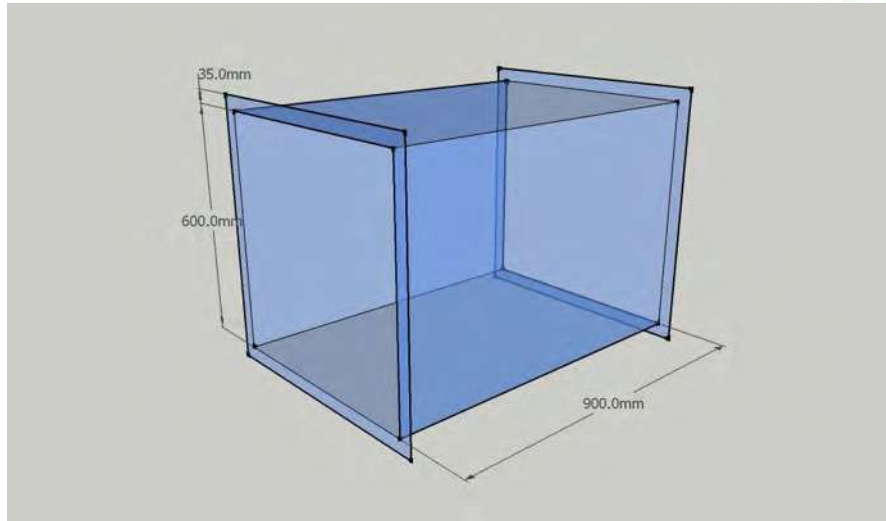


Figura- 6.26: Sección media del túnel de viento



Figura- 6.27: Fotografía del túnel de viento en la cual se muestra el experimento montado, conectado a un control de velocidad para hacerlo girar a las rpm deseadas. En el lado derecho se muestra el generador de humo empleado para trazar las líneas de corriente.

Para validar los resultados esperados de la Sección 5.4 con la experimentación, se trazaron líneas de corriente sobre el perfil con humo. En la Figura 6.28 se puede apreciar el patrón de flujo esperado.

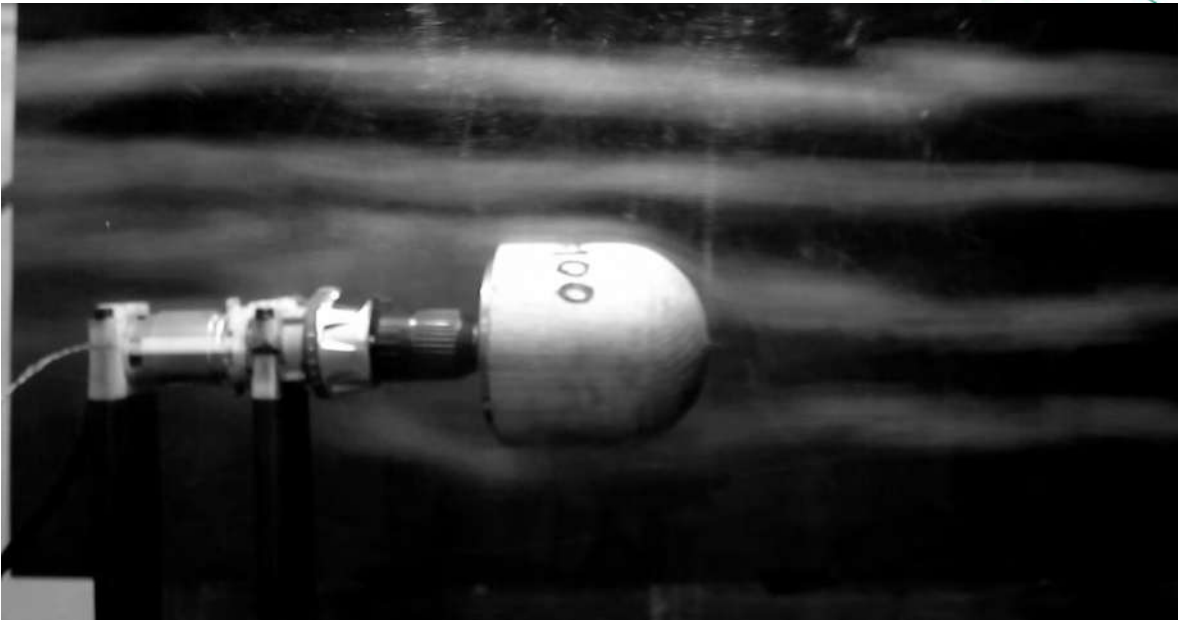


Figura- 6.28: Líneas de corriente sobre un perfil semicircular, en la que se puede apreciar el flujo por sobre el perfil, los vórtices que se crean en la parte trasera del perfil, en la parte de enfrente como se desvía el flujo del viento.

De igual forma, para validar la simulación, se estudió el contorno de presiones y comparó con lo obtenido en el túnel de viento, apreciando las zonas donde el flujo del viento se estira debido a la baja presión o lo que es igual a un aumento de velocidad. También se observó el punto de estancamiento en la parte frontal del perfil (siendo la zona donde hay mayor presión) el flujo del fluido por sobre y hacia los lados a partir del punto de estancamiento, los vórtices creados en la parte trasera del perfil y la zona de desprendimiento de la capa límite debida a la baja presión que se presenta en la zona verde de la simulación [Figura 6.29].

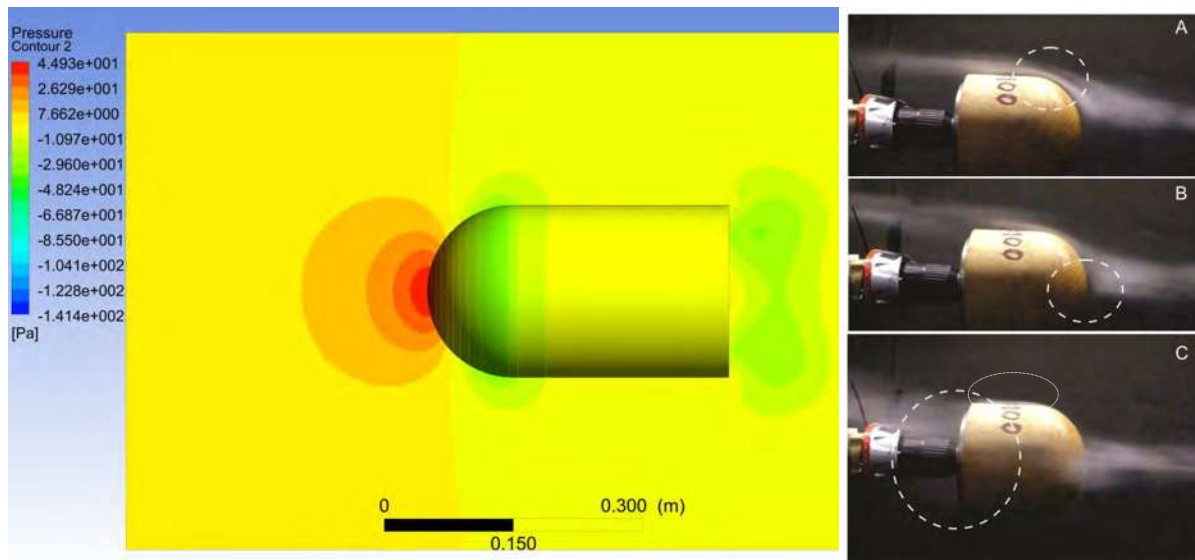


Figura- 6.29: Comparación de las regiones obtenidas en simulación con la experimentación, obteniendo un patrón de flujo con las zonas: A) Zona de aumento del flujo y flujo sobre el

perfil, B) Punto de estancamiento, Flujo desde el punto de estancamiento sobre el perfil, C) Vórtices, zona de recirculación y desprendimiento del fluido.

Con los resultados obtenidos, se puede tomar como válidos los datos obtenidos de las simulaciones y utilizar en el proceso de diseño de los perfiles. A su vez, al analizar los experimentos con un HUB girando, no se encontraron aportes significativos con respecto al HUB sin girar, por lo cual se pueden despreciar por el momento los efectos que tiene el considerar que la turbina está girando.

6.5 Método de Diseño

Como es de interés diseñar los perfiles utilizando el contorno de presiones, ya que las turbinas de viento funcionan por una diferencia de presiones a través del perfil del álabe, se obtuvieron las curvas de la presión sobre el contorno del perfil del HUB, de la forma en que se muestra en la Figura 6.30.

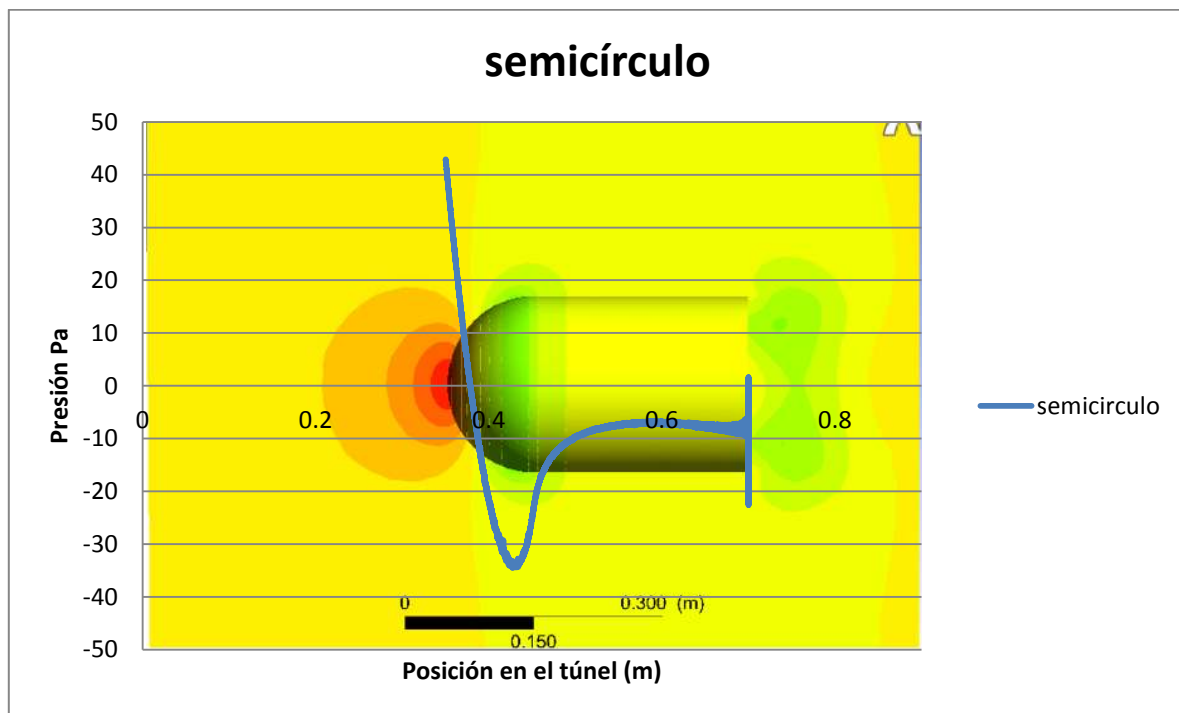


Figura- 6.30: Curva de presiones a través del contorno del HUB

De igual forma se obtuvieron las curvas para los demás perfiles, obteniendo una gráfica que se muestra en la Figura 6.31, todas las curvas son a través del perfil de su correspondiente HUB. Dichas curvas sirven como punto de partida para el diseño de más geometrías.

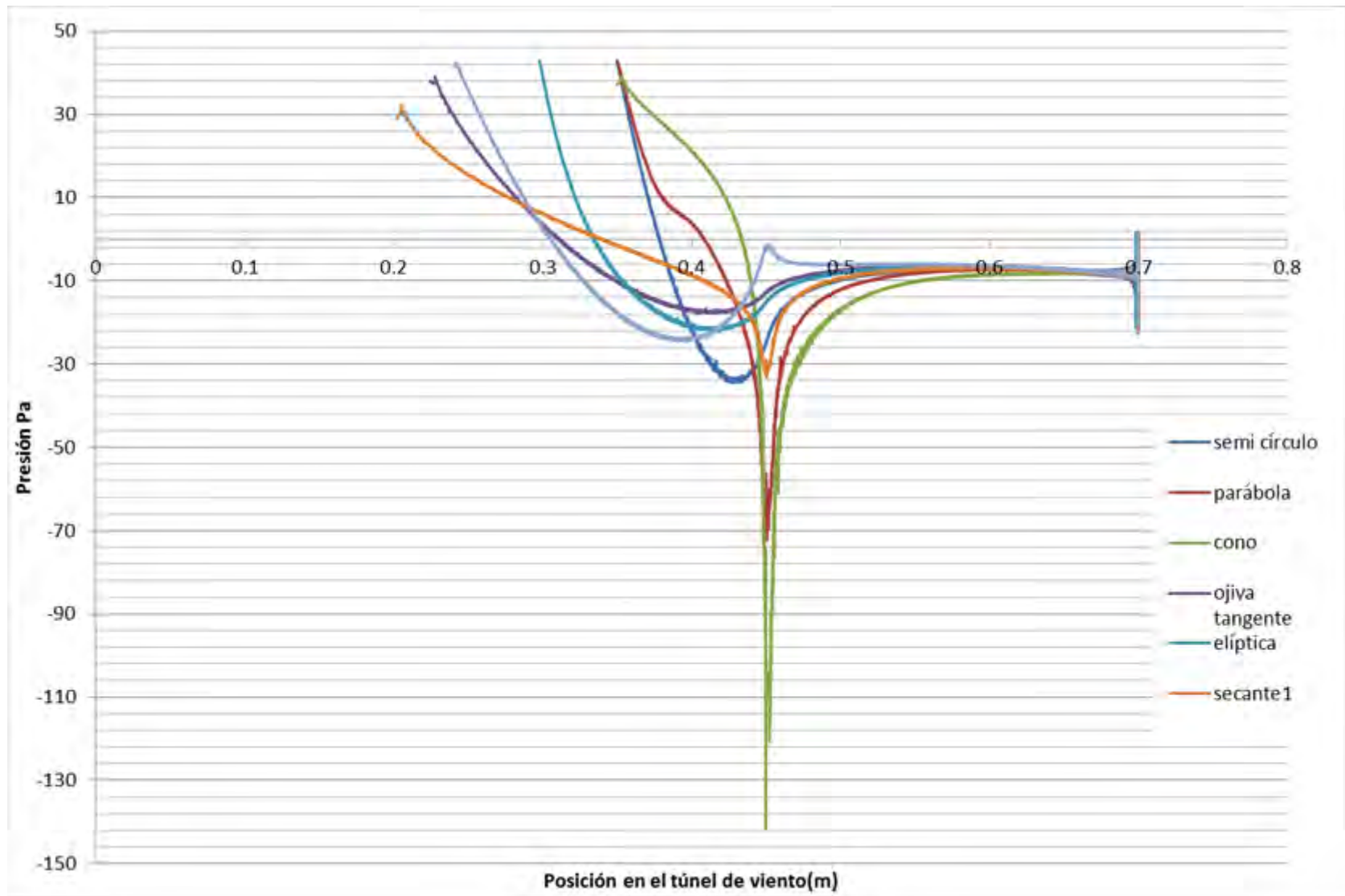


Figura- 6.31: Curvas de presión de los diferentes perfiles de HUB simulados



6.5.1 Selección de las características para el diseño

Tomando en cuenta las diferentes curvas de presión de los perfiles y conociendo que las turbinas eólicas trabajan por medio de una diferencia de presiones en el perfil de sus álabes, se seleccionó la curva que presenta una menor presión en la parte trasera del HUB; correspondiente a la raíz de los álabes, y la curva que conserva la presión en la parte frontal del HUB; para evitar frenar el aire anticipadamente, siendo la del cono y la de la ojiva secante¹, respectivamente.

Así se tomaron las regiones de interés y se unieron ambos perfiles en la parte donde se cruzan ambas curvas de presión.

Como la geometría obtenida tiene una transición de ángulos demasiado pronunciada; lo cual propicia la turbulencia, se optimizó esa región, agregando un arco tangente para reducir el cambio tan brusco, posteriormente se fue modificando ese arco tangente para tratar de optimizar más el comportamiento de presiones, pero esto repercutió en una pérdida significativa en el comportamiento de la presión negativa del perfil [Figura 6.32 y Figura 6.33].

Como la mejor geometría hasta ahora, se seleccionó el perfil S-C2, El cual conserva ambas ventajas de los perfiles secante¹ y cono, sin tener un impacto tan significativo como el perfil S-C1 en la turbulencia (Figura 6.34) y sin tener una disminución tan grande en el pico de presión negativa característico del perfil en forma de cono, como en el caso del perfil S-C2 (Figura 6.33).

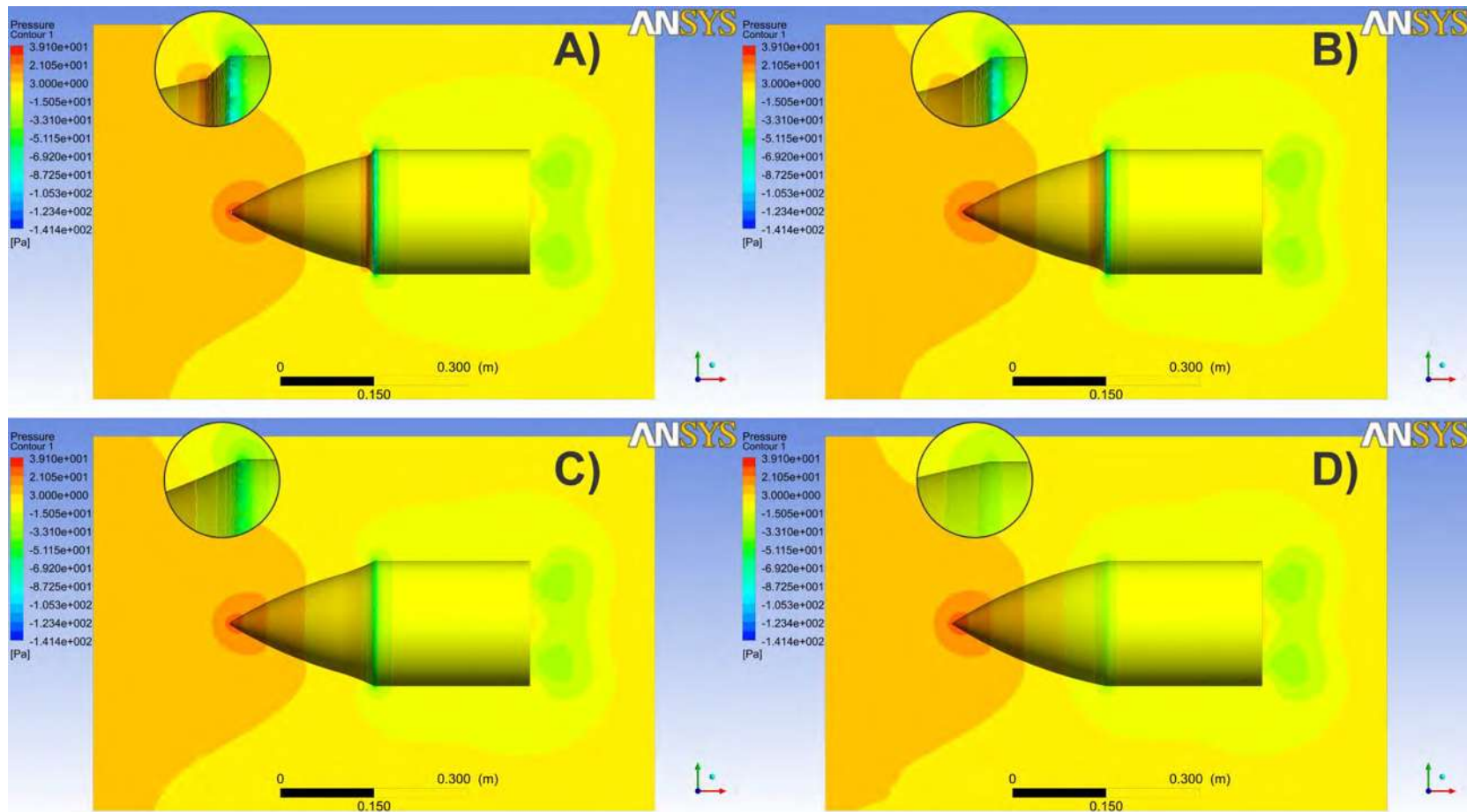


Figura- 6.32: Contornos de presión del perfil con su optimización, comparada con el contorno de presiones de la ojiva secante1. A) Primer propuesta llamada S-C1, B) Primera Optimización llamada S-C2, C) Segunda Optimización llamada S-C3, D) Ojiva secante1.

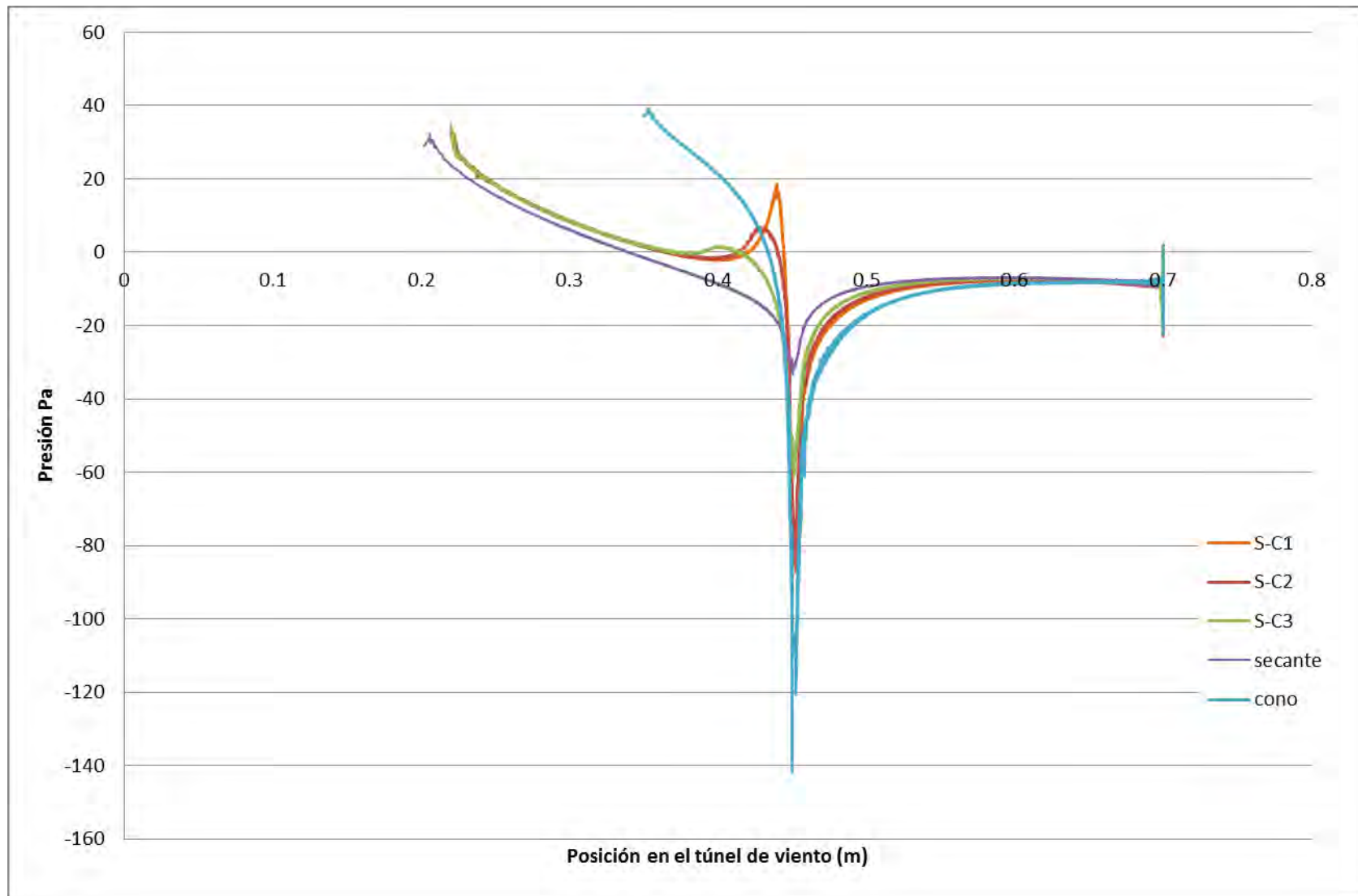


Figura- 6.33: Curvas de presión para las diferentes modificaciones de la propuesta de HUB comparadas con las curvas de la geometría tipo secante y cono.

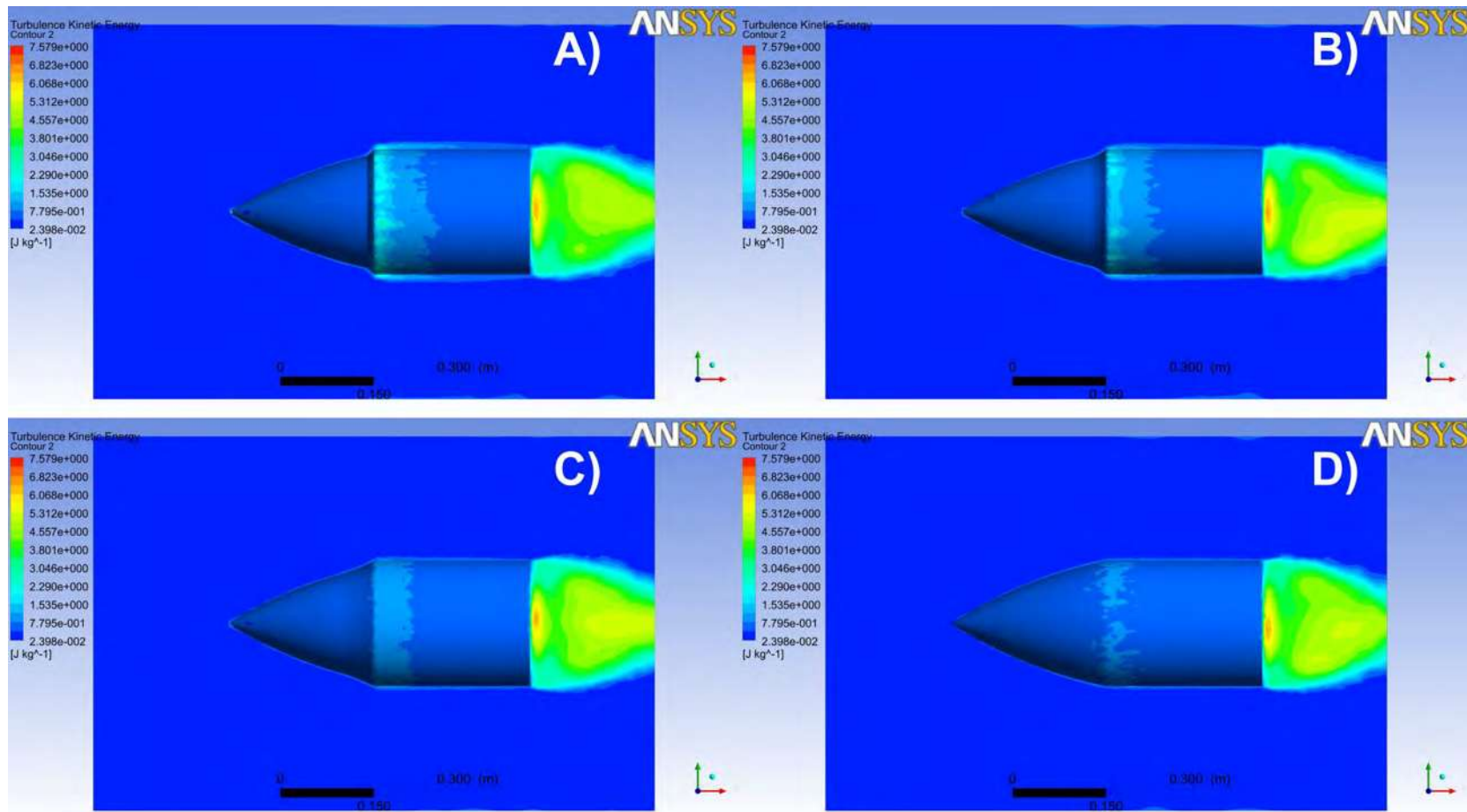


Figura- 6.34: Contorno de energía cinética turbulenta de los perfiles A)S-C1, B)S-C2, C)S-C3 y D)secante1.



6.6 Comparación entre una turbina con HUB semicircular y el HUB S-C2.

Se realizó una comparación entre la propuesta de HUB S-C2 contra uno semicircular, de la misma forma en la que se comparó un HUB plano con uno semicircular con la intención de ver las mejoras que puede tener el cambio de geometría. En esta simulación, se presentaron cambios en las regiones de los contornos tanto de velocidad como de presión. Las simulaciones se corrieron para una velocidad de viento de 12 m/s, siendo la correspondiente a una velocidad de 3.5 m/s aproximadamente, que es la velocidad de arranque.

En la Figura 6.35 y 6.36, se presentan los contornos de presión para dichas geometrías de HUB, en la Figura 6.35 se aprecia una reducción en la región de alta presión que se presenta en el HUB semicircular. En la Figura 6.36 también se aprecia como la región alrededor del HUB se empieza a aislar en el S-C2 en comparación con el semicircular, teniendo las regiones de presión más negativa concentradas sobre los álabes y no sobre el perfil del HUB.

En la Figura 6.37 se presenta el contorno de velocidades entre ambas geometrías de HUB. Se aprecia que con la geometría S-C2 hay un incremento ligero en las regiones de aumento de velocidad por enfrente de los álabes, y que más cerca de la góndola disminuye un poco en la región por detrás de los álabes. Esto puede verse como una oportunidad de usar esa región para la generación de energía, si se considera que en los contornos hay una variación en el diferencial de velocidades como de presión.

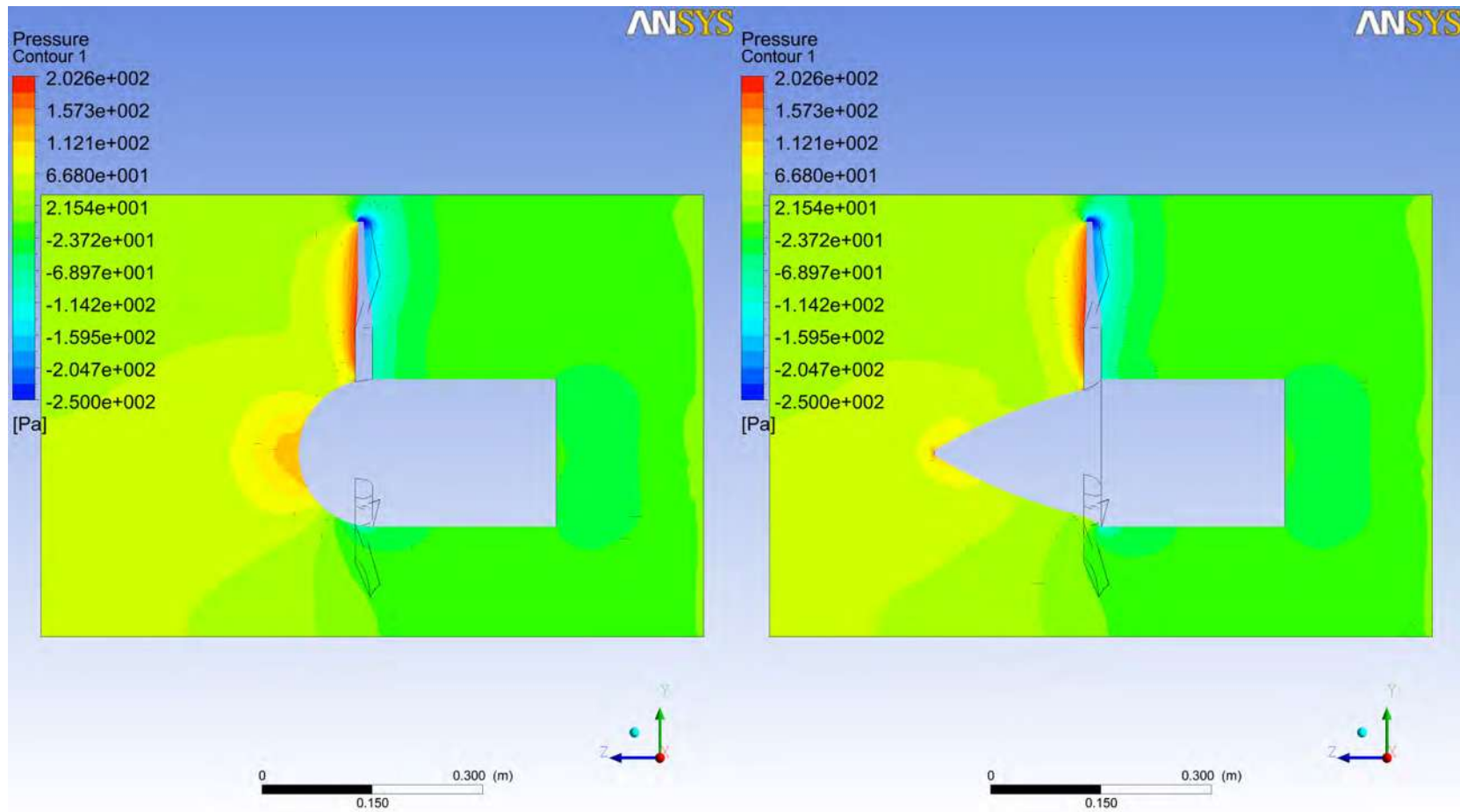


Figura- 6.35: Contorno de presiones de la vista lateral de la comparación entre una turbina con HUB semi circular y con el HUB denominado S-C2.

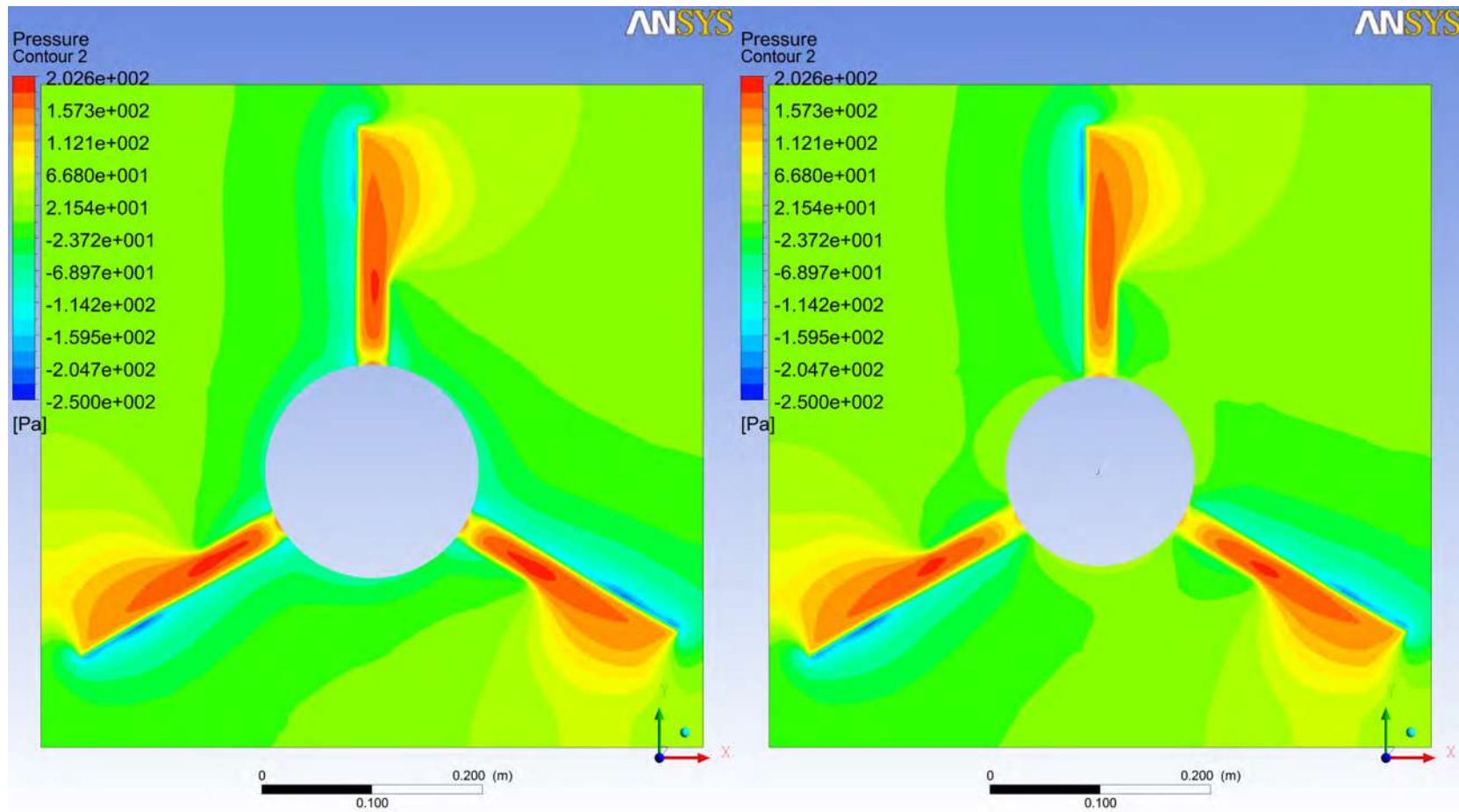


Figura- 6.36: Contorno de presiones de la vista frontal de la comparación entre una turbina con HUB semicircular y con el HUB denominado S-C2; a la izquierda HUB semi circular, a la derecha HUB S-C2.

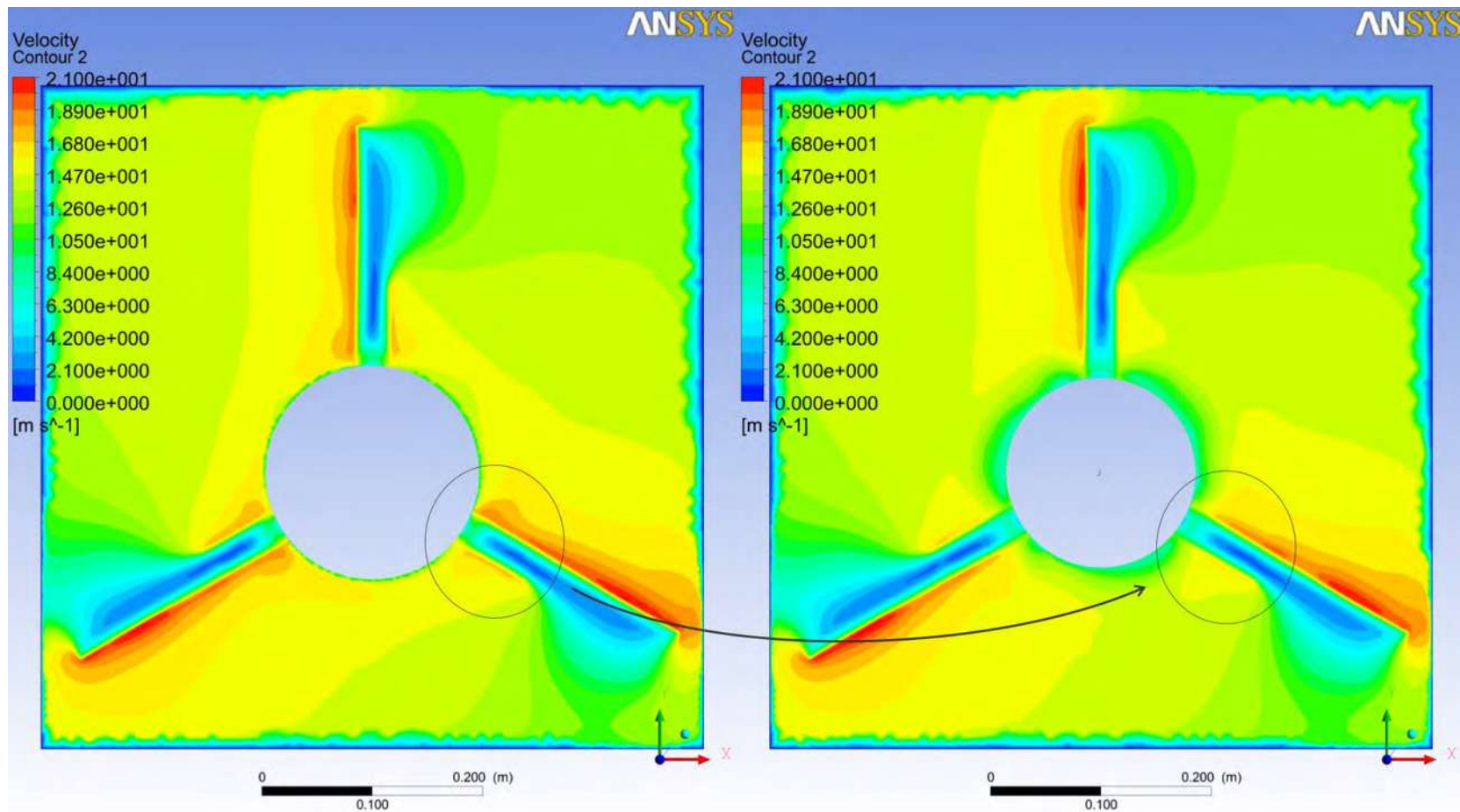



Figura- 6.37: Contorno de velocidades para una turbina con HUB semicircular y con el HUB denominado S-C2; a la izquierda HUB semi circular, a la derecha HUB S-C2.



6.6.1 Comparación con una turbina con modificación de la posición de la raíz, utilizando el perfil S-C2 para el HUB.

Tratando de aprovechar las variaciones presentes en los contornos de velocidad y presión que se presentan al colocar un HUB, con un perfil como el S-C2, se decidió modificar la disposición de los álabes con respecto al HUB, reduciendo la distancia que separa a la raíz de los álabes con respecto a el HUB y la góndola, desplazando los álabes 10 cm más cerca del HUB (Figura 7.41 Anexo 6).

En las Figuras 6.38 y 6.39, se presentan los contornos de presión y velocidad respectivamente, en ellos se aprecia un cambio significativo en la distribución de las áreas de cada uno. En la Figura 6.39, aun cuando los álabes son más largos se aprecia un aumento de velocidad en la misma zona del álabe, descartando que se deba al perfil involucrado y dejando como resultado que es por la posición relativa en la que se encuentran.

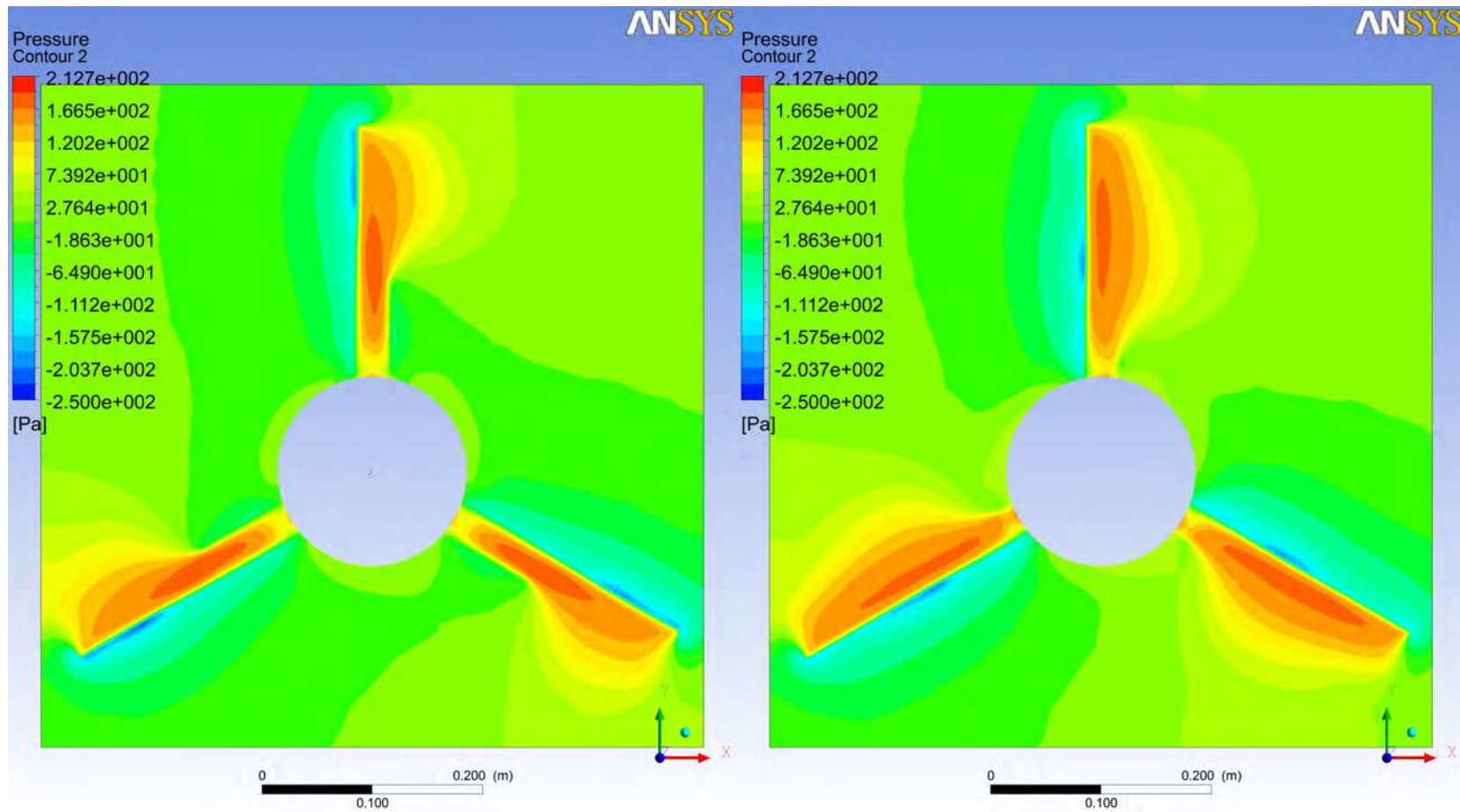


Figura- 6.38: Contorno de presiones entre una turbina con modificación de la longitud de separación de los álabes con respecto a el HUB y la góndola (derecha) contra una turbina con la posición típica de los álabes (izquierda), ambas usando el perfil de HUB S-C2.

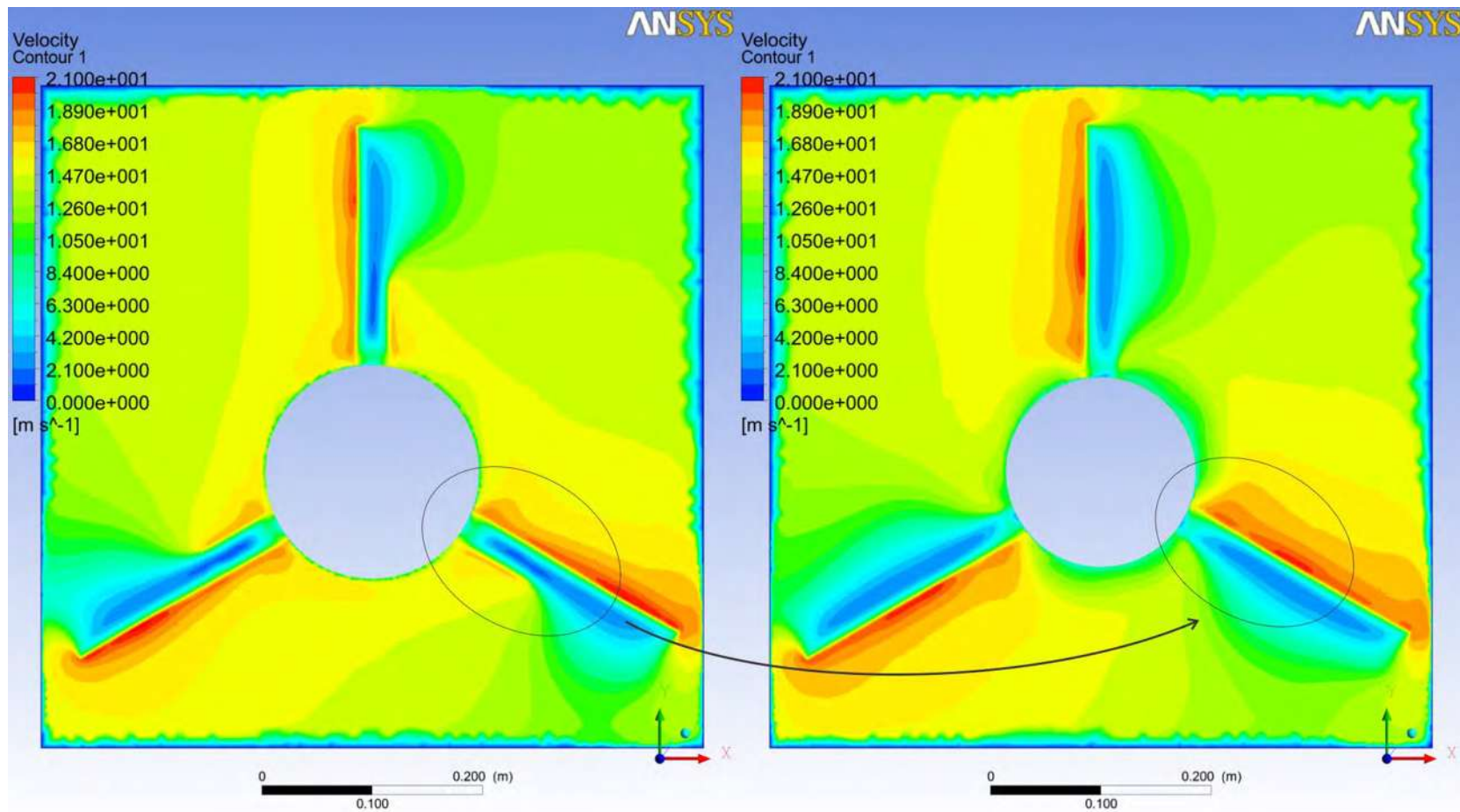


Figura- 6.39: Contorno de velocidades entre una turbina con modificación de la longitud de separación de los álabes con respecto a el HUB y la góndola (derecha) contra una turbina con la posición típica de los álabes (izquierda), ambas usando el perfil de HUB S-C2

6.7 Pruebas realizadas en un aerogenerador.

Las pruebas realizadas fueron sobre un aerogenerador comercial de 900W de potencia nominal, el cual se trabajó sobre velocidades de viento desde 2 m/s hasta los 15 m/s, siendo esta última la velocidad nominal para la mayoría de los aerogeneradores comerciales de baja capacidad.

Se probó primeramente el aerogenerador con el HUB aerodinámico con el que viene de fábrica, posteriormente se cambió éste por nuestra propuesta manufacturada y también se realizaron pruebas del mismo tipo sin tener un HUB aerodinámico. (Figura 7.42 Anexo 6).

6.7.1 Manufactura del HUB S-C2

El HUB se manufacturó tomando los modelos 3D utilizados en ANSYS, después se generó el código G para ser enviado a una moldeadora de plástico por extrusión. El croquis para la creación del perfil se muestra en la Figura 6.40, así como su modelo renderizado.

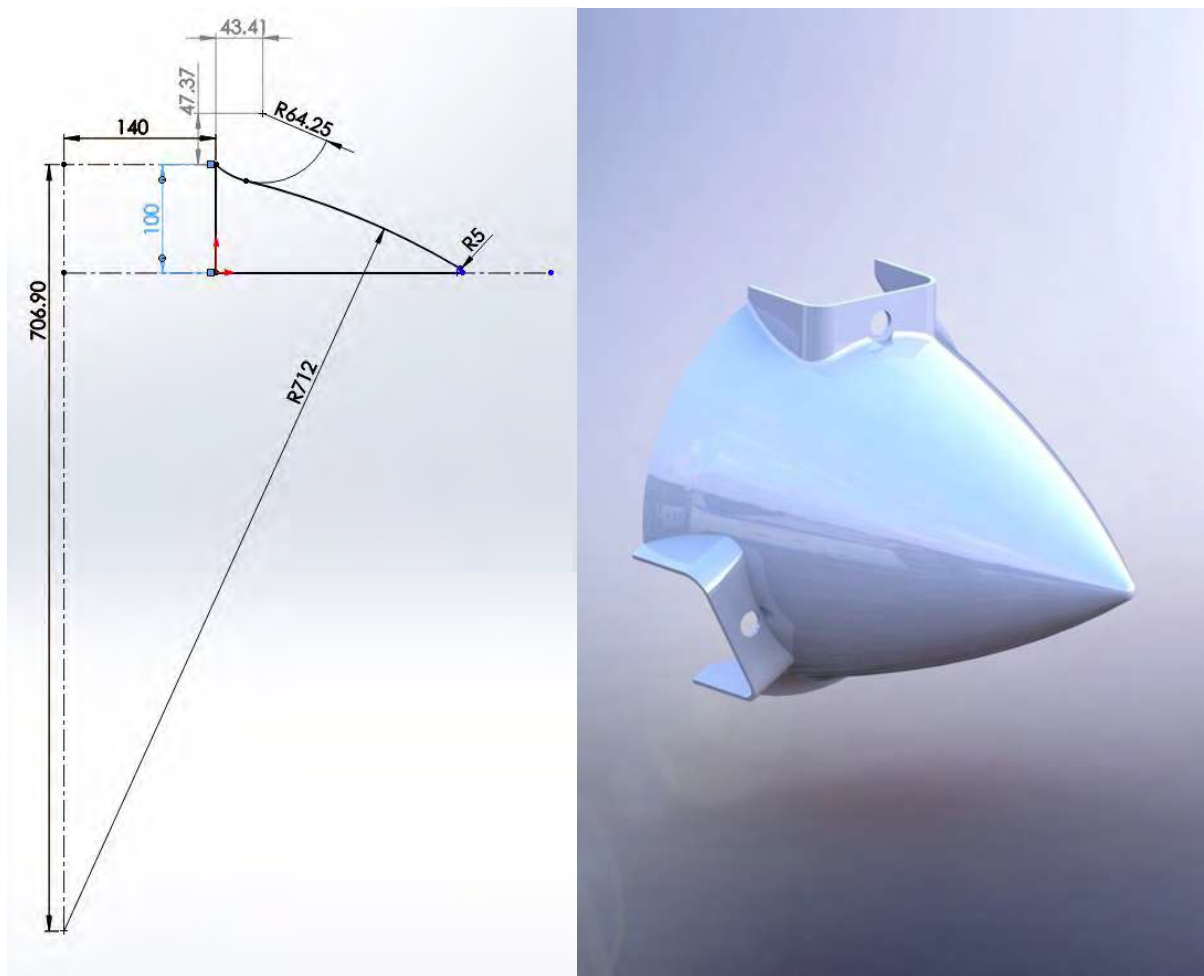


Figura- 6.40: Croquis del perfil S-C2, unidades en mm y vista renderizada del mismo.

6.7.2 Resultados obtenidos de la experimentación

Los resultados obtenidos de la experimentación sobre el aerogenerador físico se presentan en la Tabla 6.5. En la cual se muestran para las diferentes velocidades de viento, la frecuencia generada de línea a línea del generador eléctrico de tipo “brushless” de imanes permanentes, de la turbina de viento. Se tomó esta medición para tener un valor más exacto que el que se obtendría midiendo las rpm a las que gira la máquina. Si se desea obtener las rpm para éste tipo de generador sólo hay que utilizar la Ecuación 6.1

$$rpm = \frac{120 * f}{P} \quad (6.1)$$

Donde f es la frecuencia eléctrica y P el número de polos del generador.

Tabla 6.7: Frecuencia Generada en el generador eléctrico para los 3 casos de configuración del aerogenerador, con nuestra propuesta de perfil, el perfil de fábrica y el caso en el que no se le ponga un perfil aerodinámico. * no había arrancado la máquina eólica.**

velocidad de viento (m/s)	Frecuencia generada (Hz)		
	propuesta	original	sin hub
4.105	2.2	***	***
4.377	2.7	***	***
4.576	No se midió	2.8	***
4.989	No se midió	No se midió	3
5	3.5	3.4	3.1
6	4.8	4.5	4.3
7	5.6	5.5	5.4
8	7.2	7	6.8
9	8.3	8	7.8
10	9.5	9.2	9.2
11	12.2	12.1	11.8
12	14.5	14.1	13.7
14	16	15.7	15.3
15	18.1	17.8	17.3

La Figura 6.41 muestra las curvas que se obtienen de graficar los datos de la Tabla 6-5. De estos datos se aprecia que la propuesta de perfil llamada S-C2, propicia que el aerogenerador arranque a una velocidad de viento de 4.105 m/s, siendo 0.471 m/s antes que el perfil de HUB con el que venía de fábrica la turbina, el cual hizo girar la turbina con 4.576 m/s. A su vez, comparando el perfil S-C2 contra el caso en el que no se utiliza ningún HUB aerodinámico, la turbina con la propuesta de perfil empezó a girar a una velocidad de viento 0.884 m/s antes.

También en la Figura 6.41, la curva perteneciente al perfil S-C2 se mantiene por encima de la curva del perfil original de la turbina y este a su vez del caso en el que no se use ningún perfil, dichas curvas son para la frecuencia de generación del generador eléctrico. Las cuales dependen de las revoluciones a las que gire el rotor de éste, por lo tanto el perfil S-C2, hace girar a la turbina un poco más rápido que las otras configuraciones.

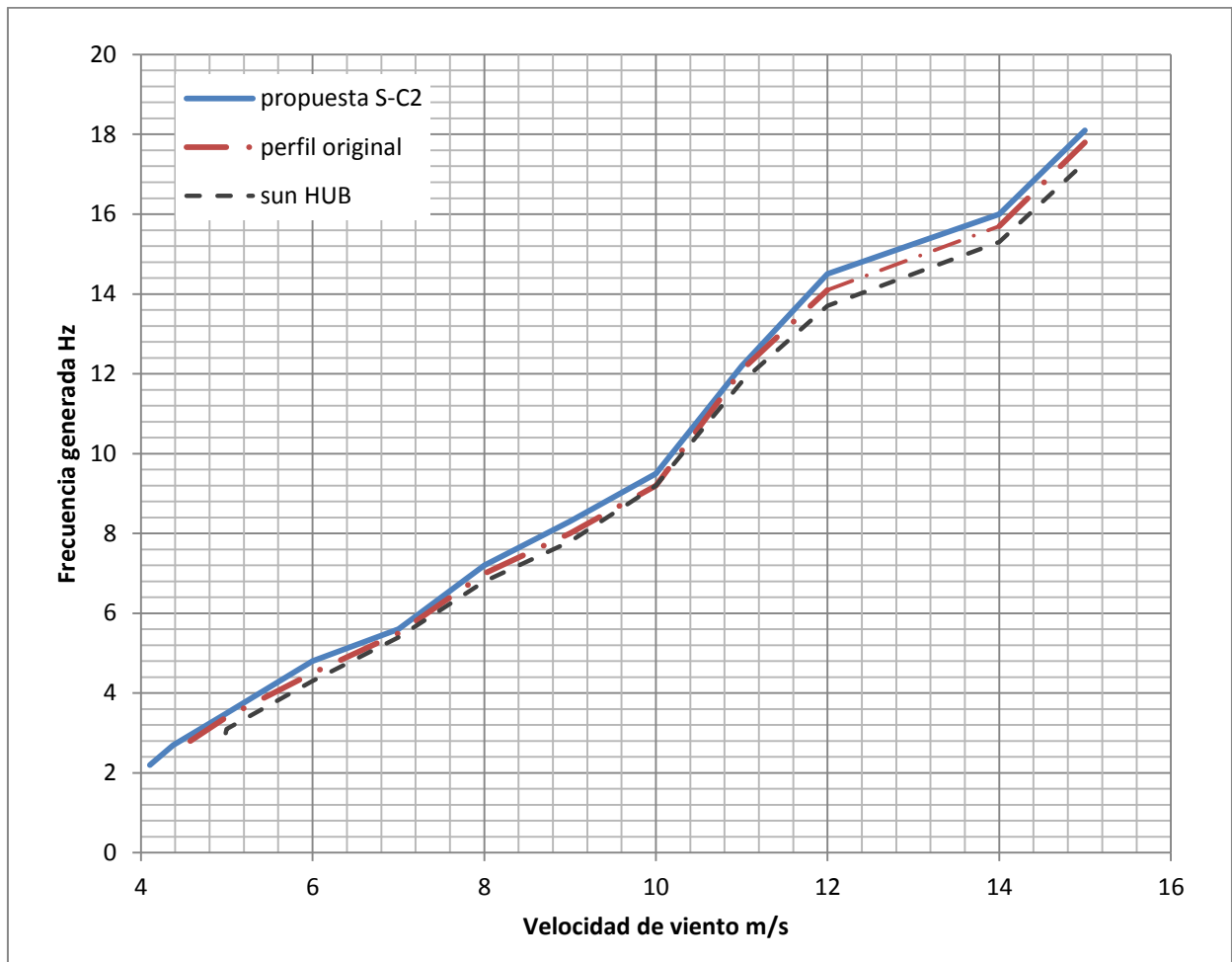


Figura- 6.41: Curvas del comportamiento para las diferentes geometrías de HUB. En la cual se aprecia como el perfil S-C2 hace que el aerogenerador empiece a girar antes que con el perfil original o sin él.

Capítulo 7 Conclusiones

Por medio de este trabajo se puede concluir, que es posible diseñar y optimizar una geometría para el HUB por medio de curvas de presiones de perfiles aerodinámicos.

Se cumplieron con los objetivos, los cuales eran diseñar y optimizar el perfil aerodinámico del HUB de una turbina de viento de baja capacidad. Propuesta de perfiles aerodinámicos conformada por: los perfiles con forma de semicírculo, elíptica, parábola, cono, ojiva tangente, ojiva secante1 y ojiva secante2, y también la propuesta de una combinación de dos perfiles, siendo los llamados S-C1 y sus variaciones S-C2 y S-C3, optimizadas por medio de contornos de presión y análisis de simulaciones.

En los resultados obtenidos de la experimentación sobre el aerogenerador con la propuesta de perfil, se observó un incremento en la velocidad del giro de la turbina eólica para la misma velocidad de viento, el cual se ve reflejado en la frecuencia de salida del generador eléctrico de la turbina eólica y a su vez en la potencia eléctrica generada.

Al confirmar que la turbina empieza a girar a una velocidad de viento 0.471 m/s antes que con el perfil de fábrica, ó 0.884 m/s antes que si no se le pusiera algún tipo de perfil, se puede considerar como un aumento en la generación de potencia eléctrica que no se tenía antes, aun cuando pudiera ser pequeño.

Del análisis entre una turbina con HUB plano y una turbina con HUB semicircular, se puede concluir que el tener una geometría más aerodinámica tiene una influencia significativa en la distribución de presiones sobre los álabes, ya que se desvía de mejor forma el flujo del viento de la parte central hacia las palas.

A su vez, no debería de dejarse sin analizar el HUB de forma aerodinámica y seleccionar una geometría al azar, ya que en las máquinas siempre se busca el máximo rendimiento, y para lograrlo se deben involucrar todas sus partes en el diseño.

De las pruebas experimentales dentro del túnel de viento, se puede apreciar que las líneas de corriente se empiezan a curvar desde el momento en que pasan por el perfil aerodinámico y se extienden por sobre toda la raíz del álabe. Pudiendo considerar una relación entre el tamaño y largo del HUB, y su influencia sobre la longitud de los álabes.

Así, al tener nuestra propuesta de perfil S-C2 en comparación con el semicircular ya sobre una turbina de viento simulada, se observa que aun cuando

las aportaciones son relativamente pequeñas, estas existen y si se busca la máxima eficiencia deben de tomarse en cuenta.

El proponer un perfil permite modificar las presiones y velocidades que se ejercen sobre él por el viento, de la forma deseada y que sea más conveniente. Cosa que se hace notar a la hora de reposicionar los álabes más cerca del HUB, ya que como habíamos mencionado, hay una zona donde tiene influencia la geometría de éste.

El perfil S-C2 está diseñado de forma tal que en la zona inmediata donde se pasa del HUB a la góndola se presente una presión menor que la que está por delante de la góndola (Figura 6.32). Ésta es la región en la que van montados los álabes. En la Figura 6.35 se aprecia en la parte frontal del álabe una mayor presión y en la trasera una menor presión la cual debería ayudar a los efectos de sustentación de los álabes. Concluyendo en que toda esa región también debe ser tomada en cuenta para el diseño de turbinas de viento, integrando el HUB, góndola y álabes como un todo.



Trabajo futuros

Seguir experimentando con las curvas de presión de los perfiles para aumentar la lista de propuestas de HUB.

Proponer un modelo matemático para obtener una geometría a partir de una curva de presión determinada.

Considerar un análisis del HUB incluyendo la góndola e integrando los álabes en el diseño, como una sola unidad.

Proponer un HUB variante en el tiempo, que adapte su geometría a las velocidades de viento.

Realizar mediciones del Par producido por diferentes geometrías de HUB a diferentes velocidades, para determinar el aporte real de cada geometría.

Instrumentación del túnel de viento, para facilitar la experimentación, con sensores de presión diferencial, temperatura, humedad relativa, tacómetros y multímetros, que grafiquen en tiempo real lo que está pasando en la experimentación.

Considerar el efecto que tiene el HUB a la hora de diseñar álabes con la teoría BEM y proponer una corrección al factor de inducción axial.



Acciones de difusión

- ISES Solar World Congress 2013.
- 5° Encuentro Regional de Energías Renovables 2013.
- Congreso estatal de Ciencia y Tecnología 2013.
- XXXVIII SNES ANES - XI CONGRESO IBEROAMERICANO.
- 5° Concurso proyectos académicos ANSYS 2015.



Bibliografía

- [1] Agüera-Pérez, J. C. Palomares-Salas, J. J. González de la Rosa, J. G. Ramiro-Leo, and A. Moreno-Muñoz, "Basic meteorological stations as wind data source: A mesoscalar test," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 107–108, pp. 48–56, 2012.
- [2] http://4.bp.blogspot.com/-we5pUrohZQo/UTOHIXcnGOI/AAAAAAAAAGg/6nt4r_IOBD4/s1600/capasatmo.jpg
- [3] <http://soloenergia.com.ar/aprendamas/energiaeolica/images/eolica015.gif>
- [4] D. LEGOURIÉRÉS, *Energía eólica, Teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones*; Masson, S.A., 1983
- [5] Manwell, J.F., McGowan J.G. and Rogers A.L. , *Wind Energy Explained; Theory, Design and Application*; *University of Massachusetts, Amherst, USA*; JOHN WILEY & SONS, LTD
- [6] Escudero López, J.M., *Manual de energía eólica*; 2ª edición corregida
- [7] *Renewables 2013: Global Status Report*, 2014
- [8] Flores Galindo, Diego Rodrigo. *Diseño de perfiles aerodinámicos*. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Ticoman. Tesis. Mexico D.F., 2006.
- [9] Gordillo Arias de Saavedra, José Manuel. *Introducción a la Aerodinámica Potencial*. Ed. Paraninfo 2012.
- [10] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. John Wiley and Sons, 2001.
- [11] Blocken, "50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 129, pp. 69–102, 2014.



- [12] J. Johansen, H. A. Madsen, N. N. Sørensen and C. Bak, Numerical Investigation of a Wind Turbine Rotor with an aerodynamically redesigned hub-region. Wind Energy Dept. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2007
- [13] F. Wang, L. Bai, J. Fletcher, J. Whiteford, D. Cullen (2008), Development of small domestic wind turbine with scoop and prediction of its annual power output, *Renewable Energy*, Volume 33, Issue 7, July, Pages 1637-1651, ISSN 0960-1481.
- [14] GOMEZ-RIVERA, William; APERADOR-CHAPARRO, William and DELGADO-TOBON, Emilio(2011). Rotor Development for a Small Wind Turbine (200 watts) through Local Technology Implementation. *Ing. Univ.*, vol.15, n.2, pp. 303-318 . ISSN 0123-2126.
- [15] P.R. Ebert , D.H. Wood (2001); The near wake of a model horizontal-axis wind Turbine Part 3: properties of the tip and hub vortices; *Renewable Energy* 22 (2001) 461–472.
- [16] Z. Simic, J. G. Havelka, and M. Bozicevic Vrhovcak, “Small wind turbines - A unique segment of the wind power market,” *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 1027–1036, 2013.
- [17] R. Ramponi and B. Blocken, “CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters,” *Build. Environ.*, vol. 53, pp. 34–48, 2012.
- [18] B. Blocken and C. Gualtieri, “Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 33, pp. 1–22, 2012.
- [19] B. Blocken, “50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 129, pp. 69–102, 2014.
- [20] N. J. Mulvany, L. Chen, J. Y. Tu, and B. Anderson, “Steady-State Evaluation of ' Two-Equation ' RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) Turbulence Models for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations.”

- [21] Gaona Hernandez , Fredy. Diseño y construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia. UMSNH. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Tesis. Morelia, Mich. 2010.
- [22] Gomez Urieta, Erick Yuvaniel. Diseño y manufactura del HUB y álabes de una turbina de viento. UMSNH. Facultad de Ingeniería Mecánica, Tesis. Morelia, Mich.2011.



Anexos

A.1 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 8m/s

Todos los ejes X corresponden a la posición en el túnel de viento en metros, y el eje Y corresponde a la presión en Pa.

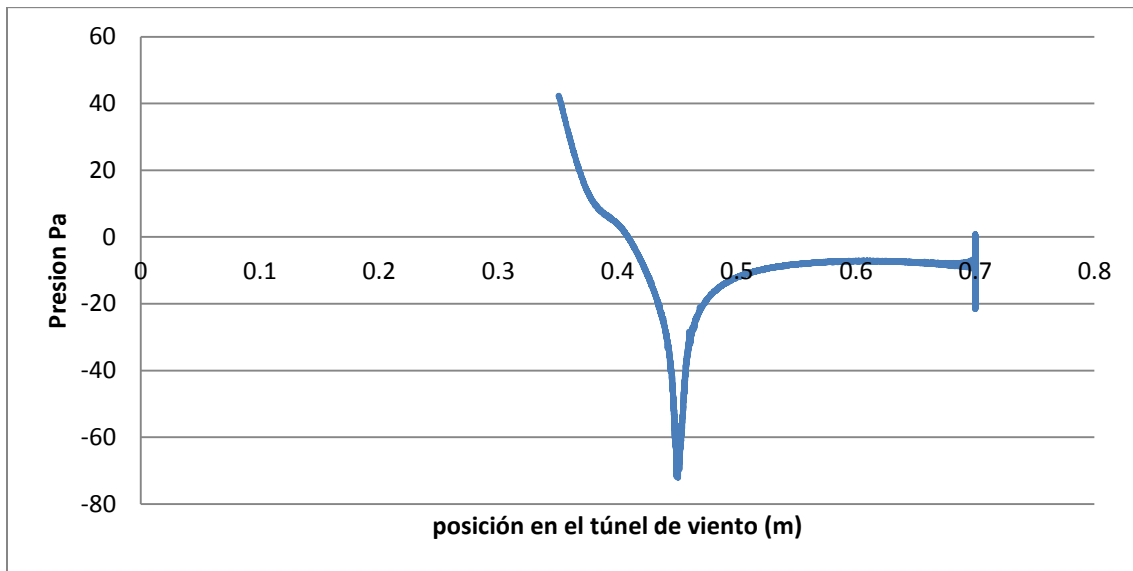


Figura- 7.1: Parábola

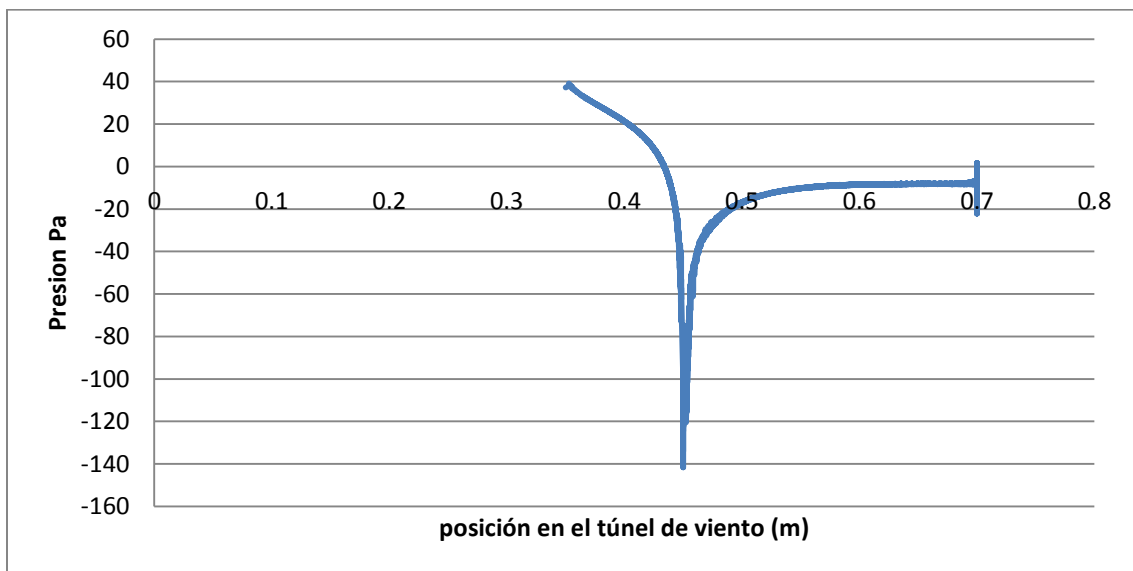


Figura- 7.2: Cono

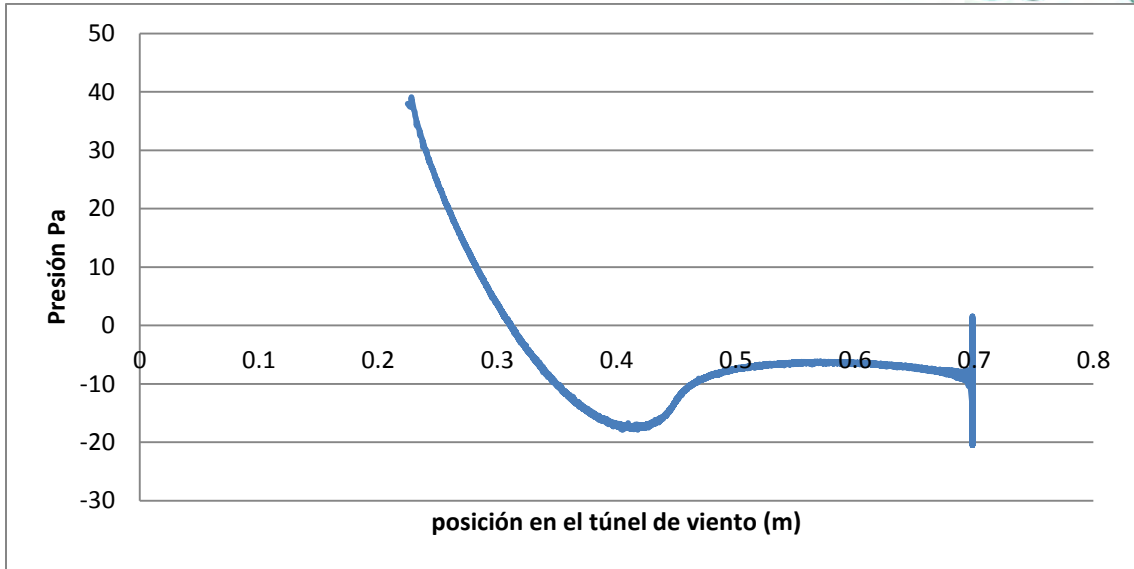


Figura- 7.3: Ojiva tangente

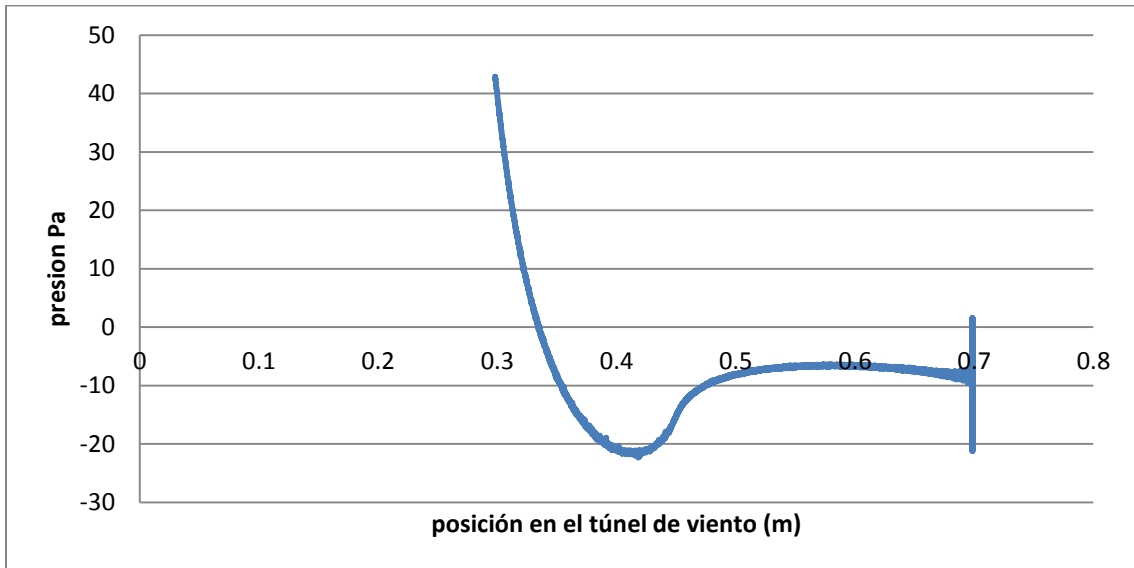


Figura- 7.4: Elíptica

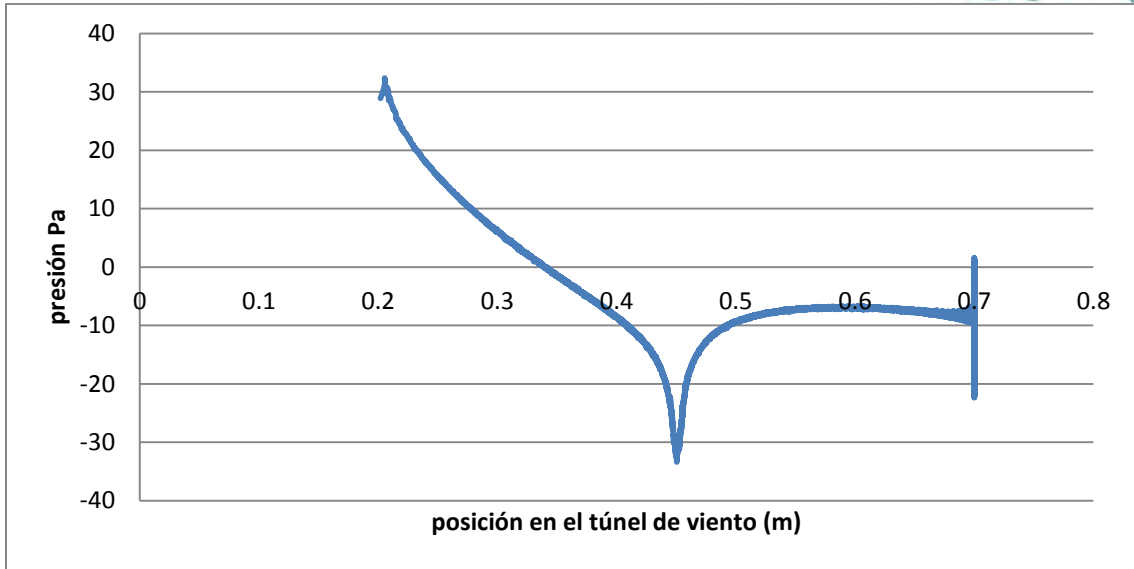


Figura- 7.5: Ojiva secante 1

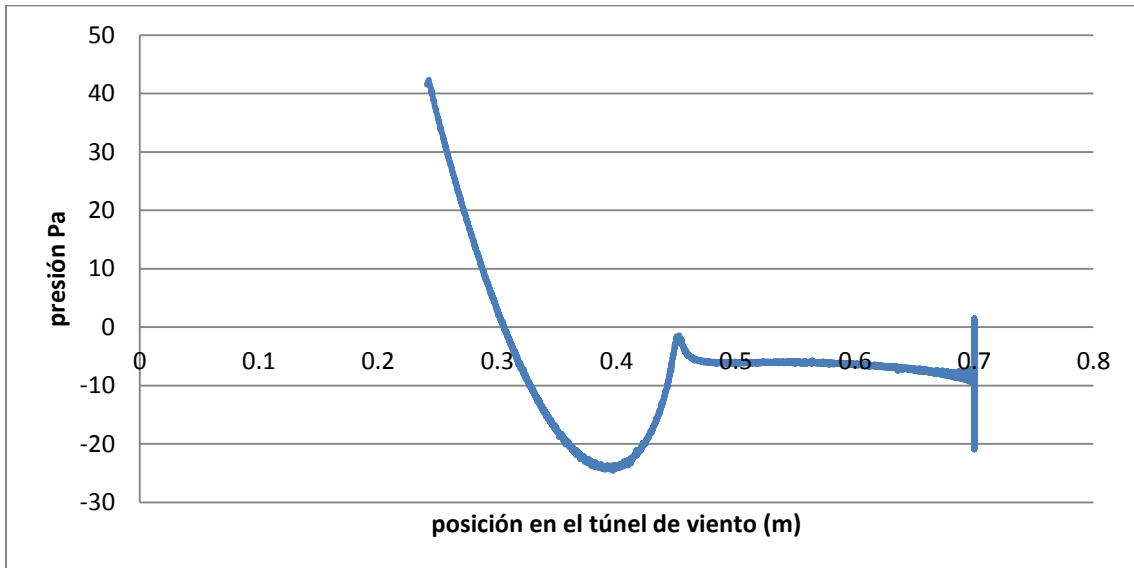


Figura- 7.6: Ojiva secante 2

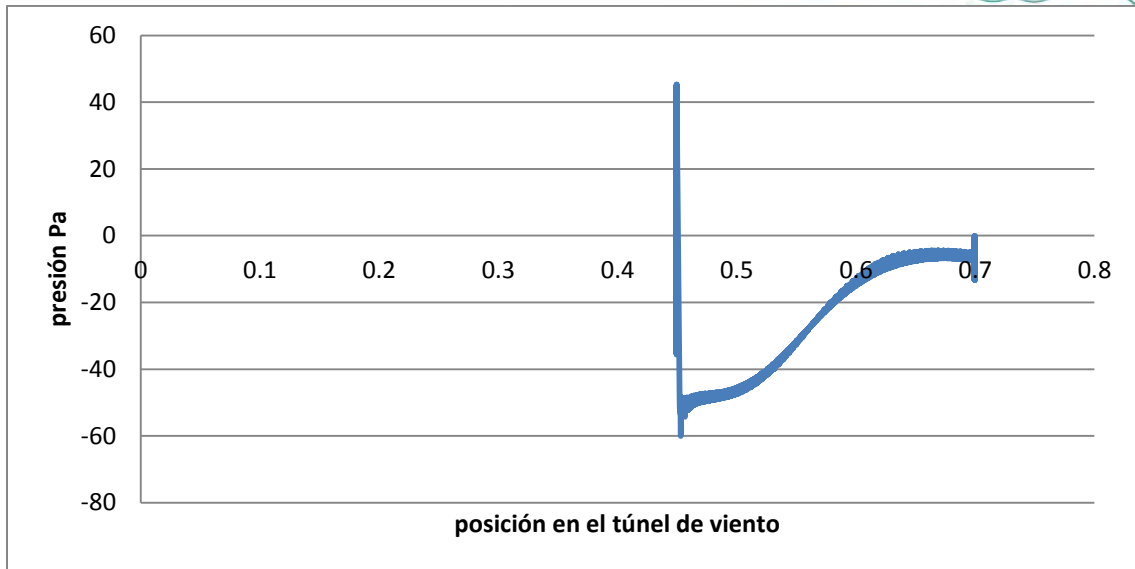


Figura- 7.7: Plano

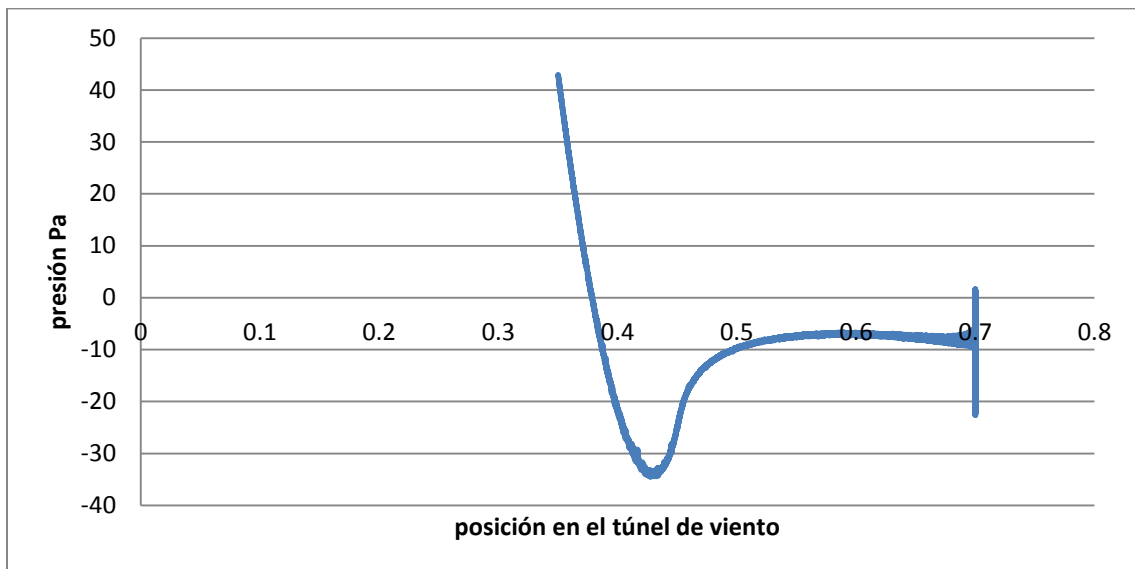


Figura- 7.8: Semicírculo



A.2 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 10.6 m/s

Todos los ejes X corresponden a la posición en el túnel de viento en metros, y el eje Y corresponde a la presión en Pa.

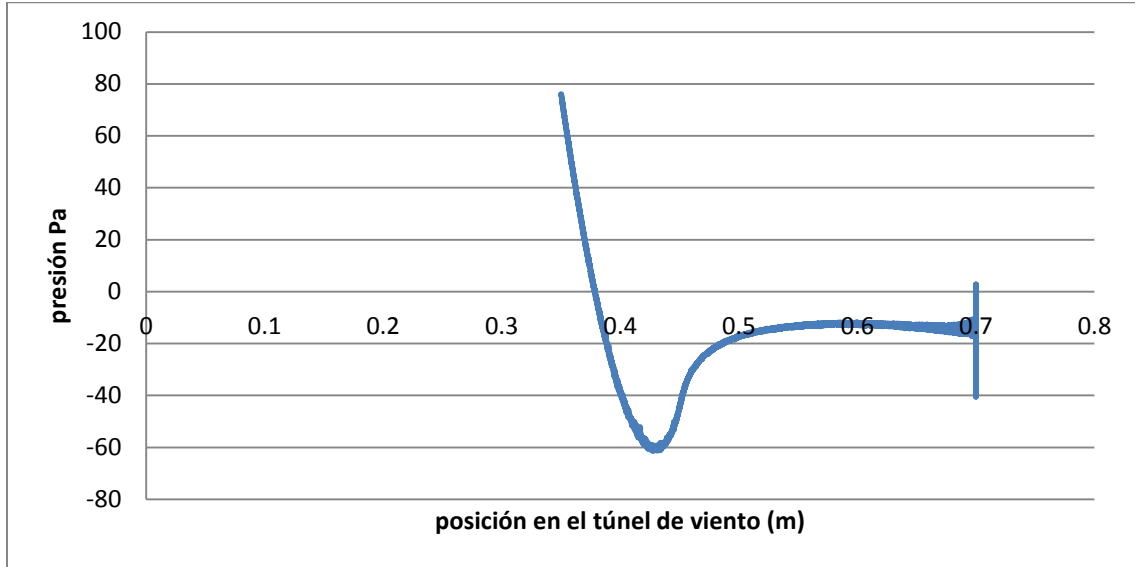


Figura- 7.9: Semicírculo

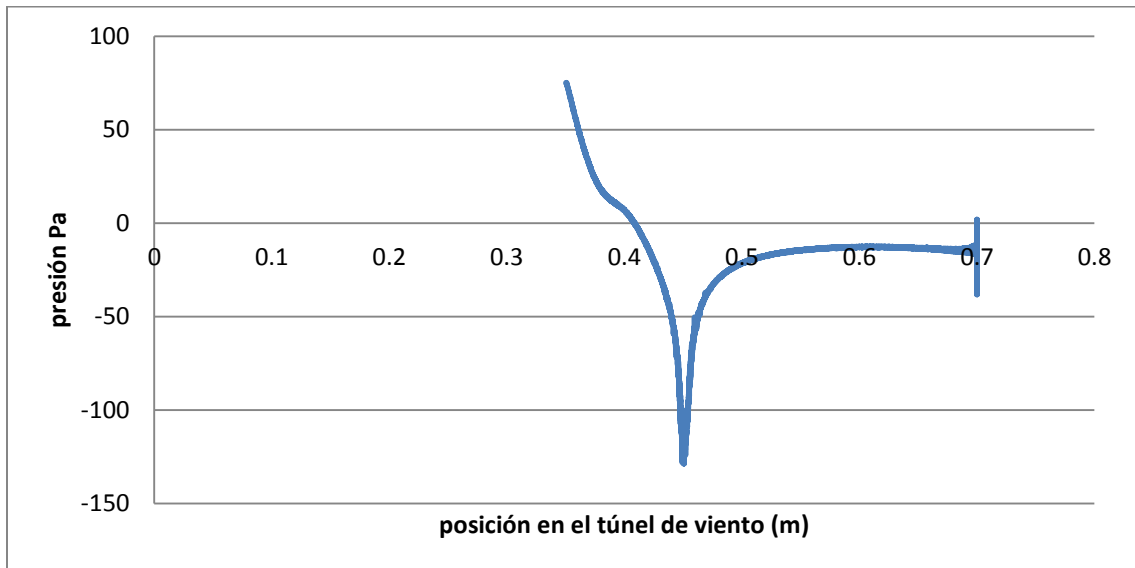


Figura- 7.10: Parábola

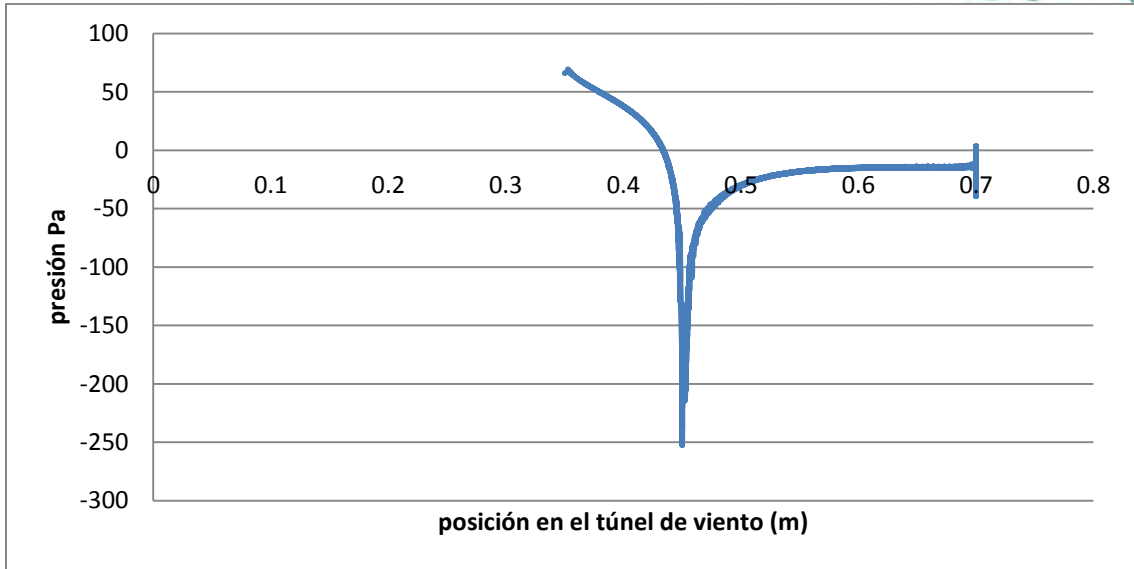


Figura- 7.11: Cono

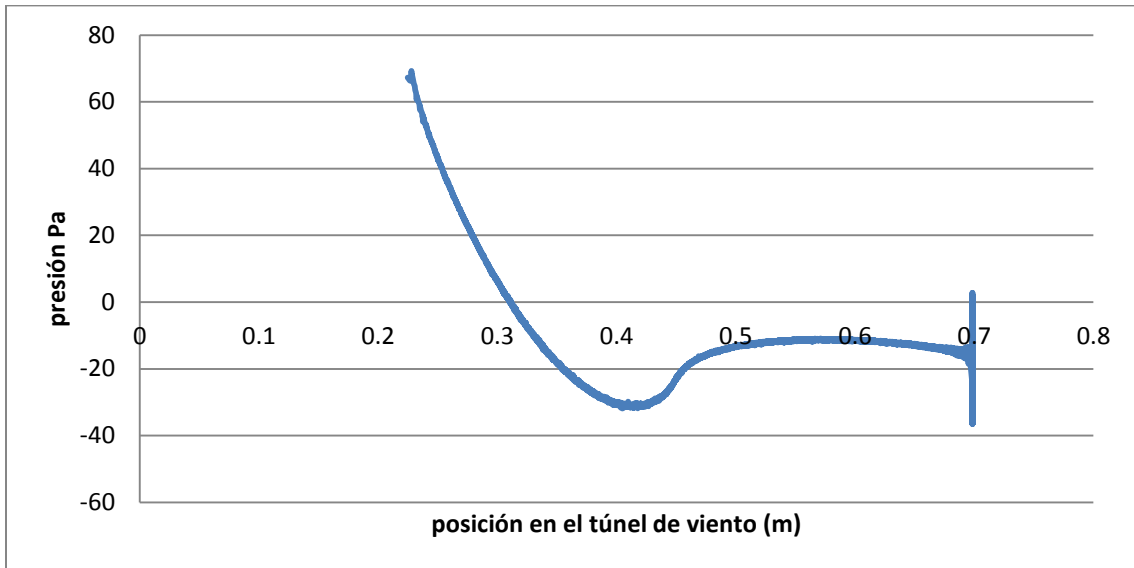


Figura- 7.12: Ojiva tangente

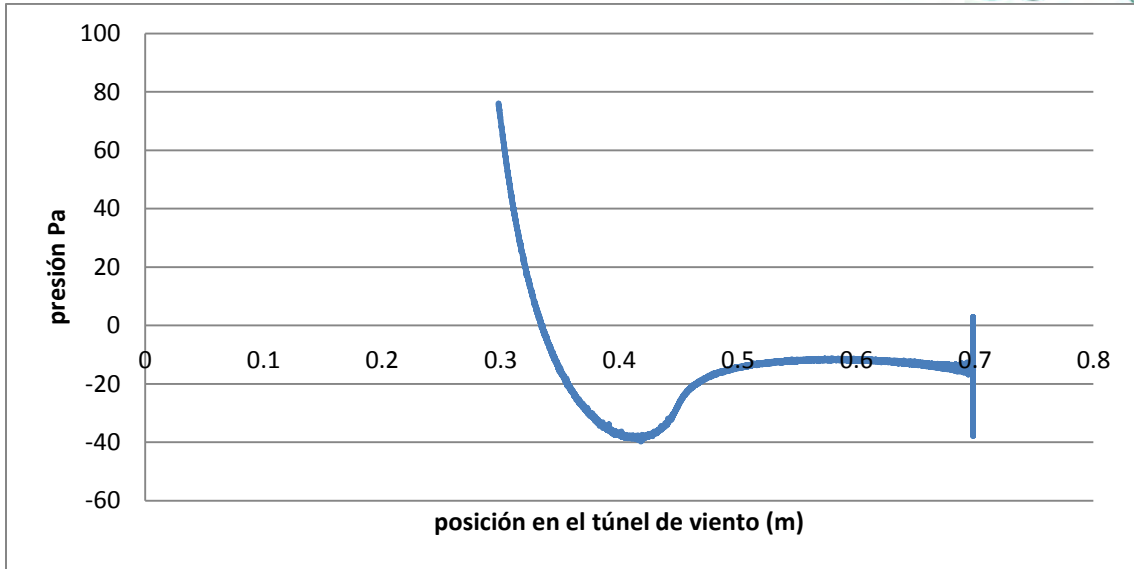


Figura- 7.13: Elíptica

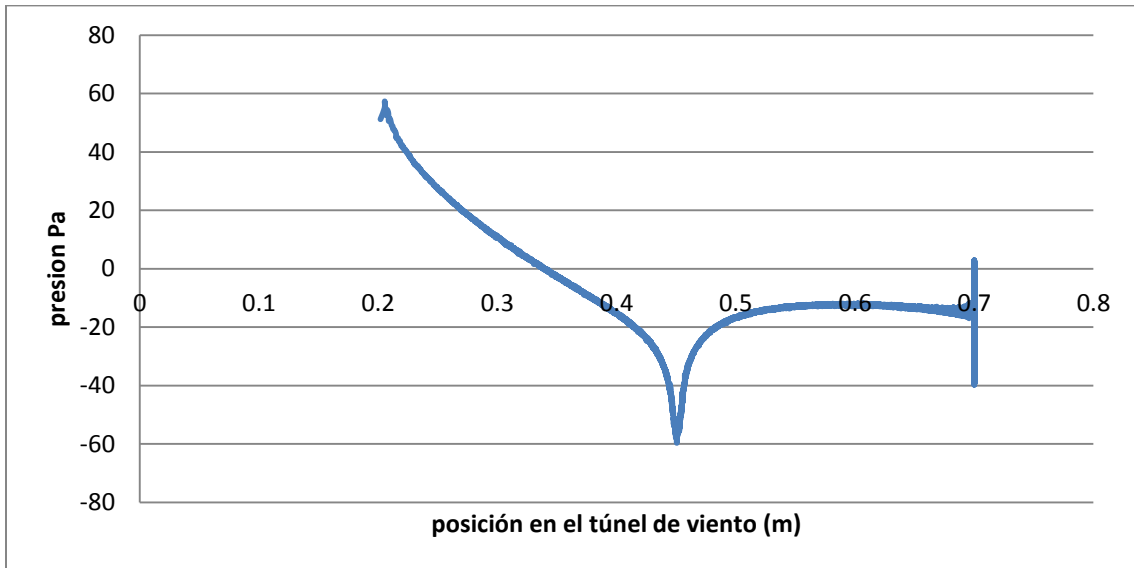


Figura- 7.14: Secante 1

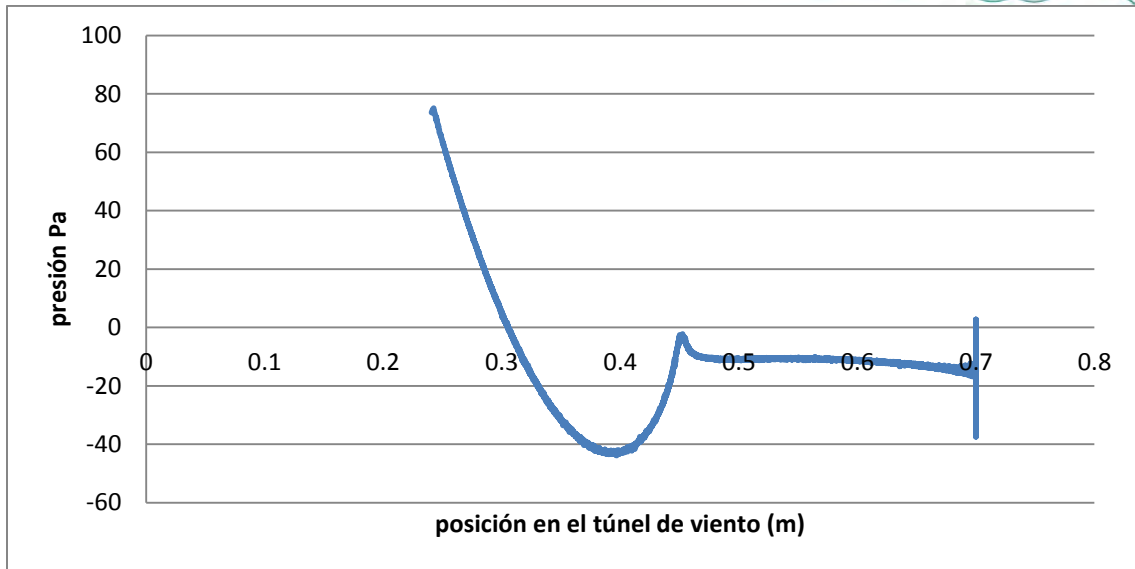


Figura- 7.15: Secante 2

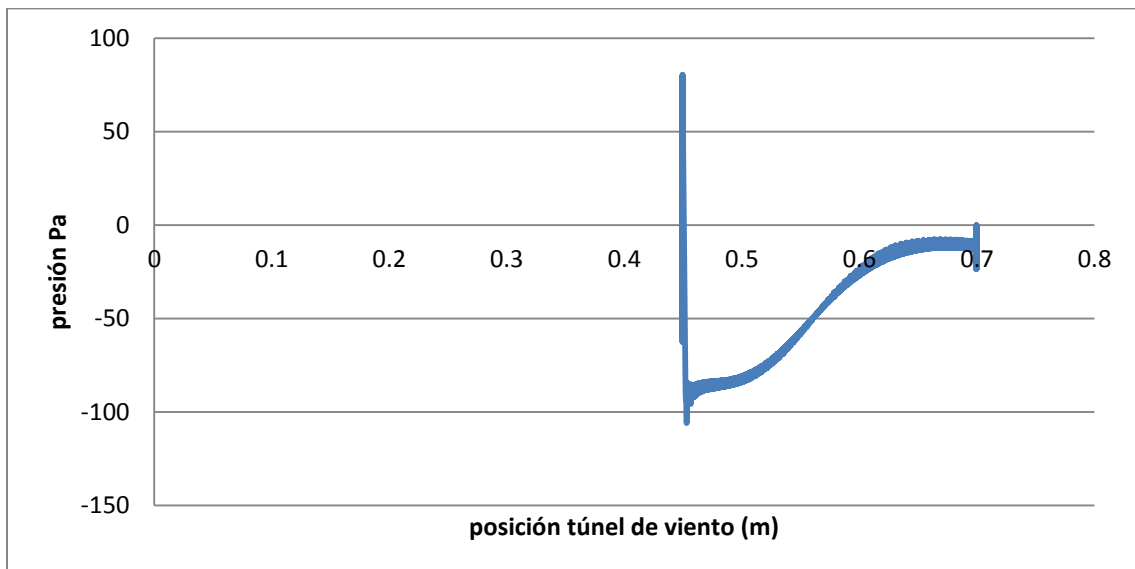


Figura- 7.16: Plano



A.3 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 13.3 m/s

Todos los ejes X corresponden a la posición en el túnel de viento en metros, y el eje Y corresponde a la presión en Pa.

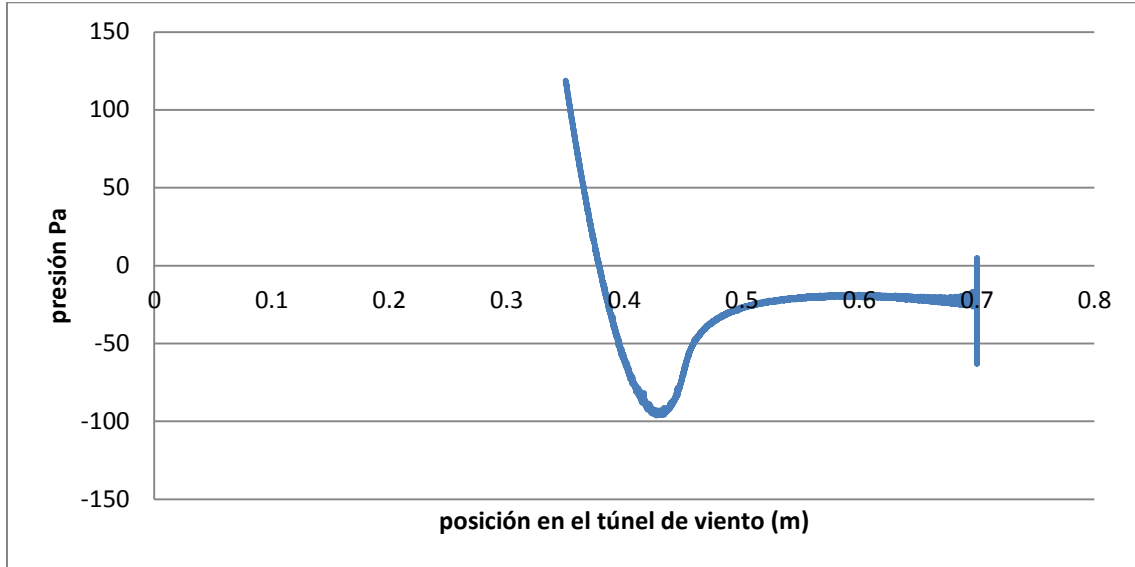


Figura- 7.17: Semicírculo

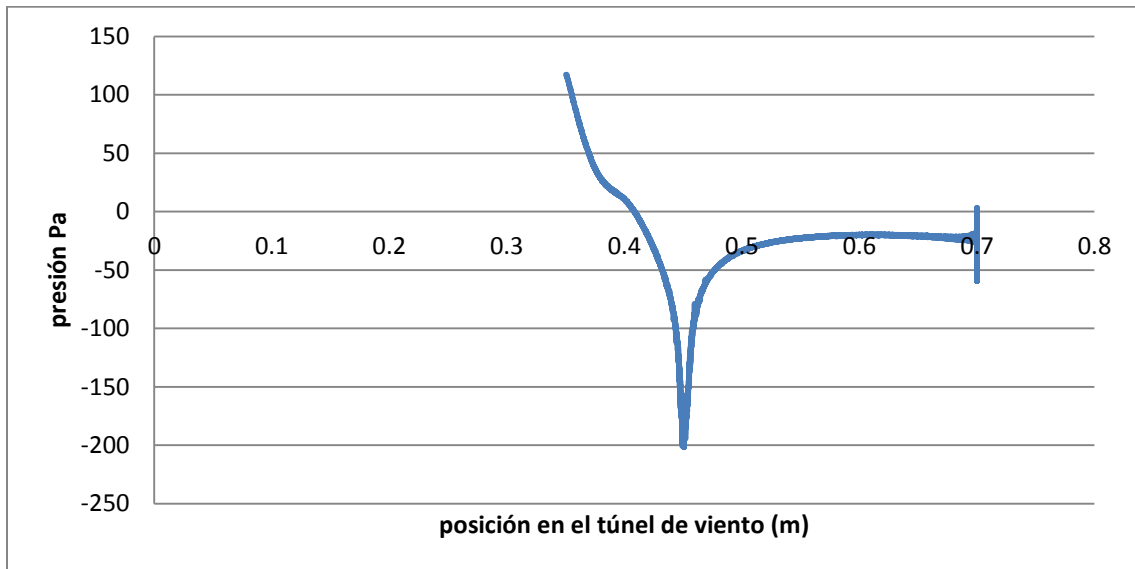


Figura- 7.18: Parábola

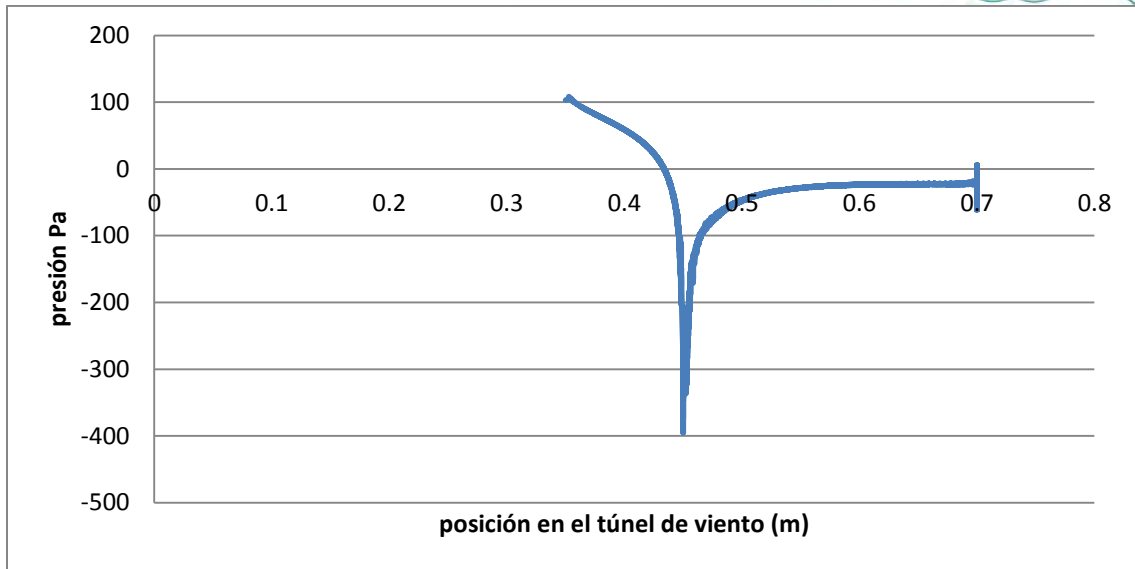


Figura- 7.19: Cono

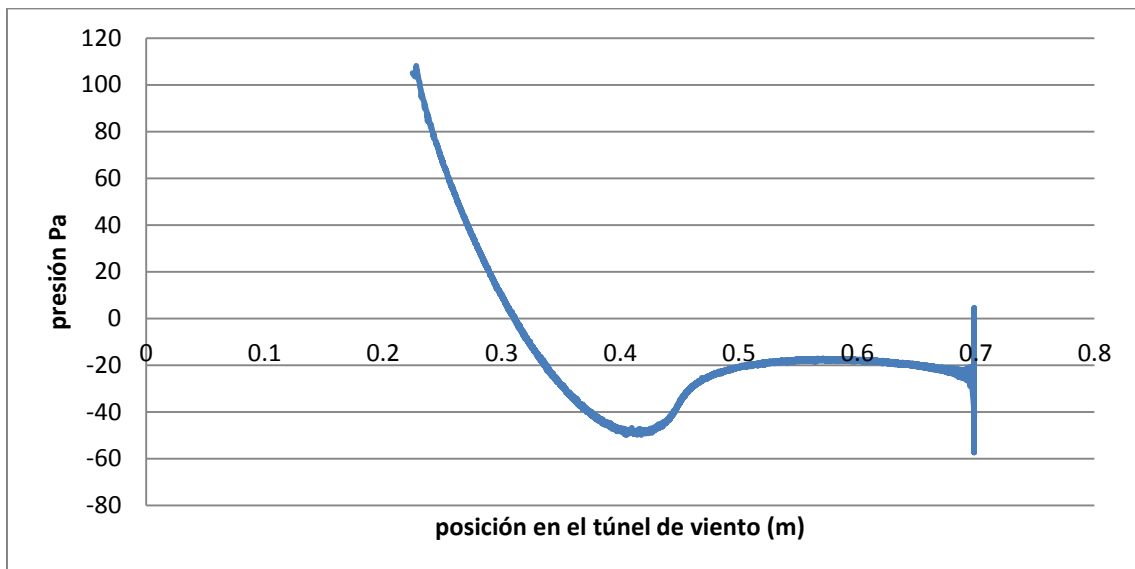


Figura- 7.20: Tangente

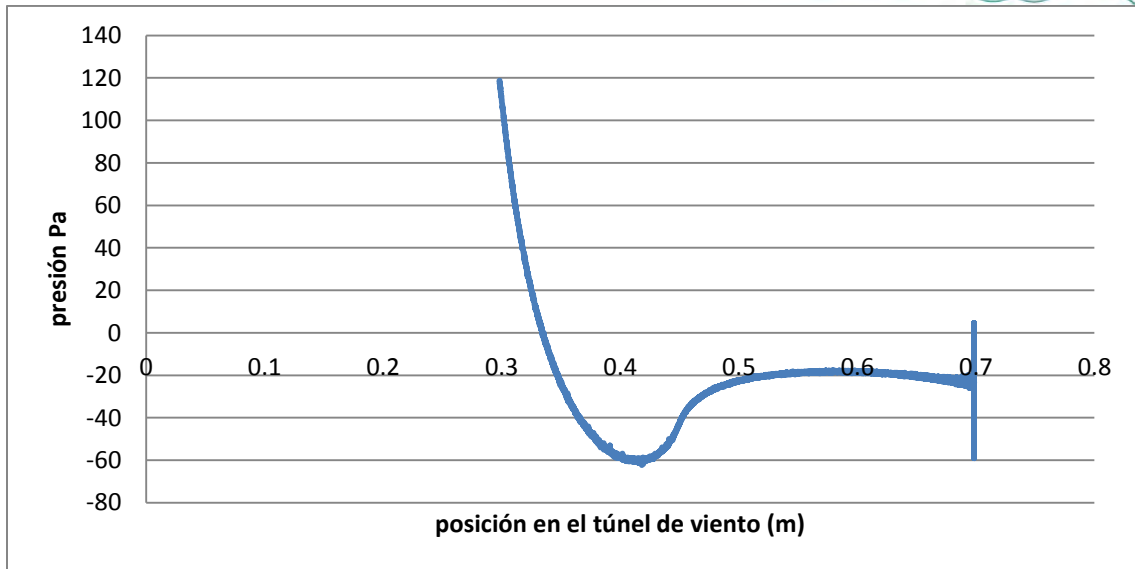


Figura- 7.21: Elíptica

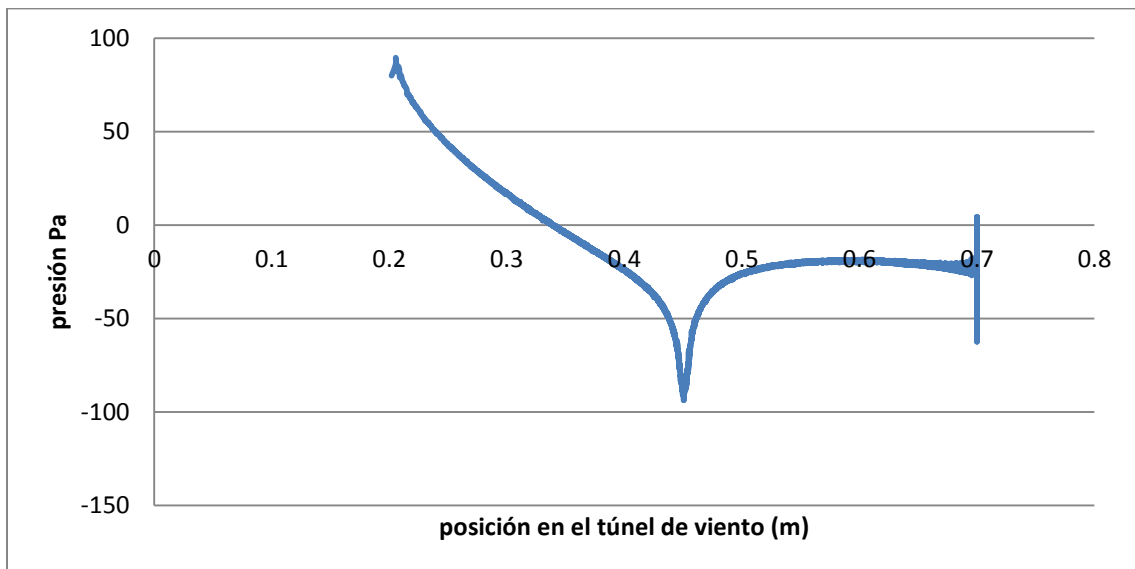


Figura- 7.22: Secante 1

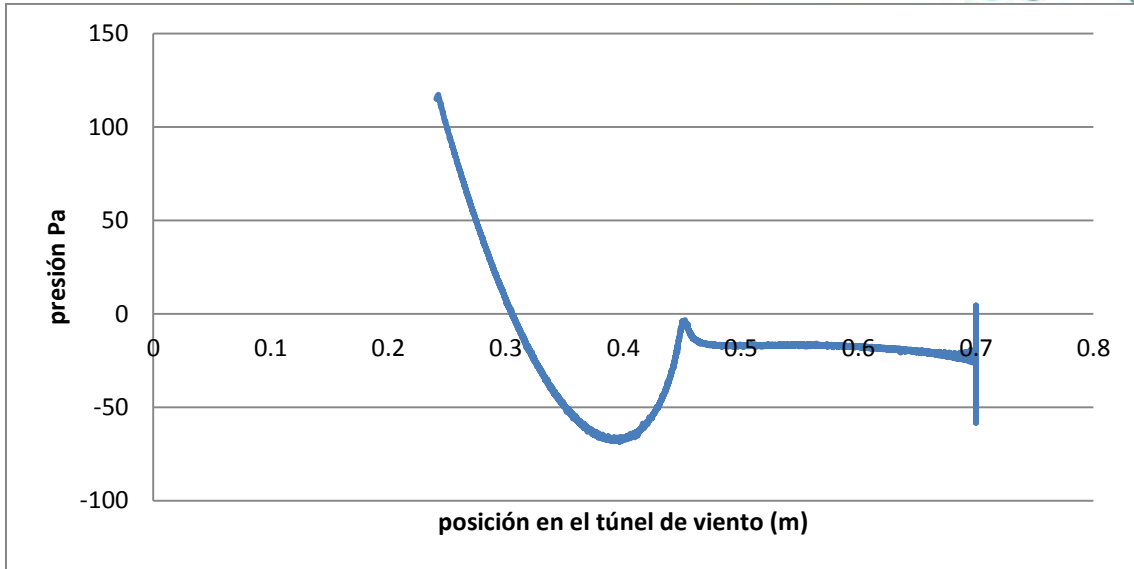


Figura- 7.23: Secante 2

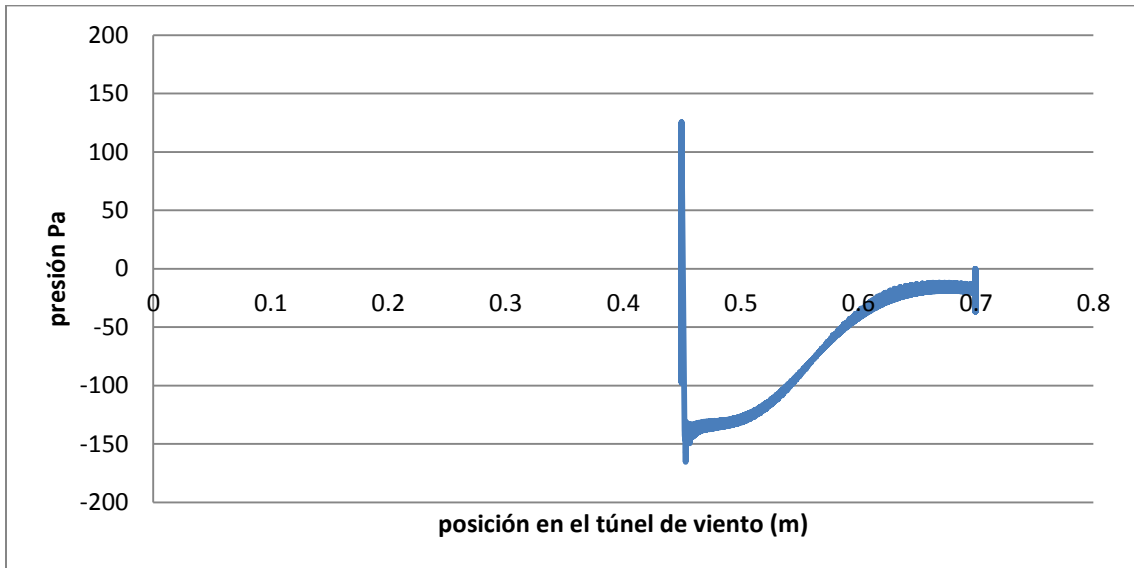


Figura- 7.24: Plano



A.4 Gráficas de presión de los diferentes perfiles para 6.6 m/s

Todos los ejes X corresponden a la posición en el túnel de viento en metros, y el eje Y corresponde a la presión en Pa.

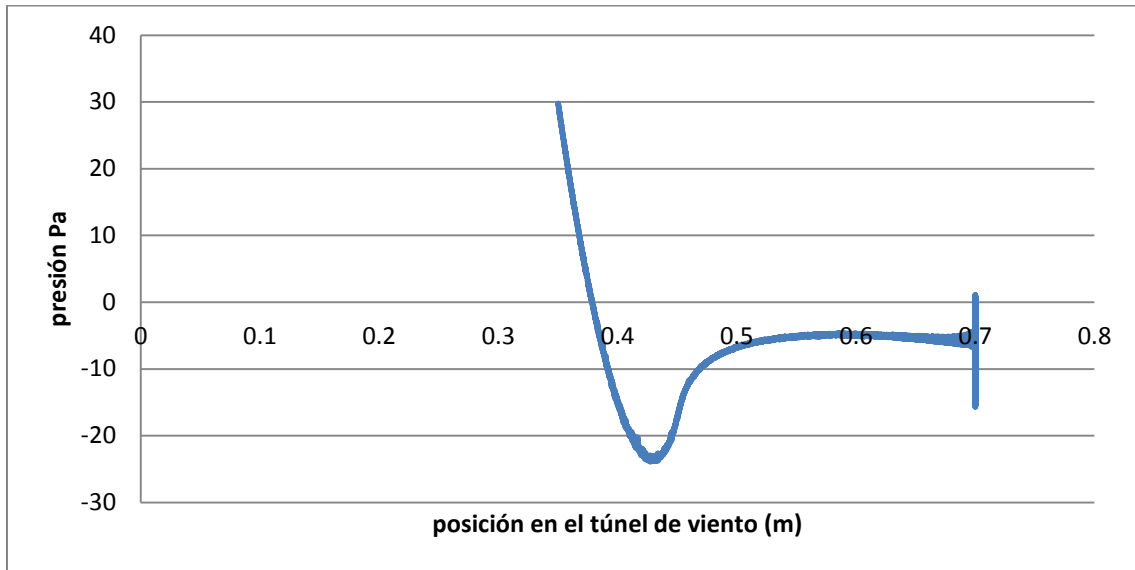


Figura- 7.25: Semicírculo

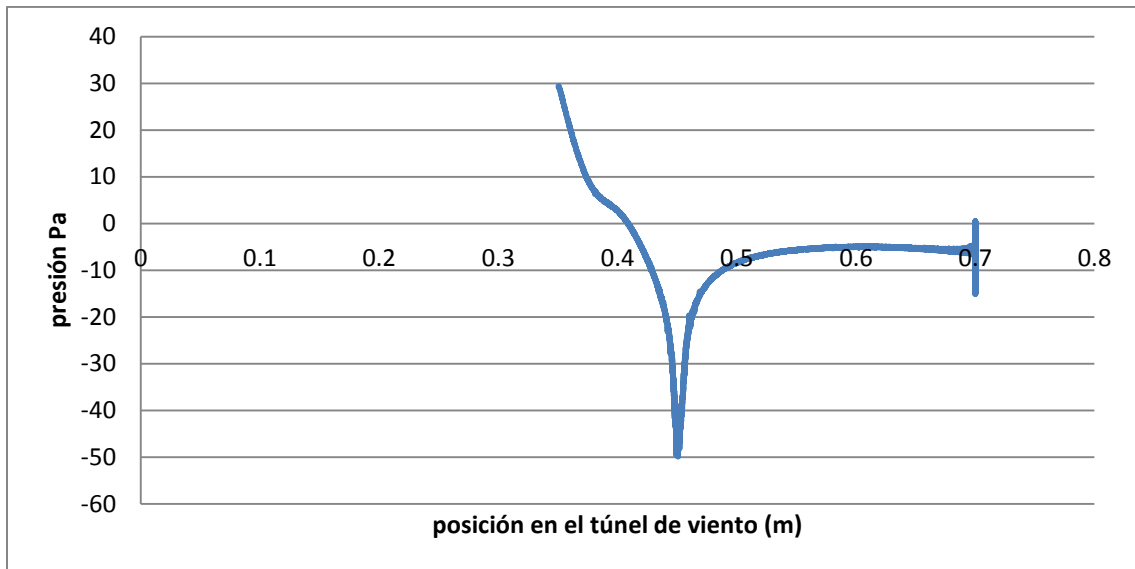


Figura- 7.26: Parábola

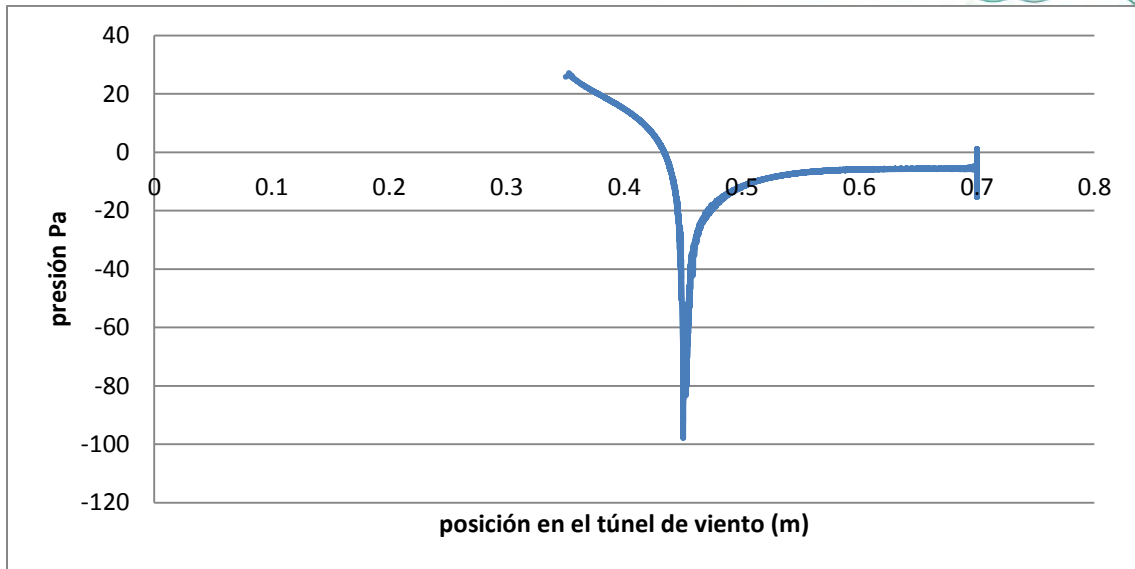


Figura- 7.27: Cono

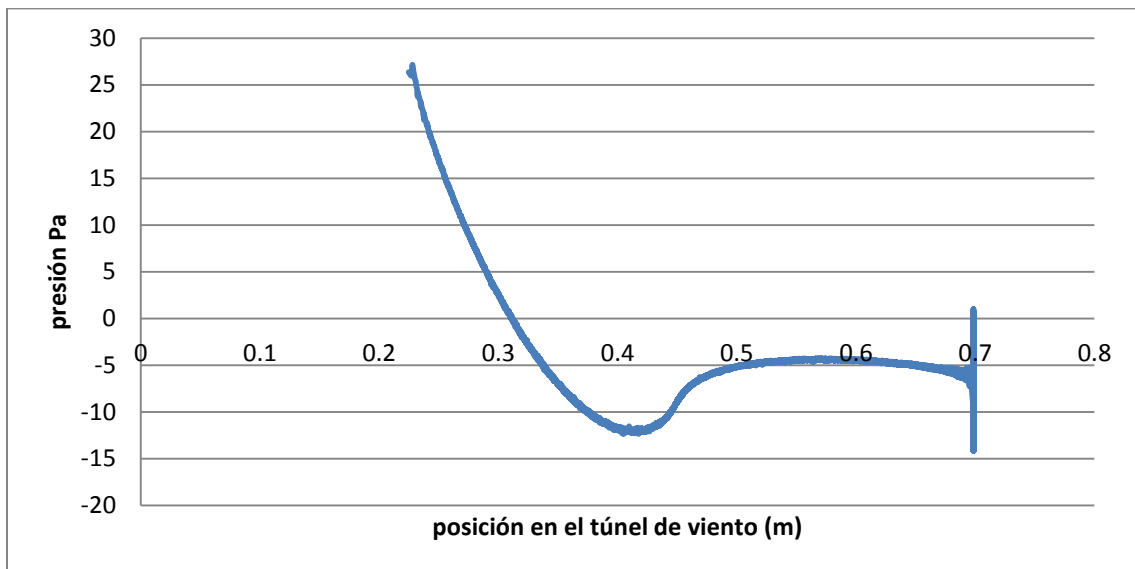


Figura- 7.28: Tangente

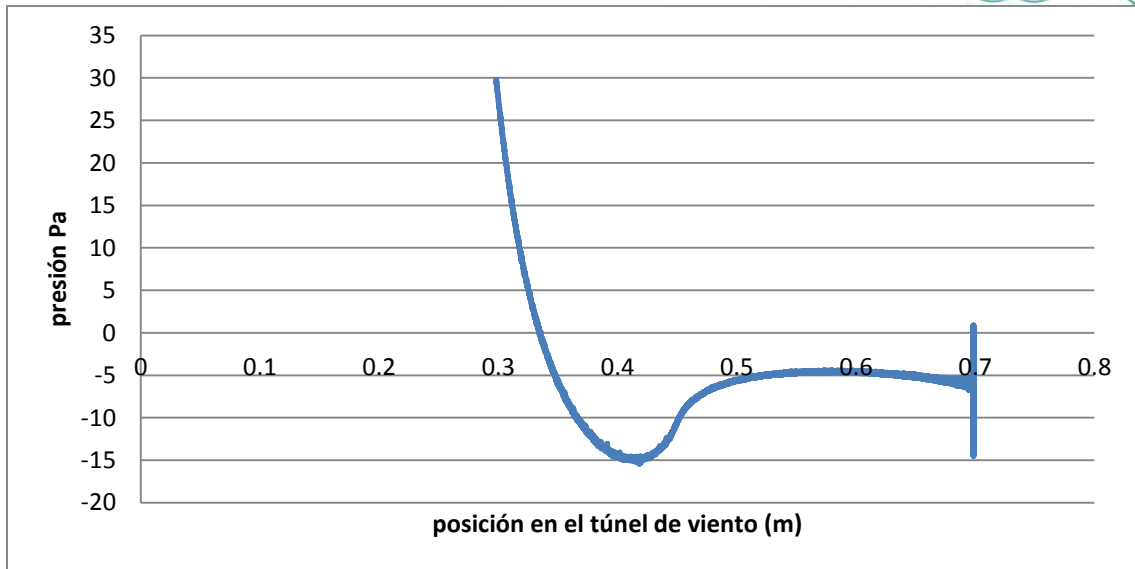


Figura- 7.29: Elíptica

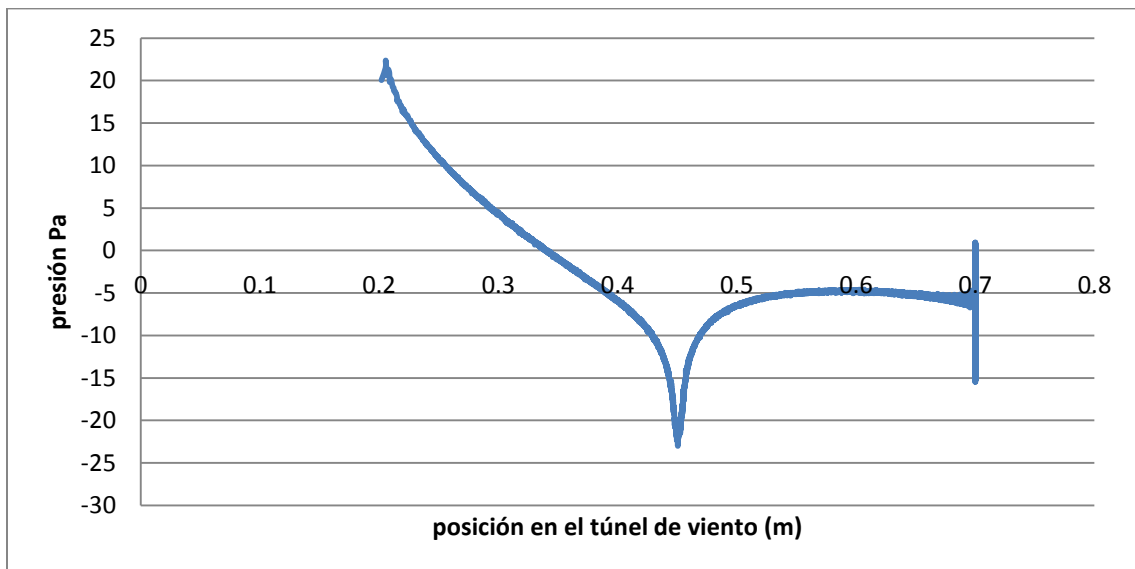


Figura- 7.30: Secante 1

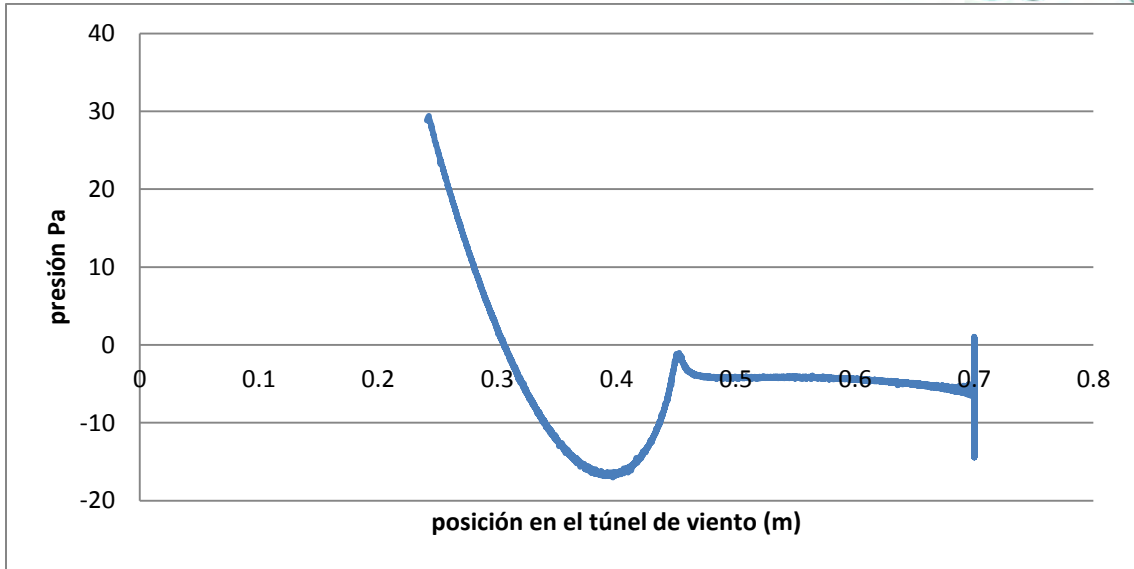


Figura- 7.31: Secante 2

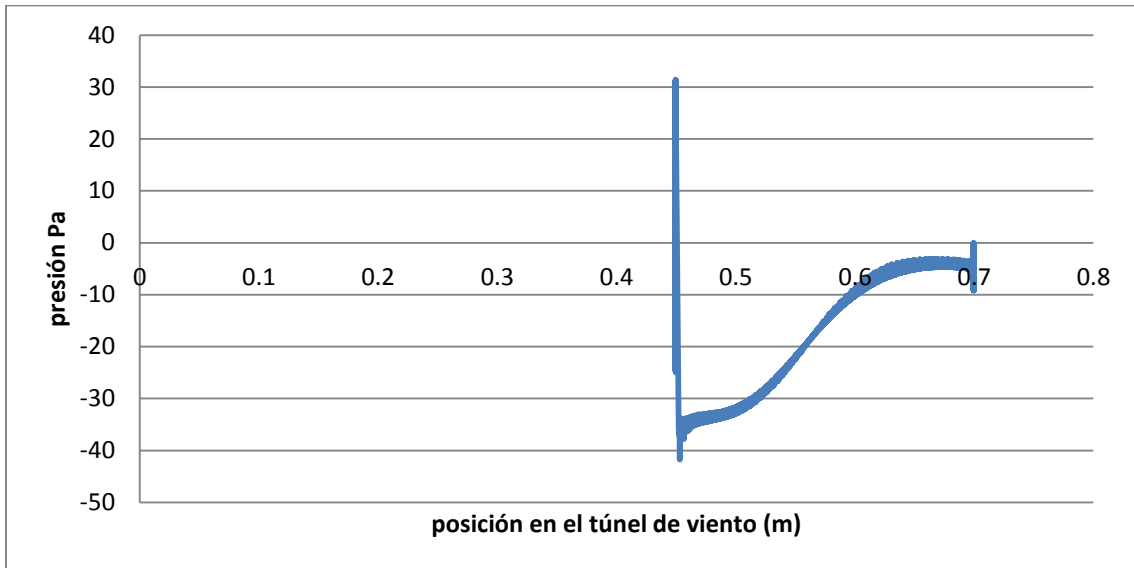


Figura- 7.32: Plano

A.5 Imágenes relacionadas a la sección 6: simulaciones y experimentación.

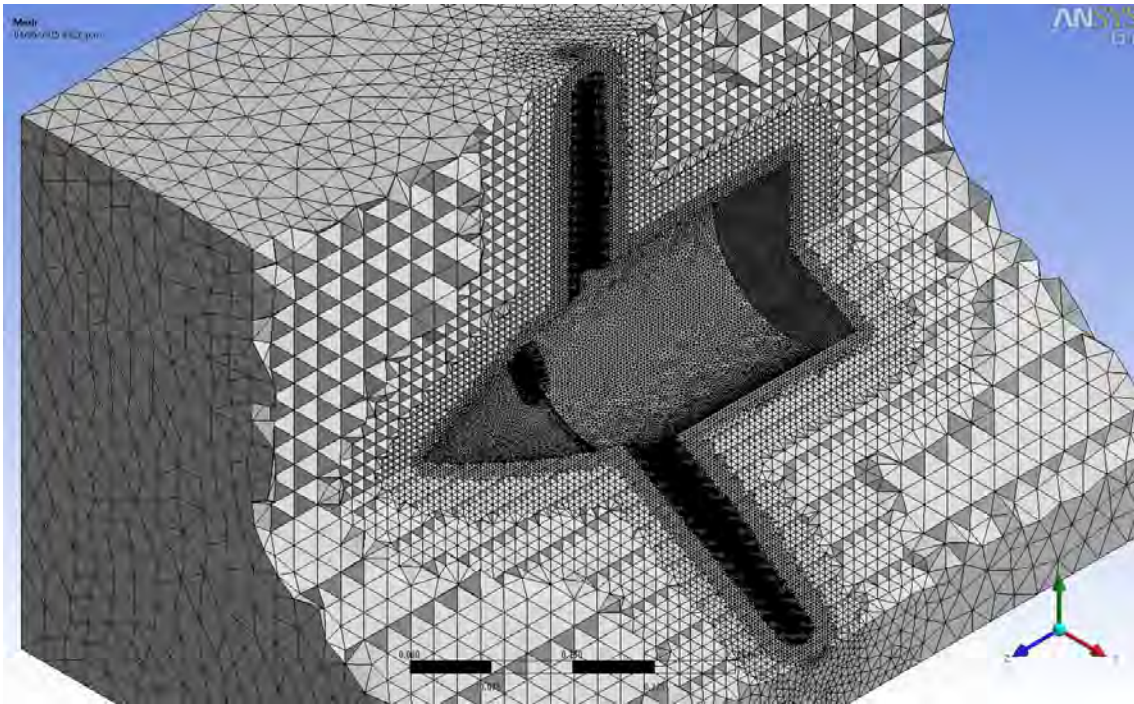


Figura- 7.33: isométrico, malla modelo turbina álabes seccionados.

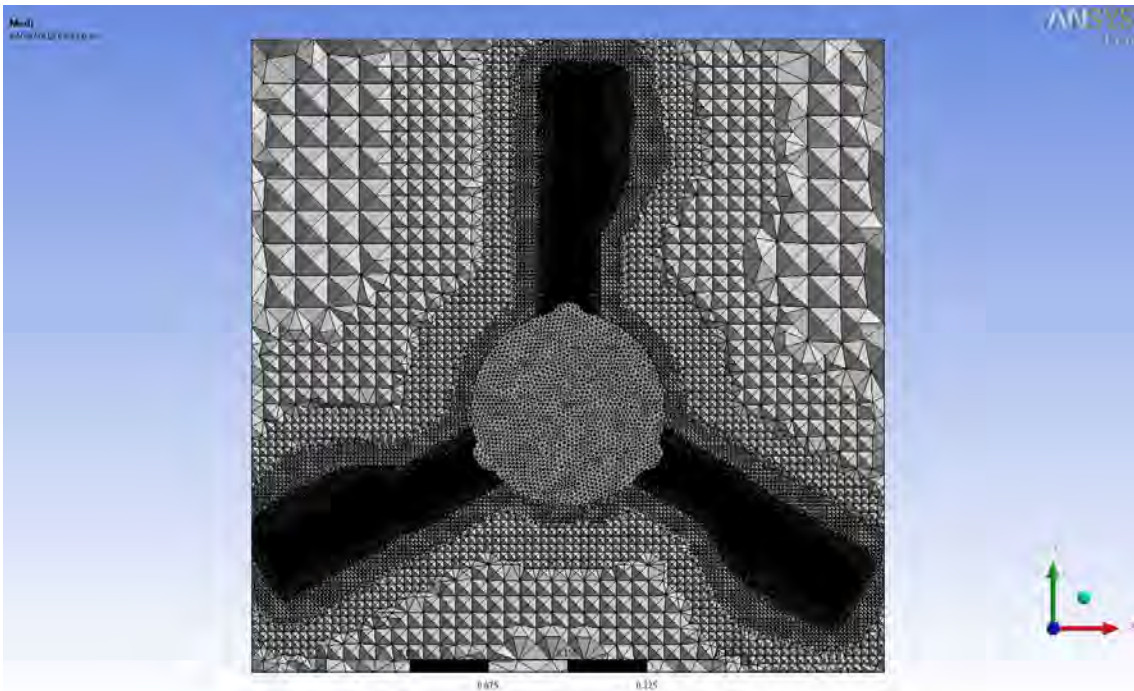


Figura- 7.34: Frontal, malla modelo turbina álabes seccionados

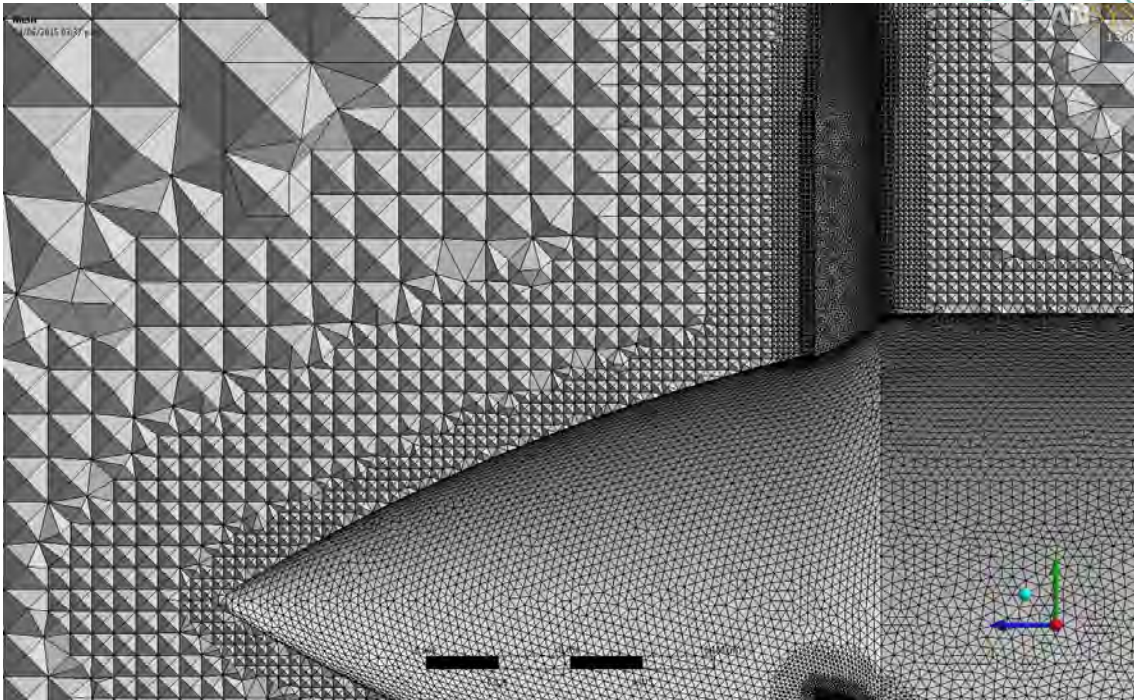


Figura- 7.35: lateral y acercamiento de la malla, modelo turbina álabes seccionados.

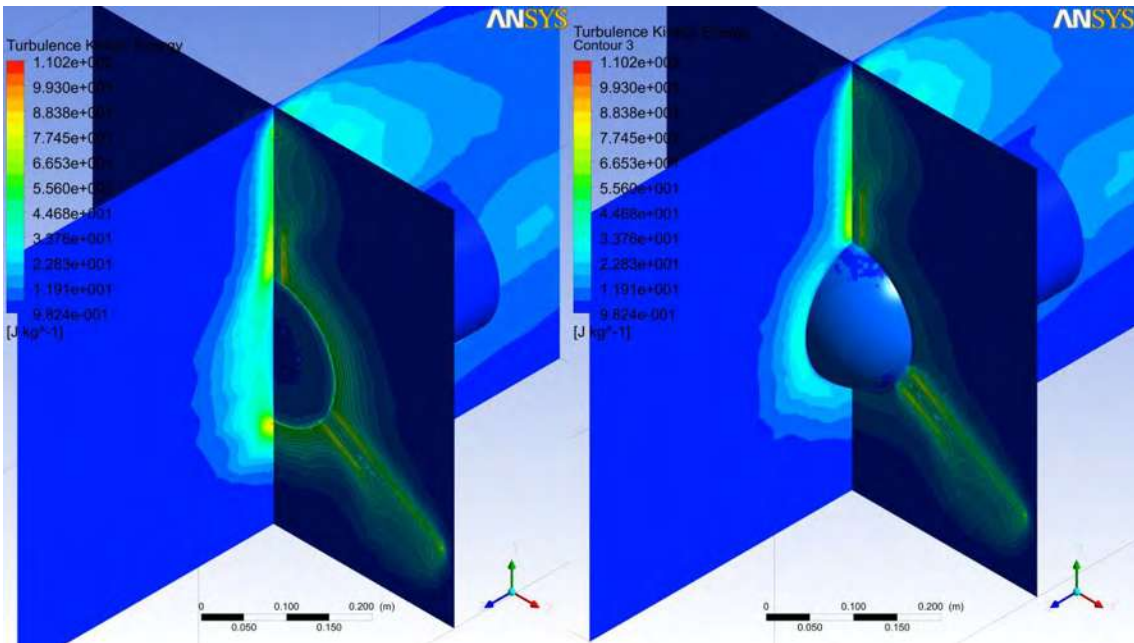


Figura- 7.36: Isométrico frontal energía cinética turbulenta

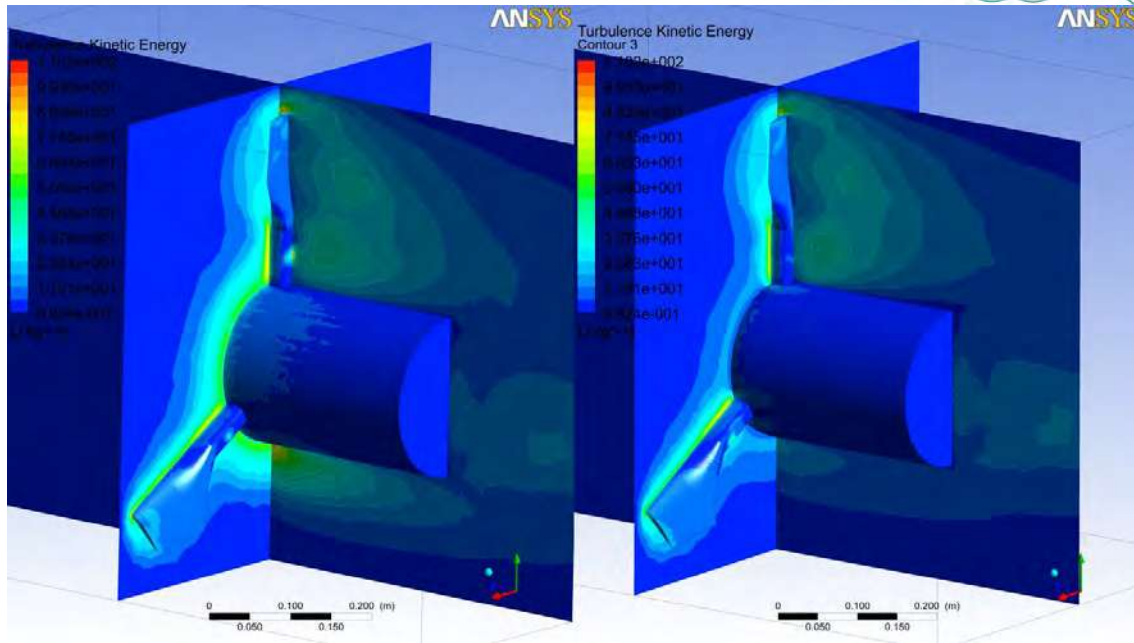


Figura- 7.37: Isométrico trasero energía cinética turbulenta

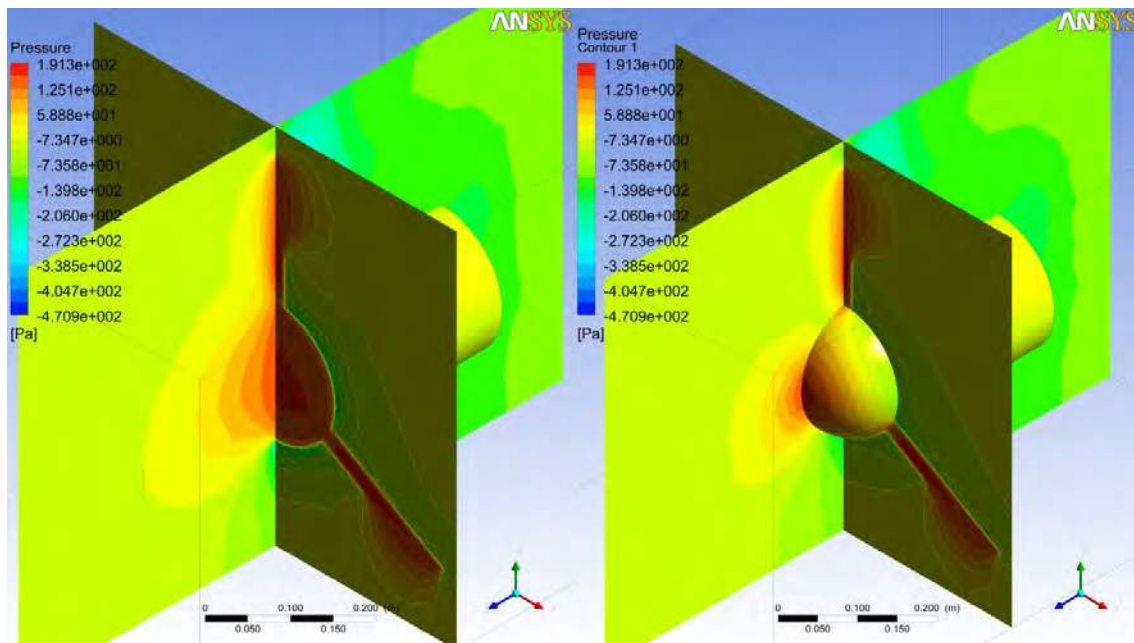


Figura- 7.38: Isométrico frontal presiones

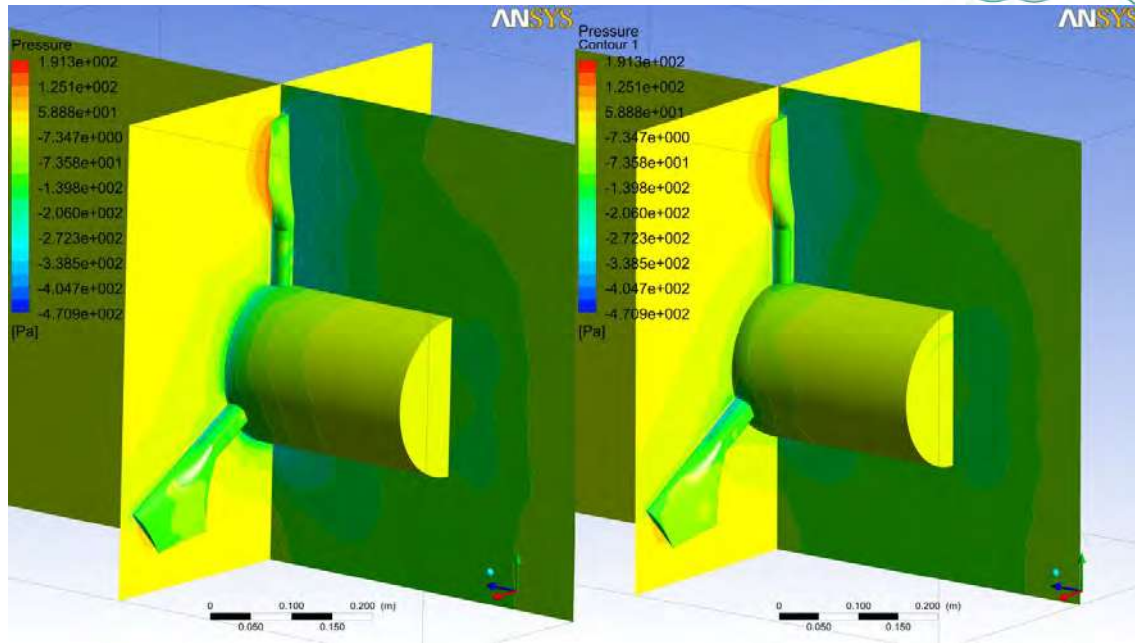


Figura- 7.39: Isométrico trasero presiones

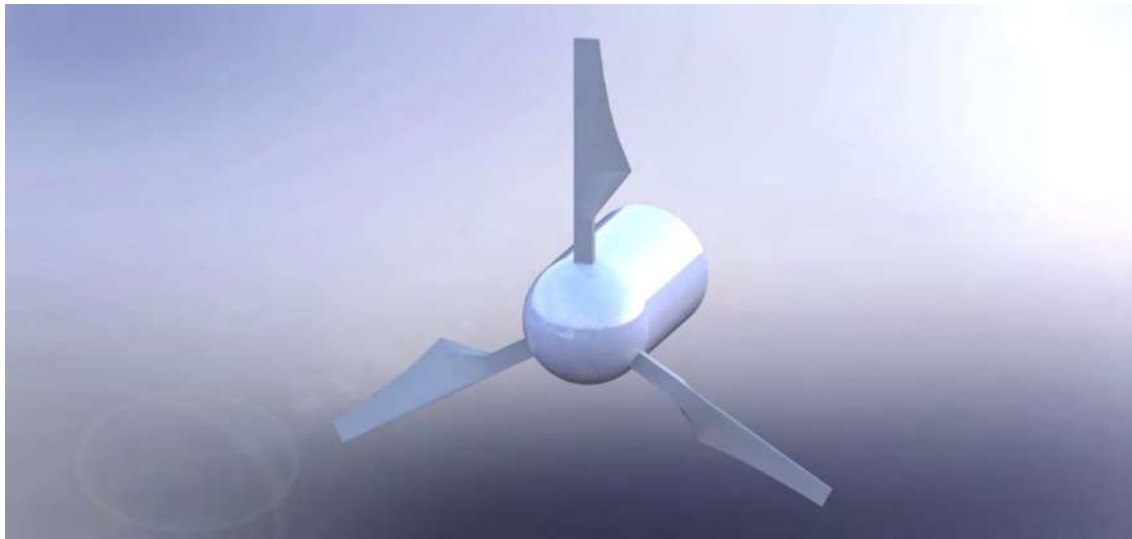


Figura- 7.40: Modelo del ensamble de la turbina empleada en la simulación

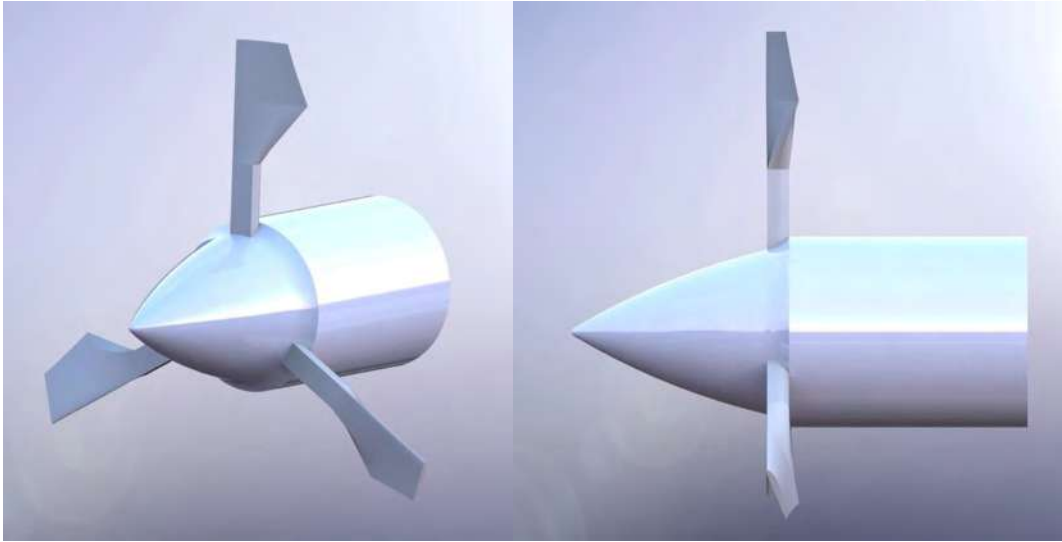


Figura- 7.41: Modelo del ensamble de la turbina con el HUB SC-2

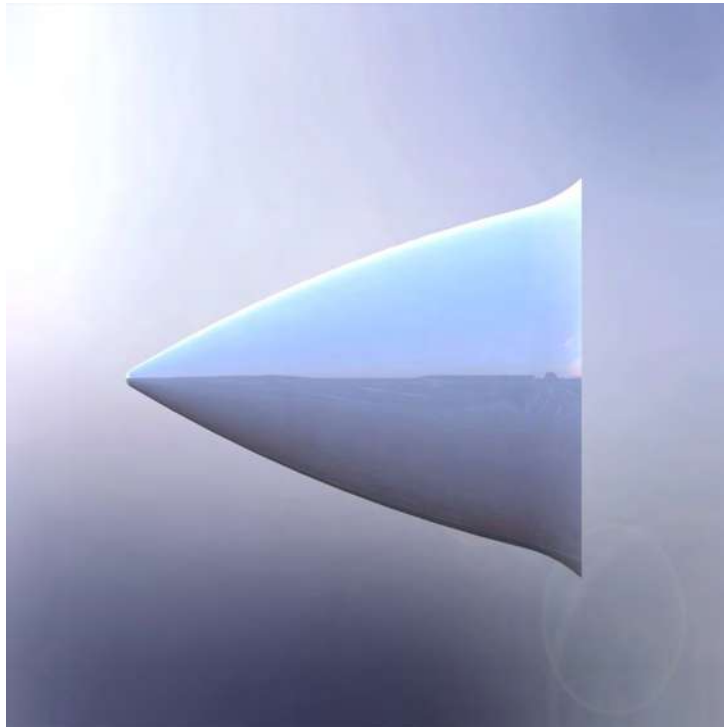


Figura- 7.42: Modelo del perfil S-C2

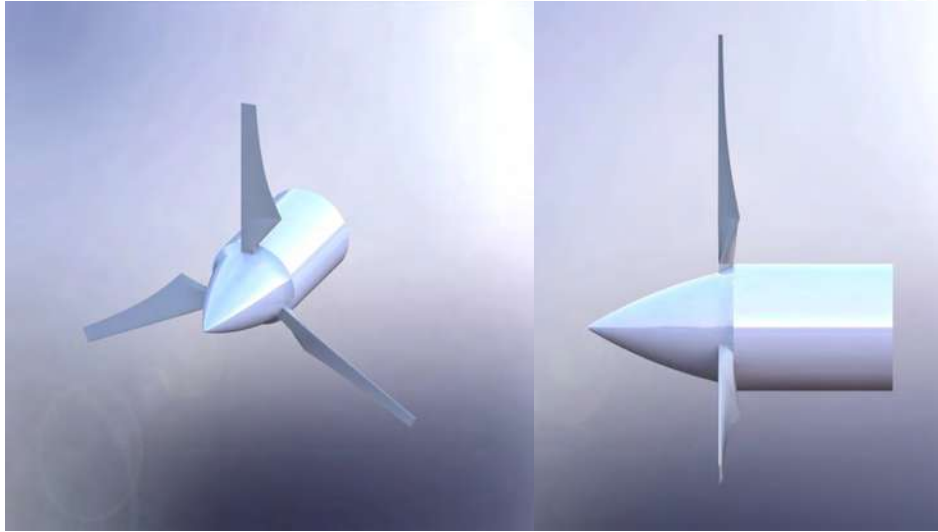


Figura- 7.43: Modelo de la turbina con HUB S-C1 y posición de los álabes modificada (más cerca de la Góndola).

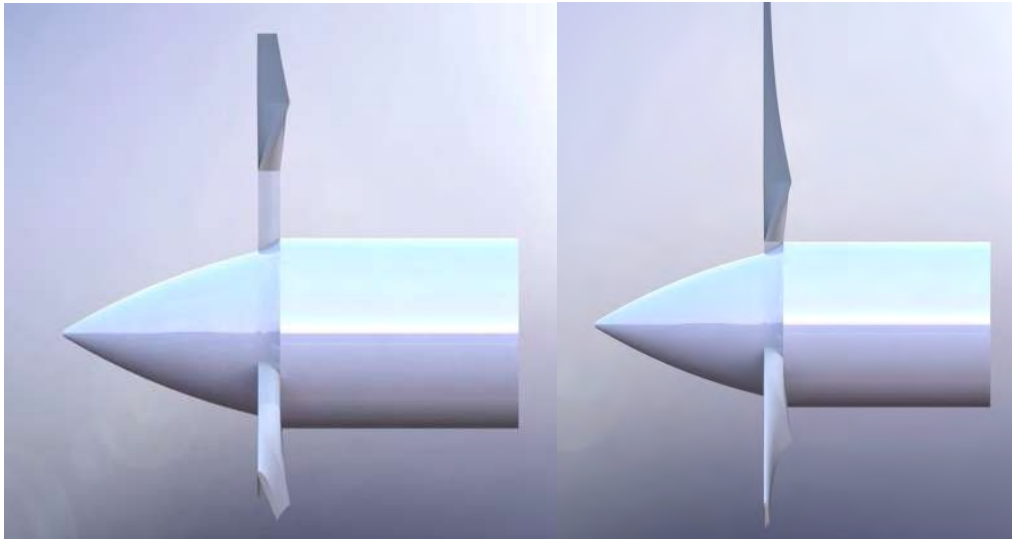


Figura- 7.44: Diferencia en la modificación de la posición de los álabes.



Figura- 7.45: Turbina de viento con diferentes HUB, empezando por izquierda, perfil S-C2, perfil de fábrica, sin HUB aerodinámico

A.6 Instrumentos empleados en la experimentación en el túnel de viento

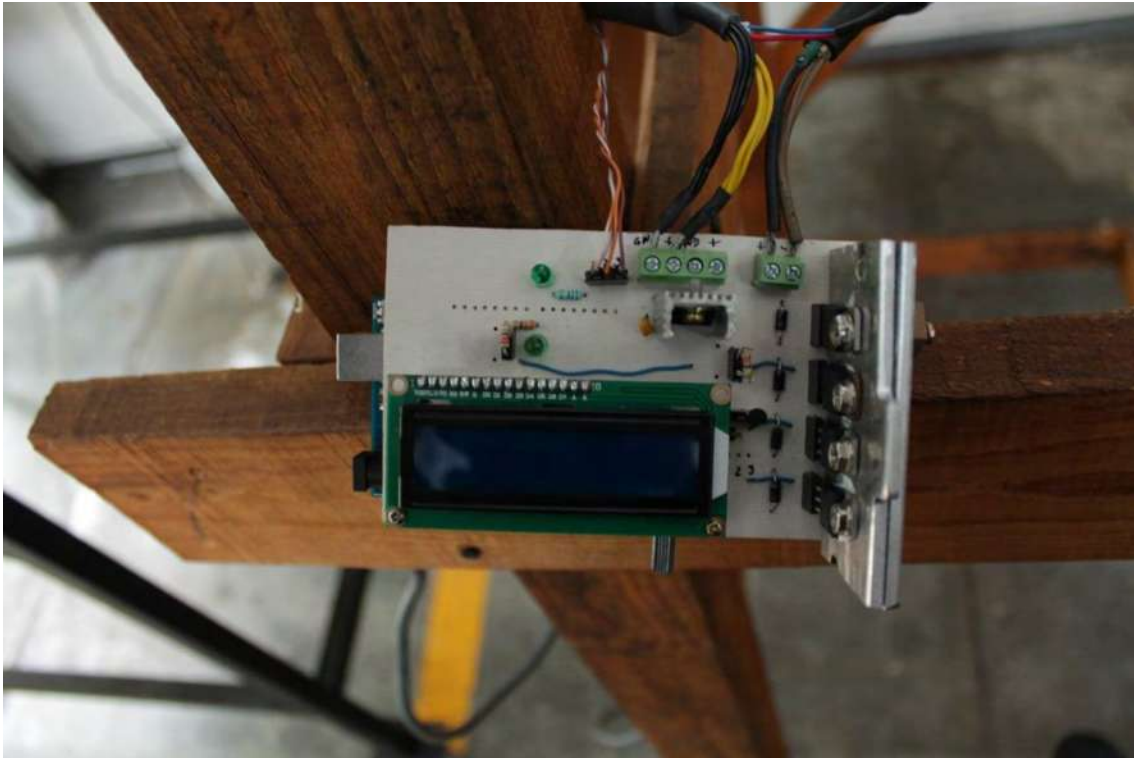


Figura- 7.46: Control de velocidad para un motor de 24V 4A



Figura- 7.47: Generador de humo a base de aceite mineral

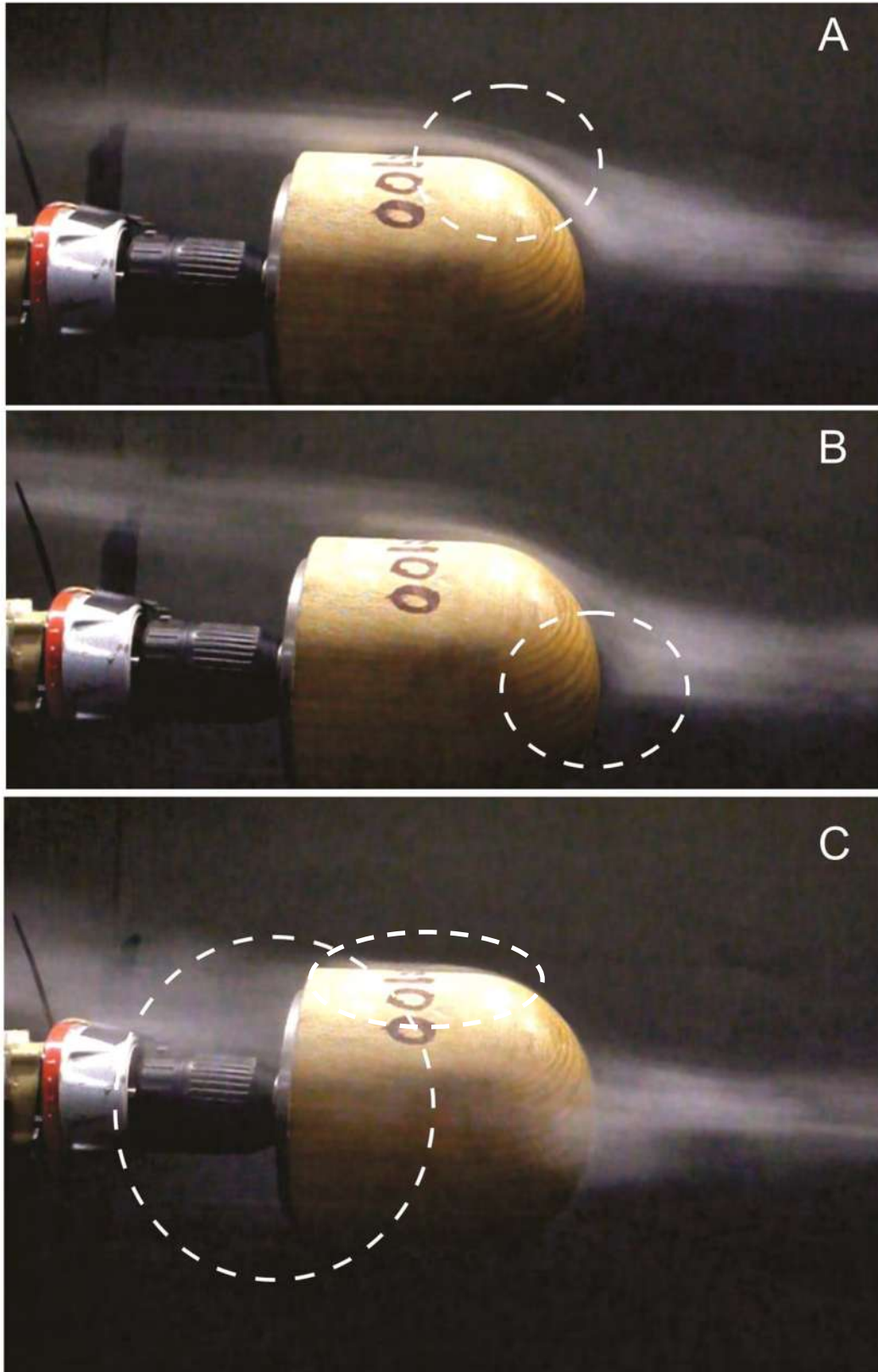


Figura- 7.48: Ampliación Imagen 6.28

A.7 Modelo κ - ϵ estándar (FLUENT User's Guide)

El modelo de turbulencia κ - ϵ estándar se ha convertido en el caballo de batalla del cálculo práctico del flujo en ingeniería desde que fue propuesto por Launder y Spalding. Robustez, economía y precisión razonable para un amplio rango de flujos turbulentos explica su popularidad en simulaciones de flujo industrial y transferencia de calor.

Es un modelo semi-empírico basado en el modelo de las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (κ) y su tasa de disipación (ϵ).

En la derivación del modelo κ - ϵ , la suposición es que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. Por lo tanto el modelo κ - ϵ estándar es válido solo para flujo completamente turbulento.

Ecuaciones de transporte para el modelo κ - ϵ estándar

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

Donde

G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidad medio.

G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad.

Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa global de disipación.

$C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes.

σ_k y σ_ϵ son números de Prandtl turbulentos para κ y ϵ , respectivamente.

S_k y S_ϵ son términos definidos por el usuario.