



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO Y MODELAMIENTO DE UNA TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL DE PEQUEÑA ESCALA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

SERGIO ALFONSO CÁCERES LUQUE

PROFESOR GUÍA:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

SANTIAGO DE CHILE
2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO.
POR: SERGIO A. CÁCERES L.
FECHA: 24/03/2014
PROF. GUÍA: ALVARO VALENCIA.

ESTUDIO Y MODELAMIENTO DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS SOBRE UNA TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL DE PEQUEÑA ESCALA

Actualmente, existe dentro de la sociedad el debate sobre cómo queremos generar en un futuro la energía que nos permita seguir desarrollándonos como país. Para ello, existen varias fuentes y medios por los cuales se puede obtener, usándose principalmente en Chile las energías provenientes del agua, carbón y petróleo. Sin embargo, como país se poseen otro tipo de fuentes que aún no han sido explotadas y que tiene un futuro alentador dado los desarrollos tecnológicos que se están llevando a cabo como por el interés de las personas en que estas se lleven a cabo, las cuales son de tipo solar, geotérmica, mareomotriz y eólica. Es en este último tipo de fuente en la cual se enfocará el desarrollo de la presente memoria con un énfasis al desarrollo de la obtención de este tipo de energías pero a pequeña escala.

El objetivo principal de la memoria es realizar un análisis de las curvas características de una turbina mediante un análisis de los coeficientes aerodinámicos presentes en los álabes de las turbinas eólicas, con el fin de comparar dos diferentes perfiles alares a utilizar, los cuales se diferencian por poseer una aerodinámica diferente como también un proceso de fabricación distinto, lo cual discutir cuan conveniente es realizar una mejora aerodinámica al perfil en base a la potencia obtenida. En conjunto con esto se podrá visualizar, mediante un modelamiento a través de ANSYS FLUENT, los efectos aerodinámicos del funcionamiento de la turbina sobre el viento incidente a causa del impacto del viento sobre los álabes

Los alcances son el poder lograr comparar los datos obtenidos entre lo realizado analíticamente por la teoría de momentum DMS y lo obtenido mediante el modelamiento computacional. Además, el desarrollo del problema computacional se realizará mediante un modelo 2D dado que según los antecedentes presentados, las diferencias entre los resultados obtenidos para casos 3D no difieren mucho de los 2D, pero el recurso computacional necesario para su ejecución es considerablemente mayor al caso 2D.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia entera, por brindarme siempre su apoyo incondicional en todas las metas que me he propuesto; por sus valores entregados los que me han hecho ser la persona que soy y sentirme orgulloso de ello.

A mi profesor guía, Álvaro Valencia, por ayudarme y guiarme en este proceso, dándome además sus enseñanzas y consejos a lo largo del trabajo realizado.

A mis compañeros y amigos del colegio, por compartir tanto tiempo juntos en los cuales aprendí a disfrutar de las amistades y del buen vivir. También agradecer a mis compañeros de universidad, tanto de bachillerato como de mecánica, por todas las horas de estudio y dispersión que compartimos a lo largo de la carrera. Gracias a los bachis Claudio, Carlos, Francisco, Elizabeth, Francisca, Juan Pablo y Nicole; como también a los mecánicos Oscar, Sebastián, Fernando, Marco, Rodolfo, Cristóbal, Thomas, Sven, Carlos, Diego, Erick, Alfredo, Rodrigo, José y Pablo.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Antecedentes generales	2
1.2.1	Turbinas eólicas.....	2
1.3	Objetivos	6
1.3.1	Objetivo General.....	6
1.3.2	Objetivos Específicos	6
1.4	Limitaciones	6
2	Antecedentes aerodinámicos y modelamiento matemático	7
2.1	Aerodinámica de un perfil alar	7
2.2	Fuerzas y coeficientes aerodinámicos.	9
2.3	Modelos Analíticos[12].....	11
2.3.1	Modelos de momentum	11
2.4	Variación del ángulo de ataque.....	17
2.5	Ecuaciones gobernantes.....	19
3	Metodología	20
3.1	Metodología específica	20
3.2	Modelación mediante CFD.....	20
3.2.1	Diseño de álabe.....	21
3.2.2	Características de la turbina y su entorno.	22
3.2.3	Mallado	23
3.2.4	Procedimiento implementado	26
3.2.5	Condiciones de borde.....	27
4	Resultados obtenidos.....	28
4.1	Resultados del modelo DMS.....	28
4.2	Resultados del modelamiento computacional.....	29
4.2.1	Resultados para el diseño de álabe NACA 0018.....	29
4.3	Validación	30
4.3.1	Detalle de resultados para el diseño de álabe NACA 0018	31
4.3.2	Resultados para el diseño de álabe rectangular.....	53

4.3.3	Detalle de resultados para el diseño de álabes rectangular	54
5	Discusiones.....	75
5.1	Análisis de resultados para el modelo con perfil alar NACA 0018.	75
5.2	Análisis de resultados para el modelo con perfil alar rectangular.	76
5.3	Comparación de resultados para los perfiles desarrollados.....	77
6	Conclusiones.....	81
7	Bibliografía	82
8	Anexos	84
8.1	Anexo A: DMS	84
8.2	Anexo B: Función Gráficos	86

TABLA DE FIGURAS

Figura 1-1	Inversión anual en nuevas energías renovables sin considerar grandes hidroeléctricas [2]	1
Figura 1-2	Energía producida por fuentes eólicas en [GW] desde 1990 al 2012 [3]	2
Figura 1-3	Principales componentes de una turbina eólica de eje horizontal [5].....	3
Figura 1-4	Tipos de turbina de eje vertical [3]	4
Figura 1-5	Diferentes tipos de configuraciones de turbinas Darrieus [3]	5
Figura 1-6	Esquema de una turbina Savonius	5
Figura 2-1	Características de un perfil alar.[9].....	7
Figura 2-2	Fuerzas presentes en un álabes de una turbina. [11].....	9
Figura 2-3	Esquema de la turbina según el modelo unidimensional[12].	12
Figura 2-4	Relación entre el C_p de una turbina y α [5]	14
Figura 2-5	Esquema conceptual del modelo de múltiples tubos	15
Figura 2-6	Esquema del principio por el cual actúa el DMS[14].....	16
Figura 2-7	Variación de ángulo de ataque α con respecto al ángulo azimutal θ [9]	18
Figura 2-8	Ángulo de ataque V/S ángulo azimutal en función del TSR de la turbina.	18
Figura 3-1	NACA 0018, cuerda=1m, y grosor =0,18m	21
Figura 3-2	Modelo 2D de la turbina aplicado en un CFD [9]	22
Figura 3-3	Casos resueltos para la independencia de malla.....	23
Figura 3-4	Mallado sobre zona giratoria y zona de malla	24
Figura 3-5	Detalle del mallado sobre uno de los álabes.....	25
Figura 3-6	Condiciones de bordes para la simulación realizada.	27
Figura 4-1	Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de máximo C_m con un TSR=1	32
Figura 4-2	Contorno de presión para el primer álabes en condición de máximo C_m con un TSR=1	33

Figura 4-3 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=1$	34
Figura 4-4 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=1$	34
Figura 4-5 Contorno de velocidad para el final de la tercera vuelta con un $TSR =1$	35
Figura 4-6 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=3$	36
Figura 4-7 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=3$	37
Figura 4-8 Contorno de velocidad para el tercer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=3$	38
Figura 4-9 Contorno de presión para el tercer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=3$	38
Figura 4-10 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=3$	39
Figura 4-11 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=3$	40
Figura 4-12 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=4$	42
Figura 4-13 Contorno de presión para el primer álabes, para condición de máximo C_m	43
Figura 4-14 Contorno de velocidad para el primer álabes, para condición de mínimo C_m para $TSR=4$	44
Figura 4-15 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=4$	45
Figura 4-16 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=5$	47
Figura 4-17 Contorno de presión para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR =5$	47
Figura 4-18 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=5$	48
Figura 4-19 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=5$	49
Figura 4-20 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=6$	51
Figura 4-21 Contorno de presión para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=6$	51
Figura 4-22 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=6$	52
Figura 4-23 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=6$	52
Figura 4-24 Contorno de velocidad para el primer álabes rectangular en condición de máximo C_m con un $TSR=1$	56

Figura 4-25 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=1$	57
Figura 4-26 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=1$	58
Figura 4-27 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=1$	58
Figura 4-28 Contorno de velocidad para el final de la tercera vuelta con $TSR=1$.	59
Figura 4-29 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=3$	61
Figura 4-30 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=3$	62
Figura 4-31 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=3$	63
Figura 4-32 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=3$	63
Figura 4-33 Contorno de velocidad para el segundo álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=3$	64
Figura 4-34 Contorno de velocidad para el final de la tercera vuelta con $TSR=3$.	65
Figura 4-35 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=4$	67
Figura 4-36 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=4$	67
Figura 4-37 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=4$	68
Figura 4-38 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=4$	69
Figura 4-39 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=5$	71
Figura 4-40 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=5$	72
Figura 4-41 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=5$	73
Figura 4-42 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=5$	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas y Desventajas de las diferentes series de NACA	8
Tabla 3-1 Características de la turbina a modelar	22
Tabla 3-2 Resumen de casos a resueltos.	23
Tabla 3-3 Características principales de la malla	24
Tabla 3-4 Valores requeridos para la Inflación	25
Tabla 3-5 Número de time steps necesario para cada TSR para un time step de 0,05	26

Tabla 4-1 Coeficiente de potencia promedio para cada TSR evaluado	29
Tabla 4-2 Coeficiente de potencia promedio para cada TSR evaluado	53
Tabla 5-1 Comparación de la potencia obtenida entre perfiles.	80

1 Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad, el desarrollo en generación de energía mediante métodos renovables no convencionales (conocido como ERNC) está siendo cada vez mayor a causa de la búsqueda de la disminución de contaminantes que generan el calentamiento global. Ya es sabido que los actuales métodos de generación de energía tales como carbón o el diésel generan grandes cantidades de dióxido de carbono, uno de los principales gas de efecto invernadero [1], por lo que la búsqueda de medio alternativos de generación se han hecho irremediables.

Es por esto que se puede apreciar un claro aumento en los montos de inversión que se realizaron durante los años 1996 y 2007 que se presenta en la figura 1-1, siendo la energía eólica una de las que presenta un mayor crecimiento [2].

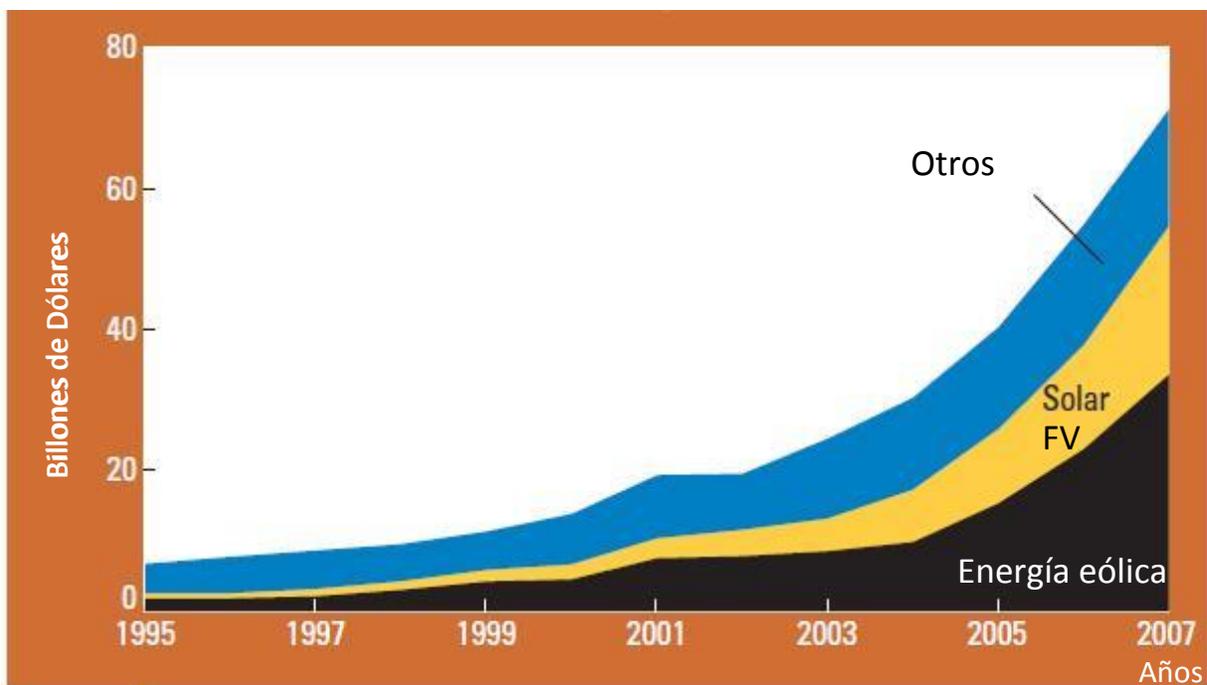
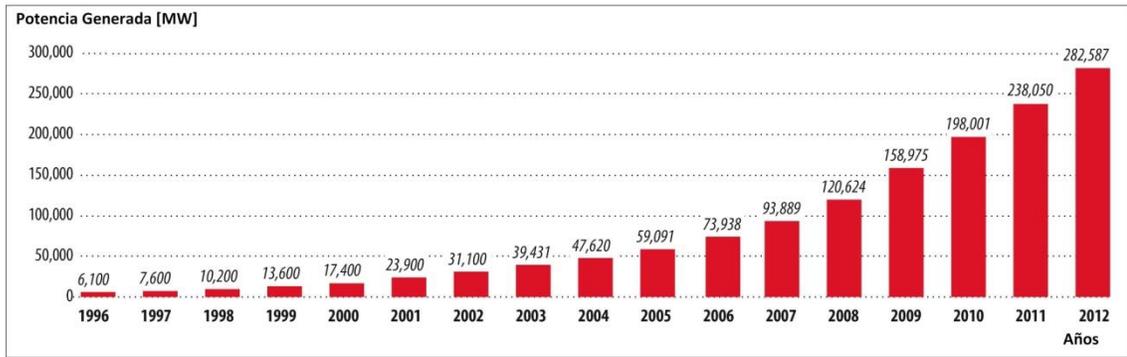


Figura 1-1 Inversión anual en nuevas energías renovables sin considerar grandes hidroeléctricas [2]

Es más, el crecimiento de dicha energía ha sido tal, que en los últimos años su capacidad instalada ha aumentado de manera exponencial, alcanzándose para el año 2007 de manera global una generación cercana a los 90 [GW] [2], tal como se ve en la figura 1-2. Por lo tanto, la investigación y desarrollo que se lleve a cabo en dicha tecnología llega a ser fundamental tanto para el progreso del país como para disminuir los efectos de gas invernadero sobre el planeta.



Source: GWEC

Figura 1-2 Energía producida por fuentes eólicas en [GW] desde 1990 al 2012 [3]

Esta memoria tiene como fin poder realizar un estudio que permita comparar la utilización de un álabe de geométrica rectangular respecto a un álabe de geometría aerodinámica con el fin de poder determinar cómo afecta en la eficiencia de la turbina la utilización de diseños más simples.

1.2 Antecedentes generales

1.2.1 Turbinas eólicas

Una turbina eólica consiste en un mecanismo que logra transformar la energía cinética proveniente del viento en energía mecánica, la cual a su vez es después transformada en energía eléctrica o es utilizada directamente para realizar un trabajo. Antiguamente, el uso de la energía eólica estaba exclusivamente enfocada en el uso de la molienda de harina mediante los molinos de viento, pero a partir del siglo XX en adelante, su principal uso ha sido en la obtención de energía eléctrica. Comúnmente se clasifican en 2 tipos de turbinas que son las de eje vertical y las de eje horizontal.

1.2.1.1 Turbina eólica de eje horizontal

Son el tipo de turbina más común en la generación de energía eléctrica en la actualidad dado que presentan mayores ventajas respecto a sus pares. Dentro estas ventajas, se pueden nombrar las siguientes [4]:

- En diseños de la hélice, la velocidad del rotor y la potencia de salida pueden ser controladas por el pitch control, el cual consiste en mover los álabes en su eje longitudinal logrando reducir las fuerzas sobre este. Por otra parte, el pitch control es la protección más eficaz contra exceso de velocidad y velocidad de los vientos extremos, especialmente en las grandes turbinas de viento.

- La forma de la hoja del rotor puede ser aerodinámicamente optimizada y se ha demostrado que se logra su máxima eficiencia cuando la sustentación aerodinámica es explotada a un máximo grado.

En la siguiente figura se presentan los diferentes componentes presentes dentro de una turbina eólica tales como el rotor, la caja de engranajes, el multiplicador y los ejes transmisores.

El funcionamiento de esta turbina parte del hecho de que el viento actúe sobre las aspas del rotor, el cual comienza a girar al igual que el eje principal. La caja de engranajes multiplicadora permite que el giro proveniente del rotor aumente hasta alcanzar las 1500 RPM sobre el eje de alta velocidad. Dicha velocidad es necesaria para que en el generador se pueda transformar la energía mecánica en energía eléctrica con una frecuencia de 50 Hz, la cual es la frecuencia con la que el sistema trabaja.

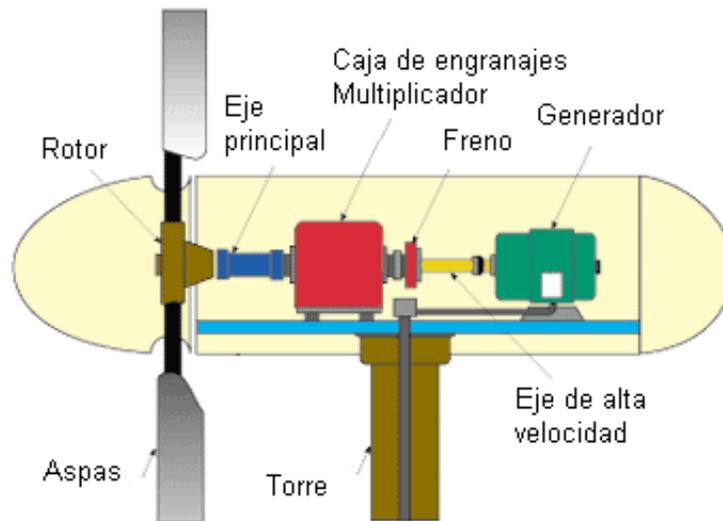


Figura 1-3 Principales componentes de una turbina eólica de eje horizontal [5]

1.2.1.2 Turbina eólica de eje vertical

Este tipo de turbinas presentan un rotor que se encuentra perpendicular al suelo, por lo que gira de forma vertical. Suelen ser de menor escala que las de eje horizontal y presentan ciertas desventajas tales como problemas en el inicio de su rotación sin ayuda externa [6], y además las cargas dinámicas que se generan sobre los álabes y el eje son considerables llegando a producir falla por fatiga, lo que ha sido un problema para casos ya existentes.

Por otra parte este tipo de turbinas presentan ciertas ventajas, como lo es ser omnidireccional, lo que quiere decir que giran sin importar la dirección del viento siendo

esto una ventaja considerable sobre las de eje horizontal ya que permite un ahorro en sistemas de control de seguimiento de las direcciones de viento. Esta ventaja además permite que este tipo de turbinas sean instaladas en sectores donde haya vientos de velocidades considerables pero de dirección cambiante, lo que permite su instalación en sitios urbanos tales como edificios, casas, etc. Además, el hecho de que sean más silenciosas que las de eje vertical facilita su acercamiento a zonas urbanas [7][8].

Dentro de este tipo de turbinas se puede dividir en 2 clases que son las más comunes: las de tipo Darrieus y las de tipo Savonius que se aprecian en la figura 1-4.

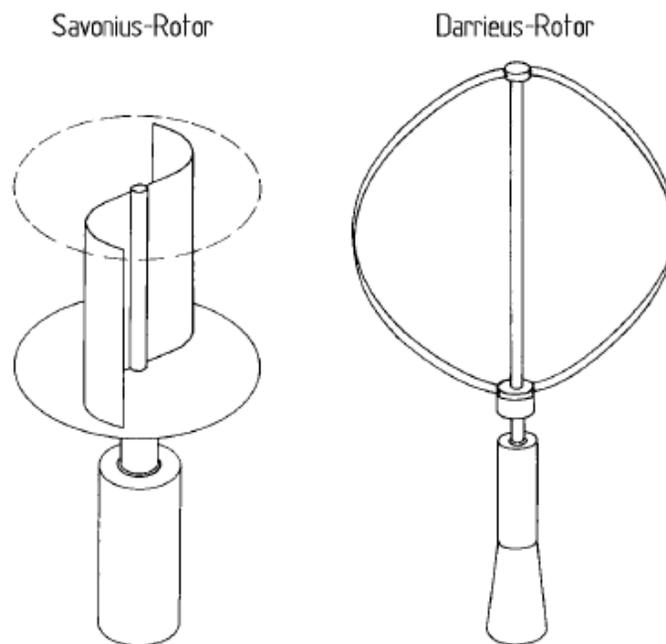


Figura 1-4 Tipos de turbina de eje vertical [3]

1.2.1.2.1 Turbina tipo Darrieus

Este tipo de turbinas presenta álabes similares a los de una turbina de eje horizontal, y basa su rotación gracias a la fuerza de sustentación que se ejerce sobre esta, similar al funcionamiento de un avión. Posee variados diseños y configuraciones tal como se presenta en la figura 1-5, pero el seleccionado para esta memoria será la configuración tipo H.

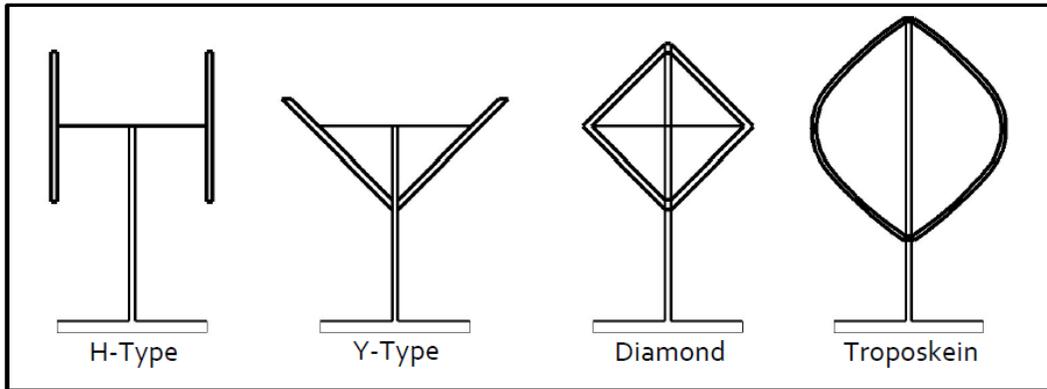


Figura 1-5 Diferentes tipos de configuraciones de turbinas Darrieus [3]

1.2.1.2.2 Turbina tipo Savonius

A diferencia de las turbinas tipo Darrieus, este tipo de turbinas funciona gracias a la fuerza de arrastre que se ejerce sobre esta. En general, están compuestas de dos álabes dispuestos en forma de un semi-cilindro, que conducen la circulación del fluido dentro de la turbina generando así un giro. [3]

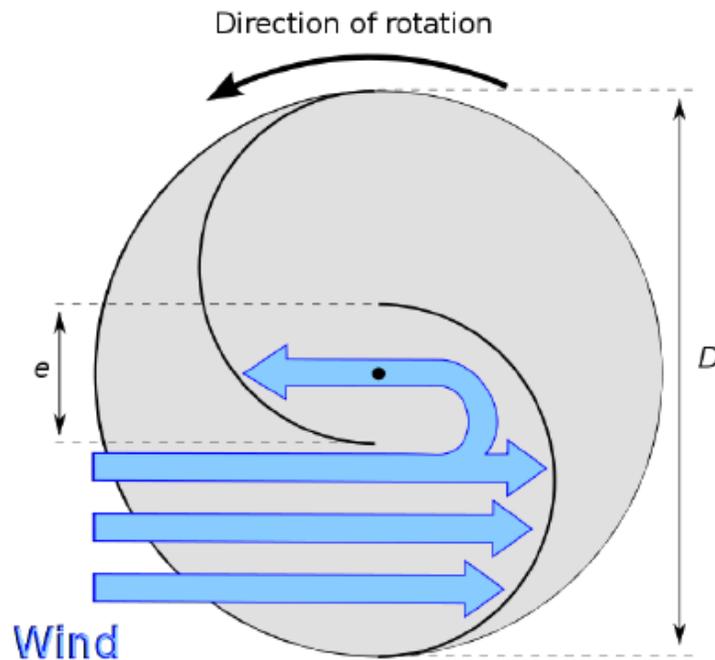


Figura1-6 Esquema de una turbina Savonius

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El principal objetivo planteado para esta memoria consiste en determinar diferentes coeficientes adimensionales (tales como el coeficiente de lift, drag, momento y potencia) de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus con configuración tipo H para distintos diseños de álabes en función de la velocidad de rotación de la turbina.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos para este trabajo son:

- Estudiar y caracterizar el comportamiento aerodinámico de 2 diseños de álabes en condiciones de operación de una turbina eólica tipo Darrieus.
- Comparar los resultados obtenidos para los dos diseños de álabes propuestos en función de la potencia global obtenida y su aerodinámica.
- Caracterizar el comportamiento global de la turbina en función del coeficiente de potencia respecto a la velocidad de giro la turbina para velocidad de viento fija.

1.4 Limitaciones

Las limitaciones expuestas para el desarrollo de este trabajo consisten en:

- Considerar una turbina Darrieus tipo H de no más allá de 5 [m] de alto y 3[m] de diámetro.
- Los álabes no se ven afectados por la temperatura ni deformaciones.
- El flujo incidente sobre la turbina es uniforme con una velocidad fija de 7 [m/s].
- La turbina posee 3 álabes.

2 Antecedentes aerodinámicos y modelamiento matemático

2.1 Aerodinámica de un perfil alar

Los álabes que se modelaran constaran con un cierto diseño el cual le otorgara aerodinámica a la turbina, por lo que es esencial poder conocer las componentes del diseño de perfiles alares para su posible estudio. Los perfiles alares son también usados en la industria aeronáutica en el diseño de alas de aviones, por lo que su estudio tiene bastante antecedentes. En la figura 2-1 se presenta un diseño alar con sus principales componentes [9].

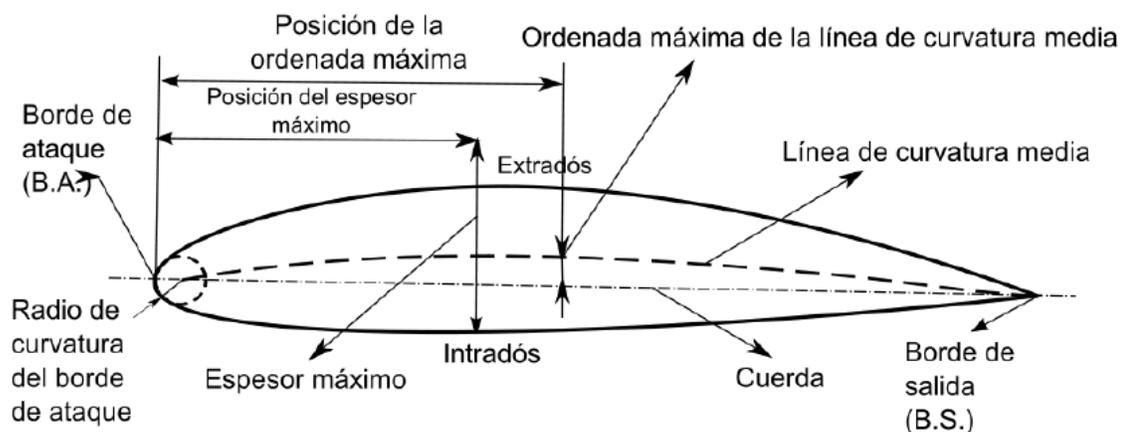


Figura 2-1 Características de un perfil alar.[9]

Borde de ataque: es el borde del perfil por el cual el flujo entra en contacto.

Borde de salida: o borde de fuga es el borde por el cual el flujo sale del perfil.

Cuerda: línea recta que conecta el borde de ataque con el borde de fuga del perfil. Por lo general esta se denomina como la distancia "c".

Extradós: es la curva del perfil sobre la cuerda,

Intradós es la curva bajo la cuerda

Línea de curvatura media: es la línea definida como el punto medio entre la extradós y la intradós.

Comba: es la distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil.

Espesor es la distancia perpendicular a la cuerda entre la intradós y la extradós.

Espesor máximo: máximo valor del espesor.

Dentro de los diseños de álabes se encuentran los diseños NACA los cuales presentan diferentes series de familias según los años de creación como a su vez los usos que se le den. A continuación se presenta una tabla resumen con sus principales ventajas y desventajas de cada familia[10]:

Tabla 2-1 Ventajas y Desventajas de las diferentes series de NACA

Familia	Ventajas	Desventajas
4-Digitos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Buenas características de pérdidas. 2. Pequeño centro de movimiento de presión para un alto rango de velocidades. 3. Rugosidad genera pocos efectos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo coeficiente de sustentación máximo. 2. Relativo alto arrastre. 3. Alto momento de pitcheo.
5-Digitos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Superior coeficiente de sustentación 2. Bajo momento de pitcheo. 3. Rugosidad genera pocos efectos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mal comportamiento de pérdidas. 2. Relativo alto arrastre.
16-Series	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evade puntos de baja presión. 2. Poco arrastre para bajas presiones. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Relativa baja sustentación.
6-Series	<ol style="list-style-type: none"> 1. Superior coeficiente de sustentación. 2. bajo arrastre para un rango pequeño en condiciones operacionales. 3. Optimizado para altas velocidades. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto arrastre para un rango fuera del operacional. 2. Alto momento de pitcheo. 3. Mal comportamiento de pérdidas 4. Muy susceptible a la rugosidad.
7-Series	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo arrastre para un rango pequeño en condiciones operacionales. 2. Bajo momento de pitcheo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reducido coeficiente de sustentación máximo. 2. Alto arrastre para un rango fuera del operacional. 3. Mal comportamiento de pérdidas. 4. Muy susceptible a la rugosidad.

Teniendo estos conceptos claros, ahora se puede ver las fuerzas actuante sobre los perfiles alares.

2.2 Fuerzas y coeficientes aerodinámicos.

Como bien se señaló en los antecedentes generales, las fuerzas que actúan principalmente en los distintos tipos de turbinas son las fuerzas de arrastre y sustentación, las cuales surgen luego de que un viento impacte sobre los álabes de la turbina. Dichas fuerzas se pueden apreciar en la siguiente figura:

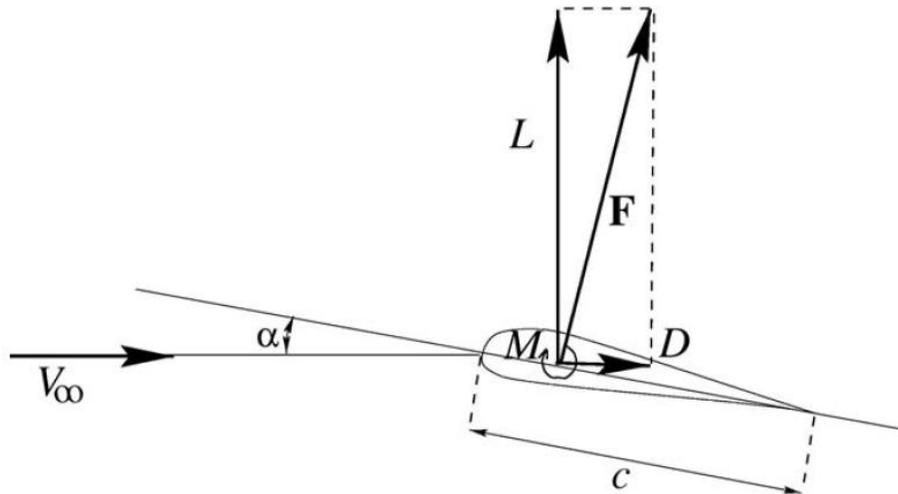


Figura 2-2 Fuerzas presentes en un álabes de una turbina. [11]

La fuerza D representa el arrastre o “Drag” en inglés y la fuerza L es la sustentación o “Lift”. Ambas fuerzas son el resultado de la descomposición de la fuerza F la cual es el resultado del impacto del viento con una velocidad V_∞ con un ángulo de ataque α sobre el álabes. Como el estudio trata sobre el análisis sobre una turbina Darrieus, la fuerza de mayor interés será la de sustentación.

La fuerza de sustentación es la fuerza que resulta perpendicular a la fuerza con la que impacta el viento al perfil alar, lo que genera un movimiento rotacional sobre las turbinas de eje horizontal y las de tipo Darrieus. Dicha fuerza se calcula de la siguiente fórmula [8]:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot c \quad (2.1)$$

En donde ρ es la densidad del aire, A es la superficie alar o área de referencia del cuerpo.

De las fuerzas aerodinámicas previamente mencionadas se pueden obtener los coeficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L), según las siguientes fórmulas [8]:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c} \quad (2.2)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c} \quad (2.3)$$

Ambos coeficientes representan la efectividad del diseño de un perfil alar para producir sustentación o arrastre según sea el caso. Por otra parte se puede contar con los coeficientes de momento (C_m), el coeficiente normal (C_n) a la cuerda y el coeficiente axial (C_a) a la cuerda:

$$C_A = \frac{A}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c} \quad (2.4)$$

$$C_n = \frac{N}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c} \quad (2.5)$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c^2} \quad (2.6)$$

Por último están los coeficientes de Torque (C_M) y Potencia (C_p), ambos relacionados con el rendimiento de la turbina ya que se son el cociente entre potencia o torque útil respecto a la proveniente del fluido.

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot R} \quad (2.7)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^3 \cdot A} \quad (2.8)$$

En donde A es el área de barrido (Diámetro por altura) y R es el Radio de la turbina. Finalmente, se poseen 2 parámetros adicionales que permite un buen análisis respecto al rendimiento de un perfil son la razón de velocidad de punta de álabe (o conocido como *tip-speed ratio* en inglés) y la solidez:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_\infty} \quad (2.9)$$

$$\sigma = \frac{n \cdot c}{R} \quad (2.10)$$

En donde ω es la velocidad de giro y n es el número de álabes. Ambos parámetros son muy utilizados en el diseño de turbinas dado que mediante estos se puede caracterizar el uso de una turbina en distintos puntos de operación [6].

2.3 Modelos Analíticos[12]

Para el desarrollo analítico del problema se utilizará la teoría basada en el modelo de mometum conocida como Double Multiple Streamtube, el cual presenta ciertos antecesores que permiten comprender de mejor manera su funcionalidad los cuales se describen a continuación.

2.3.1 Modelos de momentum

Las teorías basadas en los modelos de momentum tienen como objetivo poder determinar la potencia adquirida por la turbina considerándola como un disco actuador. El principio básico por el cual determinan la potencia es a través de un balance de momentum que se realiza al viento entre aguas arriba y aguas abajo del rotor, que en conjunto con la ecuación de Bernoulli es posible obtener el campo de velocidades que afectan a la turbina, y por ende se puede obtener la potencia. El primer modelo desarrollado es el modelo unidimensional ideal, que a pesar de ser muy simple, permite obtener el límite superior de potencia extraíble del viento conocido como límite de betz.

2.3.1.1 Modelo Unidimensional ideal

Para este caso base, se considera que cualquier turbina que enfrente algún flujo de aire actúa como un disco actuador que genera una discontinuidad en la presión que

posee el flujo. Además, para dicho análisis se debe considerar un flujo unidimensional, irrotatorio, no viscoso y en estado estacionario lo que conlleva a concluir que la velocidad aguas abajo del disco actuador resulta ser menor que aguas arriba, dado la transferencia de energía que ocurre en el disco actuador. En la figura 2-3 se aprecian las distintas velocidades asociadas al modelo, en donde V_1 es la velocidad en el flujo libre, V_2 es la velocidad antes del disco, V_3 es la velocidad después del disco, y V_4 es la velocidad de la estela ya estabilizada.

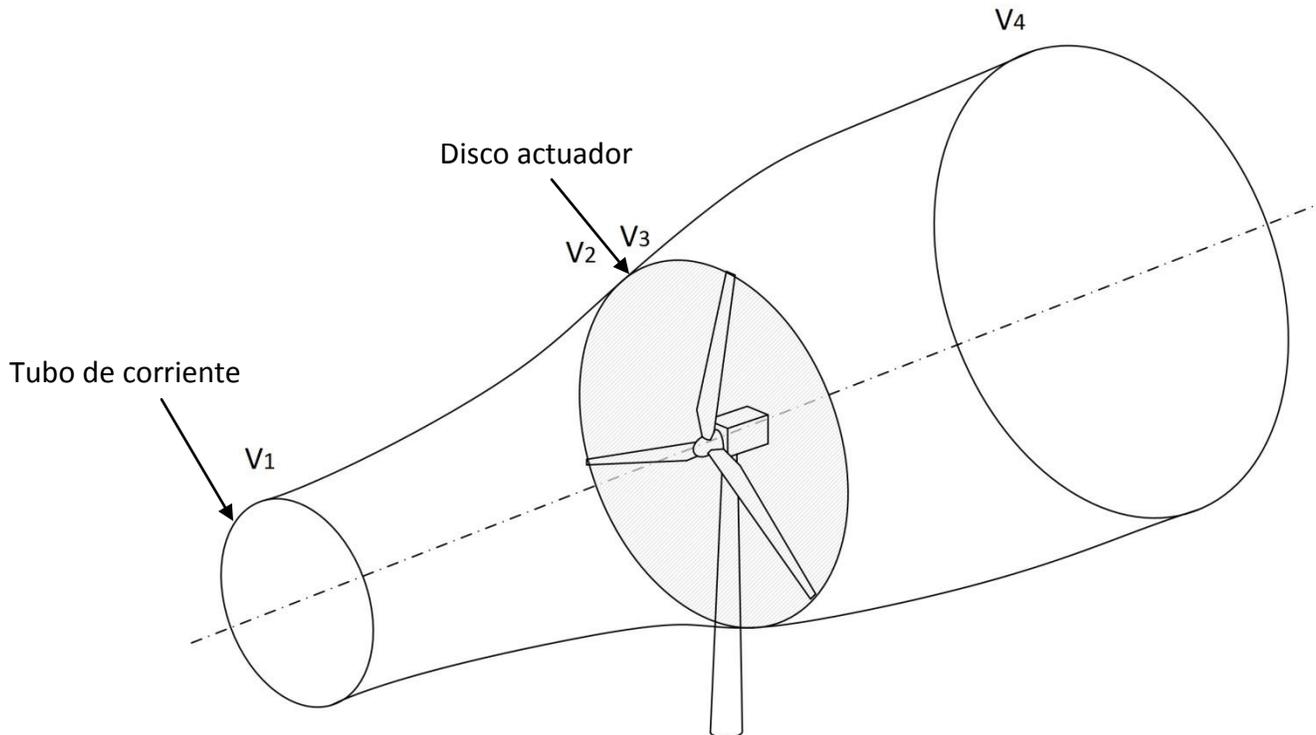


Figura 2-3 Esquema de la turbina según el modelo unidimensional[12].

Dadas estas condiciones, se puede determinar la fuerza ejercida por el viento sobre el rotor a través de la diferencia de momentum que ocurre sobre él.

$$T = \dot{m}(V_1 - V_4) \quad (2.11)$$

Tanto en la zona de aguas arriba de la turbina como aguas debajo de esta no ocurre trabajo alguno, por lo que se puede aplicar un volumen de control independiente a cada zona y aplicar la ecuación de Bernoulli, lo que conlleva a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + p_2 \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_3^2 + p_3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_4^2 + p_4 \quad (2.13)$$

Ahora bien, si tomamos en consideración los siguientes supuestos (todos ideales):

- La velocidad del aire justo antes y después de la turbina es la misma ($V_2 = V_3$).
- La presión del aire alejada del rotor es la misma tanto aguas arriba como aguas abajo ($p_1 = p_4$).
- El empuje sentido por el rotor visto en la ecuación 2.11 también puede ser descrito en función de una diferencia de presiones [$T = A_2(p_2 - p_3)$]

Se puede llegar a la siguiente relación:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A(V_1^2 - V_4^2) \quad (2.14)$$

Combinando esta última ecuación con la ecuación 2.11 se obtiene una expresión de la velocidad del rotor, siendo el promedio entre las velocidades de flujo libre y estela:

$$V_2 = \frac{V_1 + V_4}{2} \quad (2.15)$$

Con estas ecuaciones, se puede definir el factor de inducción, que no es otra cosa más que la razón entre la diferencia de velocidad en el flujo libre y la velocidad del rotor

$$\alpha = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \quad (2.16)$$

Por lo que se puede reescribir el empuje descrito por la ecuación 2.14 en función de este nuevo parámetro:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot V_1^2 (4\alpha(1 - \alpha)) \quad (2.17)$$

Con esta última expresión se puede escribir la potencia sobre el rotor como la multiplicación de su empuje T por la velocidad que posee que es V_2 . Todo esto, asumiendo que no hay cambios de energía interna en ningún momento del fluido y que no haya fricción.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot V_1^2 (4\alpha(1 - \alpha)) \cdot V_2 \quad (2.18)$$

Despejando V_2 de la ecuación 2.16 se obtiene finalmente

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot V_1^3 (4\alpha(1 - \alpha)^2) \quad (2.19)$$

Usando esta expresión en la ecuación 2.7 se puede obtener C_p en función de α

$$C_p = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot V_1^3 (4\alpha(1-\alpha)^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot V_1^3} = 4\alpha(1-\alpha)^2 \quad (2.20)$$

Si se desarrolla esta ecuación en función de α se puede obtener el siguiente gráfico, el cual presenta un punto máximo para un $\alpha = \frac{1}{3}$

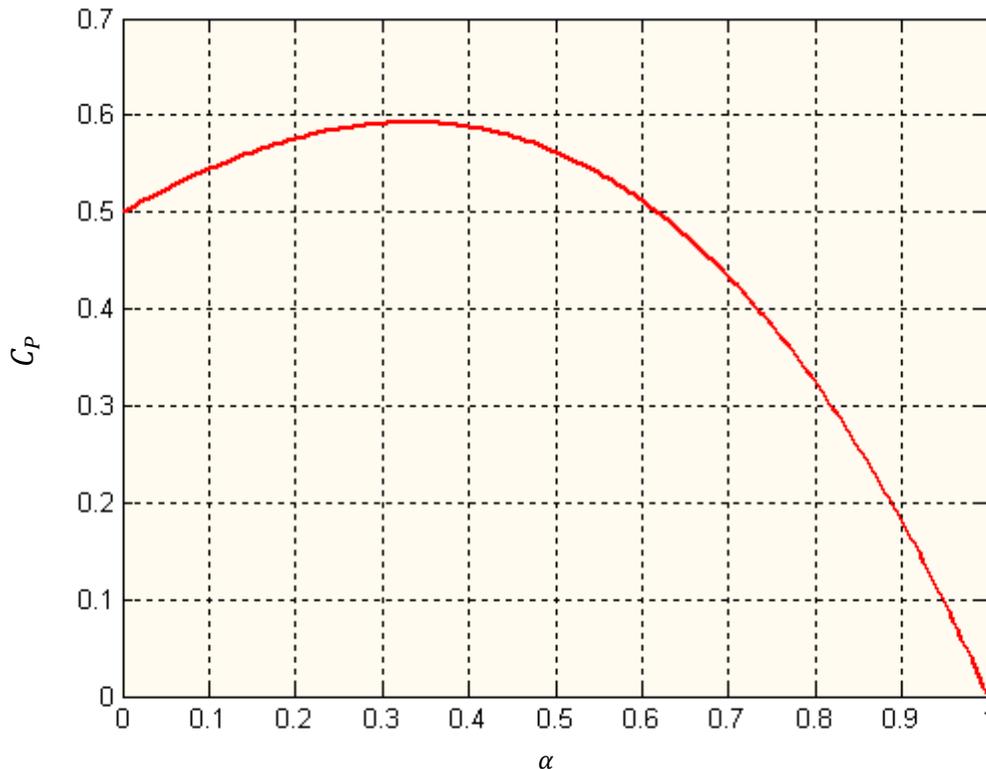


Figura 2-4 Relación entre el Cp de una turbina y α [5]

Obteniéndose así el famoso límite de Betz

$$C_p^{M\acute{a}x} \left(\alpha = \frac{1}{3} \right) = 0,5926$$

Como en el desarrollo de este modelo se utilizan una serie de supuestos que se consideran ideales, el ir agregando condiciones reales generara una reducción del valor de potencia, por lo que este límite es conocido como la máxima potencia extraíble que alguna turbina eólica pueda alguna vez alcanzar.

Con estos antecedentes, se puede desarrollar a continuación los siguientes modelos de momentum asociados a los tubos de corriente.

2.3.1.2 Modelo de Streamtube (o tubo de corriente)[13]

Al igual que en el caso anterior, el desarrollo del modelo se basa en la teoría del disco actuator, solo que a diferencia del caso anterior, aquí el flujo se divide en varias corrientes de tubo, y en cada uno de ellos se debe realizar un balance de momentum y utilizar la ecuación de Bernoulli, lo cual permite obtener un sistema de ecuaciones para cada tubo y con ellos se logra obtener un campo de velocidades de forma iterativa, dado que el empuje y las fuerzas aerodinámicas sobre el rotor están en función de la velocidad del rotor, que a su vez depende de estas.

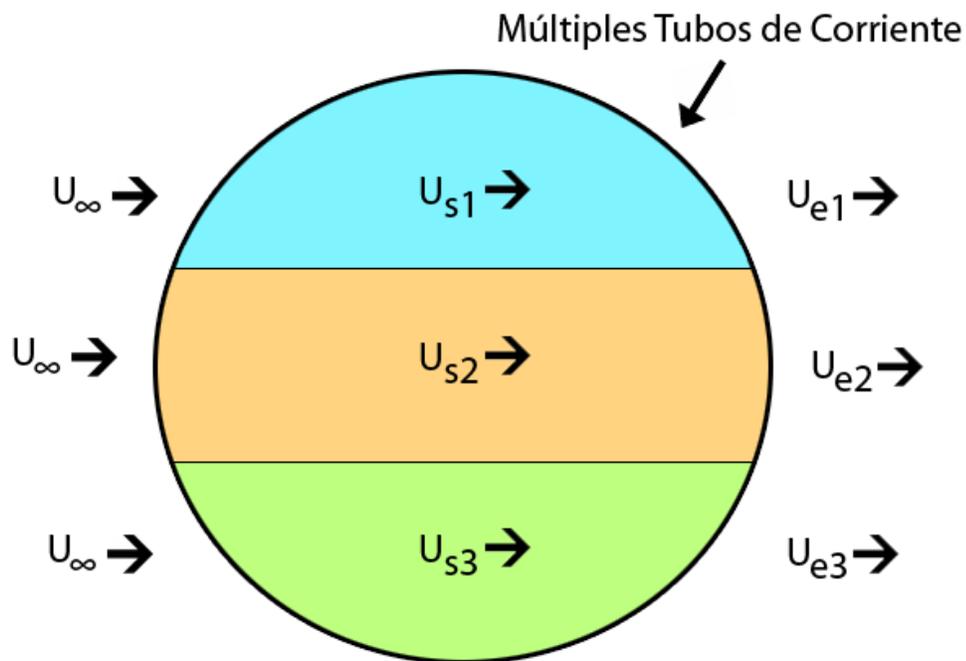


Figura 2-5 Esquema conceptual del modelo de múltiples tubos

Posterior a este modelo se desarrolló un modelo que conserva la idea de tubos múltiples, pero se incluyó la idea de que el rotor se dividiese en 2 y se considerara como un disco actuator doble. Este modelo fue desarrollado por Paraschivoiu[13]

2.3.1.3 Modelo de Double-Multiple Streamtube

El modelo de Double Multiple Streamtube (o DMS) es similar al caso de múltiples tubos de corriente, solo que en este caso el disco actuator se divide en 2 y se considera que están en serie. Esta diferencia se realiza a partir del hecho que los álabes pasan más de una vez por un mismo tubo de corriente, por lo que si el álabe interactúa primero con el flujo en la zona de aguas arriba de la turbina, la velocidad del

flujo se verá disminuida y por ende cuando el álabe pase por segunda vez en la zona de aguas abajo logrará transformar menos energía cinética a mecánica. El esquema del concepto de este modelo se presenta en la figura 2-6.

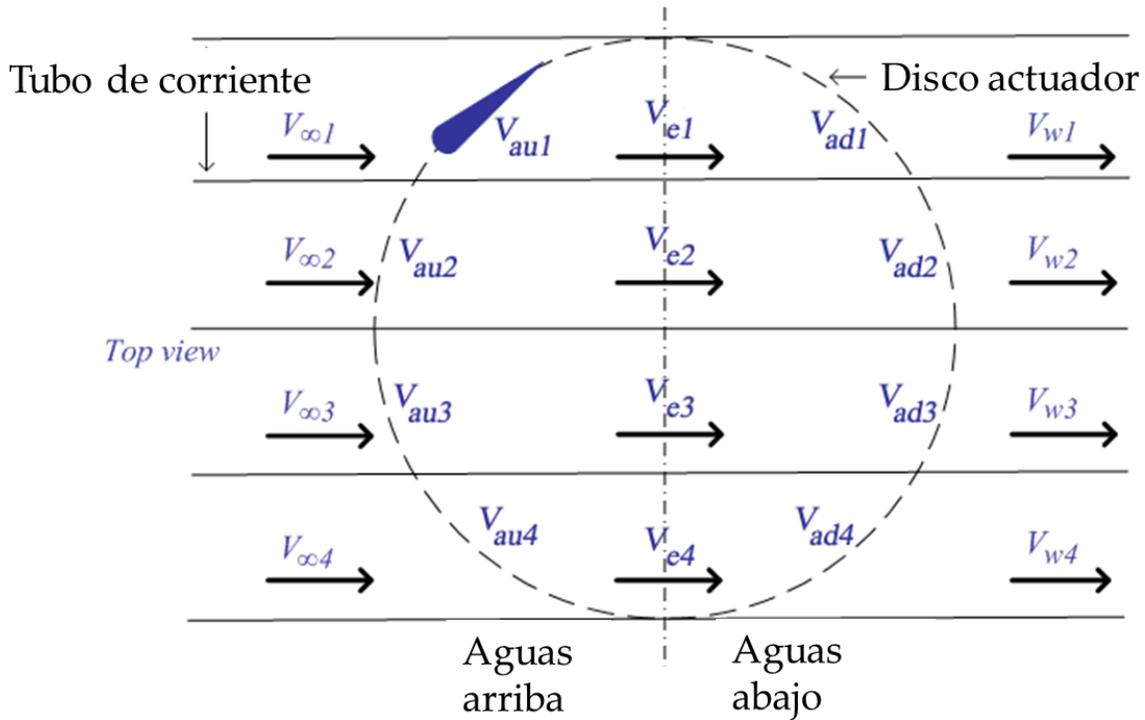


Figura 2-6 Esquema del principio por el cual actúa el DMS[14]

Para el desarrollo matemático de este modelo, se realizan ciertas variaciones al ya presentado dado que se agregan nuevas definiciones de velocidades. La velocidad V_{∞} corresponde a la velocidad de flujo incidente, V_{au} es la velocidad del flujo en la mitad aguas arriba, V_e es la velocidad de equilibrio entre el flujo mitad aguas arriba y aguas abajo y V_{ad} es la velocidad para el flujo aguas abajo. Al haber más de una interferencia sobre el flujo se debe generar un nuevo factor de interferencia y además redefinir el ya existen de la siguiente manera:

$$\alpha = 1 - \frac{V_{\infty}}{V_{au}} \quad (2.21)$$

$$\alpha' = 1 - \frac{V_e}{V_{ad}} \quad (2.22)$$

Esto permite calcular los coeficientes de las fuerzas ejercidas sobre los alabes tanto para aguas arriba como aguas abajo según lo propuesto por [15]:

$$C_{Tu} = 4a(1 - a) \quad (2.23)$$

$$C_{Td} = 2 \frac{V_{ad}}{V_{\infty}} \left(2 \frac{V_{au}}{V_{\infty}} - \frac{V_{ad}}{V_{\infty}} + \sqrt{\frac{V_{ad}^2}{V_{\infty}^2} + 2 \frac{V_{ad}}{V_{\infty}} + \frac{4V_{au} \left(\frac{V_{au}}{V_{\infty}} - \frac{V_{ad}}{V_{\infty}} - 1 \right)}{V_{\infty}} + 1 - 1} \right) \quad (2.24)$$

2.4 Variación del ángulo de ataque

Para el desarrollo de esta memoria es necesario estudiar como varía el ángulo de ataque al que se ve sometido el álabe de una turbina Darrieus durante el giro de una revolución. El valor del ángulo de ataque de un perfil alar incide directamente en la generación de Lift y el Drag según las velocidades de giro que se impongan a la turbina.

Resulta lógico pensar que si el álabe efectúa una revolución completa, el perfil se verá enfrentado a todos los ángulos de ataque posibles, es decir, de 0° a 180°. Sin embargo, esto es sólo correcto para velocidades de rotación muy bajas con respecto a la velocidad del viento; Contrario a lo que se podría pensar, a velocidades de rotación más altas, el álabe percibe una velocidad de viento relativa en adición a la velocidad del flujo incidente. Lo más correcto entonces sería tomar en cuenta la velocidad de rotación de la turbina, y a partir de esto determinar la velocidad efectiva del viento sobre el álabe, y el ángulo de ataque resultante.

Para ilustrar este efecto, sea la figura 2-7, donde el álabe está en una posición azimutal θ arbitraria. Tomando ωR como velocidad de rotación y U como velocidad del flujo incidente, se puede calcular geométricamente el ángulo de ataque de la velocidad efectiva U_R como la Ecuación 2.25, y la magnitud de dicha velocidad efectiva como la Ecuación 2.26.

$$\alpha = \arctan \left(\frac{U \sen(\theta)}{U \cos(\theta) + \omega R} \right) \quad (2.25)$$

$$U_R \sen(\alpha) = U \sen(\theta) \quad (2.26)$$

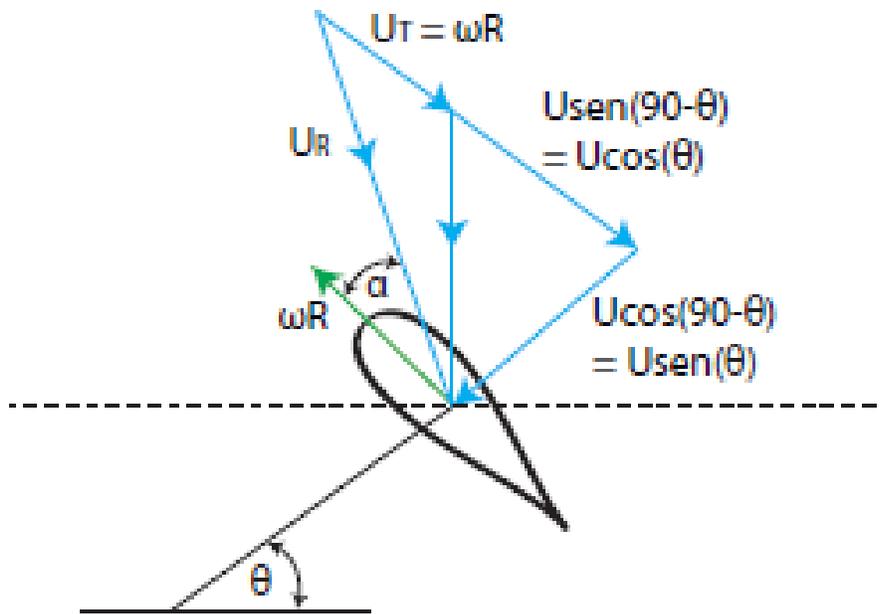


Figura 2-7 Variación de ángulo de ataque α con respecto al ángulo azimutal θ [9]

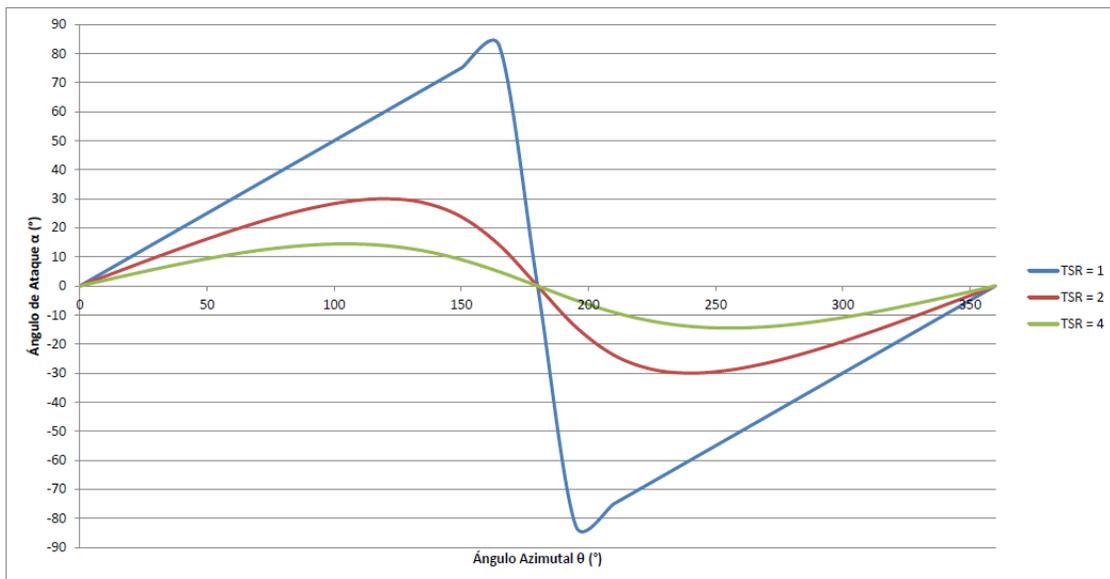


Figura 2-8 Ángulo de ataque V/S ángulo azimutal en función del TSR de la turbina.

2.5 Ecuaciones gobernantes.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido Newtoniano compresible son las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía. La ecuación de conservación de masa es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.27)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y $\vec{u} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ es el vector de velocidad.

Ahora se presentan las ecuaciones de Navier-Stokes o de conservación de momentum en x, y, z :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla v) + S_{My} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (2.30)$$

Donde ρ es la presión, y los términos S_M son términos de generación de momentum.

3 Metodología

3.1 Metodología específica

La metodología que se empleó en la realización de la presente memoria consiste en los siguientes pasos:

- Modelo Analítico: Se lleva a cabo el análisis mediante la teoría de momentum de Double Multiple Streamtube (o DMS) pudiendo obtener de esta manera los valores de los coeficientes aerodinámicos para los distintos casos planteados a realizar. Para ello se utiliza el programa computacional MATLAB que permite calcular de manera sencilla las ecuaciones involucradas. Dicho análisis se realiza para el perfil NACA 0018 para una velocidad fija.
- Modelamiento computacional: mediante el uso de ANSYS se modela el problema de forma 2D obteniendo así valores y resultados acorde a los objetivos planteados. Para dicho modelamiento se realizará un diseño CAD de los perfiles alares tipo NACA 0018 que permita así realizar los posteriores análisis.
- Verificación de resultados: En esta etapa se corroboran los resultados obtenidos a partir del modelamiento computacional coincidan con los del análisis analítico. En caso de discordancia se deberá realizar una revisión a lo realizado mediante el análisis hasta poder lograr una coincidencia entre ambos métodos.

3.2 Modelación mediante CFD

El desarrollo mediante el método de volúmenes finitos se realizara a través del software comercial ANSYS 14.5. En dicho programa se desarrolla un modelo de turbina Darrieus de álabes rectos mediante simulaciones en dos dimensiones del problema, dado que esto permite reducir los tiempos de iteración en las simulaciones lo cual hace viable realizar esta memoria. En todas las simulaciones realizadas se mantienen las dimensiones a establecer para su resolución, haciendo variar solo la velocidad de giro de la turbina (según el TSR que se desee evaluar) y el diseño de álabe a establecer.

3.2.1 Diseño de álabe

El álabe de la turbina es de la forma de un perfil NACA 0018. Los perfiles NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) fueron desarrollados por la organización de igual nombre. La familia de perfiles de cuatro dígitos 00XX están definidos por la Ecuación ((3.1)). El primer dígito indica el porcentaje de curvatura («camber») del perfil en porcentaje de la cuerda, mientras que el segundo dígito indica la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque del perfil en décimas de cuerda—ambos nulos en este caso, pues los perfiles NACA 00XX son simétricos. Los dos últimos dígitos de la nomenclatura describen apenas el grosor del perfil en porcentaje de la cuerda. Por tanto, el perfil NACA 0018 tiene un 18% de espesor respecto a su cuerda.

$$\frac{t}{0,2}c \left[0,2969 \sqrt{\frac{x}{c} - 0,1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0,3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0,2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4} \right] \quad (3.1)$$

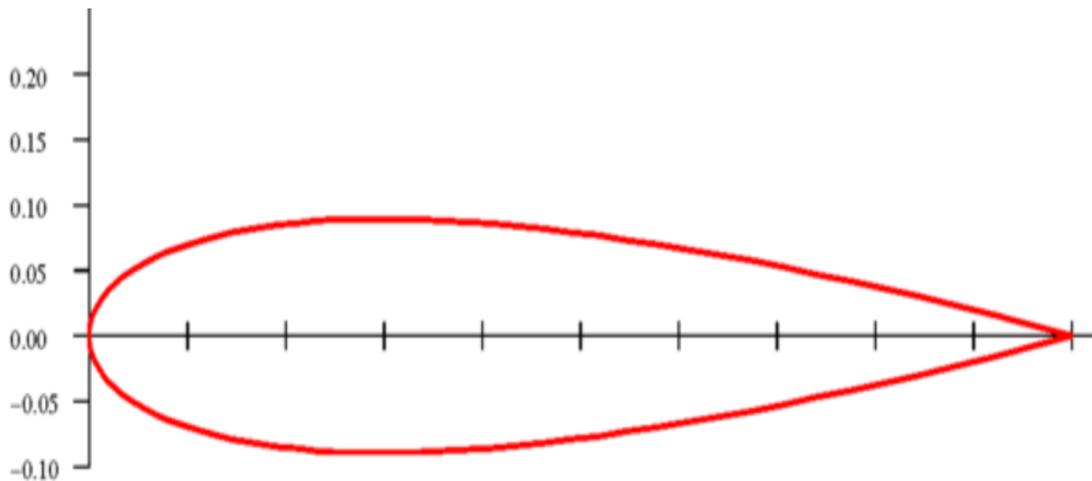


Figura 3-1 NACA 0018, cuerda=1m, y grosor =0,18m

3.2.2 Características de la turbina y su entorno.

El generador que se modela posee las siguientes características:

Tabla 3-1 Características de la turbina a modelar

Características	Dimensiones
Radio	3 [m]
Altura	1 [m]
Largo de cuerda	0,25 [m]
Nº de álabes	3
Diametro Eje	0,5 [m]
Perfiles	NACA 0018 y Rectangular
Velocidad del viento	7 [m/s]

El uso de la fluido dinámica computacional (o Computational fluid Dynamics en inglés) como herramienta en el diseño de sistemas de potencia a base de viento ha sido utilizado de gran manera. Esta herramienta permite predecir de buena forma el torque, la potencia y las diferentes fuerzas sobre el rotor, y por ende los coeficientes aerodinámicos antes señalados. Para la obtención de dichos parámetros se realizará un modelo 2-D tal como se plantea en [6] y [16]. En la figura 3-1 se muestra el modelo CAD desarrollado mediante Solidworks en el cual se explicitan las dimensiones utilizadas.

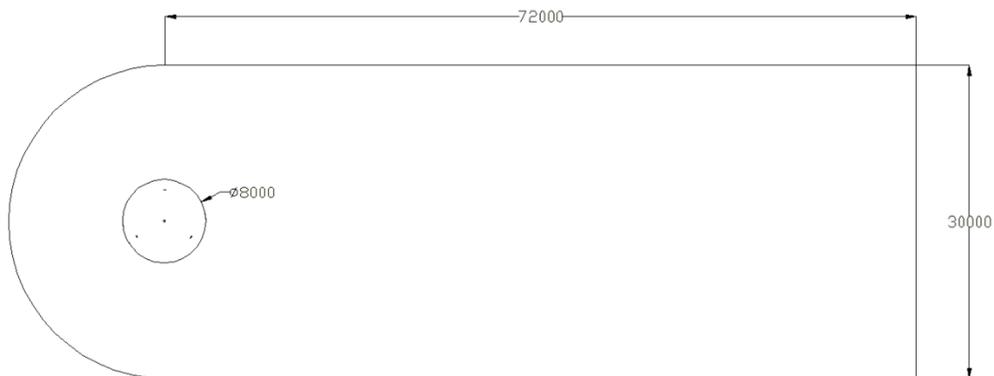


Figura 3-2 Modelo 2D de la turbina aplicado en un CFD [9]

Se genera un diámetro mayor sobre la turbina para que dicha zona sea giratoria a la hora de efectuar los cálculos, teniendo un diámetro de 8 [m]. El espacio de modelación debe ser considerablemente mayor al espacio que utiliza la turbina para que la simulación del flujo del viento no se vea afectado por las limitantes espaciales[9]; es por esto que el largo del dominio debe ser aproximadamente 12 veces el diámetro rotatorio y el ancho debe ser 4 veces el diámetro rotatorio[17].

Los casos a resueltos mediante el modelamiento computacional se resumen en la tabla 3-2:

Tabla 3-2 Resumen de casos a resueltos.

Casos	Perfil	V_{viento}	$w(\frac{rad}{s})$	TSR
1	NACA 0018	7 [m/s]	2,33	1
2	NACA 0018	7 [m/s]	7,00	3
3	NACA 0018	7 [m/s]	9,33	4
4	NACA 0018	7 [m/s]	11,67	5
5	NACA 0018	7 [m/s]	14,00	6
6	Rectangular	7 [m/s]	2,33	1
7	Rectangular	7 [m/s]	7,00	3
8	Rectangular	7 [m/s]	9,33	4
9	Rectangular	7 [m/s]	11,67	5

3.2.3 Mallado

El mallado utilizado se logró determinar luego de realizar una independencia a la malla con cantidades que variaron entre los 150.000 a los 250.000 elementos resolviendo el caso estacionario, lo cual permitió determinar finalmente que la malla optima corresponde a la que posee 203.155 elementos. En el gráfico 3.1 se presentan los resultados de la comparación entre las mallas evaluadas.

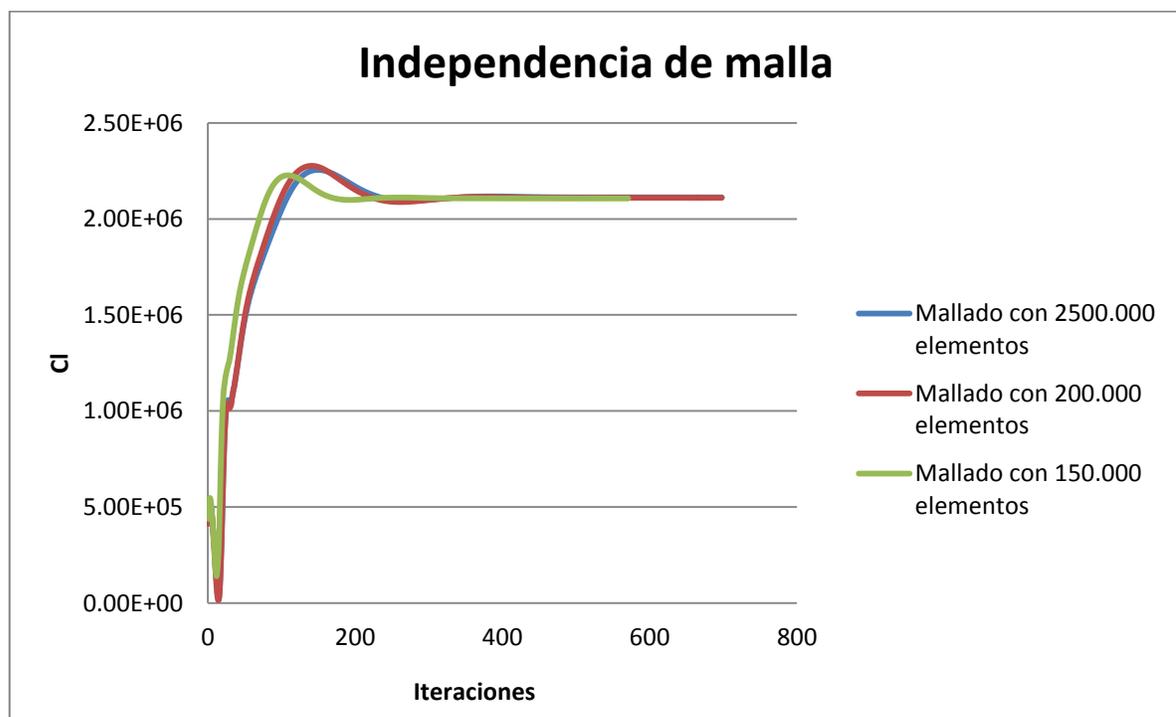


Figura 3-3 Casos resueltos para la independencia de malla

Los datos de dicha malla se presentan en la tabla 4-1, en donde se puede apreciar que dicha malla presenta una calidad aceptable debido de su bajo promedio de Skewness (inferior a 0,3) y alto promedio de ortogonalidad (superior a 0,8), lo cual indica, según las normas establecida por ANSYS, como una malla aceptable.

Tabla 3-3 Características principales de la malla

Métrica	Valor
Nodos	102.510
Elementos	203.155
Skewness Máxima	3,86E-12
Skewness Mínima	0,82
Skewness Promedio	1,66E-02
Ortogonal Máxima	0,41
Ortogonal Mínima	0,9999
Ortogonal Promedio	0,9901

En la figura 3-3 se presenta un zoom a la zona de mallado giratorio y la malla estática en donde se puede apreciar que la cantidad de elementos es mas elevada en la zona giratoria dado que es ahí donde se produce la interacción entre la turbina y el viento y por ende es la zona en la cual se busca un mayor detalle de los resultados.

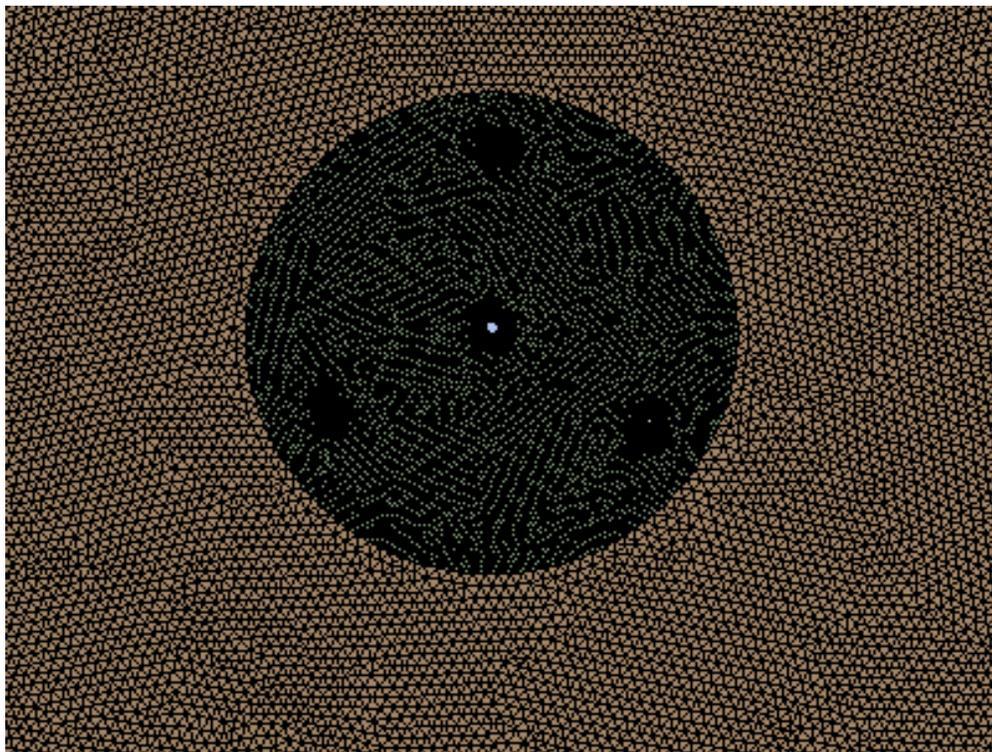


Figura 3-4 Mallado sobre zona giratoria y zona de malla

Por otra parte en la figura 3-4 se aprecia el detalle del mallado sobre uno de los álabes en el cual se puede apreciar la inflación realizada sobre este en base al modelo de turbulencia a utilizar en conjunto con las condiciones impuestas sobre el sistema.

Para la realización de dicho modelo, fue necesario implementar la ecuación de inflación:

$$\Delta y = L y^+ \sqrt{74} Re_L^{-\frac{13}{14}} \quad (3.1)$$

Para la cual se tienen los siguientes valores para los diferentes valores requeridos para su obtención, dando finalmente que la primera capa corresponde a un Δy de 7,2E-02.

Tabla 3-4 Valores requeridos para la Inflación

Inflación	
ρ [kg/m ³]	1,25
μ [Pa s]	1,8 E-05
L [m]	0,25
Reynolds	121.528
Y+	2
Δy	7,2 E-02

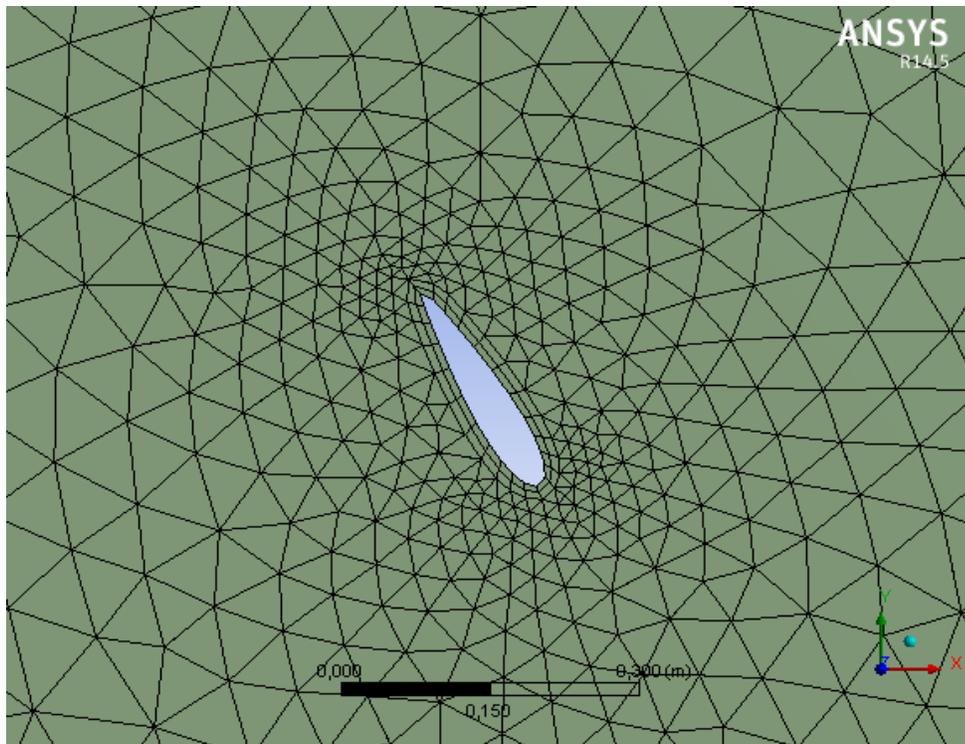


Figura 3-5 Detalle del mallado sobre uno de los álabes

3.2.4 Procedimiento implementado

Para cada modelo realizado se realiza inicialmente un desarrollo en régimen estacionario el cual no aporta información relevante para el análisis del trabajo, pero sí da como base información necesaria para obtener resultados en modo transiente de forma más efectiva. Una vez obtenido un resultado para el caso estacionario se procede a realizar un análisis transiente haciendo rotar a la turbina como mínimo 3 giros dado que esto permite asegurar la convergencia de los resultados a valores que se debiesen esperar para este tipo de turbinas, evitando así datos erróneos o que no representen la realidad.

En el caso del régimen estacionario se impone la velocidad angular de la turbina según el TSR a utilizar, junto con usar como método de solución para el acoplamiento de ecuaciones el método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) realizando discretizaciones espaciales de presión, momentum, energía cinética de turbulencia k , tasa de disipación específica de turbulencia y energía de primer orden.

Por otra parte, el modelo transiente se usa como método de solución para el acoplamiento el PISO (*Pressure Implicit with Split Operator*) y a las discretizaciones antes señaladas serán de segundo orden. La discretización del tiempo será de primer orden y será la misma para ambos casos. El time step utilizado en todos los casos es de 0,05 y el número de time step requeridos varía según la velocidad de giro de la turbina. Dicho número se ve expresado en la siguiente tabla para los diferentes casos:

Tabla 3-5 Número de time steps necesario para cada TSR para un time step de 0,05

TSR	W [rad/s]	Sec/Giro	Nº de time steps
1	2,33	2,69	54
2	4,67	1,35	27
3	7,00	0,90	18
4	9,33	0,67	13
5	11,67	0,54	11
6	14,00	0,45	9

Respecto a la modelación con turbulencia se utilizará el modelo $k - w$ SST dado que dicho modelo combina la utilización del modelo básico $k - \epsilon$ en conjunto con el modelo $k - w$ que presenta un nivel de detalle demasiado alto si se considerara trabajar únicamente con este, lo cual supera el alcance de la memoria. Además, dicho modelo ha sido utilizado con éxito en los trabajos realizado por [18] y [19].

3.2.5 Condiciones de borde

Las condiciones de borde planteadas para la simulación se presentan en la figura 3-6, en donde se aprecia que a la izquierda esta la entrada de velocidad de aire como condiciones Velocity Inlet, y por otra parte se tiene que a la derecha del modelo se encuentra la condición de Velocity outlet e la cual se condiciona como presión atmosférica de salida. Por otra parte, sobre y bajo la turbina se imponen condiciones de simetría y tanto los álabes como el eje de la turbina se consideran como paredes.

Para el modelo turbulento se impone una intensidad de turbulencia de 1% con escala de longitud turbulenta de 0,1 [m]. Estos parámetros se escogieron en base a lo señalado por [9] según otros estudios ya realizados.

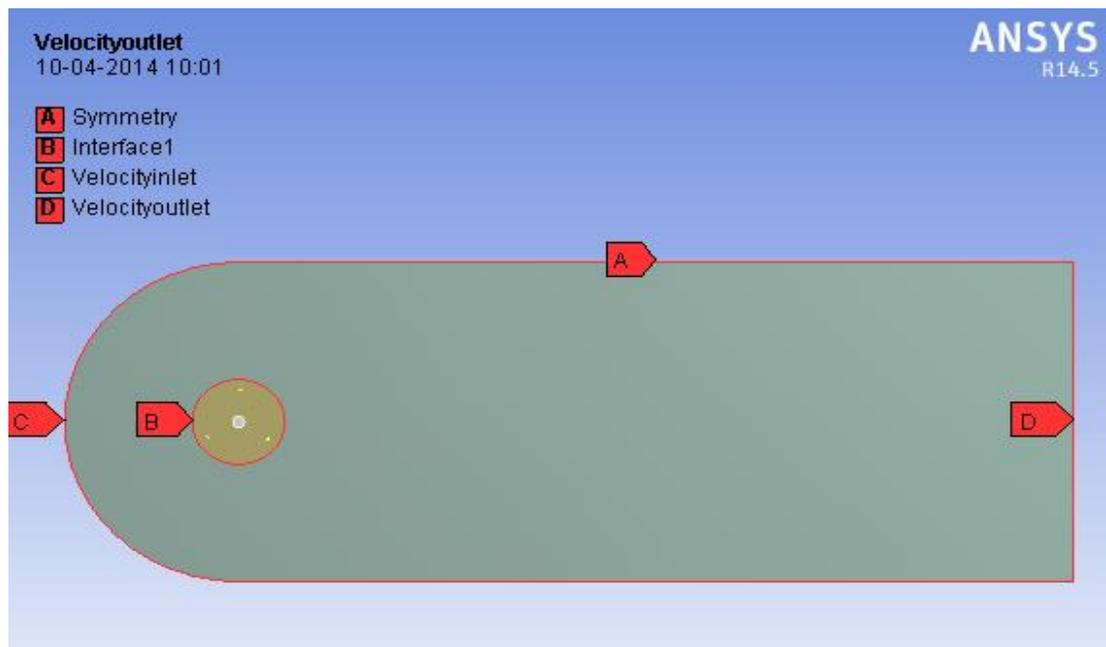


Figura 3-6 Condiciones de bordes para la simulación realizada.

4 Resultados obtenidos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tanto para el modelo analítico en donde se caracteriza la curva del coeficiente de potencia sobre los TSR evaluados, como el modelo desarrollado por CFD en donde además de presentar la curva ya mencionada, se agregan los contornos de velocidad y presión sobre los álabes ne los momentos de máxima y mínima obtención de potencia. Consta además de una sección en la cual se validan los resultados obtenidos por el modelo computacional gracias a lo desarrollado por el DMS.

4.1 Resultados del modelo DMS

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el modelo DMS presentado en forma de gráficos para el perfil alar NACA 0018 para una velocidad 7 [m/s]. Los valores obtenidos son acordes a lo presentado según diversas fuentes que poseen turbinas con características similares [9][15].

El modo de solución empleado para este caso se realizó mediante el uso de MATLAB en conjunto con valores de coeficientes de Drag y Lift asociados al perfil alar recién señalado en base a lo que se indica por [17], los cuales permiten determinar las fuerzas sobre los alabes, y por ende el torque sobre estos.

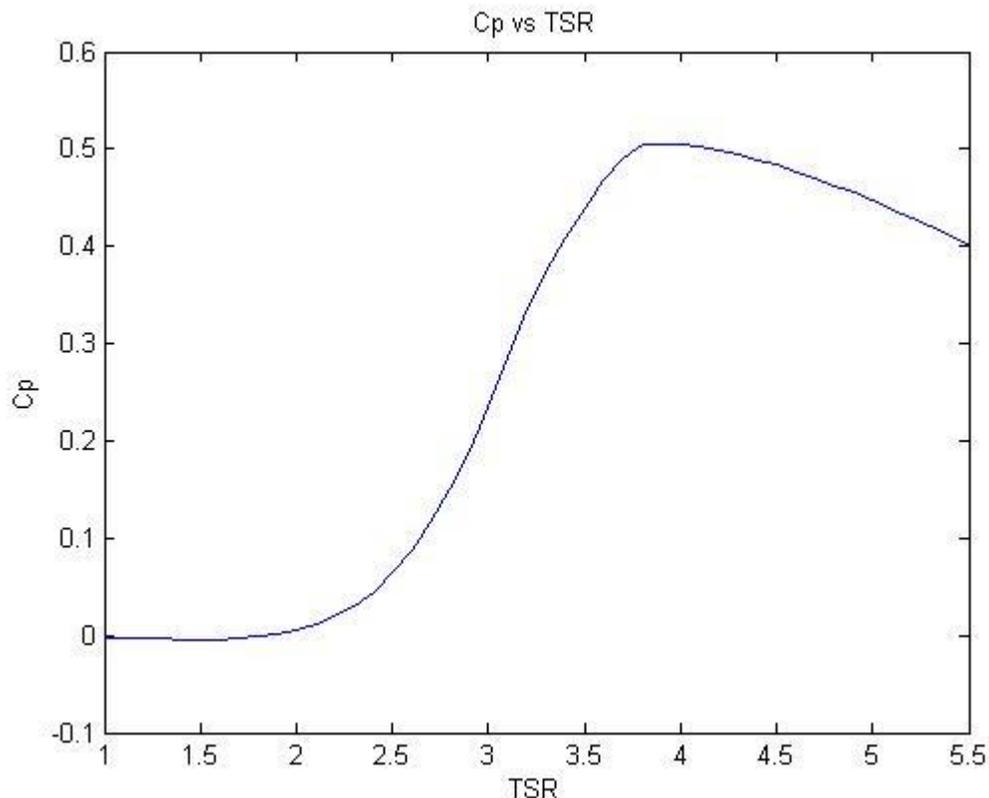


Gráfico 4-1 Curva C_p vs TSR para una velocidad de 7 m/s y un perfil NACA 0018

4.2 Resultados del modelamiento computacional

A continuación se presentan los resultados obtenidos para todos los casos modelados mediante FLUENT (es decir, los 2 diseños de álabe seleccionados) señalando los graficos del coeficiente de potencia en funcion del TSR como también los detalles de los resultados obtenidos para los diferentes TSR empleados para cada tipo de álabe.

4.2.1 Resultados para el diseño de álabe NACA 0018.

Los resultados globales obtenidos para este caso corresponden a los presentados según la tabla 4-1 y su gráfico 4-2, en donde se presenta la evolución del coeficiente de potencia en fucion del TSR de la turbina.

En el gráfico 4-2 se puede apreciar que el máximo obtenido para este caso se encuentra cercano a un TSR= 4, el cual era de esperar según los antecedentes presentados en la sección respectiva de la presente memoria.

Tabla 4-1 Coeficiente de potencia promedio para cada TSR evaluado

TSR	Cp
1	0,0587
3	0,4040
4	0,5347
5	0,5018
6	0,2404

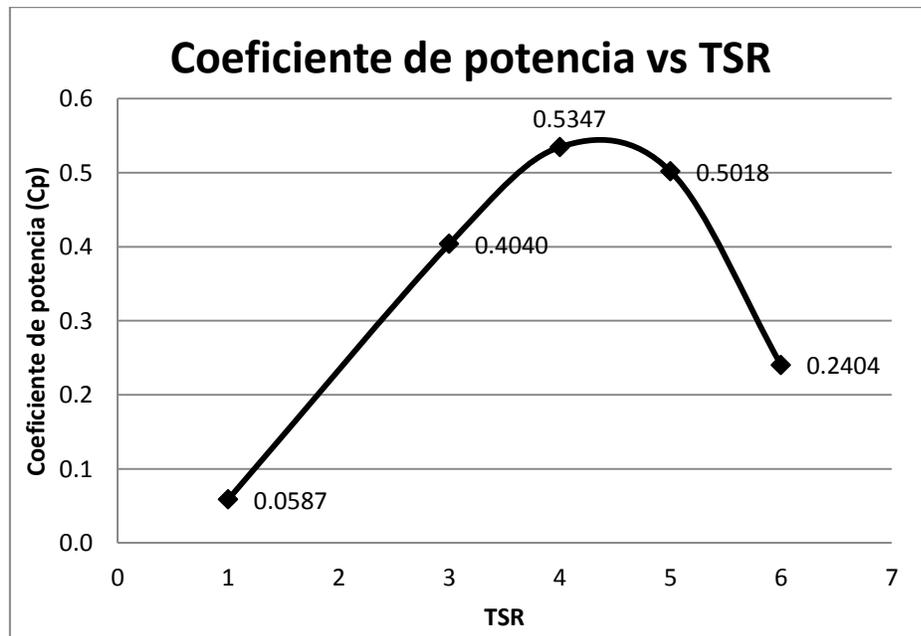


Gráfico 4-2 Curva Cp vs TSR para perfil NACA 0018

4.3 Validación

Los resultados obtenidos mediante el modelamiento computacional deben presentar un respaldo sobre su validez dado que muchas veces este tipo de programas presentan resultados erróneos que a simple vista pudiesen parecer estar bien, en especial cuando se trata de resultados visuales en los cuales se presentan contornos. Es por esto que en la metodología se presentó como propuesta para la validación de dichos resultados realizar el desarrollo numérico mediante MATLAB sobre la teoría presentada como DMS. En el gráfico 4-3 se logra apreciar que los resultados obtenidos por el CFD son en su mayoría mayores a los del DMS; este motivo ocurre ya que para valores bajos (es decir, para TSR que van entre 1 y 4) el efecto de la pérdida dinámica no es descrito por el DMS, lo cual conlleva a obtener menores potencias obtenibles. Por otra parte, para TSR mayores a los señalados, se tiene que el modelo DMS alcanza valores mayores a los obtenidos por el desarrollo computacional; La causa de esto es que en dichas velocidades los efectos de las estela del eje se hacen cada vez más notorias, lo cual implica menores potencias que no logran ser descritas mediante el modelo analítico.

A pesar de las diferencias ya planteadas entre las distintas curvas, se considera que ambas describen de buena forma el fenómeno planteado, dando por validado el modelo desarrollado por el DMS.

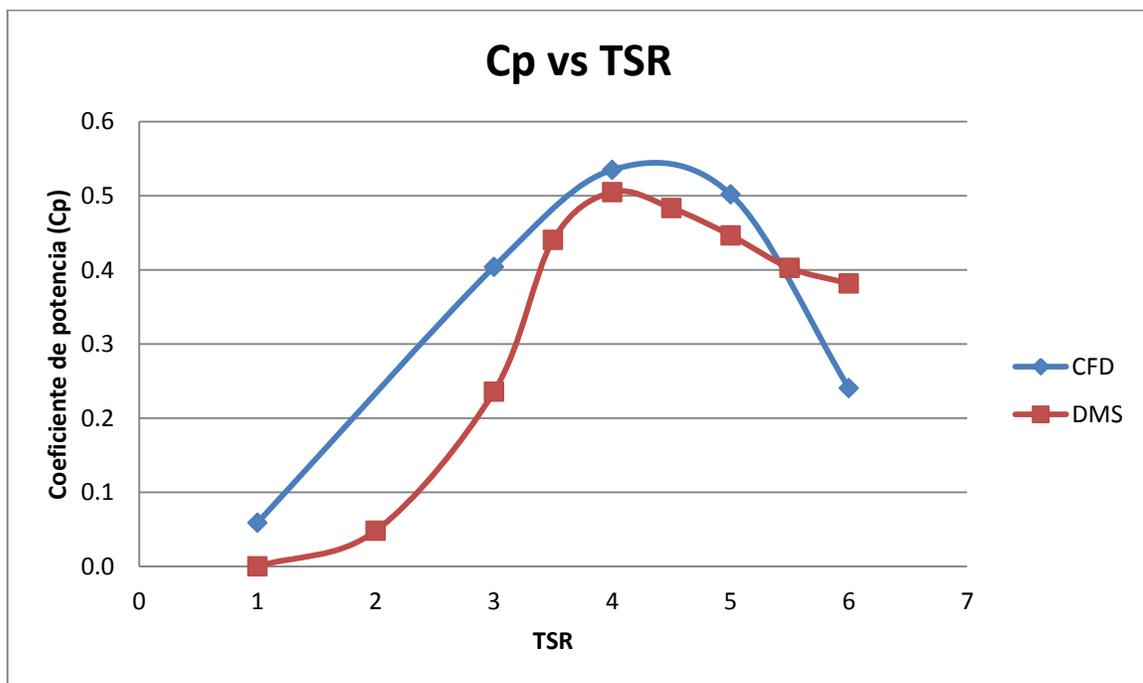


Gráfico 4-3 Cp v/s TSR para modelo CFD y DMS

4.3.1 Detalle de resultados para el diseño de álabe NACA 0018

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en detalle para las diferentes velocidades de rotación realizadas en el caso del perfil alar NACA 0018. En cada una se entrega un detalle de los coeficientes de momento obtenidos, las velocidades y presiones para los casos de máxima y mínima potencia.

4.3.1.1 TSR 1

El primer resultado a presentar serán los coeficientes de momentos obtenidos por FLUENT tanto para cada álabe individualmente como la totalidad de estos. En ella se puede apreciar que cada alabe presenta un comportamiento similar pero se diferencian en que están desfasados en 120° como es de esperar dada la geometría de la turbina. En el caso de la curva total no se presenta una tendencia clara a causa de los valores negativos que presentan los coeficientes de momento para este caso. Esto se debe a varios factores, siendo uno de estos el hecho de que como se trata de una velocidad de giro muy baja, los momentos que surgen sobre los alabes resultan ser alternantes. Otro factor que influye en la oscilación de los valores obtenidos es el hecho de que para $TSR=1$, los ángulos de ataque que se presentan poseen un rango muy amplio, lo cual permite al álabe pasar por las zonas en las cuales se generaren pérdidas dinámicas ocurriendo así desprendimientos de capas límites a lo largo de la rotación de la turbina, lo que conlleva a disminuciones del Lift, hecho que implica una menor obtención de potencia.

El punto de máximo coeficiente de momento se obtiene para un ángulo de 50° ; Este valor era de esperar dado que según el ángulo de ataque que existe para un $TSR=1$ la entrada en pérdida comienza a surgir en dichos valores lo cual es favorable para la generación de Lift, y por ende, la generación de momento. Por otra parte, el menor valor de C_m ocurre para un ángulo de 213° en el cual el coeficiente de momento para el primer álabe resulta ser negativo, junto con además presenciar la caída paulatina del coeficiente para el álabe 3 y el inicio del aumento para el álabe 2. Esto se debe principalmente a que 2 de los 3 álabes se encuentran aguas abajo, caso similar ocurre para un ángulo cercano a 100° , pero se diferencian en que la pérdida ocurrida por el primer álabe en dicho caso no resulta ser tan drástica como la que ocurre para el tercer álabe a los 213° .

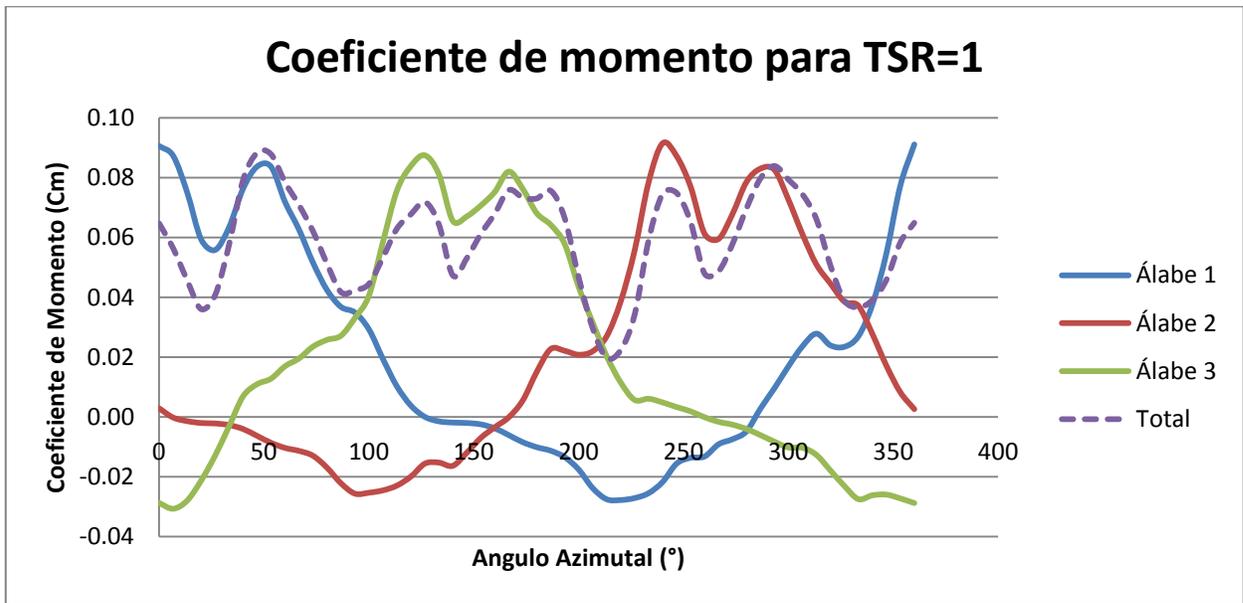


Gráfico 4-4 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=1

En la figura 4-1 se aprecia el contorno de velocidad para el primer álabe en el momento posterior al máximo C_m , ya que se hace más evidente el desprendimiento del vórtice sobre el álabe. El hecho de que en la superficie interior del álabe presente una menor velocidad indica que existe un gradiente de velocidad en el sentido favorable a la generación de momento, lo cual implica un mayor toque sobre este. Las magnitudes alcanzadas por el viento en este caso no resultan ser muy elevadas debido a la baja velocidad de rotación que presenta la turbina para TSR=1.

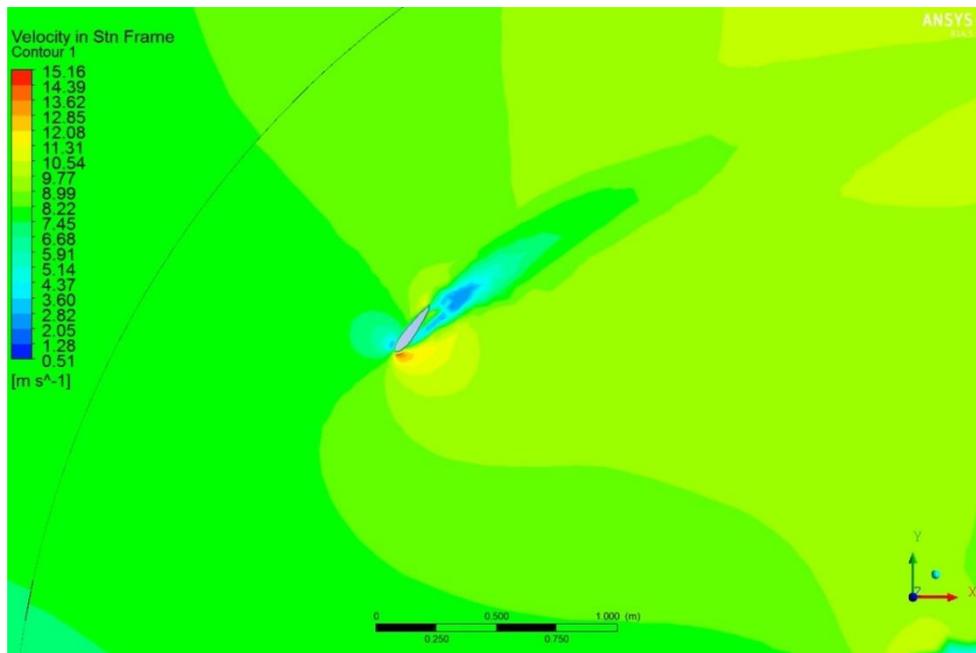


Figura 4-1 Contorno de velocidad para el primer álabe en condición de máximo C_m con un TSR=1

Por otra parte, en la figura 4-2 se presenta la diferencia de presiones relativas existente entre las cara interna y externa del álabe; en ella se aprecia que aparecen presiones negativas las cuales corresponden a presiones bajo la atmosférica lo cual indica que ocurre un efecto de succión sobre la cara interna. La distribución de presiones que se produce con las recirculaciones genera una fuerza tangencial alta y por ende un torque alto.

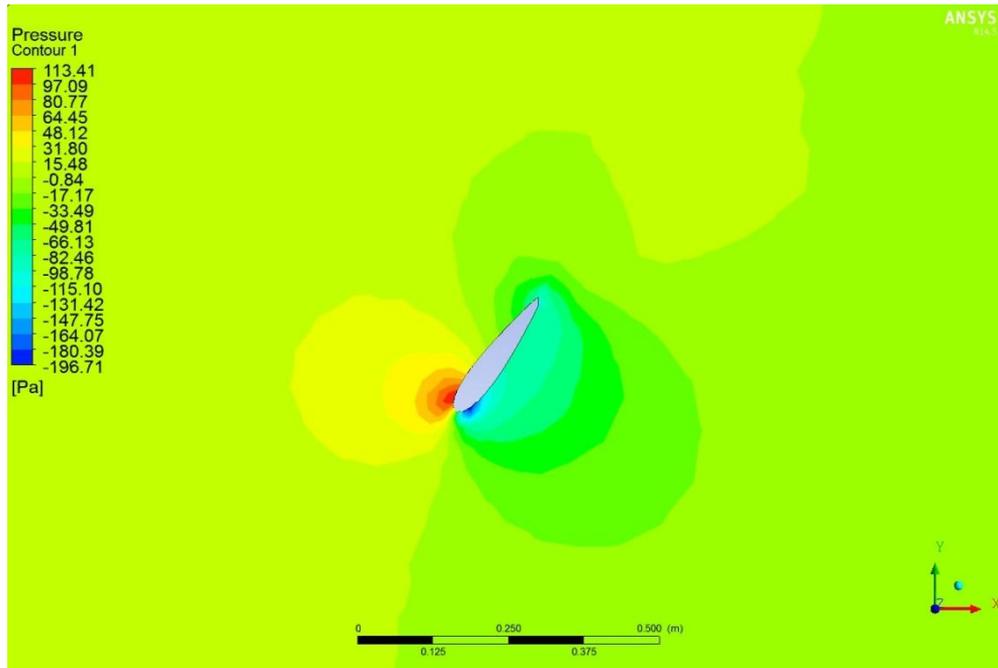


Figura 4-2 Contorno de presión para el primer álabe en condición de máximo C_m con un $TSR=1$

En contraste con los casos anteriores, se presentan los contornos de velocidad y presión para el primer álabe para el caso en que el coeficiente de momento total es mínimo. Ello ocurre cuando el primer álabe se encuentra en un ángulo de 213° . Es de esperar que el C_m mínimo ocurriese aguas abajo de la turbina dado que la velocidad incidente sobre los alabes en dicha zona resulta ser muy inferior a la de aguas arriba tanto por la interacción ocurrida con los álabes previamente como con el eje central de la turbina.

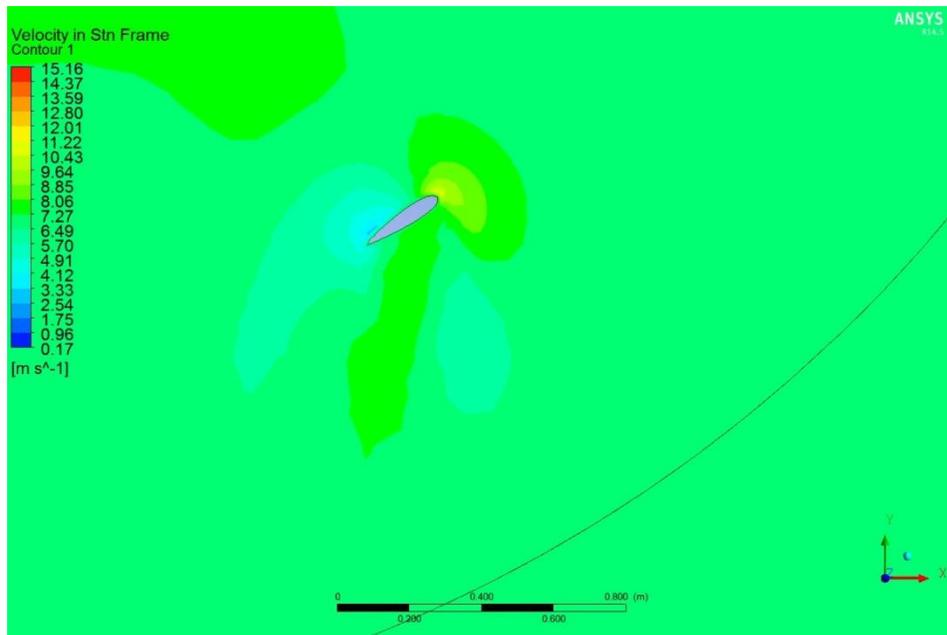


Figura 4-3 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=1$

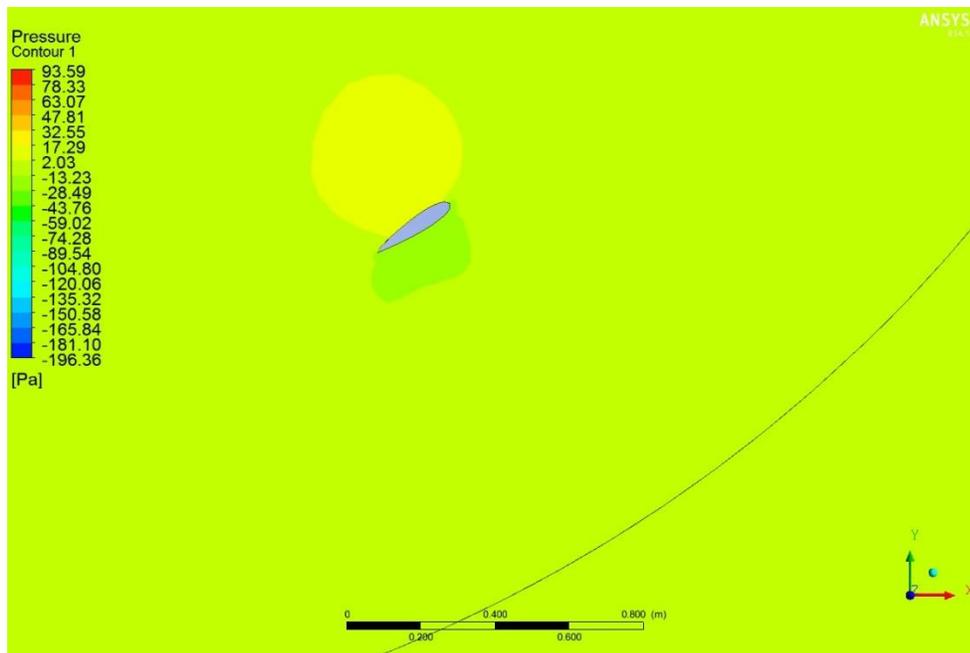


Figura 4-4 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=1$

Por último se presenta el efecto de la estela generada por la turbina sobre el global del espacio muestral. En ella se aprecia el efecto tanto de los álabes como del eje en las velocidades al interior y exterior de la turbina, en especial a la estela generada por esta.

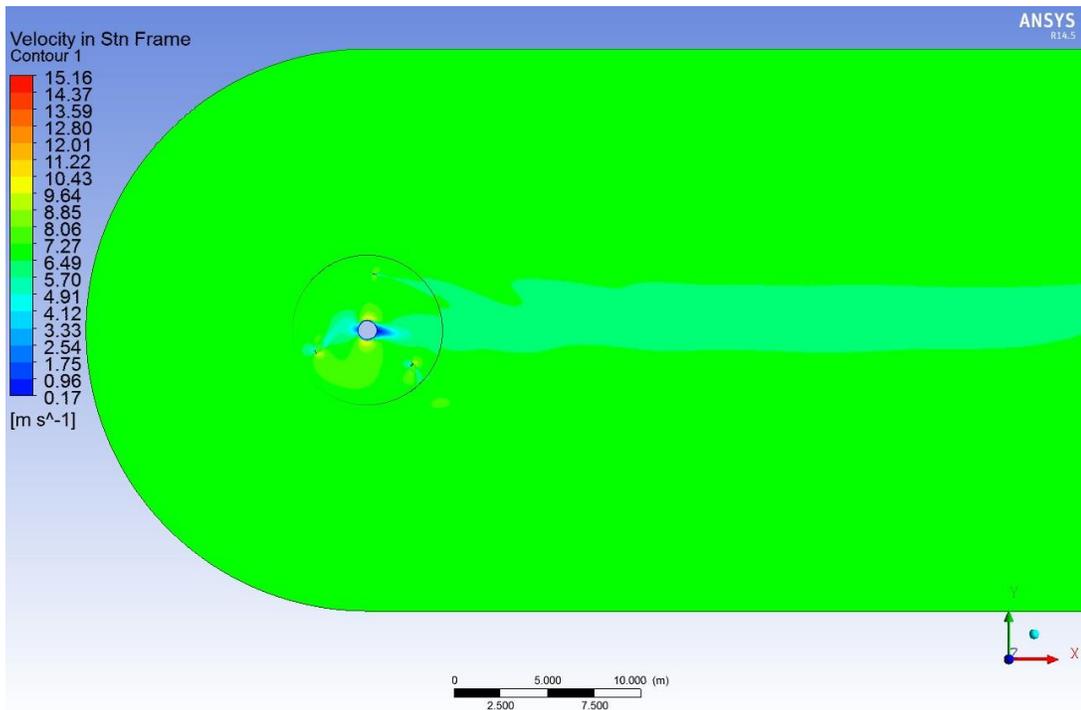


Figura 4-5 Contorno de velocidad para el final de la tercera vuelta con un TSR =1

4.3.1.2 TSR 3

Al igual que en el caso del TSR=1, se inicia describiendo las curvas obtenidas para los coeficientes de momento tanto como para cada álabes como a la totalidad de la turbina. En este caso, el punto en el cual se obtiene la máxima potencia resulta ser para un ángulo de 240° . De igual manera existe un peak menor para 120° , el cual se debe a que aún existen desprendimientos que ocurren sobre los álabes pero en menor medida, logrando curvas muchos más suaves que para el caso con un TSR=1. El mínimo ocurre para los 160° que se debe principalmente a la estera generada por el eje, la cual afecta enormemente al tercer álabes obteniéndose valores negativos por un breve periodo de tiempo. En el ángulo 240° , se aprecia que los álabes se encuentran desfasados en 120° respecto a su posición original al iniciar el giro. En dicha instancia, el tercer álabes se encuentra a 120° respecto al 0° por lo cual, como se verá en la figura 4-8, se genera un desprendimiento significativo de un vórtice, el cual genera un gran torque pero a su vez oscilaciones propias del desprendimiento.

Si bien en este caso la variación del ángulo de ataque no resulta ser tan drástica como con un TSR=1 (ver figura 2-8) se logró alcanzar de todas formas el desprendimiento de vorticidad por perdida dinámica.

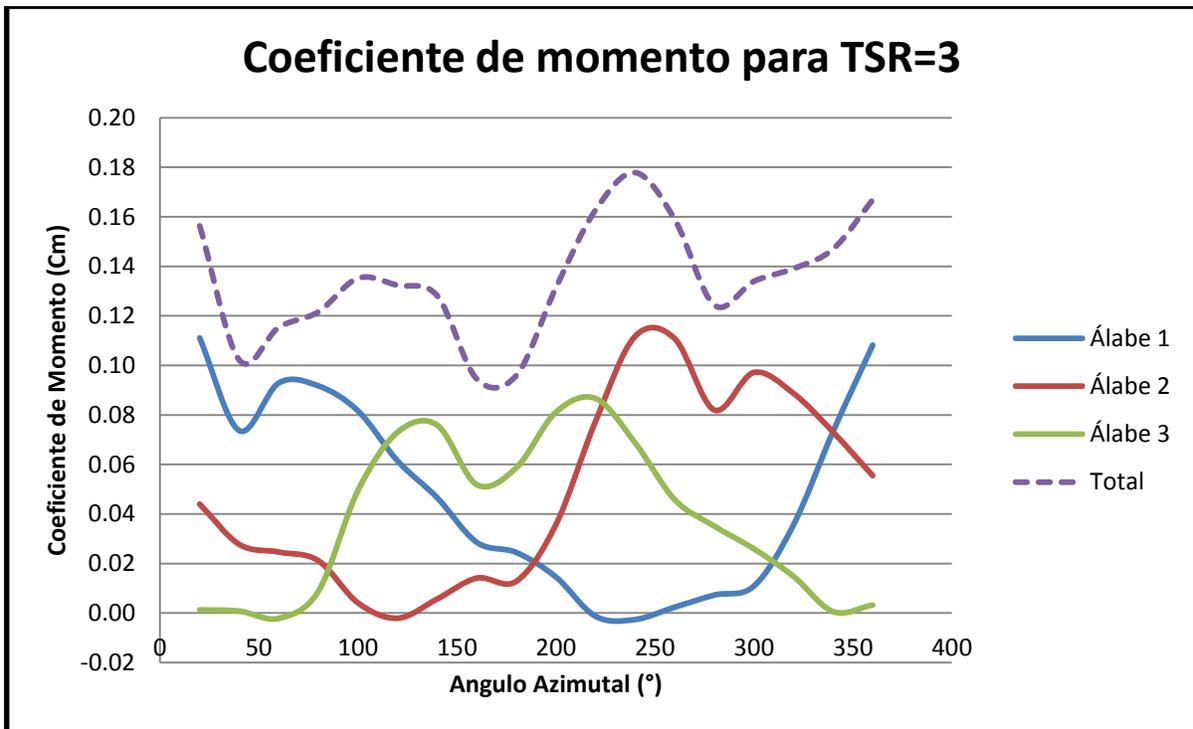


Gráfico 4-5 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=3

El contorno de velocidad para el álabe 1 en el caso de máxima C_m no entrega mucha información dado que se ve afectado por la estela generada por el eje, generando una menor diferencia de velocidad en comparación al tercer álabe. Respecto a las magnitudes encontradas en este caso, aumentan considerablemente respecto a lo que fue el caso del TSR=1.

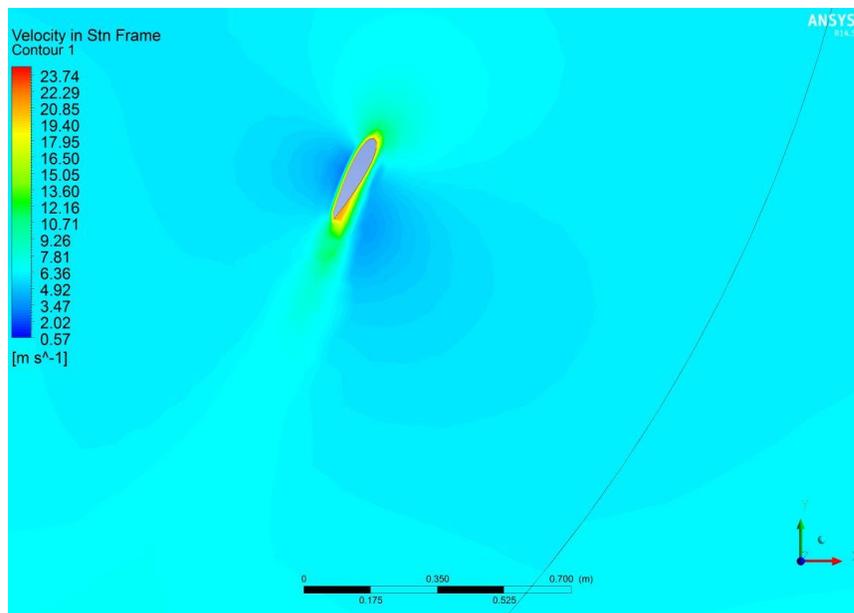


Figura 4-6 Contorno de velocidad para el primer álabe en condición de máximo C_m con un TSR=3

A su vez, en el contorno de presión alrededor del primer álabe se presenta una leve diferencia de gradiente, solo destacando que en su extrados hay presiones bajo la atmosférica, notando que existe un efecto de succión en dicha zona. Esto indica que la obtención de momento por este álabe no resulta ser significativa como además presenta un sentido que no favorece a la obtención de potencia de la turbina.

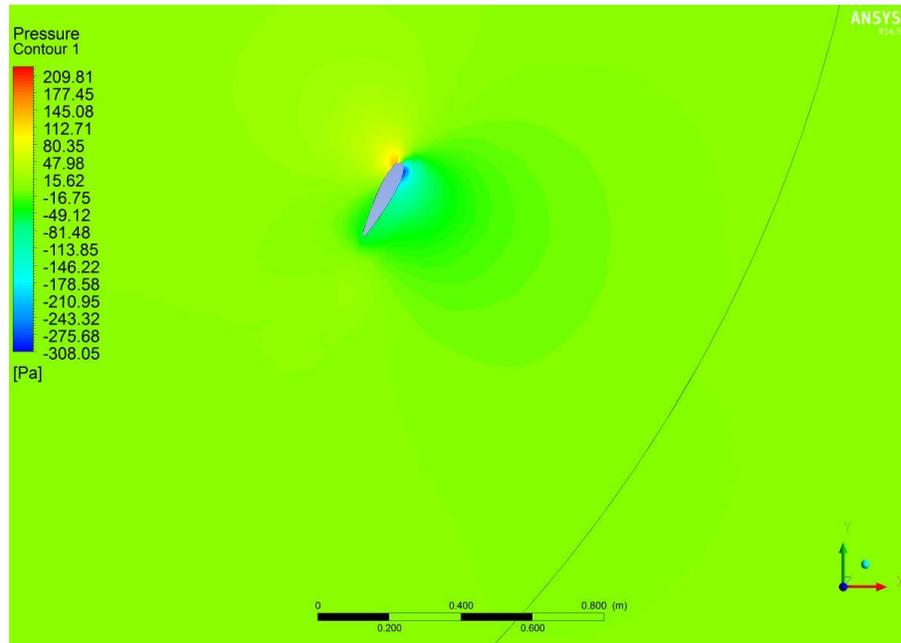


Figura 4-7 Contorno de velocidad para el primer álabe en condición de máximo C_m con un $TSR=3$

Como bien se señaló previamente el tercer álabe es quien otorga un mayor C_m para el caso de máxima potencia obtenida en la turbina. En el contorno de velocidad de dicho álabe se aprecia una gran diferencia entre sus superficies lo cual indica un mayor Lift como bien se ha señalado. Además, la zona de mayor velocidad es en donde ocurre una recirculación del viento, lo cual genera una baja de presión en conjunto con un desprendimiento de vorticidad, implicando un mayor torque sobre el álabe.

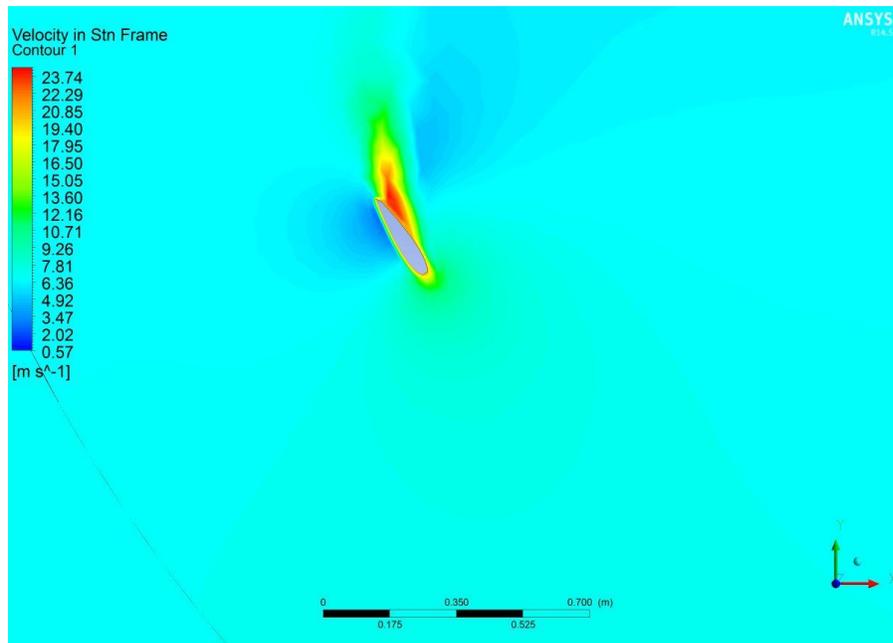


Figura 4-8 Contorno de velocidad para el tercer ábale en condición de máximo C_m con un $TSR=3$

La presión por otra parte presenta una gran diferencia entre ambas superficies pero esta se encuentra distribuida a lo largo del ábale, lo cual indica que existe una acumulación de baja presión lo cual podría ser indicio de un desprendimiento de capa límite sobre el ábale.

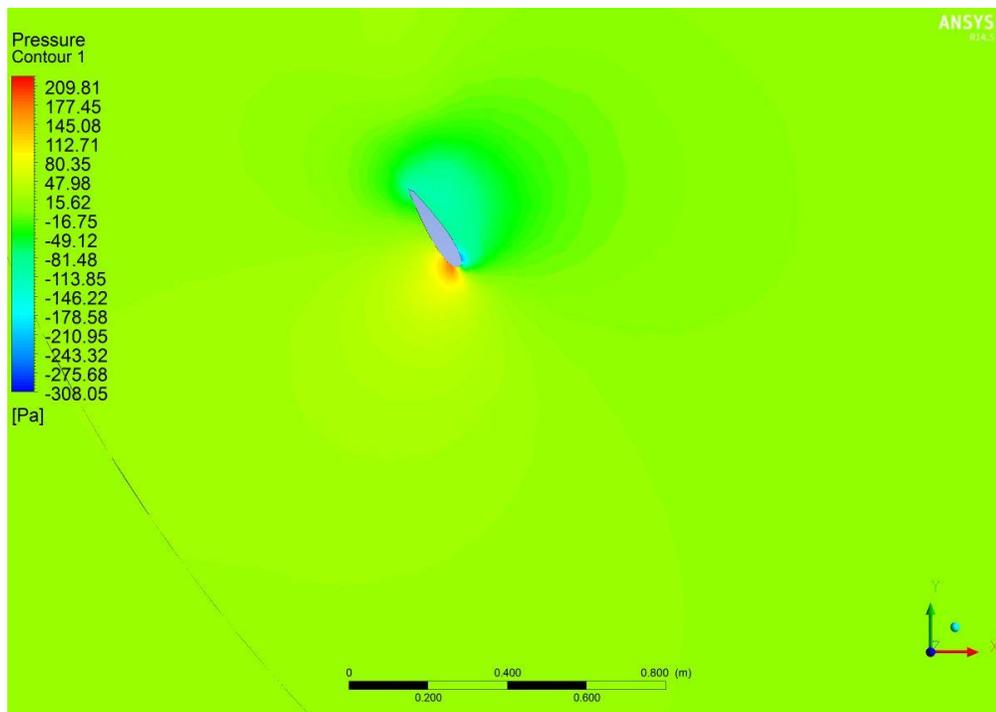


Figura 4-9 Contorno de presión para el tercer ábale en condición de máximo C_m con un $TSR=3$

Para el instante en que existe un mínimo del coeficiente de momento ocurre para 160° , en el cual se aprecia una disminución del coeficiente de momento para los 3 álabes. Esto se debe a que ocurre justo posterior a un momento de alta obtención de potencia, pudiendo deberse a una pérdida dinámica de presión sobre los álabes, la cual es considerablemente menor a la ocurrida para el $\text{TSR}=1$. Sin embargo no llega a ser un desprendimiento claro en este caso, aun con la evidente estela generada la cual se puede apreciar en la figura 4-10. En cuanto al contorno de presión existe una ligera diferencia pero que no alcanza a ser demasiado significativa e incluso la presencia de presiones bajo la atmosférica es casi nula alrededor del álabe.

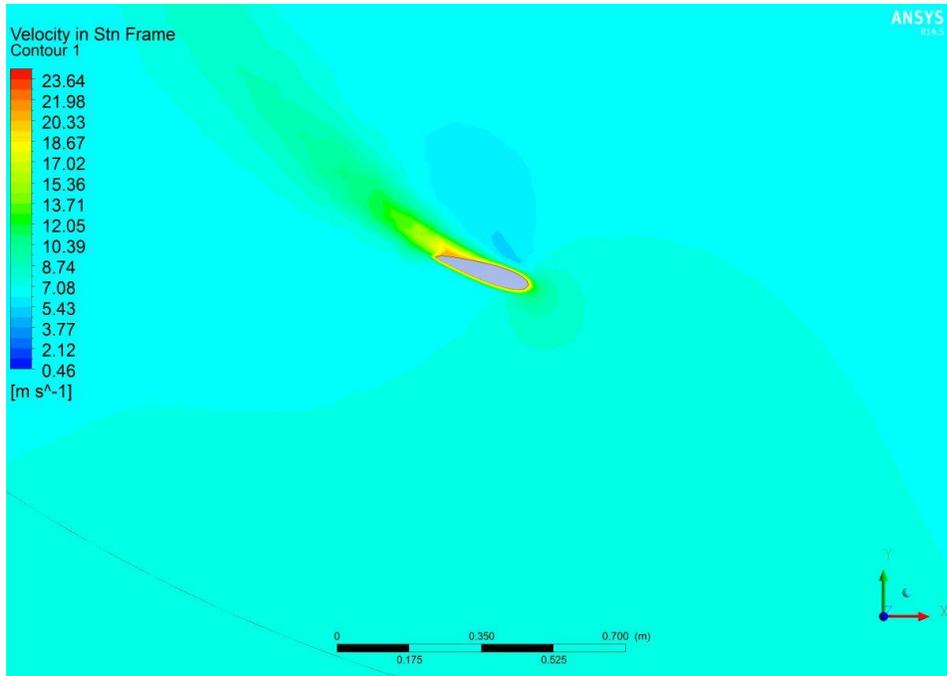


Figura 4-10 Contorno de velocidad para el primer álabe en condición de mínimo C_m con un $\text{TSR}=3$

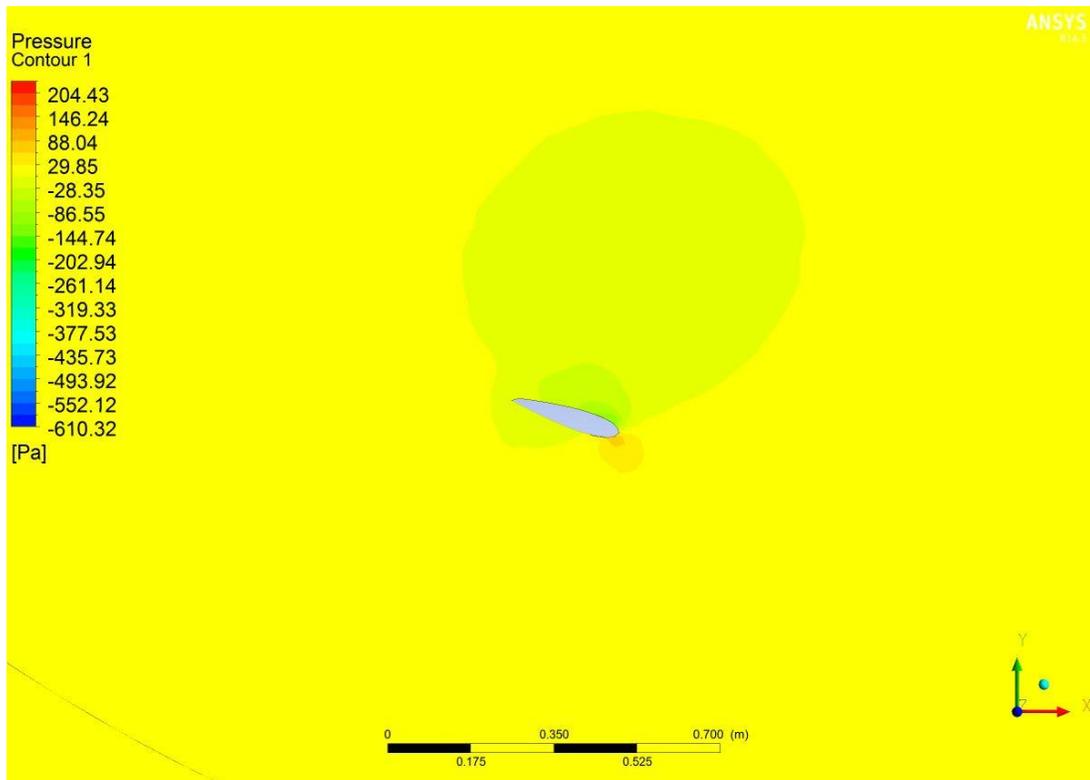


Figura 4-11 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=3$

4.3.1.3 $TSR=4$

En el caso del $TSR=4$ es cuando la turbina logra obtener la mayor potencia del viento, lo cual indica que es el momento en el cual la turbina posee una mayor eficiencia. Esto se debe principalmente a que la velocidad de giro de la turbina respecto a la velocidad incidente del viento permite leves variaciones en su ángulo de ataque, lo cual impide que hayan desprendimientos significativos en los álabes durante toda una revolución. Según la figura 2-8 para un $TSR=4$ las variaciones del ángulo de ataque no van más allá de 20° de diferencia. En este caso el mínimo se presenta para un ángulo de 33° y el máximo para 296° . El tercer álabes presenta valores del coeficiente de momentos muy bajos en un inicio debido al arrastre sufrido entre su ángulo inicial (240°) y los siguientes 100° por las estelas generadas por los otros 2 álabes y el eje de la turbina.

Respecto a los casos anteriores, las varianzas del coeficiente de momento en este caso resultan ser no tan drásticas presentando curvas mucho más suaves, evidenciando un mejor comportamiento de la turbina lo cual permite una mayor obtención de potencia.

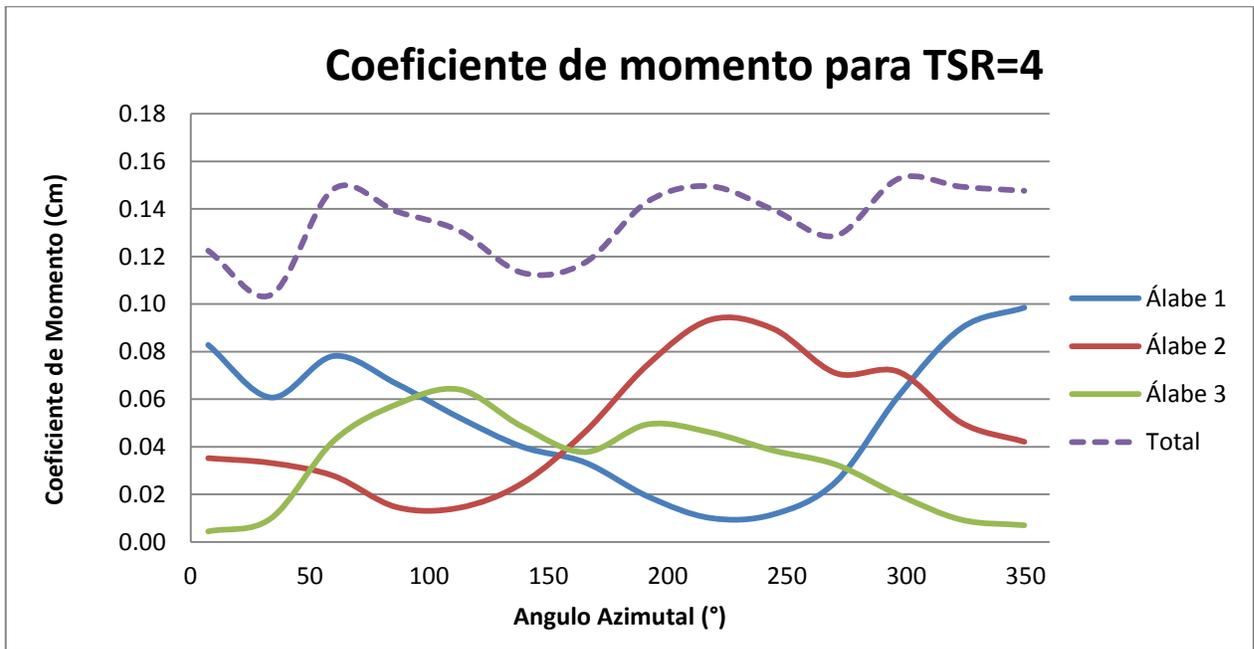


Gráfico 4-6 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=4

En el momento en que existe un mayor C_m , se puede apreciar que el contorno de velocidad sobre el primer álabe se encuentra inmerso en un entorno en donde la velocidad del viento es menor a los 7 [m/s] debido a que se encuentra en la zona de aguas abajo de la turbina. Sin embargo es posible apreciar velocidades muy superiores alrededor de la superficie del álabe. Esto se debe principalmente a recirculaciones que ocurren en su entorno las cuales a su vez generan bajas de presión que se reiteran en los diferentes casos, hecho que permite generar el Lift necesario para hacer rotar a la turbina.

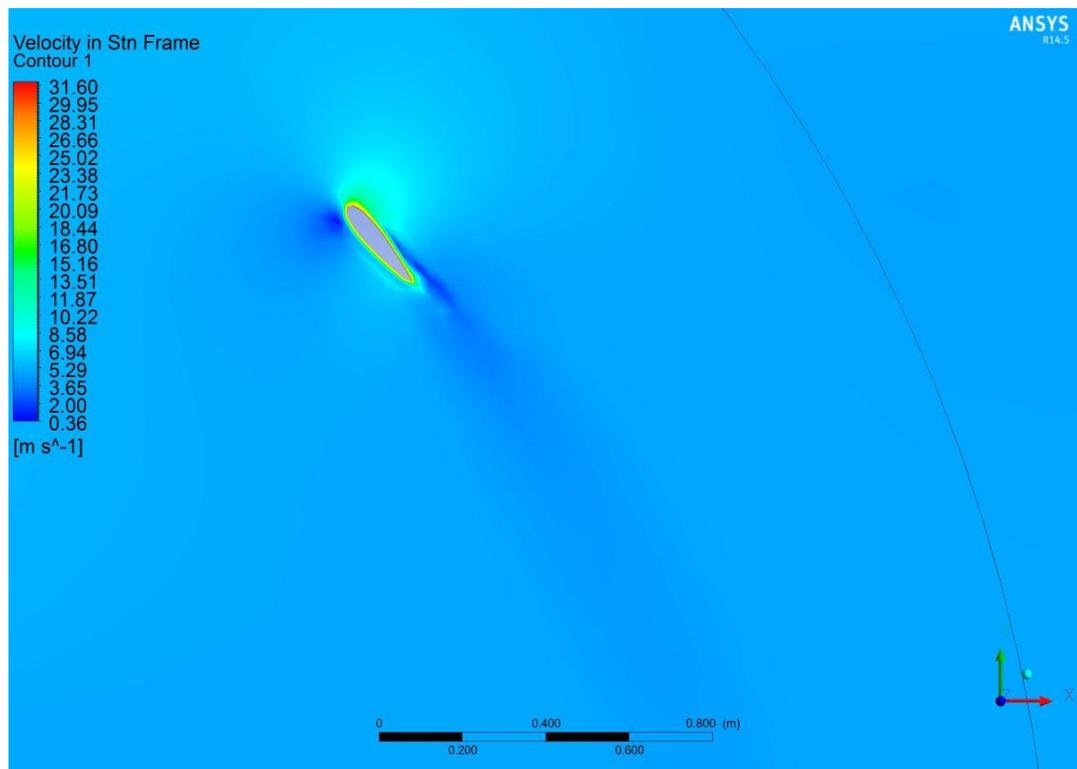


Figura 4-12 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de máximo C_m con un $TSR=4$

La diferencia de presión es significativa en este caso, generándose grandes presiones bajo la atmosférica en el extrados, lo cual implica una mayor fuerza en la dirección radial lo que a su vez deriva en la obtención de un mayor Lift.

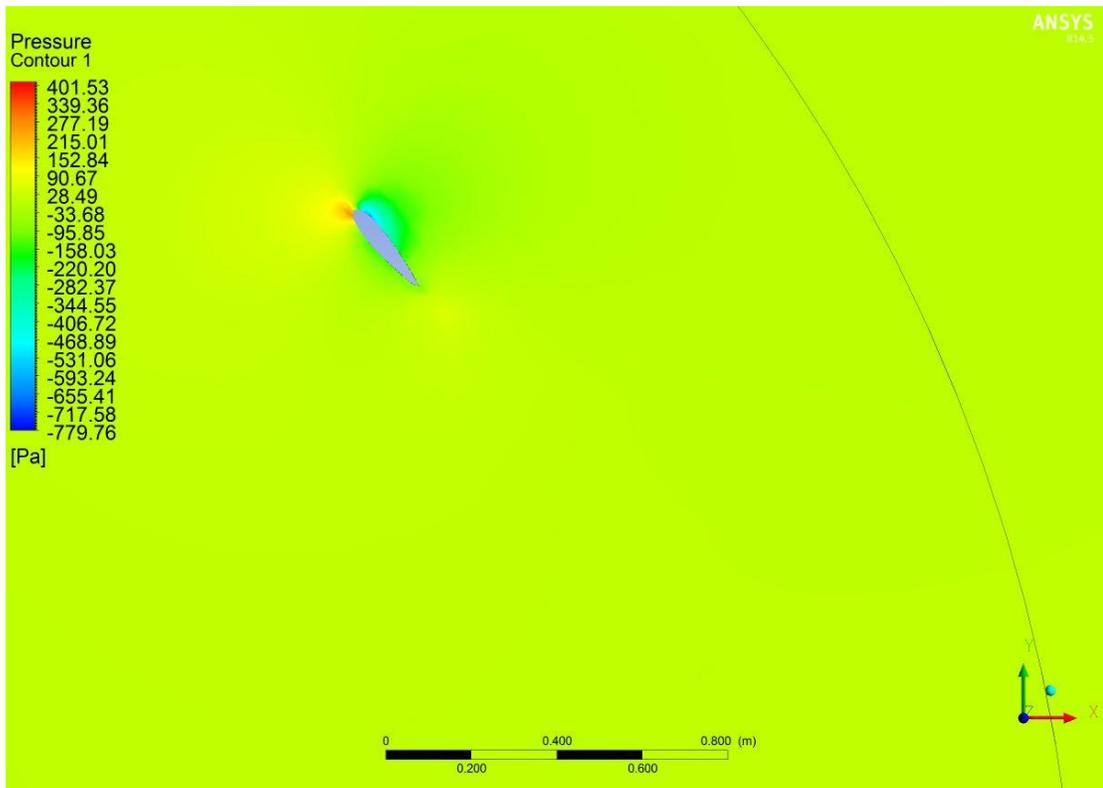


Figura 4-13 Contorno de presión para el primer álabe, para condición de máximo C_m

Por otra parte, se tiene que el momento de menor obtención de momento se produce para un ángulo de 33° para el primer álabe. Este mismo se pudo apreciar para el caso de $TSR=3$ en el cual existe una caída inicial para luego dar cabida a un leve aumento del coeficiente de momento. Esto puede deberse a la entrada en pérdida que ocurre con en el álabe según muestra la figura 4-14. En ella se puede apreciar que tras el álabe se encuentra rodeado de velocidades de similar magnitud, lo que implica una magnitud del gradiente entre las superficies bajo, y por ende un bajo momento.

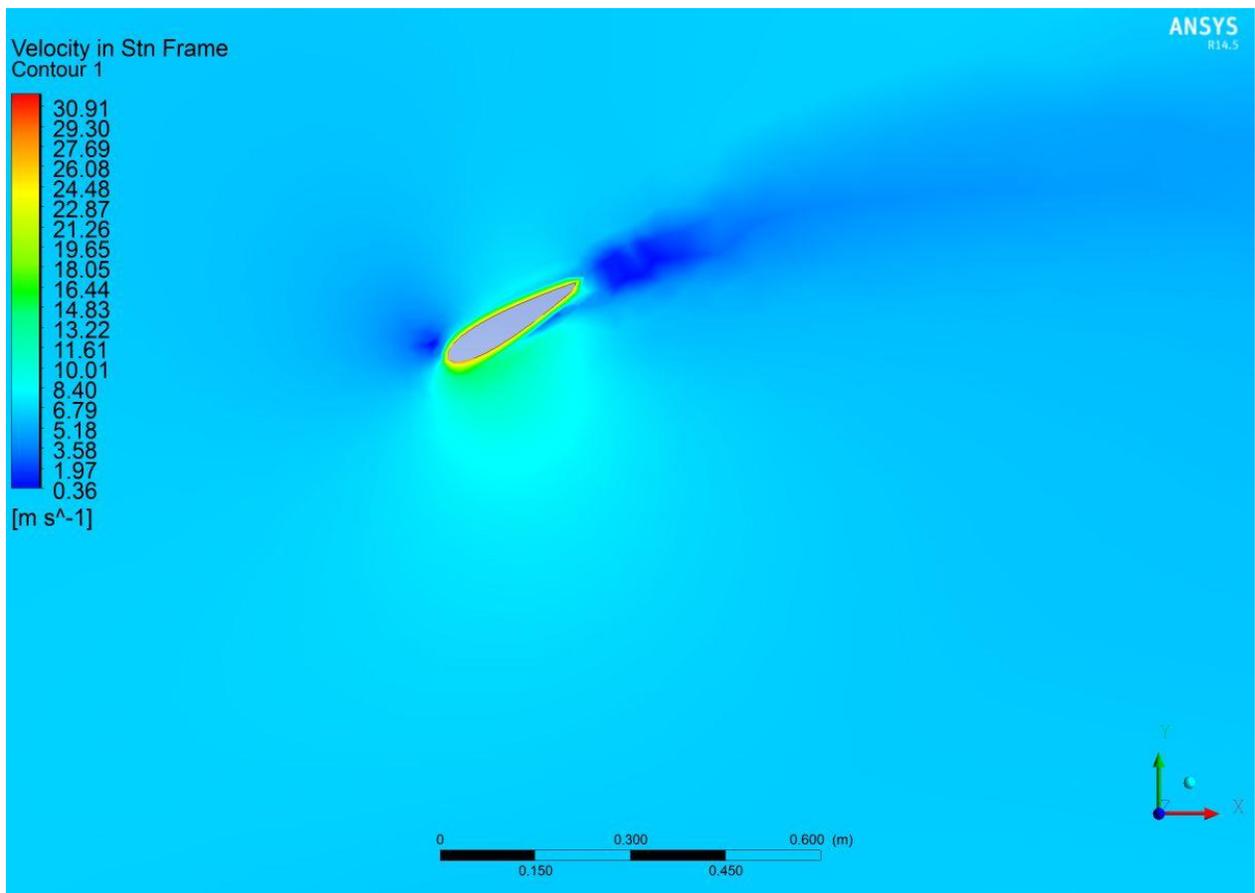


Figura 4-14 Contorno de velocidad para el primer álabes, para condición de mínimo C_m para $TSR=4$

En el contorno de presión se observa que en la zona en donde se aprecia una mayor velocidad en la figura 4-14, existe una baja de presión, lo cual es algo esperado si se piensa en términos que nos ofrecen las ecuaciones de energías debido a que por conservación de energía, si existe un aumento de velocidad debe haber una disminución de presión en dicha sección. En el borde de ataque se presenta una mayor presión debido al impacto ejercido por el álabes sobre el viento que viaja en un sentido contrario al movimiento de la rotación de la turbina. Esto a posterior generará un aumento del Lift dado a que aparecerán recirculaciones al interior del intrados lo cual como se aprecia en casos anteriores, el coeficiente de momento tiende a aumentar.

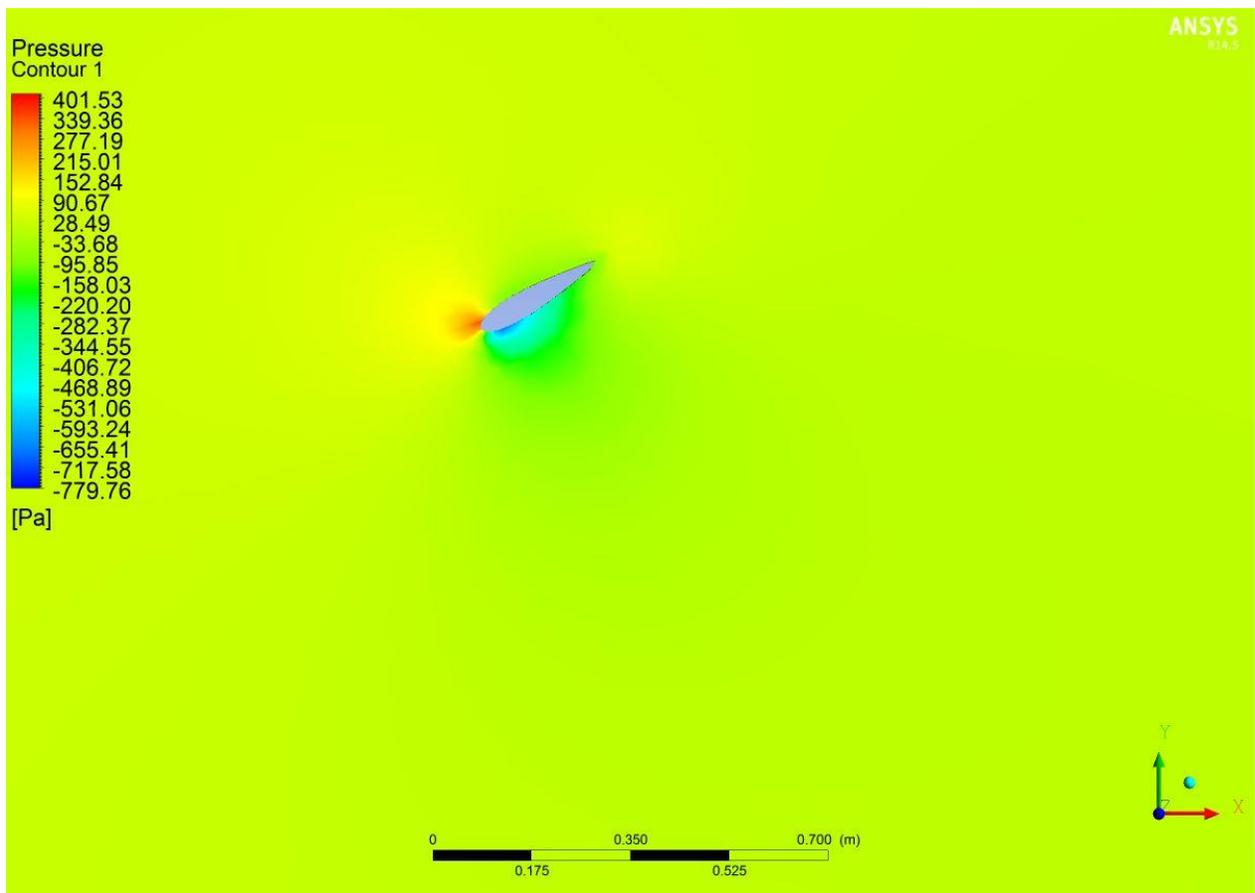


Figura 4-15 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=4$

4.3.1.4 TSR 5

Para el caso del TSR=5, se tiene una curva con menos perturbaciones que en el resto de las experiencias ya realizadas, reiterando así la ausencia de pérdidas dinámicas durante la rotación. Respecto a los coeficientes presentes en los álabes, se aprecia que el tercer álabes presenta una menor obtención de potencia en toda la revolución analizada. La disminución de potencia en este caso se debe a una disminución del rango que posee el ángulo de ataque como también un aumento de la velocidad efectiva que incide sobre los álabes, el cual favorece a las fuerzas de arrastre por sobre a las de sustentación. El ángulo en el cual se da el mínimo del coeficiente de momento es el 133° mientras que el máximo ocurre para un ángulo de 233° .

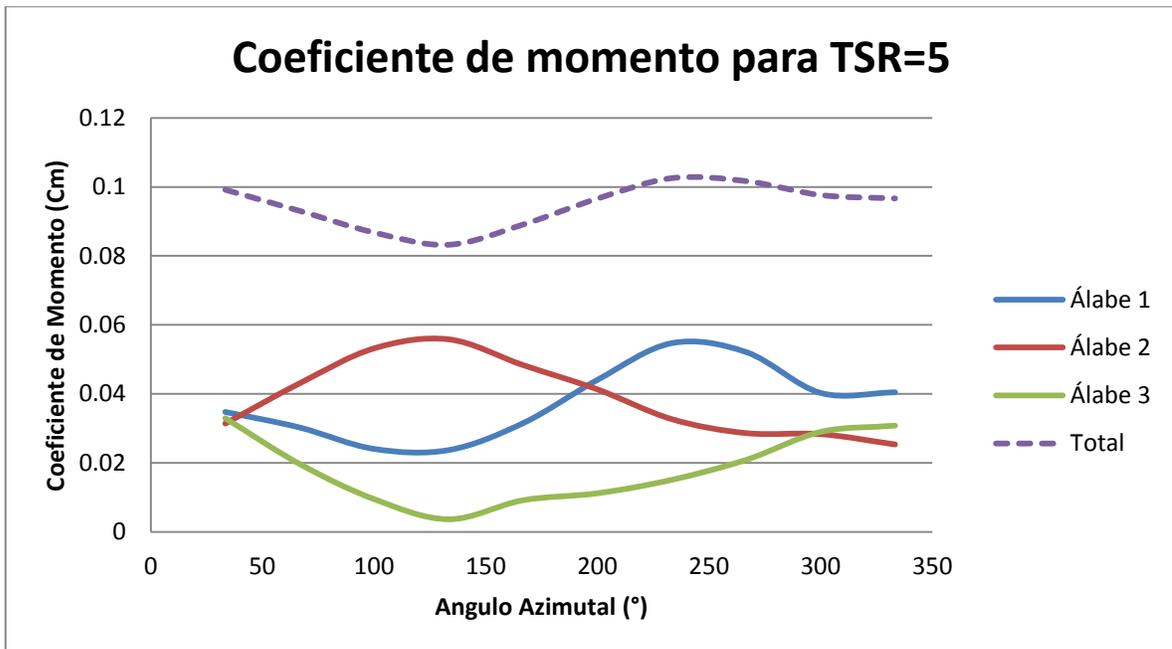


Gráfico 4-7 Coeficiente de momento para cada álabes de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=5

Para el contorno de velocidad sobre el primer álabes en el caso de máximo coeficiente de momento se aprecia que no existe desprendimiento de alguna vorticidad viéndose rodeado el álabes por una estela de alta velocidad. Lo mismo se puede apreciar para la presión alrededor del álabes la cual solo es alta en el borde de ataque por el sentido de giro de la turbina. La presencia de bajas velocidades circundantes al álabes se deben a las estelas prevenientes del eje y del álabes 3.

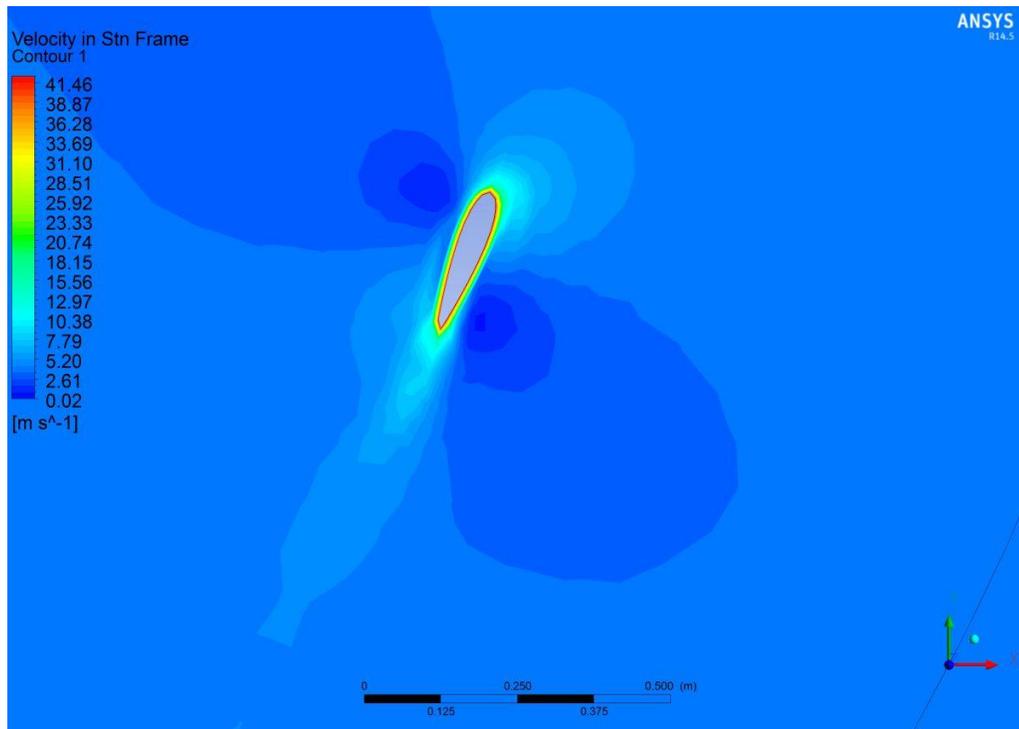


Figura 4-16 Contorno de velocidad para el primer álabe en condición de máximo C_m con un $TSR=5$

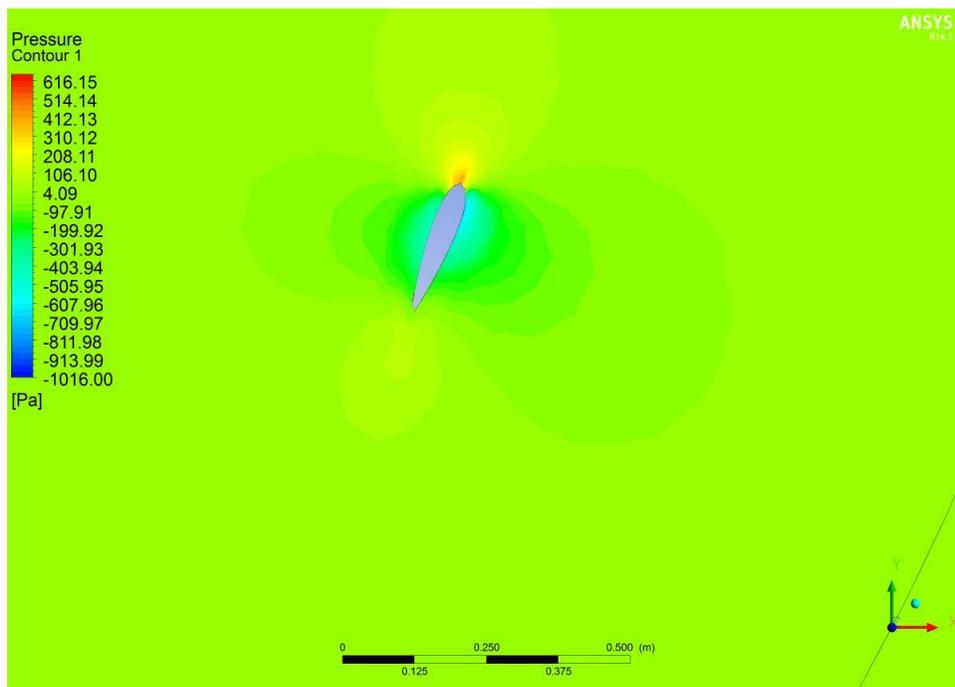


Figura 4-17 Contorno de presión para el primer álabe en condición de máximo C_m con un $TSR =5$

Respecto al caso de mínima obtención de potencia, se aprecia un efecto similar sobre los álabes respecto a los casos anteriores, en donde cada vez es más notoria la ausencia de desprendimientos, evitando así las pérdidas dinámicas no deseables en este tipo de turbinas.

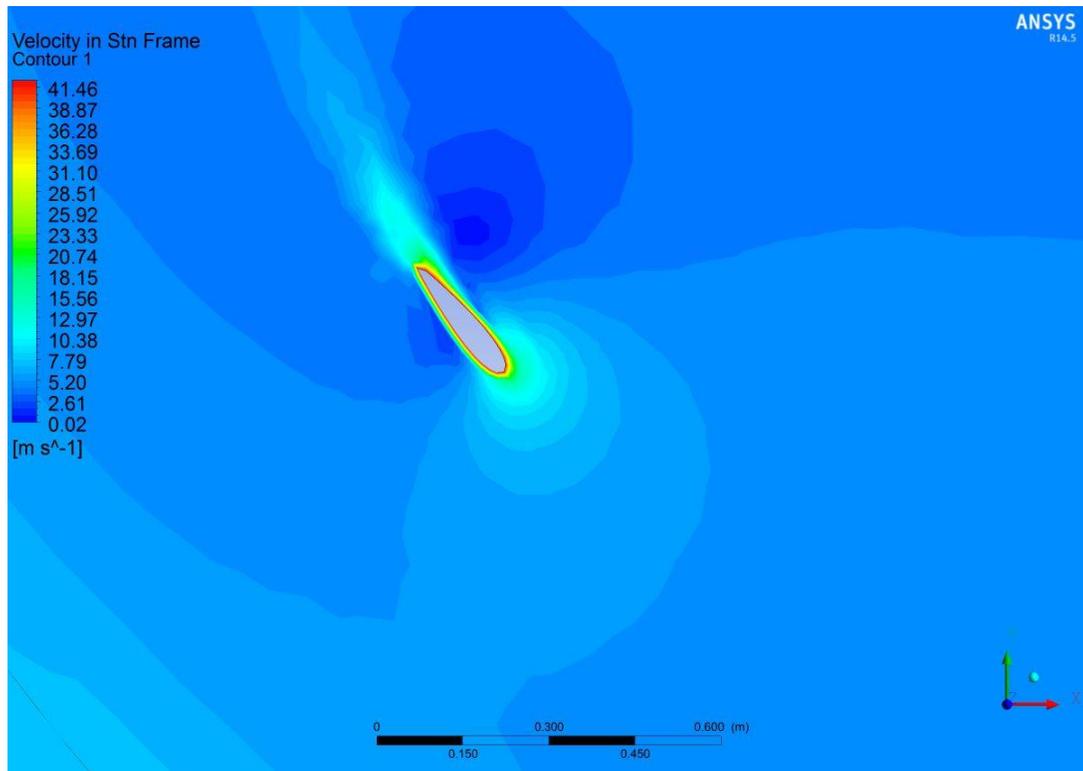


Figura 4-18 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de mínimo C_m con un $TSR=5$

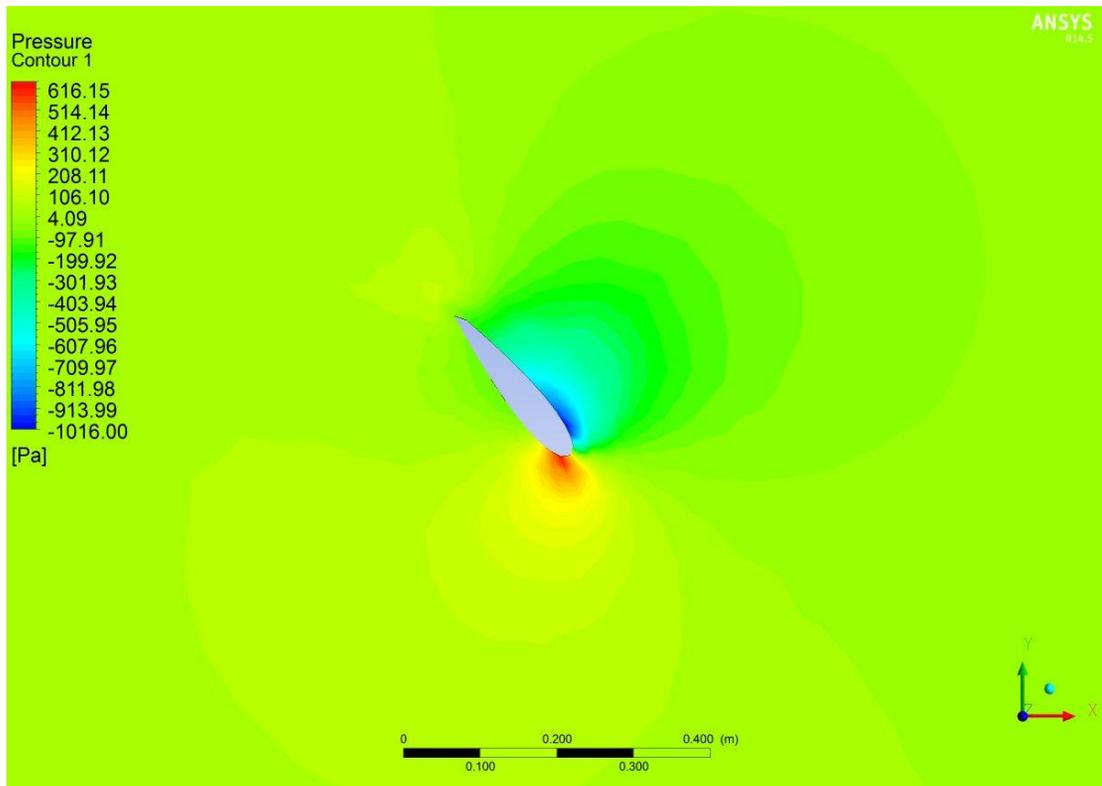


Figura 4-19 Contorno de presión para el primer álabe en condición de mínimo C_m con un $TSR=5$

4.3.1.5 TSR 6

Por último, se tiene que para el caso con $TSR=6$ las curvas de los coeficientes de momento poseen valores muy bajos, incluso menores a los de $TSR=1$, pero logra mayores valores de potencia debido a su alta velocidad de giro. Al igual que en el caso del $TSR=5$, existe una baja variación del momento obtenido a causa de los bajos ángulos de ataque que se pueden obtener para este tipo de velocidades, como también nuevamente se ve muy afectado el Lift por la velocidad efectiva incidente sobre el álabe. Todas estas condiciones hacen que las turbinas a altos TSR impidan obtener valores de potencia deseados, dado que sus rendimientos resultan ser muy bajos.

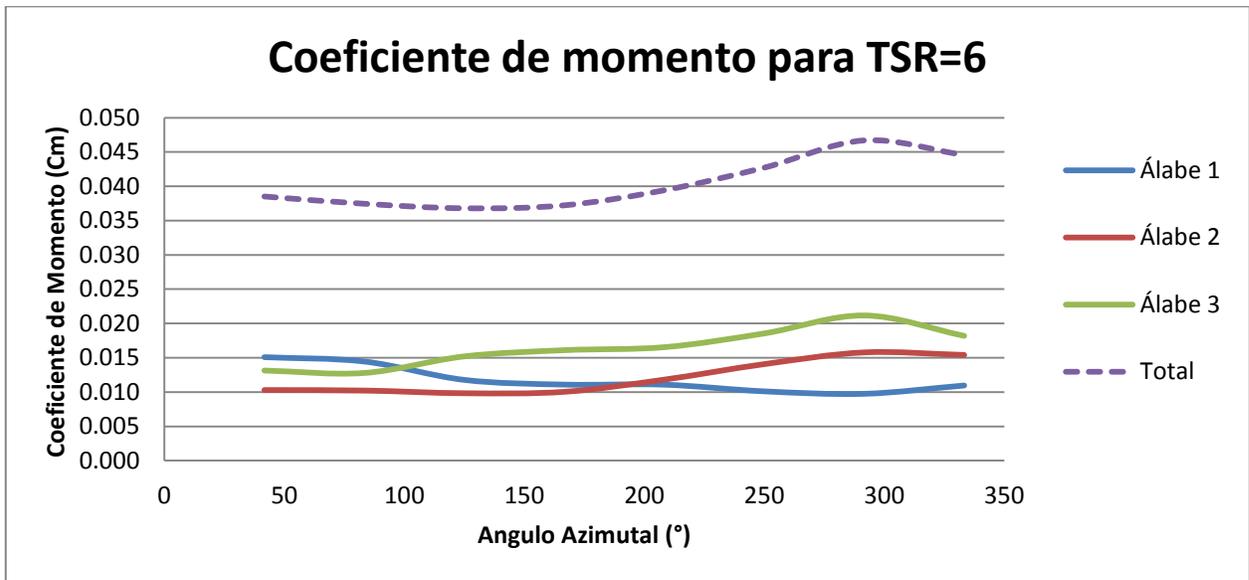


Gráfico 4-8 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=6

Los ángulos en los cuales se obtiene los mínimos y máximos del coeficiente de momento ocurren para 125° y 310° respectivamente. Las figuras obtenidas en dichos casos resultan ser muy similares a las obtenidas para el caso de TSR=5 con leves variaciones según el ángulo en el cual ocurren dado que las condiciones a las cuales se encuentran no distan mucho al caso previo ya que por una parte el rango de los ángulos de ataque no disminuye significativamente como en casos anteriores.

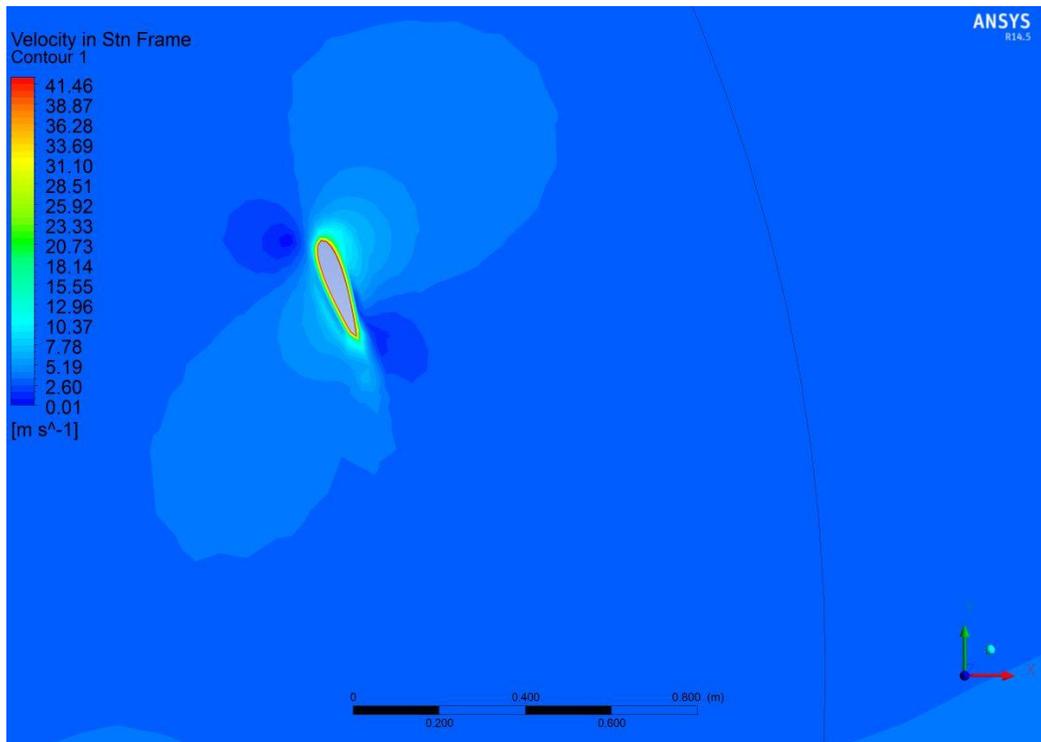


Figura 4-20 Contorno de velocidad para el primer ábale en condición de máximo C_m con un $TSR=6$

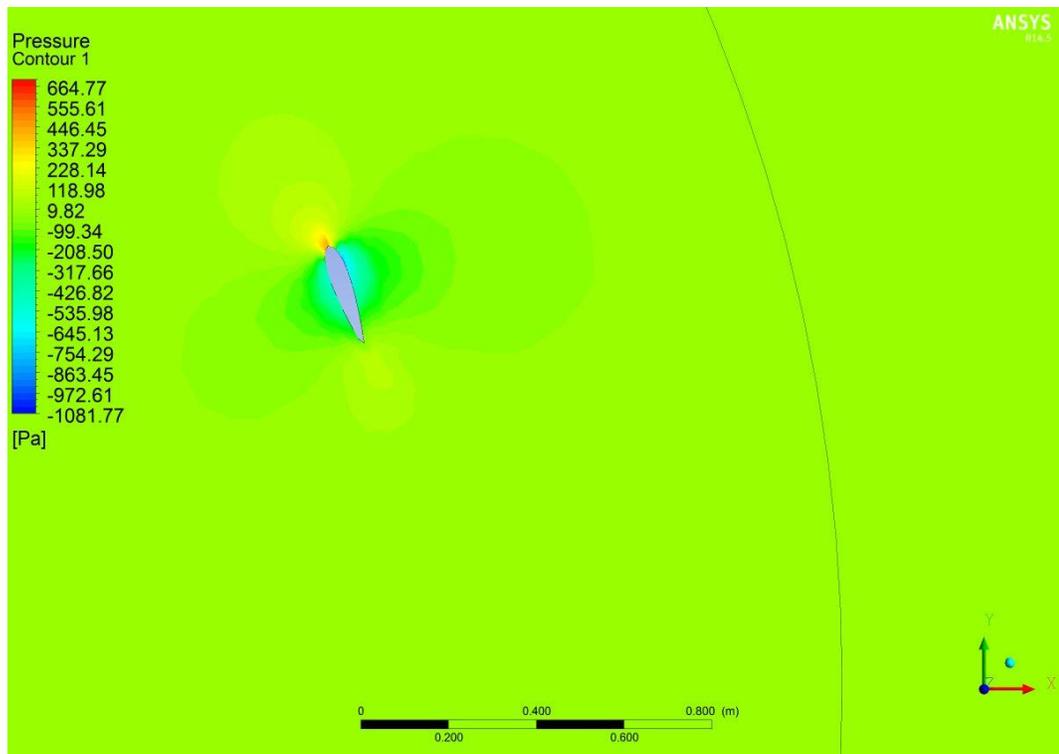


Figura 4-21 Contorno de presión para el primer ábale en condición de máximo C_m con un $TSR=6$

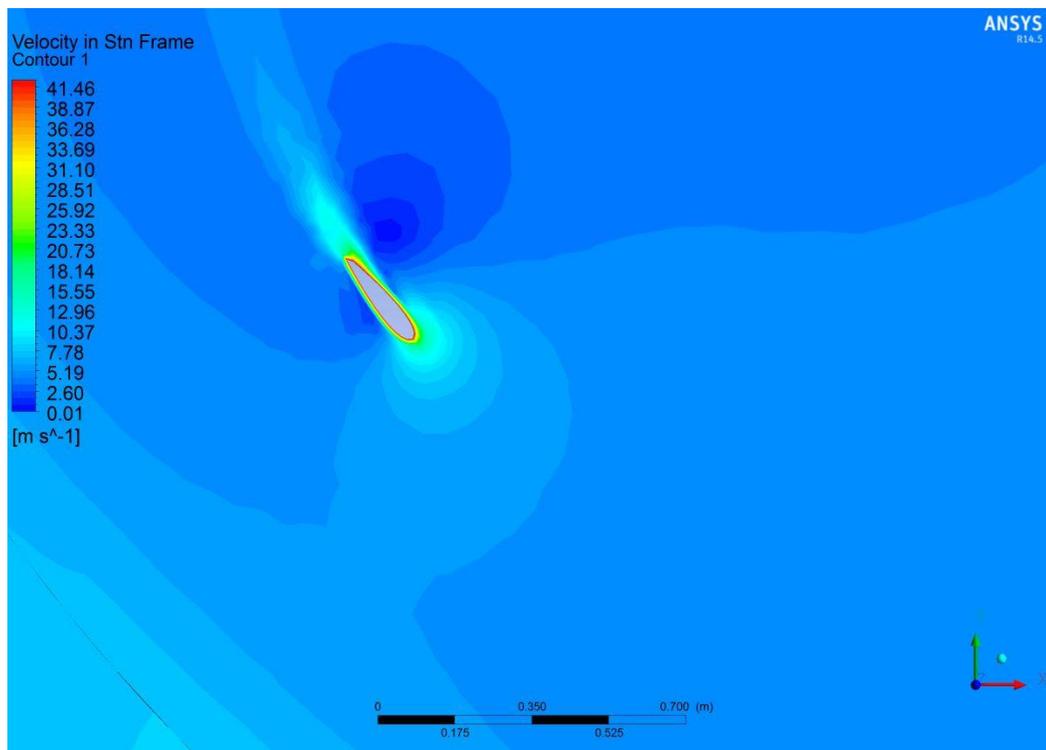


Figura 4-22 Contorno de velocidad para el primer álabes en condición de mínimo Cm con un TSR=6

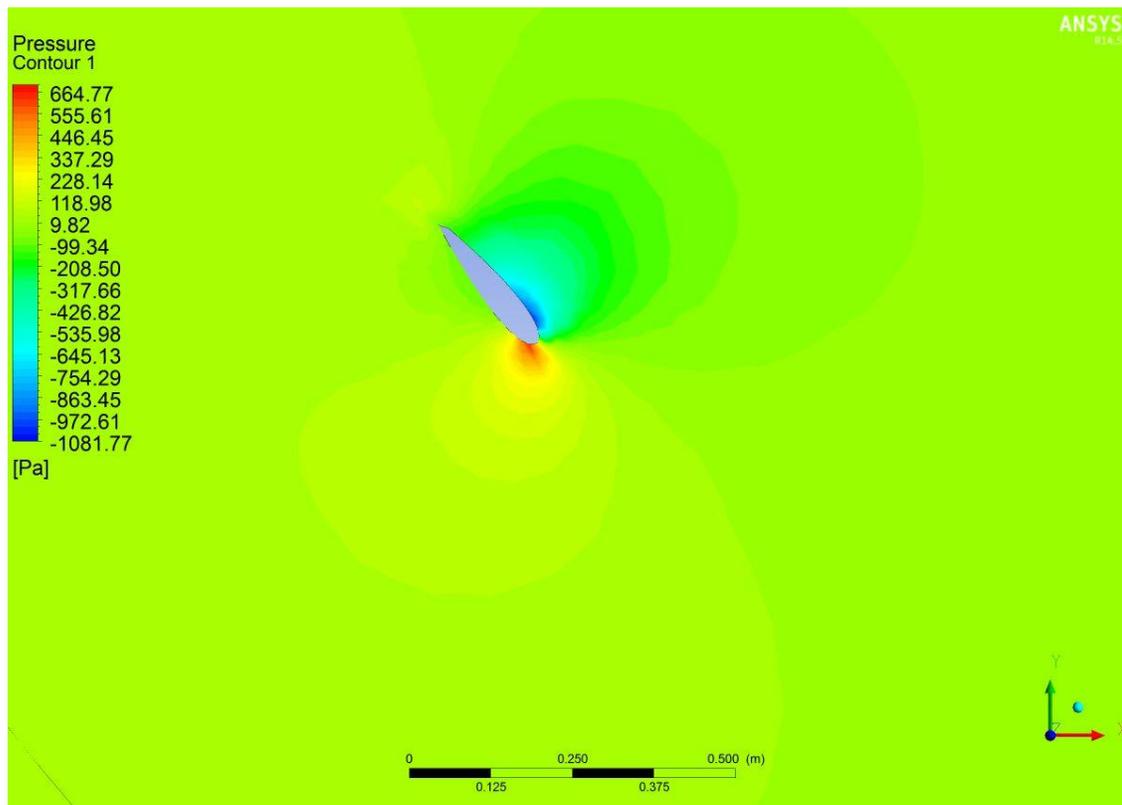


Figura 4-23 Contorno de presión para el primer álabes en condición de mínimo Cm con un TSR=6

4.3.2 Resultados para el diseño de álabe rectangular

Los resultados globales obtenidos para este caso corresponden a los presentados según la tabla 4-2 y su gráfico 4-9, en donde se presenta la evolución del coeficiente de potencia en función del TSR de la turbina.

Tabla 4-2 Coeficiente de potencia promedio para cada TSR evaluado

TSR	Cp
1	0,0520
3	0,3392
4	0,4784
5	0,4162

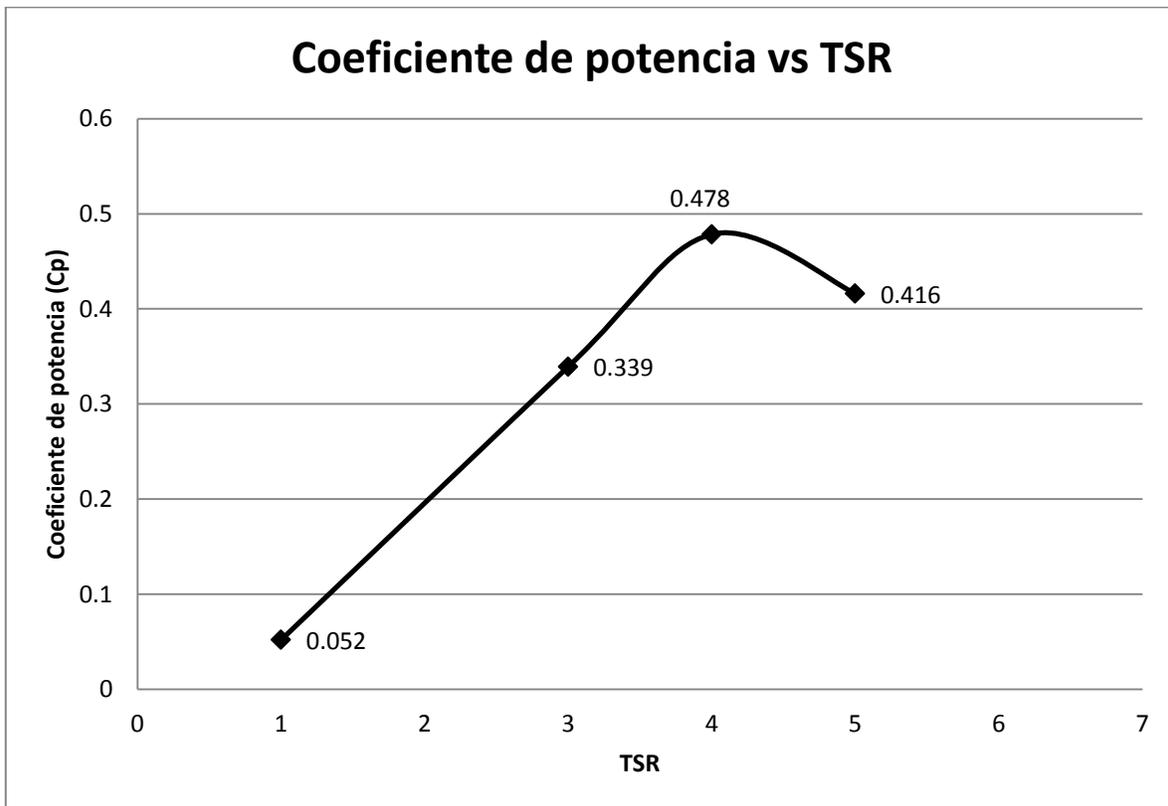


Gráfico 4-9 Curva Cp vs TSR para perfil rectangular.

4.3.3 Detalle de resultados para el diseño de álabe rectangular

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en detalle para las diferentes velocidades de giro realizadas en el caso del perfil alar rectangular. En cada una se entrega un detalle de los coeficientes de momento obtenidos, las velocidades y presiones para los casos de máxima y mínima potencia sobre el primer álabe de la turbina.

4.3.3.1 TSR 1

Similar al caso con el perfil NACA, se procede a presentar en primera instancia los valores de los coeficientes de momentos obtenidos tanto por álabe como de forma total. Dichos resultados se presentan en el gráfico 4-10, en el cual se puede apreciar que todos los álabes poseen un comportamiento similar solo que se encuentran desfasados en 120° como es de esperar. Se puede apreciar que existen 3 máximos definidos según el momento por el cual los álabes pasan por la zona de aguas arriba dado que en dicha zona reciben el aire sin efectos de estelas producidos por el resto de los componentes.

A diferencia del caso con el perfil alar NACA 0018, las curvas obtenidas no poseen variaciones tan pronunciadas, lo cual indica una mayor estabilidad para este tipo de perfil. Esto se debe a que este tipo de perfil presenta desprendimientos no tan significativos debido a su poca aerodinámica, lo cual no permite alcanzar diferencias tan altas de velocidades alrededor del perfil obteniendo así valores globales del coeficiente de potencia inferiores a los presentados por el perfil NACA. Se considera para un ángulo de 50 grados como el punto de máxima obtención del coeficiente de momento mientras que el punto de menor obtención es para un ángulo de 240° . Dichos casos se presentan en las figuras 4-24 a 4-27.

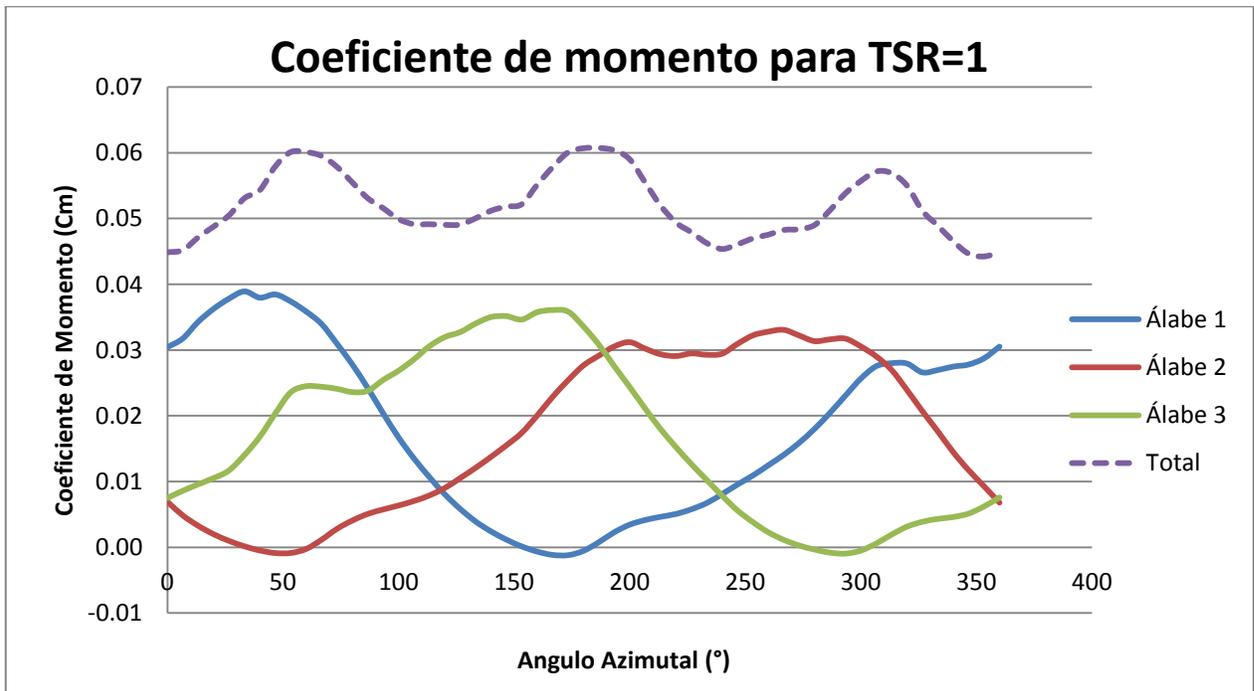


Gráfico 4-10 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=1

En la figura 4-24 y 4-25 se aprecian los contornos de velocidad y presión respectivamente para el caso de mayor coeficiente de momento para el primer álabe. Similar al caso con perfil NACA 0018 se aprecia el desprendimiento por entrada en pérdida a causa de recirculación para un ángulo de 50°. Se puede notar que las diferencias de velocidades entre intrados y extrados no resultan ser tan altas respecto al caso previo lo cual implica una menor generación de momento.

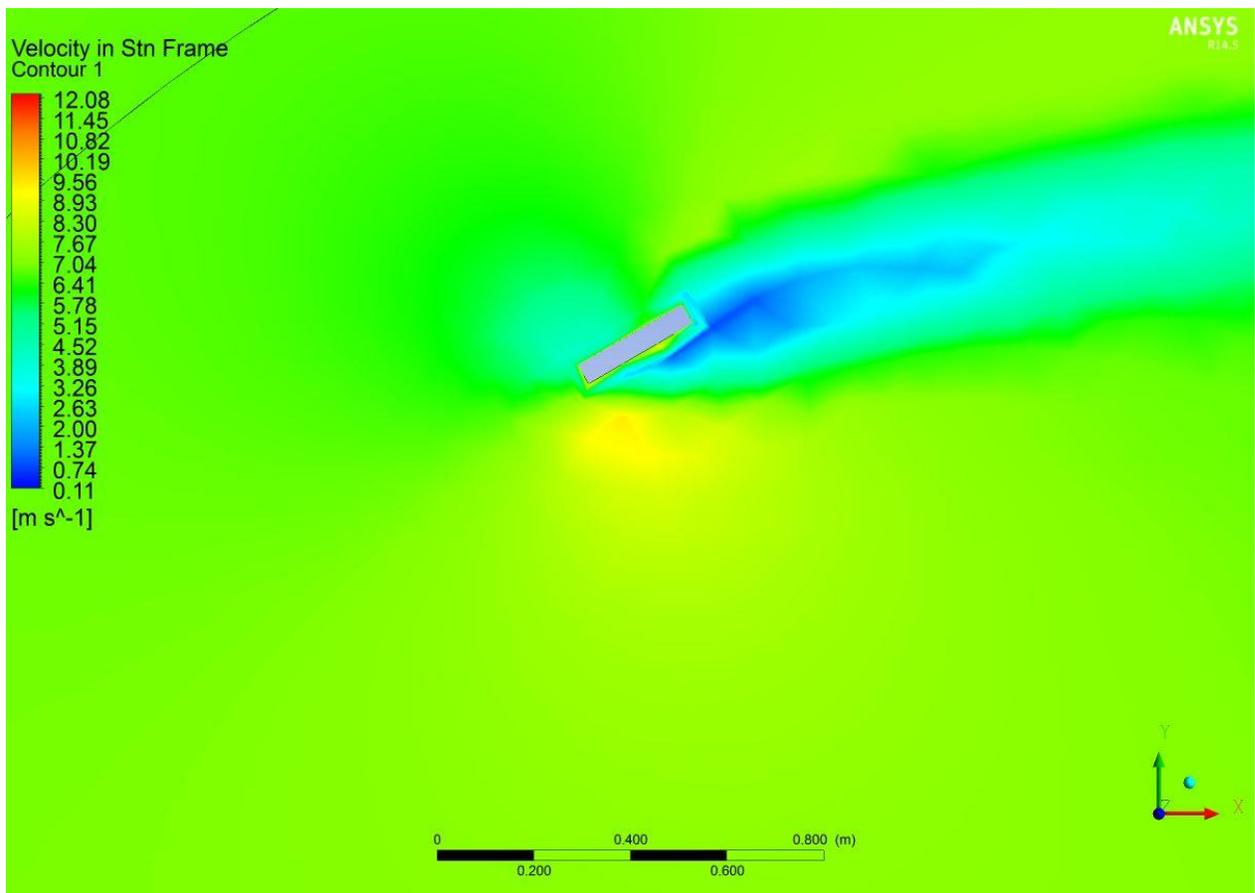


Figura 4-24 Contorno de velocidad para el primer álabo rectangular en condición de máximo C_m con un $TSR=1$

Este último hecho también puede ser visto en el contorno de presión, en donde se aprecia una presión bajo la atmosférica en la curva del intrados pero de magnitud considerablemente menor respecto al caso con perfil NACA 0018. Se caracteriza además un punto de alta presión en la esquina superior por donde entra en contacto con el viento, lo cual podría significar torsiones no deseadas sobre el álabo incidentes en el funcionamiento y desgaste del equipo.

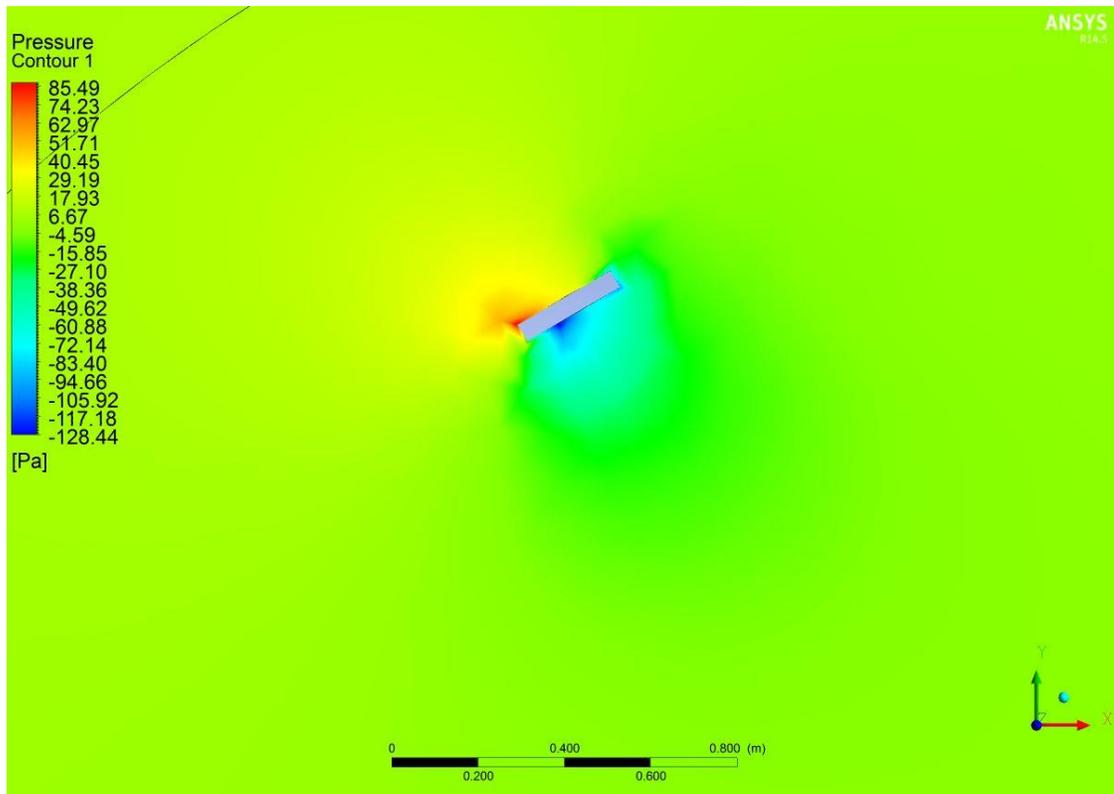


Figura 4-25 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=1$

Por otra parte, se tiene en las figuras 4-26 y 4-27 los contornos de velocidad y presión para el caso en que se obtiene el menor coeficiente de momento posible. En ambos casos se puede apreciar que las diferencias de magnitudes alrededor del perfil no son muy altas, siendo estas diferencias la principal fuente por el cual el álabe puede obtener potencia para la turbina. Además, el sentido del gradiente tanto para las velocidades como presiones es similar al caso previo, solo que esta vez se encuentra en la zona de aguas abajo, por lo que se busca que dicho gradiente tenga un sentido contrario para que el signo del coeficiente de potencia sea siempre positivo; es por esto que en el gráfico 4-10 se puede apreciar que en determinados momentos los álabes logran alcanzar valores negativos.

Una vez más, es posible apreciar que las ecuaciones de Bernoulli si son aplicables en este tipo de casos debido a la correlación existente entre zonas de baja velocidad y alta presión, o a su inversa.

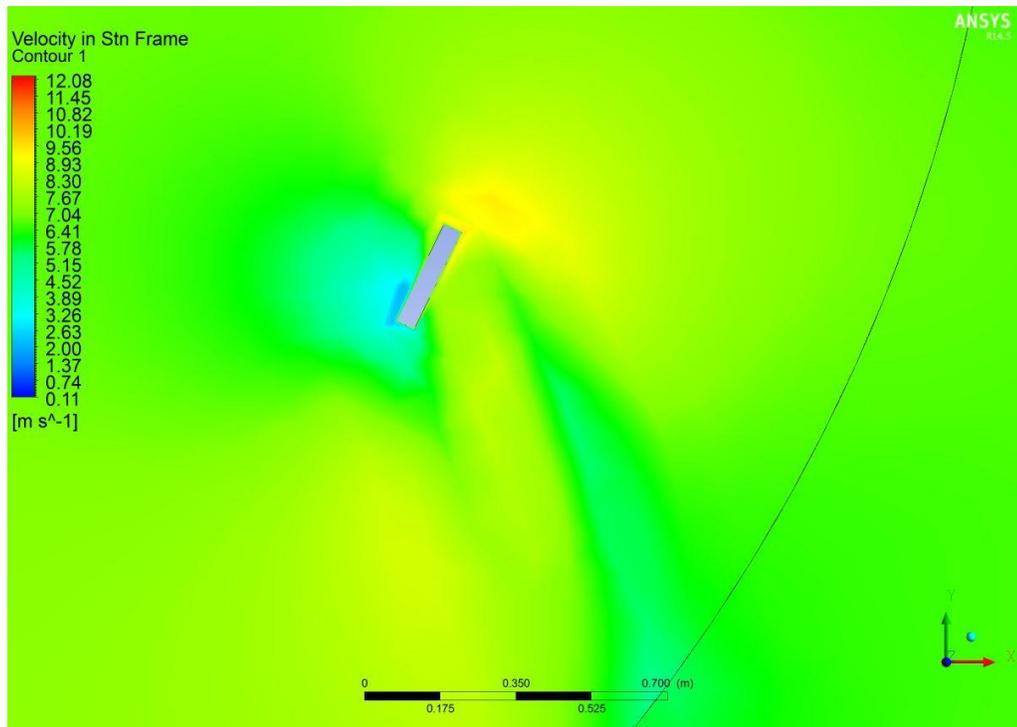


Figura 4-26 Contorno de velocidad para el primer álabes rectangular en condición de mínimo Cm con TSR=1

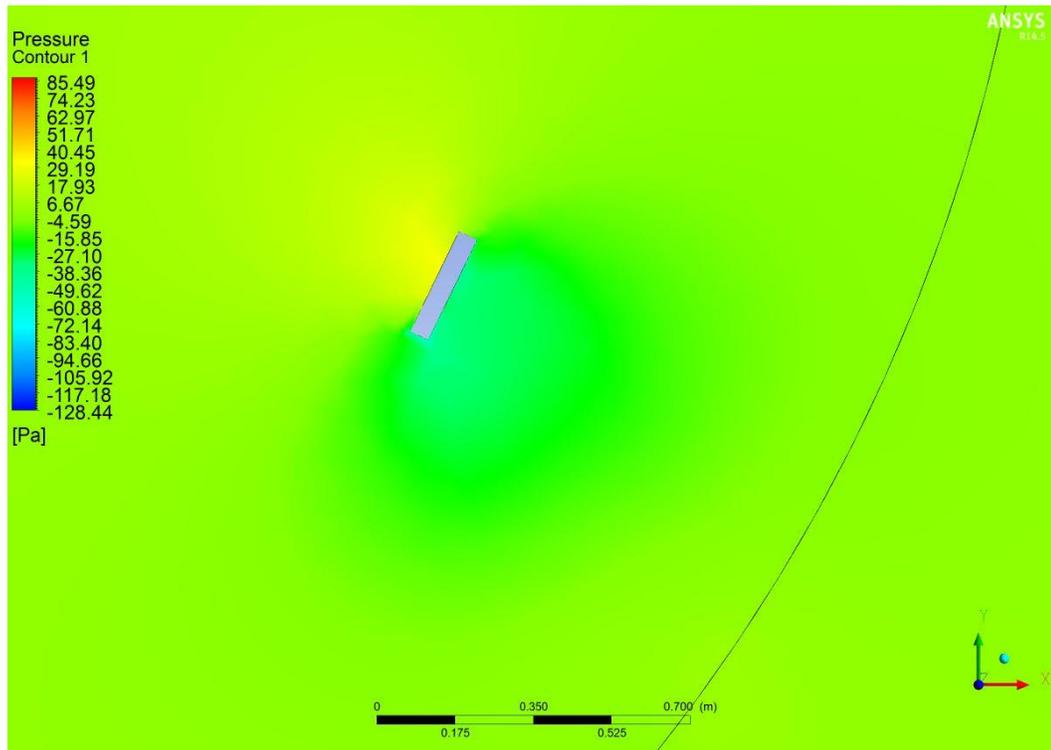


Figura 4-27 Contorno de presión para el primer álabes rectangular en condición de mínimo Cm con TSR=1

Por último, se tiene la figura 2-28 en la cual se aprecia el efecto de estelas sobre el campo utilizado en el instante final de iteración. En esta figura se puede apreciar la formación y desprendimiento de estelas por parte de 2 de sus álabes, como también la interacción de uno de ellos con la estela ya generada. A su vez se aprecie que el eje tiene un efecto considerable sobre el contorno de velocidad del aire incidente, lo cual conlleva un menor rendimiento de la turbina.

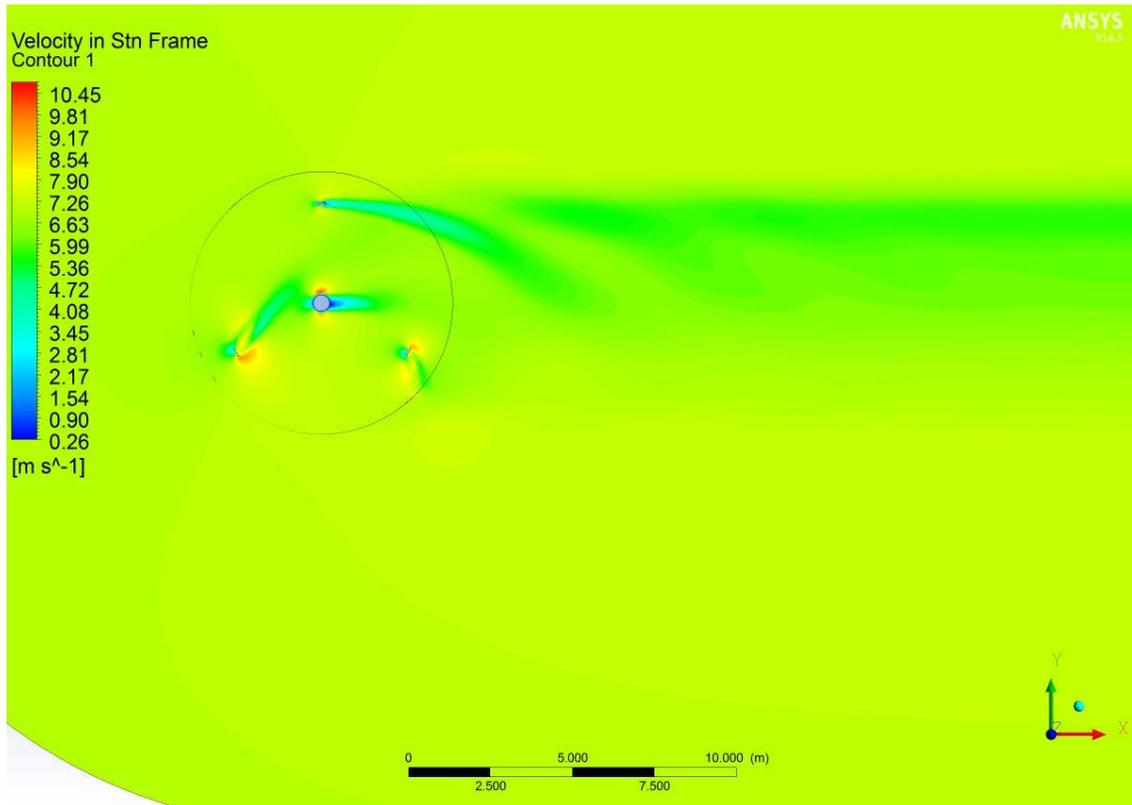


Figura 4-28 Contorno de velocidad para el final de la tercera vuelta con TSR=1

4.3.3.2 TSR 3

En el caso del TSR=3, se reitera la similitud en el comportamiento de los álabes para el coeficiente de momento solo que van desfasados en 120°. Para el primer álabe se presenta su punto máximo en un ángulo de 100° (cercano al caso del TSR=1) que además coincide con el máximo de la totalidad de la turbina, mientras que el mínimo total se da para un ángulo de 300°. Nuevamente se reitera el caso de que las magnitudes no se ven alteradas de gran manera como en el caso del perfil NACA, permitiendo asumir que este efecto es una característica propia de este tipo de perfil que aunque no sea aerodinámico. Respecto a la curva total se aprecia que no presenta un rango muy alto de valores y tiene una tendencia regularmente estable. Eso sí se aprecia que no es una curva suave debido a ciertas irregularidades presentes en las curvas individuales de los álabes debido a posibles desprendimientos no muy significativos en los álabes.

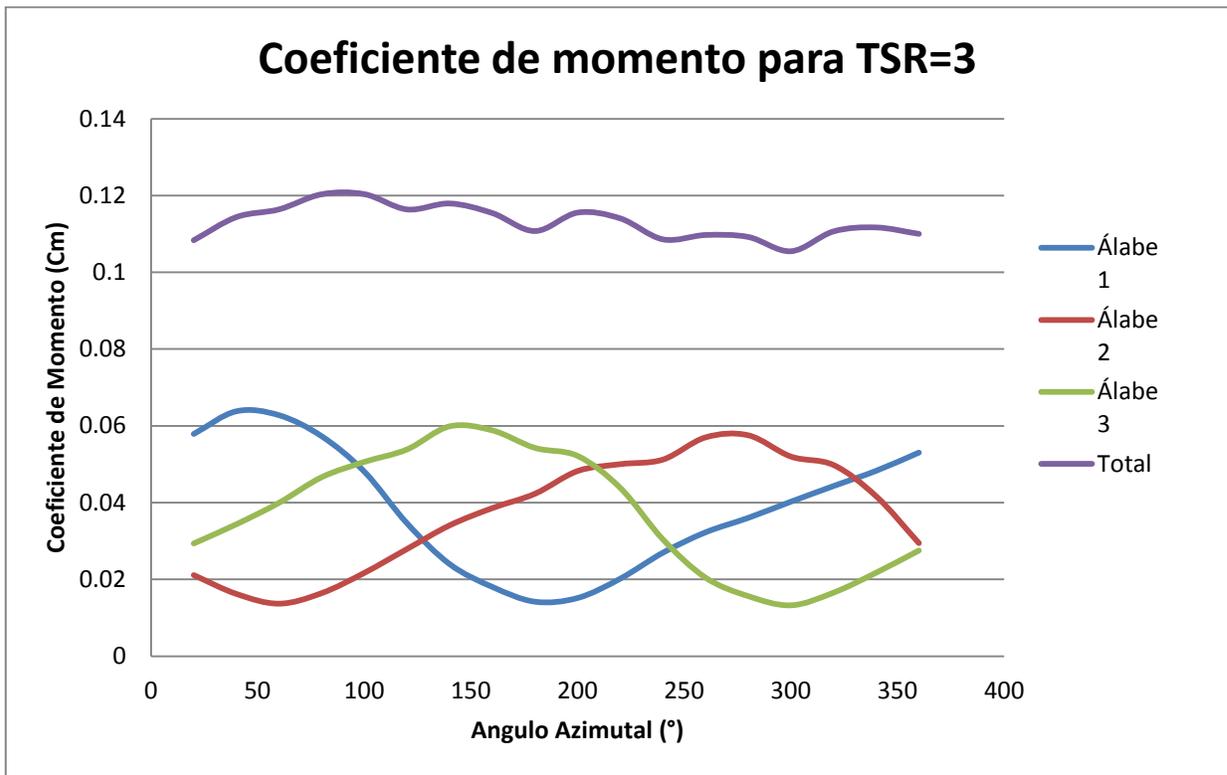


Gráfico 4-11 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=3

Como bien se señaló previamente, el máximo se obtuvo para un ángulo de 100°. En el contorno de velocidad se aprecia que no hay un desprendimiento de alguna vorticidad dada la ausencia de una zona de baja velocidad cercana al borde de salida del álabe; sólo se distingue una zona de baja velocidad sobre el extrados del álabe

debido al impacto que sufre el viento sobre la superficie de este. La presencia de estela generada se hace evidente en las figura 4-33.

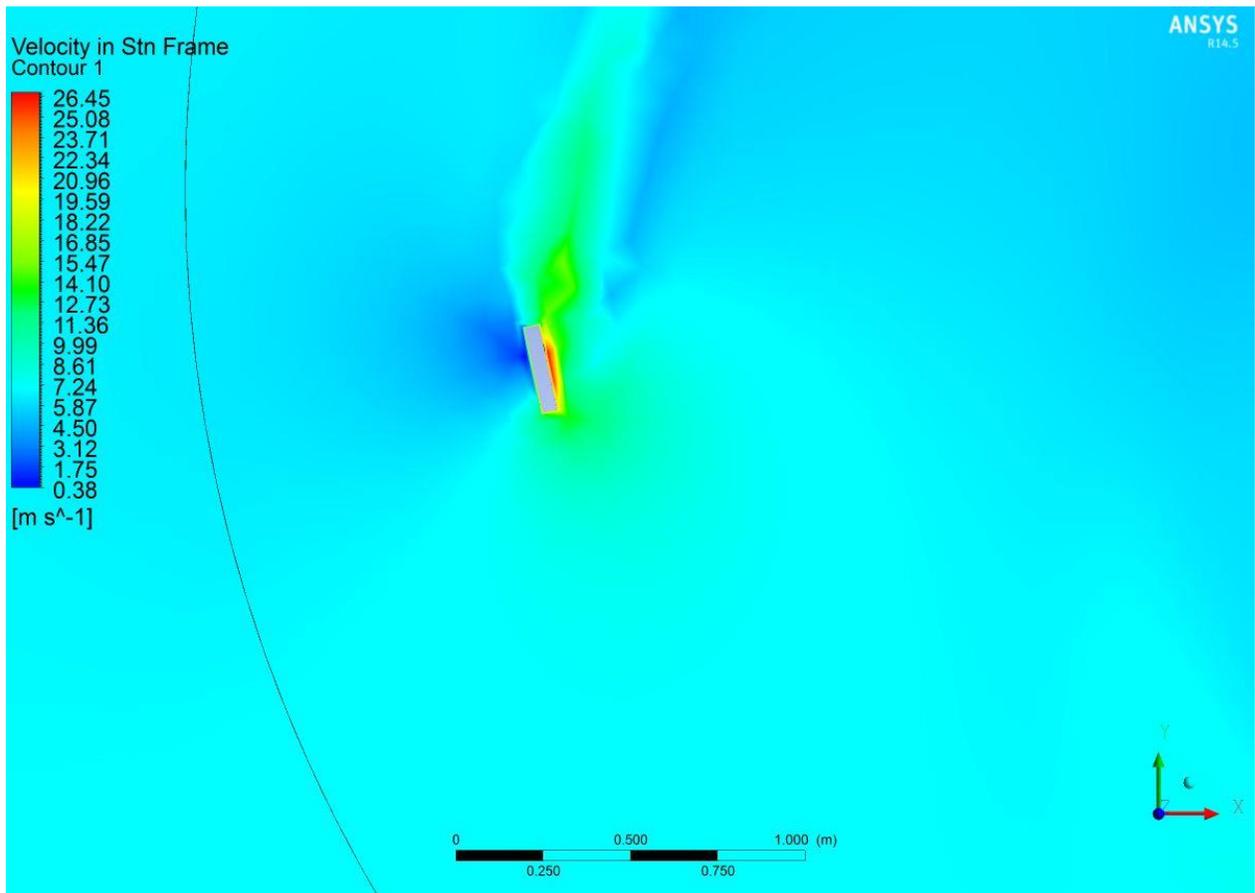


Figura 4-29 Contorno de velocidad para el primer ábabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=3$

Respecto a al contorno de presión que existe en dicho ángulo se aprecia un comportamiento similar a los casos previos, existiendo una zona de presiones bajo la atmosférica en la curva del intrados lo cual genera una succión en el ábabe generando torques positivos para la turbina.

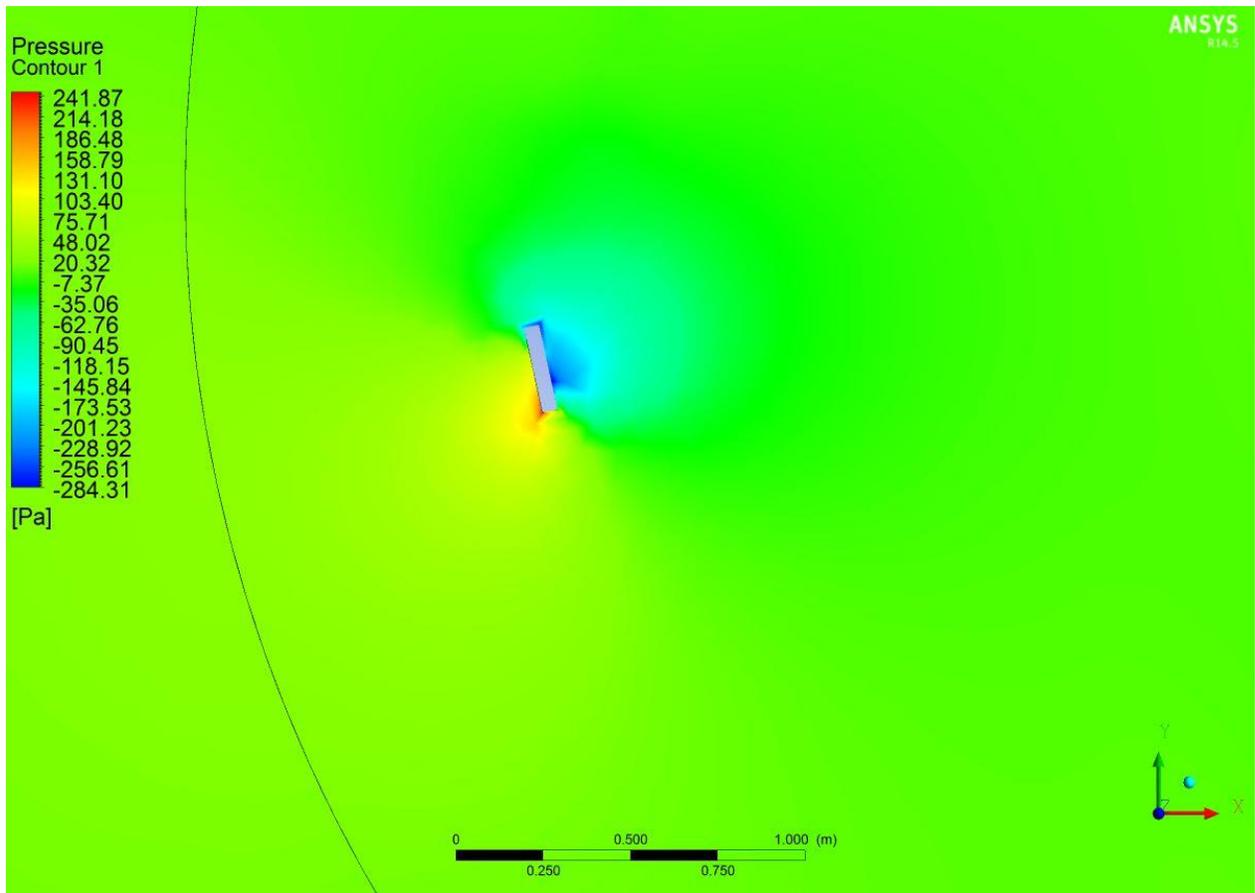


Figura 4-30 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=3$

En el caso de mínimo coeficiente de momento se tiene que ocurre para el primer álabe en un ángulo de 300° , es decir, habiendo pasado la zona de estela generada por el eje de la turbina. En la figura 4-31 se puede apreciar como el álabe atraviesa la estela generada por el resto de los álabes en conjunto con el eje de la turbina. Este hecho genera que en este caso las zonas de mayor velocidad se encuentren por la superficie externa del álabe, lo cual como se ha dicho en reiteradas ocasiones, implica generación de momentos no favorables para la obtención de potencia de la turbina. Este mismo hecho se aprecia pero para el contorno de presiones en la figura 4-31, en donde las menores presiones se encuentran sobre la superficie interna del álabe.

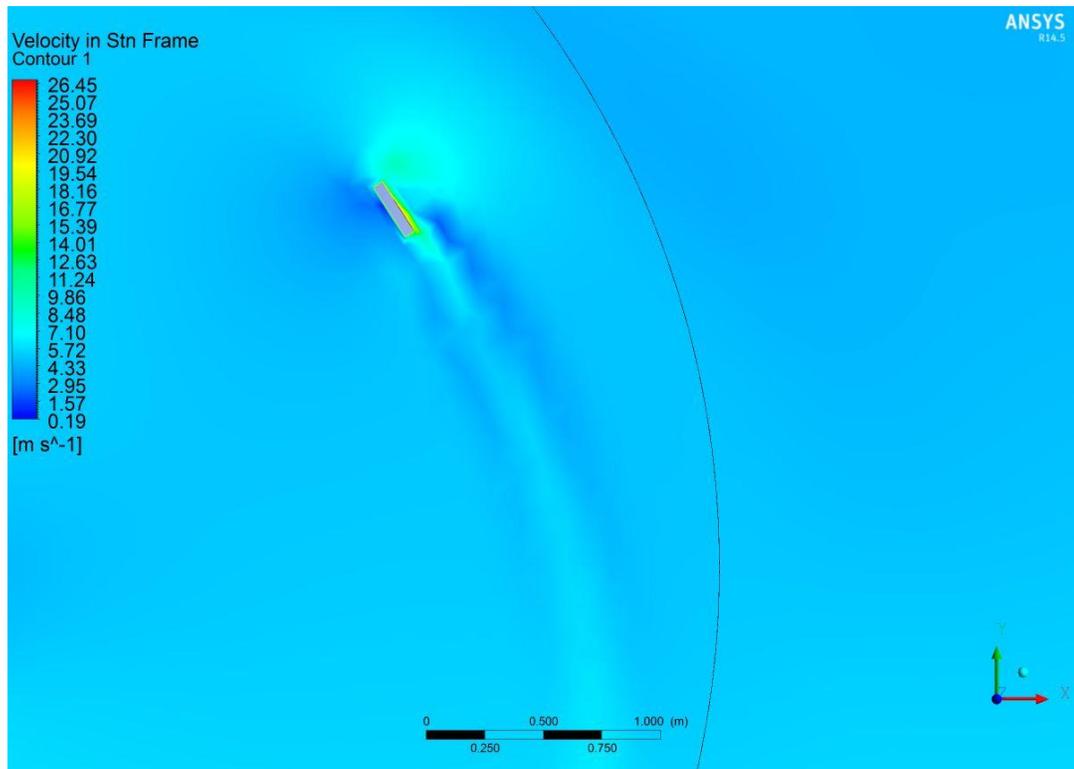


Figura 4-31 Contorno de velocidad para el primer ábale rectangular en condición de mínimo Cm con TSR=3

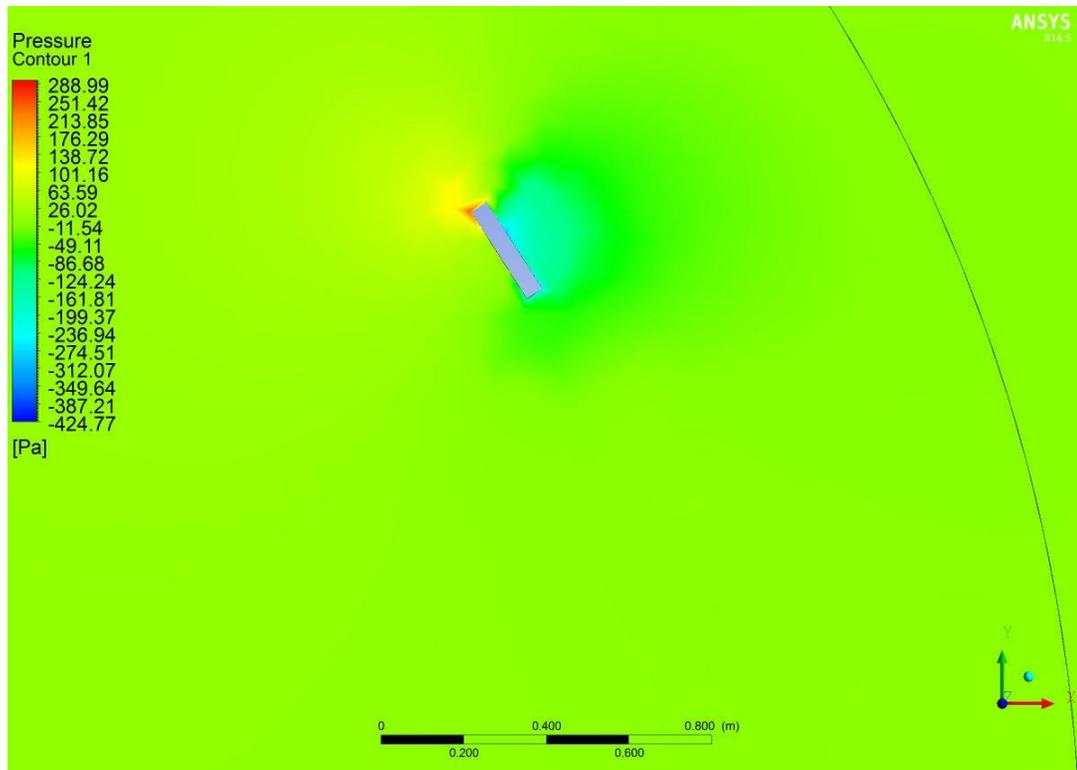


Figura 4-32 Contorno de presión para el primer ábale rectangular en condición de mínimo Cm con TSR=3

Al momento de describir el contorno de velocidad para el caso de máximo coeficiente de momento se señaló que en la figura 4-33 se puede apreciar el efecto de la estela generada. En efecto, en dicha figura se presenta el contorno de velocidad para el segundo álabe en el momento en que la turbina obtiene el menor coeficiente de potencia. En ella se puede apreciar cómo va dejando un rastro de baja velocidad el cual afectará en la obtención de potencia al álabe que le sigue (es decir el primero) en la zona de aguas abajo.

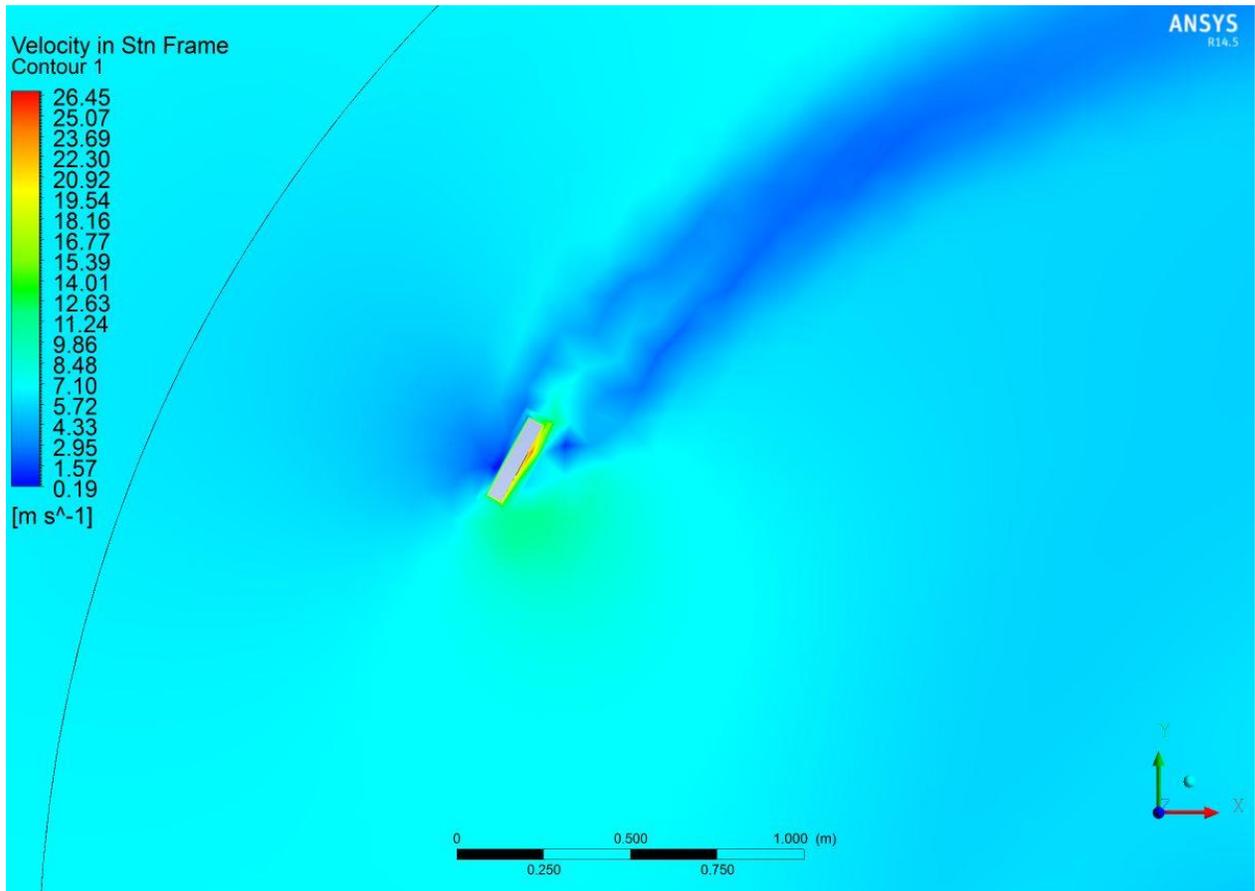


Figura 4-33 Contorno de velocidad para el segundo álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=3$

Por último se aprecia el contorno de velocidades para el total de la turbina en el último giro de esta. En ella se puede evidenciar con claridad los desprendimientos y las estelas generadas por los diferentes álabes, en especial a los que se encuentran por sobre el eje de la turbina.

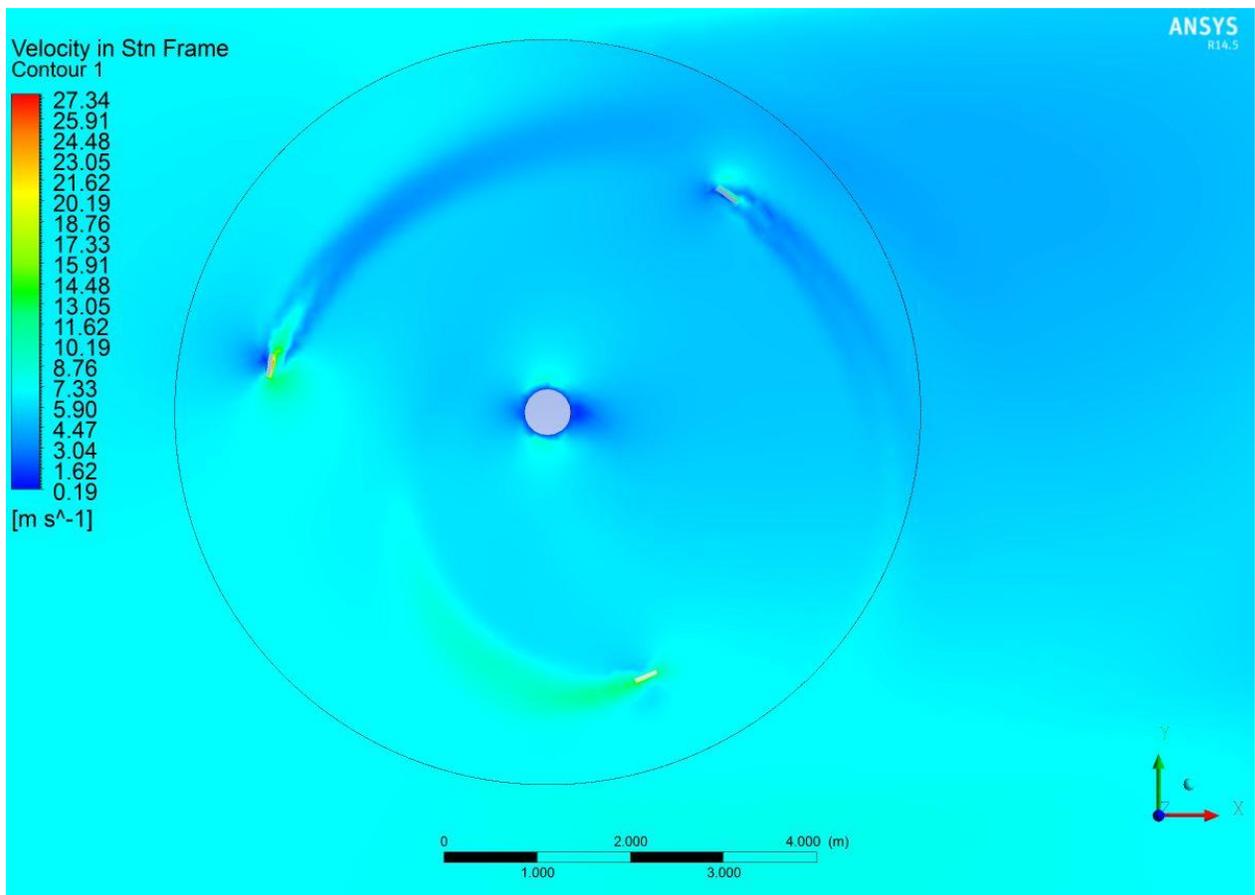


Figura 4-34 Contorno de velocidad para el final de la tercera vuelta con TSR=3

4.3.3.3 TSR 4

Para un TSR=4 la turbina logra obtener la mayor potencia alcanzando una eficiencia de un 47%. Nuevamente se reitera la similitud de las curvas características de los diferentes álabes para el coeficiente de momento con un desfase de 240°. Este hecho resultó ser menos evidente para el caso del perfil NACA dada la poca regularidad que poseía dicho perfil en la obtención de potencia debido a el desprendimiento de estelas afecta en los contornos de presión, siendo estos irregulares sobre la superficie de este tipo de álabes. En este caso se logró obtener el máximo coeficiente de momento para un ángulo de 105°, mientras que el mínimo se obtuvo para 263°.

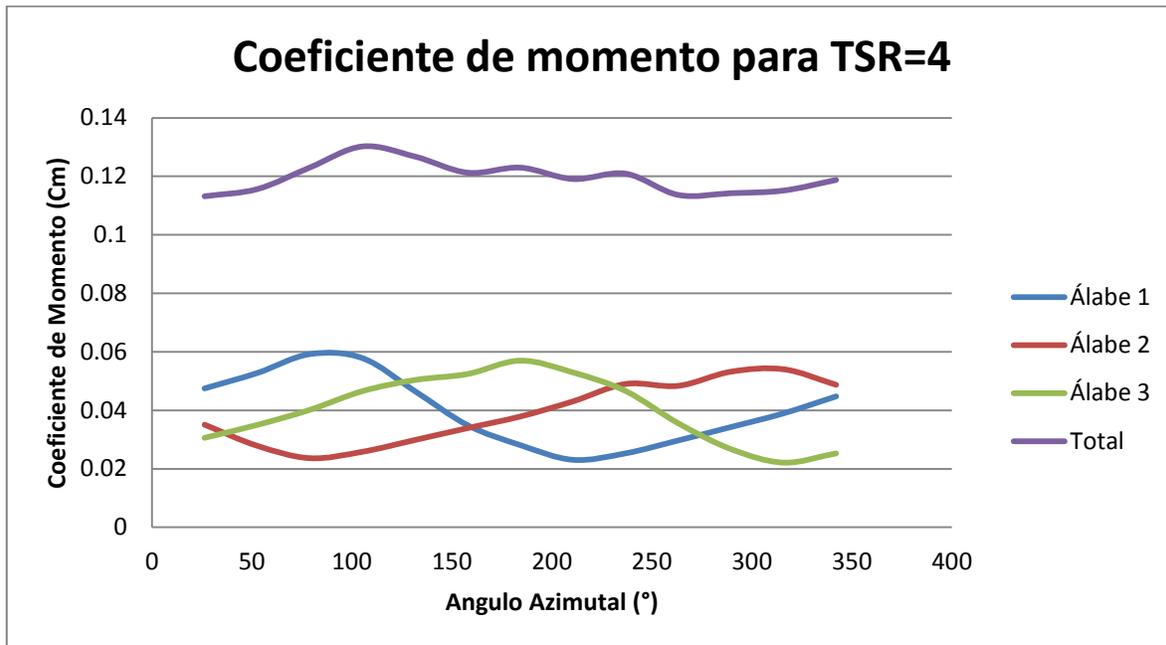


Gráfico 4-12 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con TSR=4

En el momento en que se está obteniendo el coeficiente máximo de momento, se puede apreciar que los órdenes de magnitud tanto de las velocidades como de las presiones resultan ser mayores al caso de TSR=3 lo cual implica una mayor obtención de potencia dado que el momento crece (aparte de que la turbina aumenta su velocidad angular). En la figura 4-35 se aprecia que en la superficie del intrados existe una alta velocidad, la cual implicará una muy baja presión (como se aprecia en la figura 4-36), hecho que beneficia al momento generado sobre el álabe. Además, se aprecia que el álabe no entra en pérdida dinámica lo cual era de esperar en base a lo ocurrido con el perfil NACA.

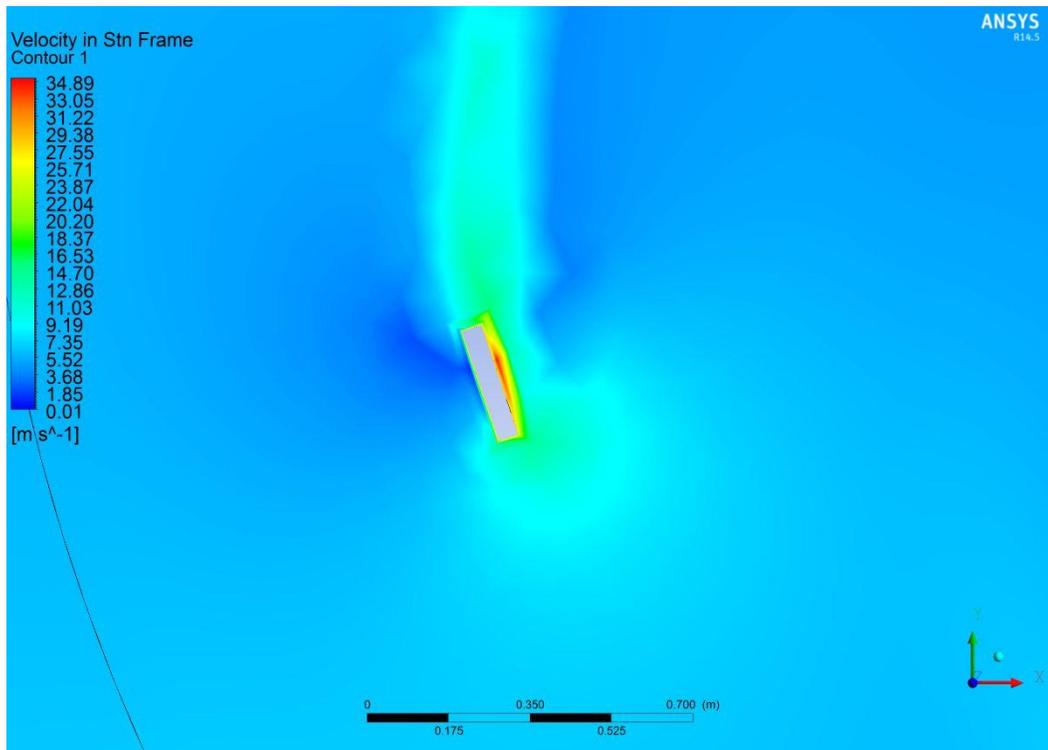


Figura 4-35 Contorno de velocidad para el primer ábale rectangular en condición de máximo Cm con TSR=4

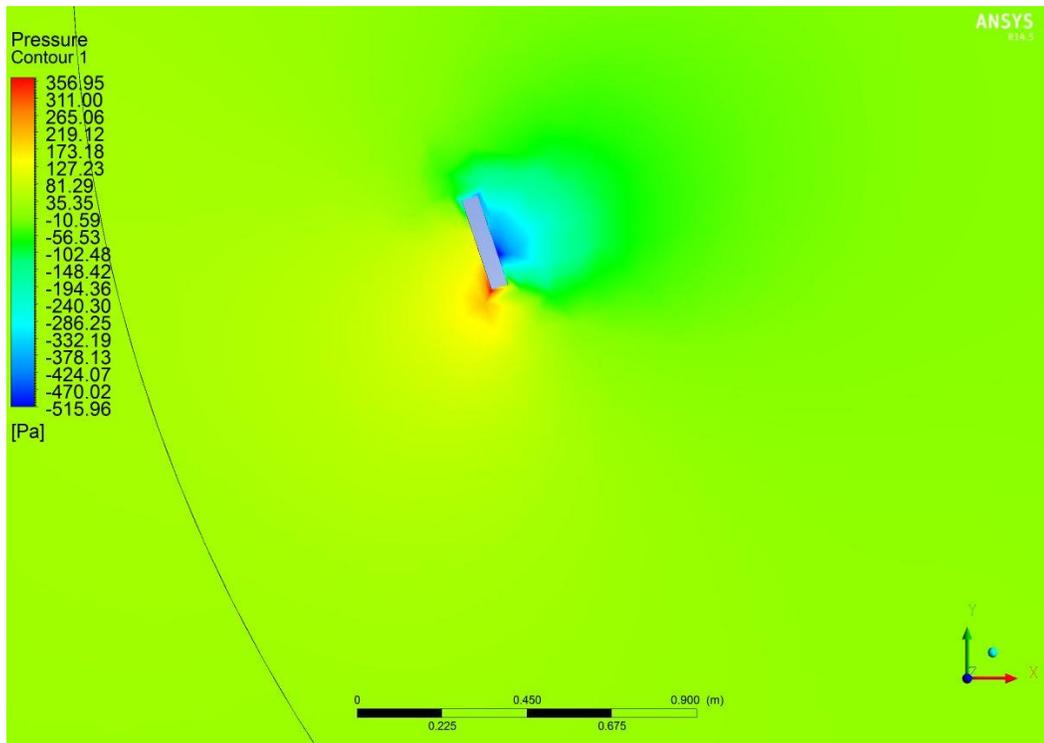


Figura 4-36 Contorno de presión para el primer ábale rectangular en condición de máximo Cm con TSR=4

Ahora bien, en el momento en que la turbina logra un muy bajo coeficiente de momento se logra apreciar que su entorno se encuentra a una menor velocidad que en el caso de $TSR=3$. Esto se debe principalmente a que la obtención de momento en la zona de aguas arriba logra ser más eficiente que en casos anteriores (según como se vio en las figuras previas), lo cual implica una reducción considerable del viento que logra pasar a la zona de aguas abajo. Sin embargo, se logra apreciar que el álabe deja una estela de alta velocidad pero que sin embargo no lograra ser reutilizada a menos que se considere un caso de turbinas en serie lo cual queda fuera del alcance de la memoria; eso sí, queda propuesta la idea de ver el efecto sobre diferentes configuraciones de una serie de turbinas de tipo Darrieus para un futuro.

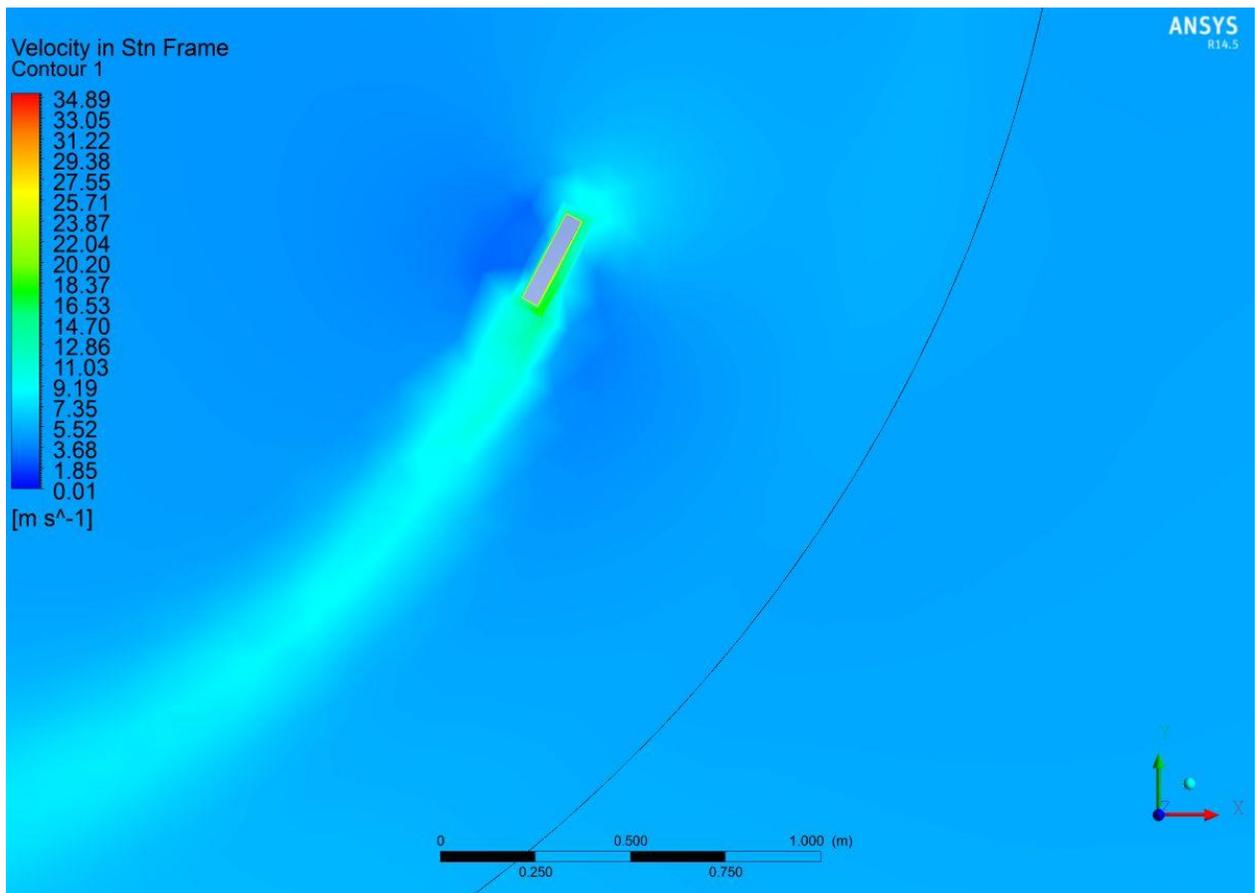


Figura 4-37 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=4$

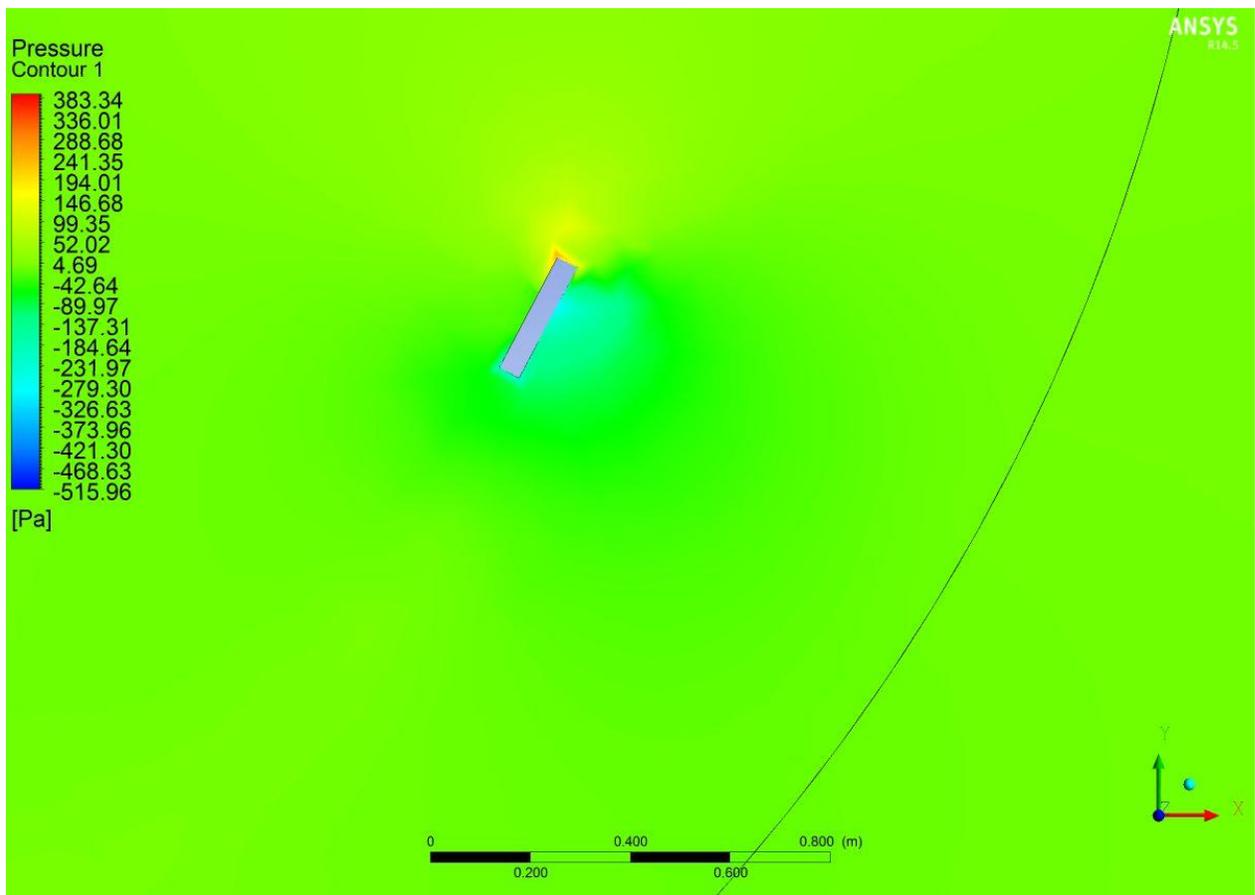


Figura 4-38 Contorno de presión para el primer álabo rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=4$

4.3.3.4 TSR 5

Por último se tiene para el caso del álabe rectangular la simulación con un $TSR=5$. En el gráfico 4-15 se puede apreciar como los valores de los coeficientes de momento no varían de gran manera, hecho que dista al caso con el perfil NACA ya resuelto. Nuevamente esto se justifica a la baja presencia de desprendimientos y recirculaciones con este tipo de álabes lo cual es beneficioso por una parte ya que los álabes sufren menos efectos de torsión, pero esto se ve en desmedro de una menor obtención de potencia. Al igual que en casos anteriores, los álabes presentan comportamientos similares pero con desfases de 120° . El mínimo coeficientes de potencia para este caso ocurre a los 260° mientras que el máximo para 60° .

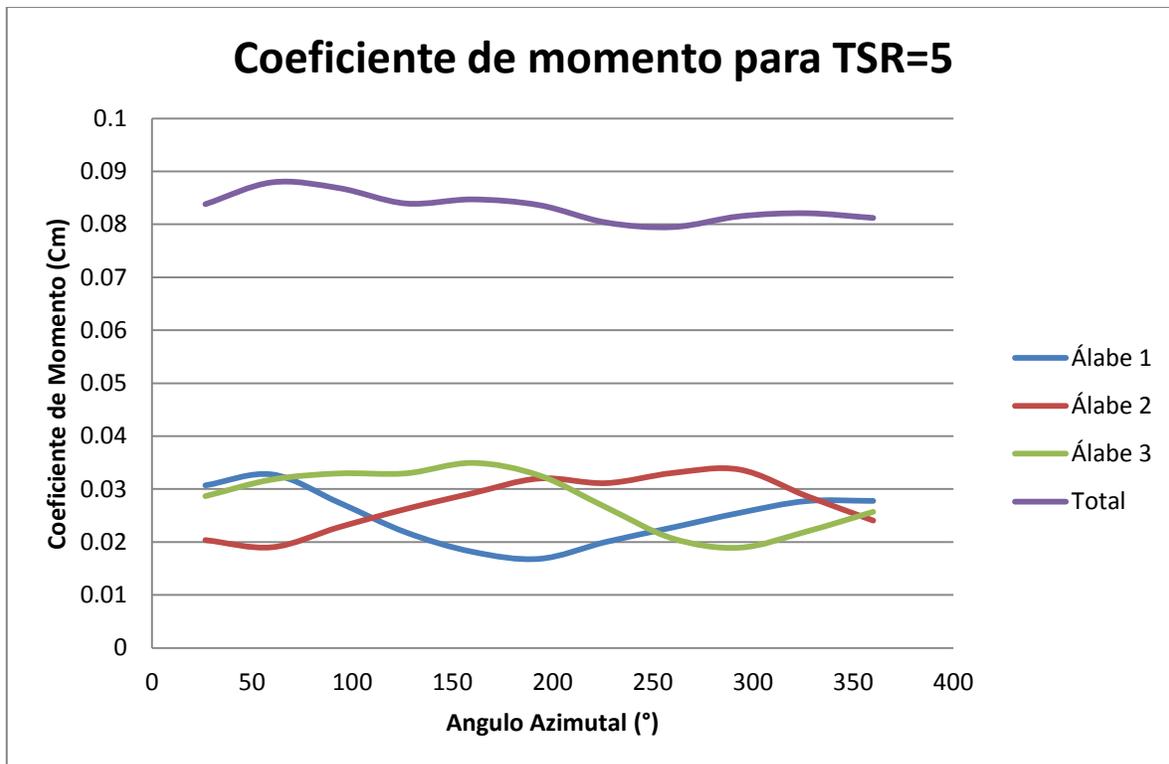


Gráfico 4-13 Coeficiente de momento para cada álabe de la turbina como también el total en función del ángulo azimutal para el tercer giro de la turbina con $TSR=5$

Para el contorno de velocidad obtenido en este caso en la condición de máximo coeficiente de momento se nota una diferencia aun mayor que en el caso de $TSR=4$ respecto a las velocidades circundantes al álabe con las que se encuentran alrededor de este. Las velocidades en este caso se mantuvieron dentro de las órdenes de magnitud presentadas previamente en el caso anterior pero presentan una menor banda de estela de alta velocidad. Esto impide que exista una mayor diferencia de velocidades sobre el contorno del álabe lo que implica menores momentos y por ende menor potencia, aunque se haya aumentado la velocidad de giro.

Para el contorno de presiones se aprecia que la diferencia existente entre las 2 superficies es similar al caso anterior, pero como se encuentra en posiciones diferentes implica que a posterior esta diferencia disminuirá para este caso lo cual expresa una menor obtención de momento.

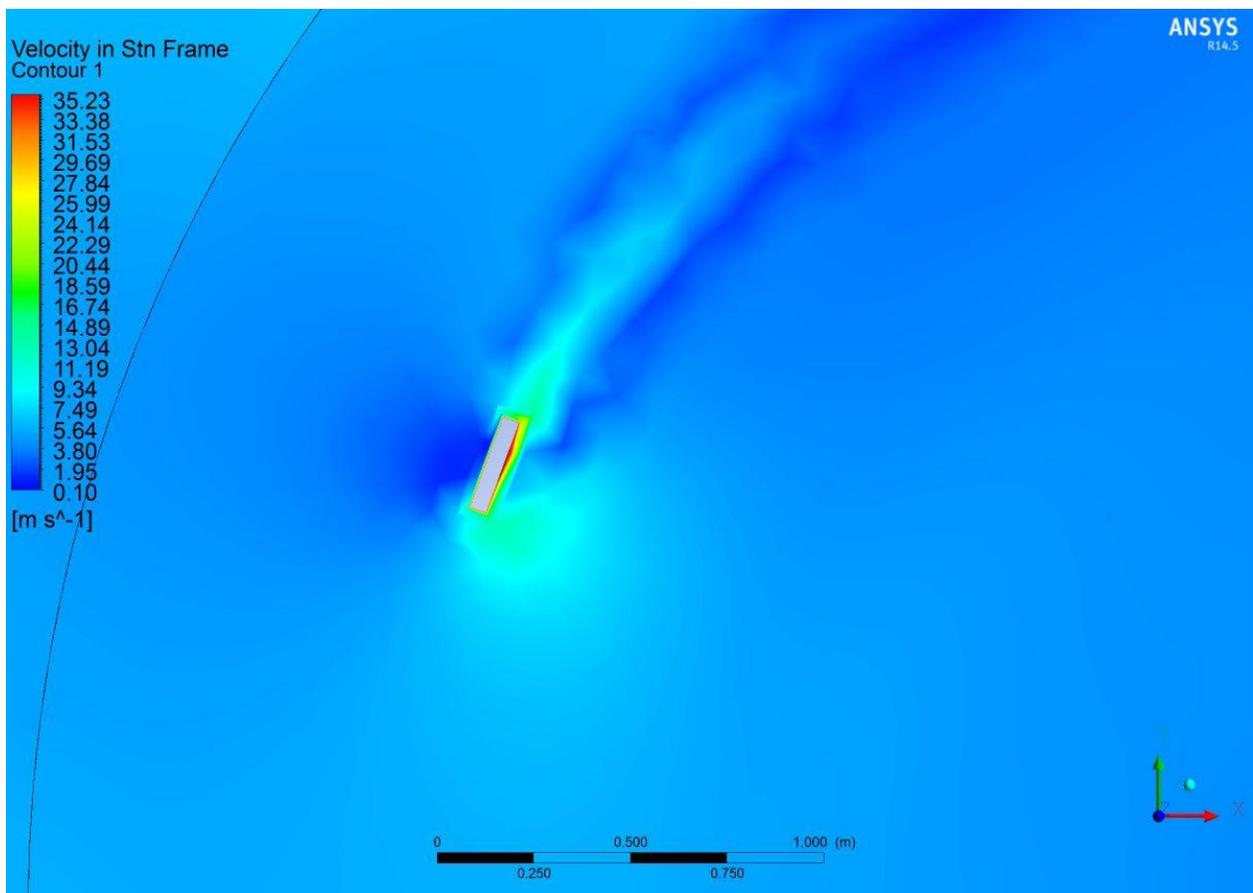


Figura 4-39 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=5$

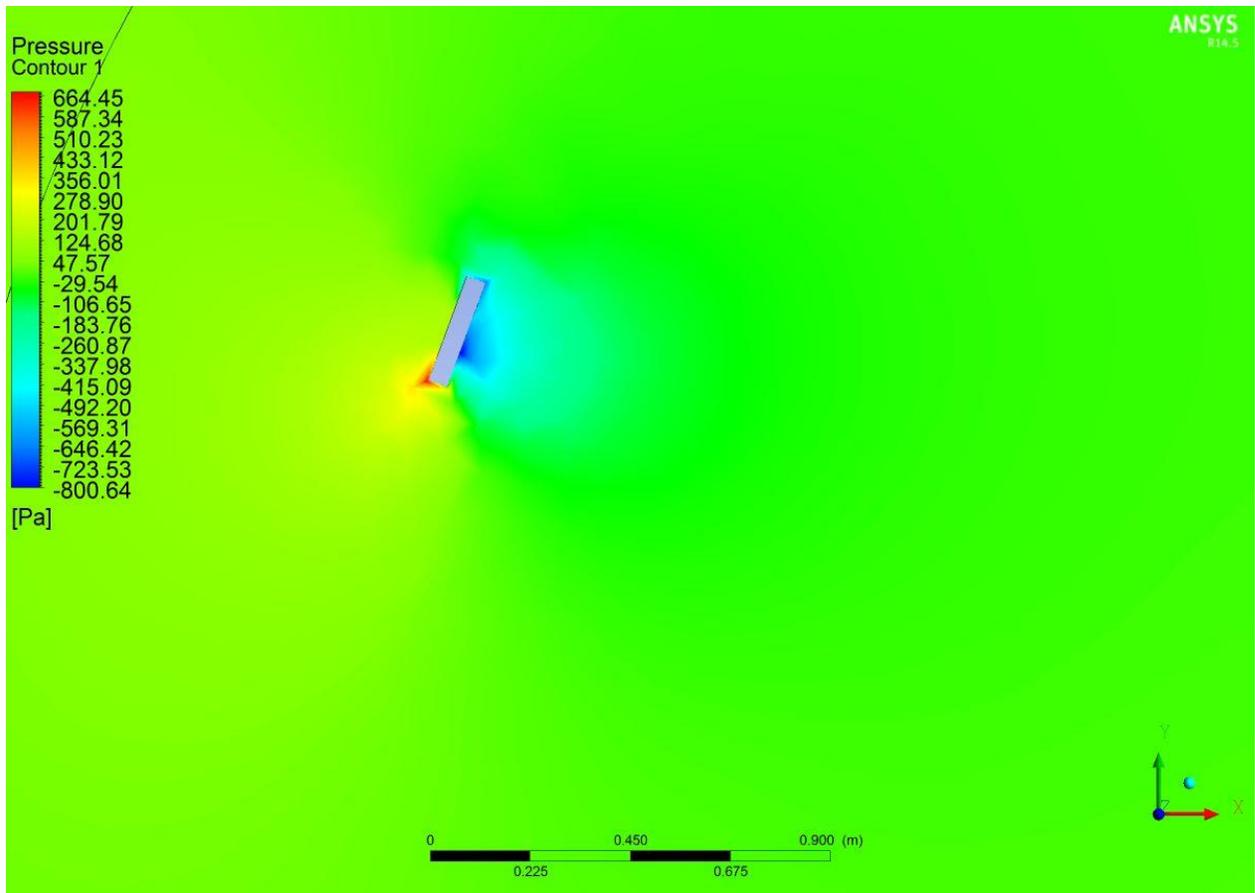


Figura 4-40 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de máximo C_m con $TSR=5$

Para el caso de mínimo coeficiente de momento se tiene que el álabe 1 se encuentra muy cercano a la zona por la cual el viento se ve afectado por la estela del eje, teniendo velocidades su alrededor que resultan ser muy bajas, como también similares en ambos lados, lo cual es perjudicial en lo que respecta a la obtención de potencia de la turbina.

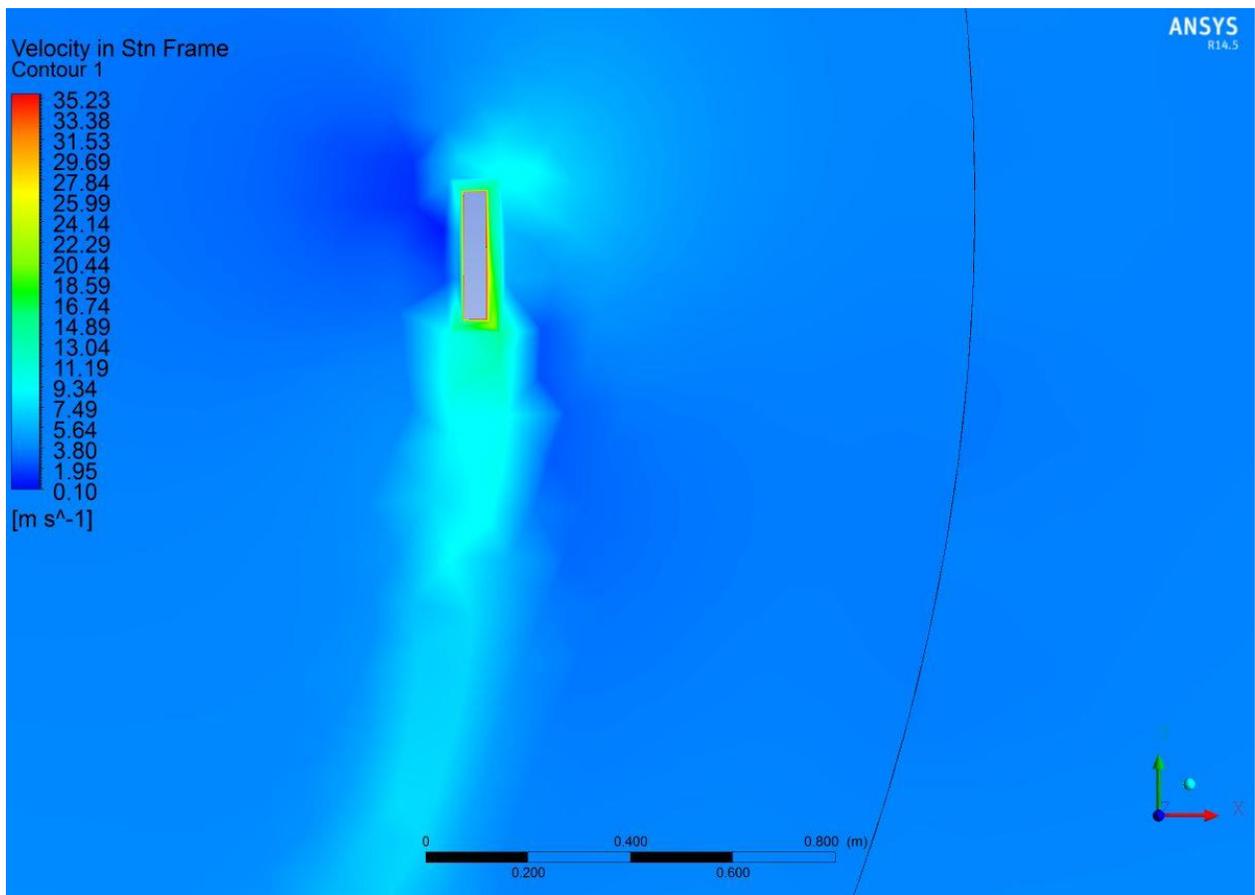


Figura 4-41 Contorno de velocidad para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=5$

En la zona de contornos también se evidencia el hecho recién señalado, solo distinguiendo una mayor presión en la zona del borde de ataque pero que no llega a ser significativa. De hecho, la diferencia de presión entre extrados e intrados llega ser cercana a los 200 [Pa] con un gradiente que genera momentos con sentidos negativos.

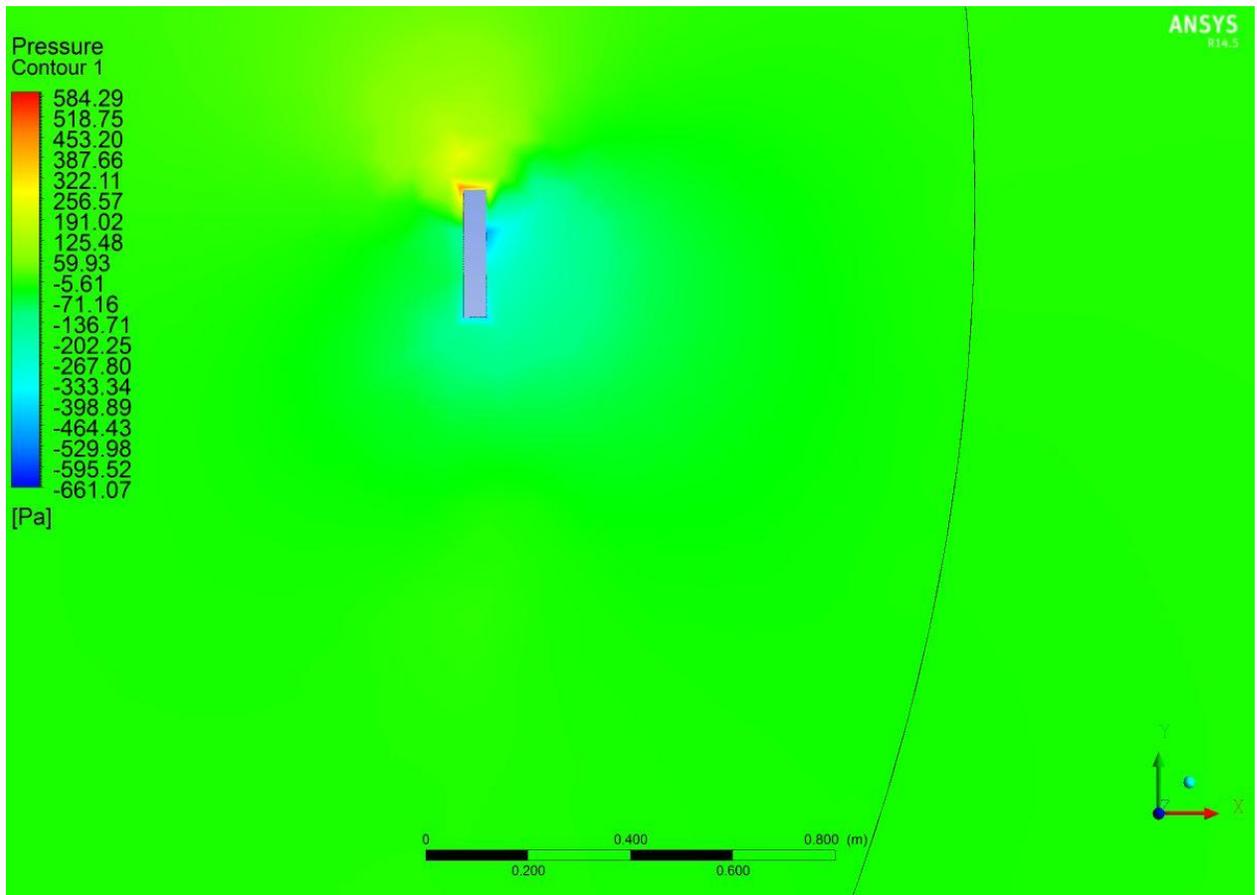


Figura 4-42 Contorno de presión para el primer álabe rectangular en condición de mínimo C_m con $TSR=5$

5 Discusiones

Las discusiones a realizar se dividen según 3 puntos:

- Análisis de resultados para el modelo con perfil alar NACA 0018.
- Análisis de resultados para el modelo con perfil alar rectangular.
- Comparación de resultados para los perfiles desarrollados.

5.1 Análisis de resultados para el modelo con perfil alar NACA 0018.

En primera instancia se analizará el efecto ocurrido respecto a las pérdidas dinámicas sobre los álabes para los distintos TSR evaluados. Se pudo apreciar que en el caso de las turbinas Darrieus, se obtuvieron valores del coeficiente de momento muy variados, los cuales se justificaron dada la rápida variación en ángulos de ataque que permite que el flujo se desprenda y vuelva a adjuntar reiteradas veces dentro de una rotación. Este fenómeno provocó que surgieran caídas y subidas abruptas en el momento generado de cada álabe, lo que influye enormemente en la potencia generada por la turbina. A su vez, esto hace que los momentos en la turbina para bajos TSR sean inestables y se generen variados máximos y mínimos (ver gráfico 4-4), lo cual podría ser perjudicial a la larga dado que se generan ciclos de fatiga dañinos. Es importante señalar que dichos ciclos son inevitables dado que para que la turbina alcance su rendimiento óptimo (es decir, valores de $TSR=4$) tiene que pasar necesariamente dichos ciclos, por lo que se debiese buscar que la turbina este el menor periodo posible dentro de un rango de velocidades bajas.

Desde un $TSR = 3$ en adelante, el fenómeno cambia dado que la pérdida dinámica deja de ser relevante. Esto, como bien se explicó en la sección de resultados, porque los ángulos de ataque presentes en los álabes se hacen cada vez menor a medida que aumenta el TSR (según lo visto en la figura 2-8), lo que hace que a partir de un determinado TSR los álabes no superen su ángulo de ataque de pérdida estática. Esto implica que el flujo se mantiene adjunto durante toda la rotación, y las curvas de coeficiente de momento por álabe (y por ende de la turbina) resultan ser mucho más suaves.

Se pudo apreciar por otra parte que los coeficientes de momento para los diferentes álabes siempre resultaban menores cuando entraban en la zona de aguas debajo de la turbina, dado que en dicha zona las velocidades del viento que impactaban sobre los álabes resultaron ser bajas debido a los efectos de estelas generados por los propios álabes durante su trayecto en la zona de aguas abajo en conjunto de la estela

generada por el eje. Dicho efecto se intensifica aún más a mayores velocidades de rotación tal como se pudo apreciar a medida que se aumentaba el valor del TSR.

Siguiendo con esta idea, para valores altos de TSR, los ángulos de ataque se hacen cada vez más pequeños, por lo que los valores del coeficiente de Lift van disminuyendo mientras que los del coeficiente de Drag se hacen cada vez más significativos. La fuerza generada por Drag va en contra sentido de la rotación, lo cual hace que la generación de potencia disminuya explicando así el decaimiento de la curva de CP respecto al TSR. Eso sí, cabe señalar que las zonas en las cuales el efecto del Drag toma mayor relevancia son las cercanas a los ángulos 0° y 180° , dado que en dichas zonas la fuerza tangencial disminuye mucho a causa de que los perfiles utilizados son simétricos. Este hecho permite conjeturar que el utilizar tres álabes es superior a utilizar solo dos o sólo un álabe, pues así se evita que la totalidad de los álabes se encuentren en una zona poco favorable para la generación de Lift. Es de esperar que para valores de TSR mayores a los expuestos durante la memoria se logre alcanzar bandas de torque negativos, los cuales afectan en la funcionalidad de la turbina dado que generan fatiga en sus componentes.

5.2 Análisis de resultados para el modelo con perfil alar rectangular.

Muchas de las conclusiones y análisis ya presentados en la sección 5.1 se aplican para el caso con perfil rectangular dado que fueron conjeturas asociadas al funcionamiento de la turbina en su totalidad. Sin embargo, a continuación se darán algunos análisis respecto a pequeñas diferencias que se tuvieron en este caso.

Una de las principales diferencias que caben señalar fueron los menores valores obtenidos respecto a la eficiencia del perfil alar rectangular. Esto viene asociado a la aerodinámica del perfil la cual no es idónea para este tipo de funciones impidiendo que se logren grandes recirculaciones en los perfiles internos de los álabes según lo apreciado en los resultados obtenidos. Sin embargo, dado la simpleza del diseño de este tipo de álabes se obtiene valores bastante decentes lo cual hace pensar que este tipo de diseño podría ser una alternativa en casos de personas que busquen una vía rápida de obtención de energía para su consumo personal.

Por otra parte, se obtuvo que tanto para los contornos de velocidad como los de presión en los diferentes casos evaluados no logran alcanzar diferencias demasiado significativas, lo cual conlleva a potencias menores. Esto se debe principalmente a que el perfil seleccionado no permite un buen desprendimiento de las recirculaciones generadas en su superficie dado que se trata de un perfil poco aerodinámico pero que resulta mucho más simple de fabricar. Se pudo apreciar en los distintos casos como las estelas generadas no lograban alcanzar desprendimientos de velocidades muy altas en los momentos de máxima obtención.

Otro punto interesante a considerar es que para el desarrollo del modelo, a la zona del mallado que rotaba se le impone una velocidad giro de acuerdo al TSR a evaluar, lo cual en la realidad puede no ser necesariamente así para el caso de este tipo de perfil, dado que como posee una simetría muy definida, las fuerzas de Drag y Lift no necesariamente deben actuar según lo estipulado para este caso, por lo cual se plantea a desarrollar a futuro un prototipo de turbina a la cual se le instale este tipo de perfil para poder realizar una comprobación empírica de los resultados obtenidos.

5.3 Comparación de resultados para los perfiles desarrollados.

En esta sección se comparan con mayor detalle las diferencias presenciadas entre los dos diseños de álabes propuestos. En primera instancia la diferencia más significativa que se obtuvo y a la cual está enfocada la memoria está relacionada con el coeficiente de potencia obtenido en cada caso para los diferentes TSR evaluados. Dicha comparación se puede apreciar de mejor manera en el gráfico 5-1.

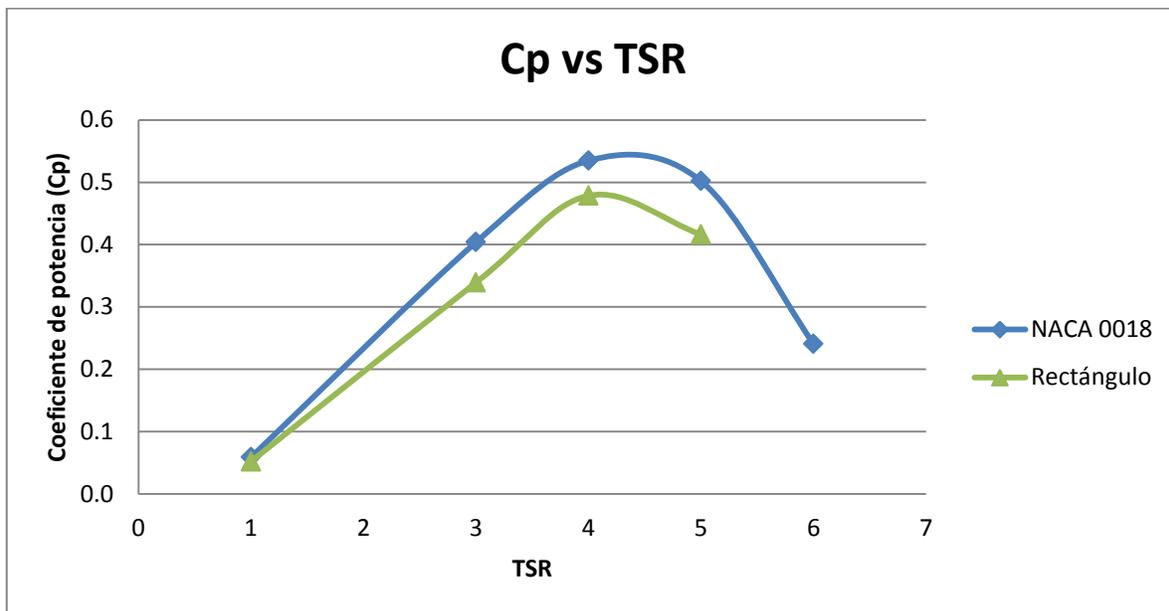


Gráfico 5-1 Cp v/s TSR para los perfiles desarrollados

En dicho gráfico se evidencia la menor eficiencia global obtenida por el álabes de perfil rectangular, lo cual era algo esperado dado que como bien se presentó en los antecedentes, dicho perfil posee una menor aerodinámica debido a que el contorno que presenta no favorece el paso fluido del viento, impidiendo así que este desarrollarse completamente.

Complementando este hecho, se presentan a continuación los gráficos en donde se comparan los coeficientes de momento entre los perfiles seleccionados para las distintas velocidades de giro evaluadas.

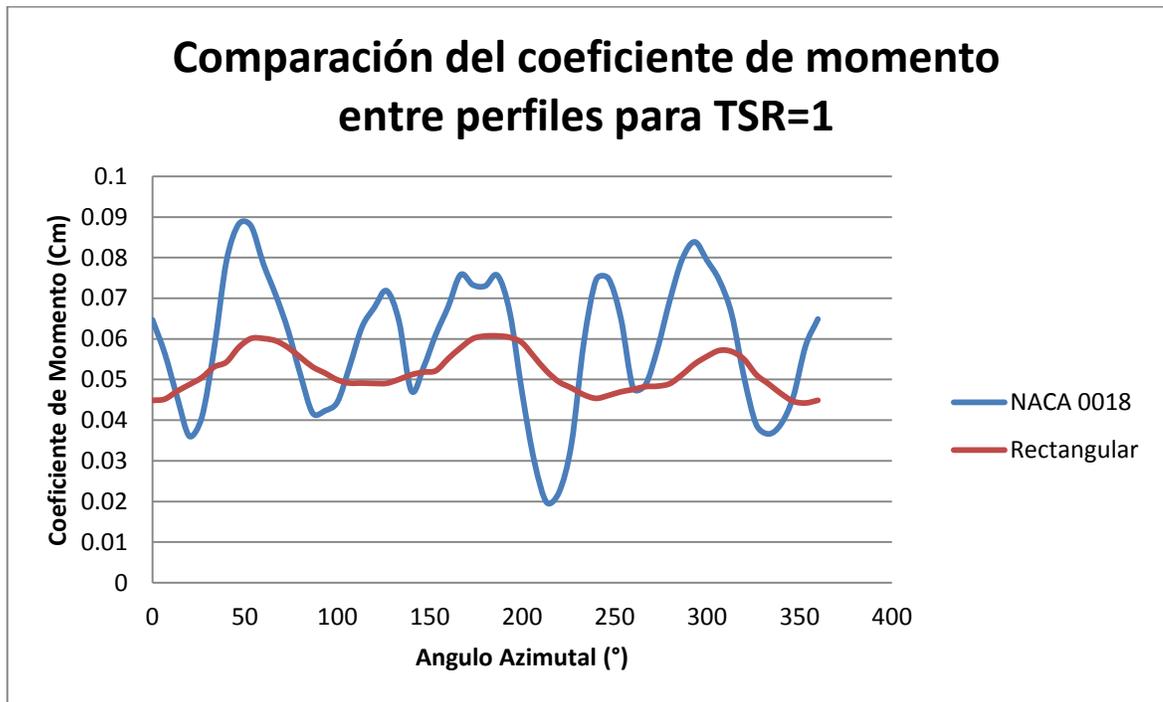


Gráfico 5-2 Comparación del coeficiente de momento total para los perfiles seleccionados con un TSR=1

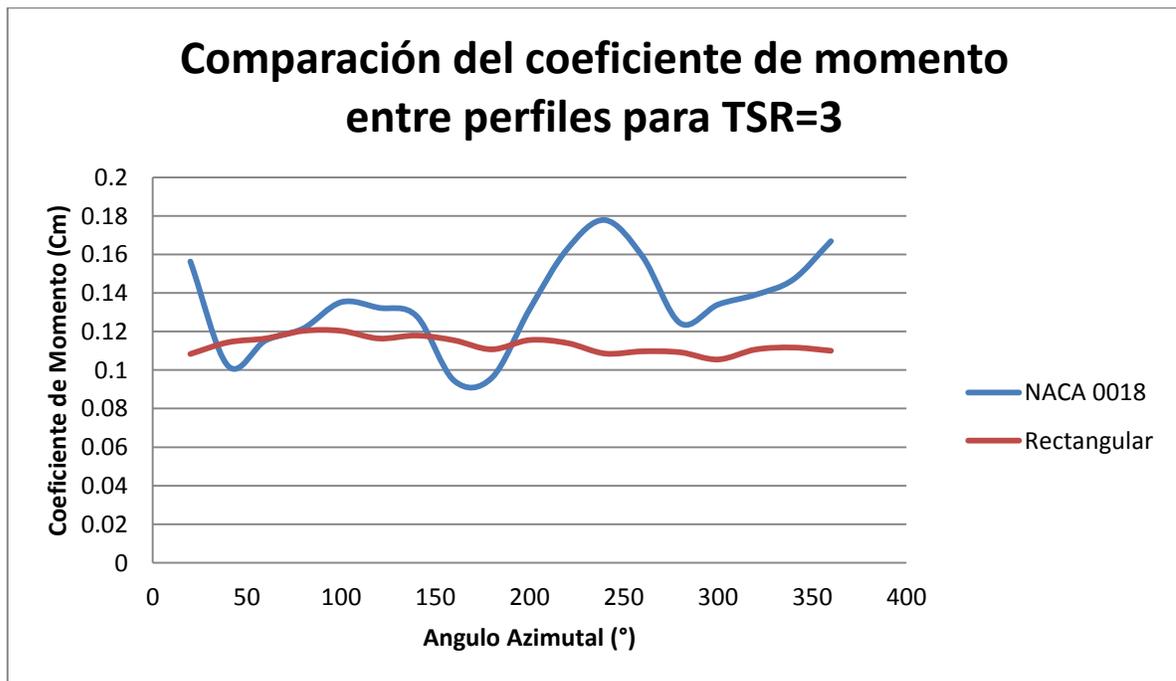


Gráfico 5-3 Comparación del coeficiente de momento total para los perfiles seleccionados con un TSR=3

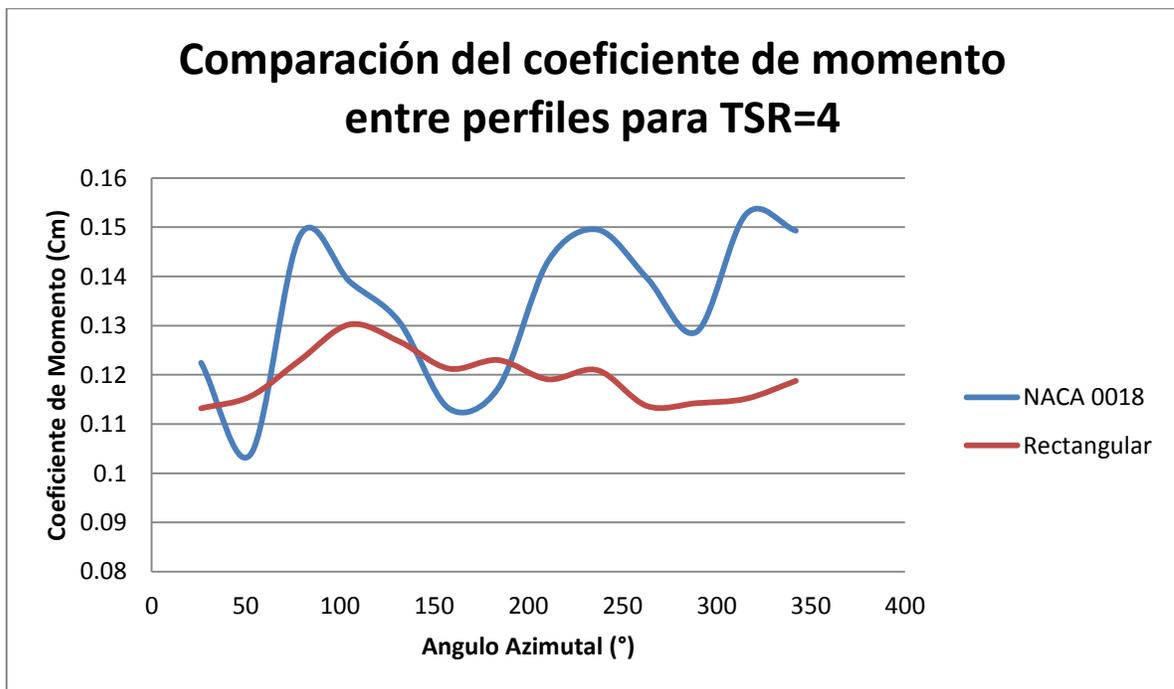


Gráfico 5-4 Comparación del coeficiente de momento total para los perfiles seleccionados con un TSR=4

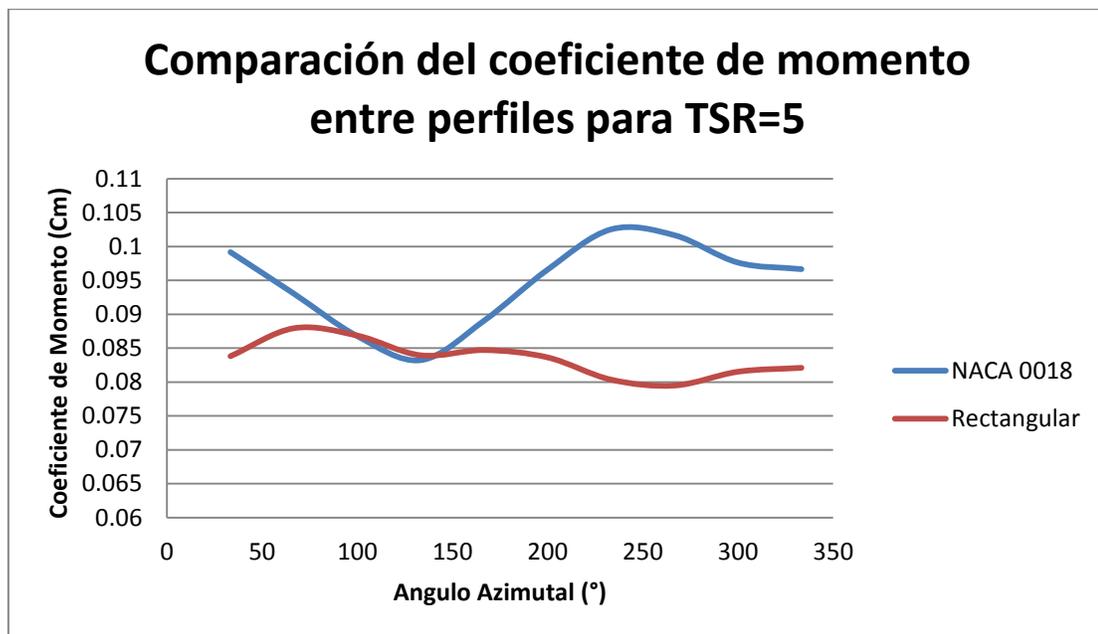


Gráfico 5-5 Comparación del coeficiente de momento total para los perfiles seleccionados con un TSR=5

En dichos gráficos se puede presenciar que para el caso del perfil alar NACA 0018 existe una tendencia mucho más oscilante que para el perfil rectangular, sin importar la velocidad de rotación que se considere. Este hecho se justifica, en base a lo ya señalado en los resultados obtenidos, por el poco desprendimiento de vórtices presenciados en este último perfil. Además, se aprecia como en cada caso existen diferencias notables respecto a las magnitudes de los coeficientes, lo que a la larga influye en la obtención de potencia por parte de la turbina.

Otro modo de comparación para ambos perfiles es la potencia final obtenida por ambos modelos, calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^3 A} \quad (5.1)$$

En donde ρ es 1,225 [kg/m³], V_∞ es 7 [m/s] y A corresponde al área de impacto la cual se considera como 6 m². En la tabla 5-1 se puede apreciar que la diferencia de potencias entre ambos perfiles no resulta ser demasiado drástica pero que la generación en ambos casos es baja. Esto se debe a que la velocidad escogida para realizar la simulación es baja, lo cual implica una energía cinética no muy alta lo cual no permite que la obtención de potencia sea demasiado alta.

Tabla 5-1 Comparación de la potencia obtenida entre perfiles.

Perfiles Alares				
	NACA 0018		Rectangular	
TSR	Cp	P (W)	Cp	P (W)
1	0,0587	73,99	0,052	65,55
3	0,404	509,25	0,3392	427,57
4	0,5347	674,01	0,4784	603,04
5	0,5018	632,53	0,4162	524,63
6	0,2404	303,03	-	-

Un punto a destacar a favor del perfil rectangular es el hecho de que presente niveles de oscilación muy bajos de forma global, cuales beneficioso para la turbina en lo que respecta a posibles fallas que pudiesen ocurrir a lo la del tiempo. El hecho de que el perfil NACA presente variaciones muy drásticas no puede ser evaluado estructuralmente por esta memoria, pero si da indicios que este tipo de turbinas necesita presentar una robustez significativa para lograr soportar dichos esfuerzos. En cambio, para el perfil rectangular, se deja como propuesta que al momento de realizar un estudio empírico del caso se analicen los esfuerzos aplicados sobre la estructura ya que si se cumple lo previsto en este caso, se podría lograr abaratar costos de fabricación y material en la elaboración de este tipo de turbinas.

6 Conclusiones

En base a los objetivos planteados para la presente memoria, se concluye lo siguiente:

- Se pudo caracterizar el comportamiento que posee una turbina en operación normal mediante las curvas de coeficiente de potencia v/s la velocidad punta del álabe (TSR) para los dos perfiles seleccionados. Ambos casos presentan comportamientos similares, en donde para rangos de TSR bajos (entre 1 y 3) ocurre el fenómeno de pérdidas dinámicas en reiteradas ocasiones a lo largo de una revolución. Dichas pérdidas impiden que la obtención de potencia sea la idónea por lo que se busca evitar que la turbina se establezca a esas velocidades de giro. Para valores de TSR medio (es decir entre 3 y 5) se obtiene el punto de mayor rendimiento de la turbina dado que para estas velocidades de giro el ángulo de ataque que presentan los álabes no es lo suficientemente elevado como para poder superar la pérdida estática, lo cual impide la aparición de pérdidas dinámicas. Por último, para rangos de TSR superiores a los ya mencionados se tiene que el ángulo de ataque es cada vez menor mientras que la velocidad efectiva incidente es aún mayor, lo cual desfavorece al Lift y a su vez favorece la participación del Drag, lo cual implica una caída de la potencia generada.
- La mayor parte de la potencia generada por los álabes ocurre en aguas arriba de la turbina. En la zona de aguas abajo la magnitud de la velocidad del flujo es mucho menor a causa de las estelas generadas por los diferentes componentes que constituyen a la turbina, por lo que las fuerzas aerodinámicas y la potencia generada también tienden a decrecer.
- Para el perfil rectangular se obtuvieron potencias inferiores a las presentadas por el perfil NACA debido a que este perfil resulta ser poco aerodinámico, desfavoreciendo el desprendimiento de estelas de alta velocidad según lo visto en los resultados obtenidos, pero que permite evitar grandes cantidades de desprendimiento de vorticidades dado que se obtiene curvas mucho más suaves que las presentadas por el otro perfil.
- Respecto al caso del perfil rectangular se menciona el hecho de que no hay certeza sobre si el comportamiento que tiene la turbina según lo modelado corresponde a la realidad. Es por esto que para este caso se plantea a futuro desarrollar eventuales pruebas experimentales mediante túneles de viento que permitan corroborar el buen funcionamiento o no de dicho perfil.

7 Bibliografía

- [1] P. V. R, C. Programa, M. Ambiente, F. Liberona, D. Ejecutiva, and T. Publicaciones, “Chile y el Calentamiento Global : Una mirada desde la política pública,” no. Rpp 24, 2008.
- [2] S. V. Scholar, “Renewables 2007 Global Status Report,” 2007.
- [3] “Global Wind Report Annual market update 2012,” 2012.
- [4] J. W. Twidell, “Wind Turbines,” vol. W, pp. 6–7, 2006.
- [5] C. Rahmann, “Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables.”
- [6] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain, “Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 1926–1939, May 2012.
- [7] “HAWT versus VAWT,” *Refocus*, vol. 4, no. 4, pp. 44–46, Jul. 2003.
- [8] F. Balduzzi, A. Bianchini, E. A. Carnevale, L. Ferrari, and S. Magnani, “Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building,” *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 921–929, Sep. 2012.
- [9] C. R. THOMAZ JUNIOR, “Desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabe,” 2012.
- [10] “Aerospaceweb.org | Ask Us - NACA Airfoil Series.” [Online]. Available: <http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml>. [Accessed: 17-Jun-2013].
- [11] M. O. L. Hansen and L. Sterling, “Aerodynamics of Wind Turbines Second Edition.”
- [12] E. Branlard, “Introduction to wind turbines aerodynamics: the actuator disk theory.” [Online]. Available: <http://emmanuel.branlard.free.fr/work/papers/html/2008ecn/node58.php>.
- [13] I. Paraschivoiu, *Wind Turbine Desing with emphasis on Darrieus Concept*. 2009.
- [14] N. C. Batista, R. Melício, J. C. O. Matias, and J. P. S. Catalão, “Vertical Axis Wind Turbine Performance Prediction : An Approach to the Double Multiple Streamtube Model Key words,” pp. 1–4, 2012.
- [15] J. Castillo, “SMALL-SCALE VERTICAL AXIS WIND TURBINE DESIGN,” no. December, 2011.

- [16] P. Sabaeifard, H. Razzaghi, and A. Forouzandeh, "Determination of Vertical Axis Wind Turbines Optimal Configuration through CFD Simulations," vol. 28, pp. 109–113, 2012.
- [17] S. N. Laboratories, U. S. Dep, U. S. Government, U. S. Governrnt, U. States, and A. Available, "Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections through 180-Degree Angle of attack for use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbine."
- [18] N. C. Batista, R. Melício, J. C. O. Matias, and J. P. S. Catalão, "Vertical Axis Wind Turbine Performance Prediction : An Approach to the Double Multiple Streamtube Model Key words," pp. 1–4, 2012.
- [19] L. X. Zhang, Y. B. Liang, X. H. Liu, Q. F. Jiao, and J. Guo, "Aerodynamic Performance Prediction of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine Based on CFD," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–11, 2013.

8 Anexos

8.1 Anexo A: DMS

Se presenta el código realizado en MATLAB para realizar el análisis a través del modelo DMS.

```
function [Cpt, Tp] = DMS(Vo, w, NACA)
%PARAMETROS DE ENTRADA
%Vo = Velocidad del Viento (m/s).
%w = velocidad angular del rotor (rad/s).
R = 3; %Radio del rotor (m).
N = 3; %numero de alabes
c = 0.25; %cuerda (m).
L = 3; %Largo del alabe (m).
Ao = 0; %angulo de ataque inicial
%NACA = Serie NACA a utilizar.
%PARAMETROS DE SALIDA
%Cpt = Coeficiente de potencia.
%Tp = Torque promedio (Nm).
%%CONSTANTES PARA CONDICIONES ESTANDAR DEL AIRE A 1 ATM
kv = 1.4607e-5; % viscosidad cinematica a 15°C [m^2/s].
rho = 1.225; % Densidad del Aire[kg/m^3]
n=36; %Numero de streamtubes
%Para distinguir entre los elementos pertenecientes al analisis aguas arriba
%y aguas abajo, se distingiran segun sus siglas en ingles, aguas arriba=
%upstream (u) y aguas abajo= downstream (d)
theta = linspace (-89*pi/180, 89*pi/180, n); % angulos aguas arriba (rad).
theta_d = linspace (91*pi/180, 269*pi/180, n); % angulo aguas abajo (rad).
Xt=w*R/Vo; %Tip speed ratio
S = 2*L*R; %Area de barrido [m^2]
% CALCULOS AGUAS ARRIBA
i = 0;
while (i~=n)
i = i+1;
au = 1.01; % Factor de interferencia para Aguas arriba.
newau = 1;
while ((au-newau)>1e-3) %Proceso Iterativo para determinar au
au = newau;
Vu = Vo*(au); %Vu =Velocidad aguas arriba de la turbina
X = R*w/Vu; %Tip speed ratio local
% Wu=Velocidad relativa
Wu = sqrt ( Vu^2*( X - sin (theta(i)))^2 + (cos (theta(i)))^2));
Reb = Wu*c/kv; %Reynolds del álabe
costh = cos(theta(i));
cosao = cos(Ao);
sinh = sin(theta(i));
sinao = sin(Ao);
A = asin((costh*cosao-(X-sinh)*sinao)/sqrt((X-sinh)^2+(costh^2)));%Angulo de ataque
% Si el ángulo de ataque es negativo, se debe cambiar el signo de este para
%obtener los datos de los coeficientes, y luego el dato del coeficiente es
%cambiado de signo
neg = 0;
if (sign(A)==-1)
neg = 1;
```

```

end
A = abs(A*180/pi); %Cambiar angulo de radianes a grados
Cl = CL(A,Reb,NACA); %Funcion de la cual se obtiene los valores de CL en
%base a los datos de [17]
Cd = CD(A,Reb,NACA); %Funcion de la cual se obtiene los valores de CD en
%base a los datos de [17]
if (neg==1)
A = -1*A; %Se restablencen los valores de los coeficientes y ángulos.
Cl = -1*Cl;
Cd = 1*Cd;
end

Cnu = Cl*cosd(A) + Cd*sind(A); % Cn = Coeficiente Normal para aguas arriba
Ctu = Cl*sind(A) - Cd*cosd(A); % Ct = Coeficiente Tangencial para aguas arriba
% fup = Función para determinar el factor de transferencia.
g=@(theta) (abs(sec(theta)).*(Cnu.*cos(theta)-Ctu.*sin(theta)).*(Wu/Vu).^2);
y = quadl(g, -89*pi/180, 89*pi/180);
fup = N*c*y/(8*pi*R);
newau = pi/(fup+pi); % Nuevo factor de interferencia para siguiente iteración
end
Auvector(i) = A; % Se almacenan los angulos de ataque
auvector(i) = newau; % Se almacena los valores del factor de interferencia
Fnu(i) = (c*L/S)*Cnu*(Wu/Vo)^2; % Fuerza normal para aguas arriba
Ftu(i) = (c*L/S)*Ctu*(Wu/Vo)^2; % Fuerza Tangencial para aguas arriba
Tup(i) = 0.5*rho*c*R*L*Ctu*Wu^2; % Torque generado sobre el álabe al pasar
% por este tubo de corriente
end
% Torque promedio para aguas arriba
ts2 = trapz(theta, Tup);
TupP = N*(ts2)/(2*pi);
% Coeficiente de torque promedio
CquP = TupP/(0.5*rho*S*R*Vo^2);
Cpu = CquP*Xt; %Coeficiente de potencia para aguas arriba

%                CALCULOS AGUAS ABAJO
j = n+1;
Alerta = 0;
i = 0;
while (j~=1)
j = j-1;
i = i+1;
ad = 1.01; % Factor de interferencia para aguas abajo.
newad = auvector(j);
while ((ad-newad)>1e-3) %Proceso iterativo para determinar ad
ad = newad;
Ve = Vo*((2*auvector(j))-1); %Ve =Velocidad del aire al interior del cilindro
Vd = Ve*ad; %Vd = Velocidad del aire aguas abajo del cilindro
X = R*w/Vd; %Tip speed ratio local
% Wd=Velocidad relativa
Wd = sqrt ( Vd^2*( X - sin (thetad(i)))^2 + (cos (thetad(i)))^2);
Reb = Wd*c/kv; %Reynolds del álabe
costh = cos(thetad(i));
cosao = cos(Ao);
sinh = sin(thetad(i));
sinao = sin(Ao);
A = asin((costh*cosao-(X-sinh)*sinao)/sqrt((X-sinh)^2+(costh^2))); %Angulo de ataque
neg = 0;
if (sign(A)==-1)

```

```

neg = 1;
end
A = abs(A*180/pi);
Cl = CL(A,Reb,NACA);%lo mismo que para el primer caso.
Cd = CD(A,Reb,NACA);
if (neg==1)
A = -1*A;
Cl =-1*Cl;
Cd =1*Cd;
end

Cnd = Cl*cosd (A) + Cd*sind (A); %Cn = Coeficiente Normal para aguas abajo
Ctd = Cl*sind (A) - Cd*cosd (A); %Cn = Coeficiente Tangencial para aguas abajo
g=@(thetad) (abs(sec (thetad)).*(Cnd.*cos(thetad)-Ctd.*sin(thetad)).*(Wd./Vd).^2);
y = quadl (g, 91*pi/180, 269*pi/180);
fdw = N*c*y/(8*pi*R);
if (Alerta ==0)
newad = pi/(fdw+pi);
end
%En caso de que la interacion no converja, El valor del factor de
%interferencia se asume dicho valor como el obtenido en aguas arriba para
%el mismo stream tube.
if (newad<0.01)
warning('newad<0.01 para theta = %d y A = %d', (thetad(i)*180/pi),A);
if (i>1)
newad = advector(i-1);
else
newad = auvector (i);
end
Alerta = 1;
end
end
Advector (i) = A;
advector (i) = newad; %Se almacena el valor del ad en un vector
% Calculo de fuerzas y torque
Fnd (i) = (c*L/S)*Cnd*(Wd/Vo)^2;
Ftd (i) = (c*L/S)*Ctd*(Wd/Vo)^2;
Tdw (i) = 0.5*rho*c*R*L*Ctd*Wd^2;
end
% Torque promedio para aguas abajo
ts4 = trapz(thetad, Tdw);
TdwP = N*(ts4)/(2*pi); %
% Coeficiente de torque promedio
av_Cqd = TdwP/(0.5*rho*S*R*Vo^2);
Cpd = av_Cqd*Xt; %Coeficiente de potencia para aguas abajo

Cpt = Cpd+Cpu % Coeficiente de potencia total
Tp = TupP + TdwP % Torque Promedio total [Nm]

```

8.2 Anexo B: Función Gráficos

Mediante este código de matlab se pudo obtener los graficos presentados en la sección de resultados del desarrollo analítico

```

function [] = graficos(V,NACA)
J=zeros(1:0,1:5.5,2);

```

```
i=1;
j=1;
while i<=5.5
J(j,1)=i;
w=i*V/3;
[J(j,2),n]=DMS(V,w,NACA);
j=j+1;
i=i+0.1;
end
plot (J(:,1), J(:,2))
xlabel('TSR')
ylabel ('Cp')
title ('Cp vs TSR')
```