



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“DISEÑO DEL ELEMENTO EXTERIOR DE UN  
DIFUSOR PARA UNA MINI TURBINA EÓLICA”**

**TESIS**

PRESENTADO POR:  
**I.C. JUAN PABLO LÓPEZ ORTÍZ**

EN OPCIÓN AL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
OPCIÓN ENERGÍAS RENOVABLES

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO  
2016

“Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiere sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.”

## **Agradecimientos**

Agradezco enormemente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su labor de fomentar la formación científica del país, particularmente, por el otorgamiento de la beca perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) la cual, hizo posible la realización de mis estudios.

A la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) por darme la oportunidad, las facilidades y los recursos necesarios para concluir con éxito el posgrado.

## Resumen

El presente trabajo expone el estudio y diseño de un difusor para una mini turbina eólica capaz de maximizar el flujo de aire en su interior. El difusor está formado por dos elementos: un elemento interior en forma de perfil aerodinámico diseñado para generar mayores fuerzas de sustentación y un elemento exterior en forma de perfil aerodinámico simétrico de la serie NACA, ambos elementos extruidos anularmente y separados entre sí por un espacio vacío.

Se manipularon 3 variables independientes, las cuales fueron modificadas en varios intervalos de un diseño factorial. Las variables independientes fueron: el ángulo de inclinación del elemento exterior, la distancia de separación entre las superficies de ambos elementos y la posición del elemento exterior a lo largo de la cuerda del elemento interior. El experimento se desarrolló en una simulación dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) utilizando el software ANSYS Fluent,

Los resultados demostraron que el difusor de doble elemento propuesto por este estudio, es capaz de generar un aumento en la velocidad del viento localmente y que el grado del aumento en la velocidad del viento se encuentra relacionado con la posición de los elementos que conforman el difusor.

El diseño del difusor para la mini turbina eólica de 2 metros de diámetro, se configuró con: un elemento interior con forma de perfil aerodinámico modelo S1223 de 40 cm de longitud y un ángulo de ataque de 10 grados; un elemento exterior con forma de perfil aerodinámico modelo NACA0008 de 20 cm de longitud, inclinado a un ángulo de 19 grados, ubicado en el borde de ataque y a una separación de 2.5 cm de la superficie más cerca del elemento interior. La velocidad de viento máxima alcanzada en una región en el interior del difusor por esta configuración fue de 10.67 m/s, esto representa un aumento de hasta 77% de la velocidad original de entrada al sistema de 6 m/s.

## **Abstract**

The present work exposes the study and design of a mini wind turbine diffuser capable of maximize the air flow in its interior. The diffuser consists of two elements: an inner member shaped aerodynamic profile design to create greater lift forces and one exterior member in form of symmetrical airfoil NACA series, both elements extruded annularly and separated by an empty space

Three independent variables were manipulated, which were modified at several intervals of a factorial design. The independent variables were: the angle of inclination of the exterior element, the distance between the surfaces of both elements and the position of the exterior element along the inner member chord. The experiment was developed in a computational fluid dynamics (CFD) simulation using the software ANSYS Fluent.

The results showed that the dual element diffuser proposed by this study, is capable of generating an increase in wind speed locally and that the extent of increase in the wind speed is related to the position of the elements of the diffuser.

The diffuser design for the mini wind turbine of two meters in diameter, was configured with: an inner member shaped S1223 airfoil model of 40 cm in length and an angle of attack of 10 degrees; an exterior shaped element NACA0008 airfoil model of 20 cm long, inclined at an angle of 19 degrees, located in the leading edge and 2.5 cm apart from the closer surface closer to the inner element. The maximum wind speed reached in a specific region by this configuration was 10.67 m/s, this represents an increase of up to 77% of the original system input speed of 6 m/s.

# ÍNDICE GENERAL

|   |            |
|---|------------|
| Resumen .....   | I          |
| Abstract .....  | II         |
| <b>ÍNDICE GENERAL .....</b>   | <b>III</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>   | <b>VI</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>   | <b>IX</b>  |
| <b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</b>                                     | <b>1</b>   |
| 1.1 Antecedentes.....   | 1          |
| 1.2 Justificación .....   | 8          |
| 1.3 Objetivos.....  | 9          |
| 1.3.1 Objetivo general.....   | 9          |
| 1.3.2 Objetivos particulares.....                                       | 9          |
| 1.4 Contenido .....   | 10         |
| <b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>                                  | <b>11</b>  |
| 2.1 Introducción a las turbinas eólicas .....                           | 11         |
| 2.1.1 La energía disponible en el viento.....                           | 11         |
| 2.1.2 Límite de Betz.....   | 12         |
| 2.2 Turbinas eólicas.....   | 14         |
| 2.2.1 Concepto de turbina eólica .....                                  | 14         |
| 2.2.2 Clasificación de turbinas eólicas .....                           | 14         |
| 2.3 Perfiles aerodinámicos.....   | 15         |
| 2.3.1 Descripción del perfil aerodinámico.....                          | 15         |
| 2.3.2 Principios de sustentabilidad en los perfiles aerodinámicos ..... | 16         |
| 2.3.3 Flaps.....  | 17         |
| 2.4 Dispositivos de concentración y difusión.....                       | 19         |
| 2.5 Principios físicos de la mecánica de fluidos .....                  | 19         |
| 2.5.1 Descripción de los fluidos .....                                  | 19         |
| 2.5.2 Ecuaciones generales del movimiento de fluidos .....              | 21         |
| 2.6 Dinámica de fluidos computacional CFD.....                          | 23         |
| 2.6.1 Simulaciones CFD .....  | 23         |
| 2.6.2 Proceso de solución de una simulación CFD .....                   | 24         |
| 2.6.3 Geometría.....  | 25         |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.6.4 Mallado .....   | 25        |
| 2.6.5 Modelos .....   | 25        |
| 2.6.6 Propiedades.....  | 27        |
| 2.6.7 Fronteras y condiciones iniciales .....                           | 27        |
| 2.6.8 Solución .....  | 27        |
| 2.6.9 Análisis .....  | 27        |
| <b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....</b>                                    | <b>29</b> |
| 3.1 Modelado de la geometría .....                                      | 29        |
| 3.1.1 Creación de la geometría .....                                    | 29        |
| 3.1.2 Creación de las superficies .....                                 | 31        |
| 3.2 Generación del mallado .....  | 31        |
| 3.2.1 Tipo de mallado .....   | 31        |
| 3.2.2 Algoritmo y propiedades del mallado no estructurado.....          | 33        |
| 3.2.3 Calidad de los elementos.....                                     | 34        |
| 3.2.4 Especificación de tipo de límites de frontera y zonas .....       | 34        |
| 3.3 Propiedades y modelos de turbulencia .....                          | 36        |
| 3.3.1 Características de la simulación.....                             | 36        |
| 3.3.2 Ejecución del programa .....                                      | 36        |
| 3.3.3 Revisión del mallado .....  | 37        |
| 3.3.4 Metodología de solución .....                                     | 37        |
| 3.3.5 Ecuación de la energía .....                                      | 38        |
| 3.3.6 Modelos de turbulencia .....                                      | 39        |
| 3.3.7 Materiales .....  | 39        |
| 3.3.8 Condiciones de inicio .....                                       | 40        |
| 3.3.9 Métodos de solución .....   | 40        |
| 3.3.10 Criterios de convergencia .....                                  | 40        |
| 3.3.11 Puntos de referencia .....                                       | 41        |
| 3.4 Selección del elemento interior .....                               | 42        |
| 3.4.1 Perfil Selig 1223 (S1223) .....                                   | 43        |
| 3.4.2 Perfil FX 63-137.....   | 43        |
| 3.4.3 Perfil N-10.....  | 44        |
| 3.4.4 Procedimiento del cálculo de selección del elemento interior..... | 44        |
| 3.5 Elemento exterior.....  | 45        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.5.1 Valores de las variables .....   | 47        |
| 3.6 Diseño factorial .....   | 49        |
| 3.7 Comprobación de resultados .....   | 50        |
| <b>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>                                     | <b>51</b> |
| 4.1 Selección del diseño del elemento interior .....                               | 51        |
| 4.1.1 Parámetros físicos preliminares .....  | 51        |
| 4.1.2 Cálculo de los coeficientes de sustentación y arrastre en <i>Xfoil</i> ..... | 52        |
| 4.1.3 Selección del perfil.....  | 53        |
| 4.2 Posición del plano de las aspas respecto a la cuerda del perfil S1223.....     | 54        |
| 4.2.1 Comprobación de resultados .....   | 57        |
| 4.3 Variables del elemento exterior.....   | 59        |
| 4.3.1 Separación de la variable “ <i>s</i> ” .....                                 | 59        |
| 4.3.2 Posición de la variable “ <i>l</i> ” .....                                   | 63        |
| 4.3.3 Angulo de la variable “ $\theta$ ” .....                                     | 66        |
| 4.4 Combinación óptima de variables .....  | 70        |
| <b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES.....</b>  | <b>72</b> |
| <b>APÉNDICES.....</b>  | <b>75</b> |
| Apéndice A. Procedimiento para la realización de una simulación CFD.....           | 75        |
| Modelado de la geometría .....   | 75        |
| Generación de la geometría en AutoCAD .....  | 75        |
| Creación de Superficies con Design Modeler .....                                   | 77        |
| Generación del mallado .....   | 79        |
| Propiedades y modelos de turbulencia .....   | 82        |
| Post proceso.....  | 89        |
| <b>REFERENCIAS .....</b>   | <b>92</b> |



# ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Esquema de la sección transversal de un difusor, haciendo énfasis en la ubicación de <i>slots</i> a la entrada del difusor y a la mitad de su longitud (B. L. Gilbert, 1978) ..... | 2  |
| <b>Figura 2</b> Esquema de los cambios realizados en la geometría del difusor Vortec 7 para evitar la separación del flujo másico del eje de giro de la turbina eólica (D.G. Phillips, 2008) ..... | 3  |
| <b>Figura 3</b> Esquema del mecanismo de flujo alrededor de un difusor con reborde (Ohya et al., 2008) .....   | 4  |
| <b>Figura 4</b> Potencia de salida vs velocidad del viento de una turbina eólica con difusor (Ohya et al., 2008).....  | 5  |
| <b>Figura 5</b> Secciones de los difusores compactos para pruebas en túnel de viento (Ohya y Karasudani, 2010) .....   | 5  |
| <b>Figura 6</b> Comparación del coeficiente de potencia de los prototipos de difusores C, variando su velocidad tangencial en las puntas de las aspas (Ohya y Karasudani, 2010) .....              | 6  |
| <b>Figura 7</b> Secciones de perfiles aerodinámicos elegidos para ser analizadas como difusores (Aranake, Lakshminarayan y Duraisamy, 2013) .....  | 7  |
| <b>Figura 8</b> Contornos de presión alrededor del punto de estancamiento del perfil S1223 a (c) 4 grados y (d) 15 grados (Aranake, Lakshminarayan y Duraisamy, 2013).....                         | 8  |
| <b>Figura 9</b> Coeficiente de potencia en relación a la velocidad corriente arriba y corriente abajo .....  | 14 |
| <b>Figura 10</b> La función de un flap es prevenir la separación de la corriente de aire de la capa de frontera en la superficie de un perfil aerodinámico. (A. Cengel y M. Cimbala, 2006).....    | 18 |
| <b>Figura 11</b> Clasificación de medios continuos en la mecánica de fluidos (W. Fox y T. McDonald, 1995) .....  | 20 |
| <b>Figura 12</b> Pasos en una simulación CFD (Andersson et al., 2012).....   | 24 |
| <b>Figura 13</b> Dibujo de los perfiles aerodinámicos en AutoCAD .....   | 30 |
| <b>Figura 14</b> Ejemplos de mallado estructurado (arriba) y mallado no estructurado (abajo).....  | 32 |
| <b>Figura 15</b> Detalle del mallado utilizado en las simulaciones .....   | 33 |
| <b>Figura 16</b> Condiciones de frontera del dominio .....   | 35 |
| <b>Figura 17</b> Comparación de las velocidades del viento a 95cm del eje de la turbina utilizando un error de convergencia de 0.001 y 0.0000001.....  | 41 |
| <b>Figura 18</b> Puntos de referencia para la obtención de las velocidades de viento .....   | 42 |
| <b>Figura 19</b> Geometría del perfil Selig S1223.....   | 43 |
| <b>Figura 20</b> Geometría del perfil FX 63-137 .....  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 21</b> Geometría del perfil N10 .....   | 44 |
| <b>Figura 22</b> $C_L$ del perfil NACA0008 a 200,000Re variando su ángulo (Illinois s.f.) .....   | 46 |
| <b>Figura 23</b> Variables $s$ , $l$ y $\theta$ de posición del elemento exterior en relación a la cuerda $c$ , del elemento interior. ....   | 47 |
| <b>Figura 24</b> Valores de los coeficientes de sustentación y arrastre, del perfil aerodinámico S1223, al variar el ángulo de inclinación. Se utilizó el programa Xfoil por medio de la interfaz gráfica para Matlab. .... | 52 |
| <b>Figura 25</b> (a) Gráfica del coeficiente de sustentación vs coeficiente de arrastre y (b) Gráfica del coeficiente de arrastre vs ángulo de ataque. ....   | 53 |
| <b>Figura 26</b> (a) Gráfica del coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque y (b) Gráfica de la relación coeficiente de sustentación/coeficiente de arrastre vs ángulo de ataque. ....                                 | 53 |
| <b>Figura 27</b> Dimensiones del dominio (sin escala). ....   | 55 |
| <b>Figura 28</b> Contorno de velocidades del perfil S1223 representando el aumento de la velocidad del viento en el interior del difusor. ....  | 56 |
| <b>Figura 29</b> Velocidades del viento en el interior del difusor a diferentes distancias al centro del eje de una turbina eólica. ....  | 57 |
| <b>Figura 30</b> Comparación de $C_L$ de referencia para la validación de la simulación CFD .....   | 58 |
| <b>Figura 31</b> Sección de la geometría inicial en AutoCAD del difusor a $s=1.5$ . ....  | 59 |
| <b>Figura 32</b> Diferencias en los contornos de velocidad resultado de las simulaciones CFD a diferentes valores de la variable $s$ : a) 1.5 b) 2.5 y c) 3.5. ....   | 61 |
| <b>Figura 33</b> Curvas de velocidad de viento en el interior del difusor a diferentes valores de $s$ .....   | 62 |
| <b>Figura 34</b> Velocidades máximas alcanzadas en las puntas de las aspas a diferentes $s$ .....   | 62 |
| <b>Figura 35</b> Curvas de velocidad de viento en el interior del difusor a diferentes valores de $l$ . ....  | 63 |
| <b>Figura 36</b> Velocidades máximas alcanzadas en las puntas de las aspas a diferentes $l$ .....   | 64 |
| <b>Figura 37</b> Diferencias en los contornos de velocidad resultado de las simulaciones CFD a diferentes valores de la variable $l$ : a) 36, b) 37.6, c) 41.6. ....  | 65 |
| <b>Figura 38</b> Velocidades máximas alcanzadas en las puntas de las aspas a diferentes $\theta$ . ....   | 67 |
| <b>Figura 39</b> Curvas de velocidad de viento en el interior del difusor a diferentes valores de $\theta$ . ....   | 67 |
| <b>Figura 40</b> Diferencias en los contornos de velocidad resultado de las simulaciones CFD a diferentes valores de la variable $\theta$ : a) 4, b) 10 y c) 18. ....   | 69 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 41</b> Velocidades máximas del viento por arreglo de elementos .....                              | 70 |
| <b>Figura 42</b> Comportamiento de la velocidad del viento en los diferentes arreglos .....                 | 71 |
| <b>Figura 43</b> Coordenadas de la geometría del perfil S1223 .....   | 75 |
| <b>Figura 44</b> Generación de la geometría por medio de coordenadas utilizando el comando "Spline" .....   | 76 |
| <b>Figura 45</b> Distancia entre el elemento interior y el límite inferior del dominio .....                | 77 |
| <b>Figura 46</b> Parámetros de importación de la geometría dibujada en AutoCAD.....                         | 78 |
| <b>Figura 47</b> Utilización de la herramienta "Boolean" en geometrías en Design Modeler.....               | 78 |
| <b>Figura 48</b> Parámetros generales del mallado .....   | 79 |
| <b>Figura 49</b> División de las geometrías para adecuar el tamaño del mallado .....                        | 80 |
| <b>Figura 50</b> Mallado triangular no estructurado del dominio generado en Meshing .....                   | 81 |
| <b>Figura 51</b> Etiquetado de las selecciones de la geometría del mallado .....                            | 82 |
| <b>Figura 52</b> Parámetros iniciales de simulación en Fluent.....  | 82 |
| <b>Figura 53</b> Resultados del reporte de calidad del mallado en Fluent .....                              | 83 |
| <b>Figura 54</b> Opciones del panel de tareas "Solver" .....  | 83 |
| <b>Figura 55</b> Parámetros de configuración del modelo de turbulencia elegido (Spalart-Allmaras).....      | 85 |
| <b>Figura 56</b> Propiedades del fluido de las simulaciones .....   | 85 |
| <b>Figura 57</b> Propiedades del borde de entrada del dominio .....   | 86 |
| <b>Figura 58</b> Métodos de solución de las ecuaciones del modelo de turbulencia .....                      | 87 |
| <b>Figura 59</b> Criterios de convergencia en la solución de las ecuaciones del modelo de turbulencia ..... | 88 |
| <b>Figura 60</b> Convergencia de la simulación realizada en Fluent.....                                     | 88 |
| <b>Figura 61</b> Parámetros de contorno de velocidad .....  | 90 |
| <b>Figura 62</b> Creación de la línea de referencia para la obtención de datos de velocidad.....            | 90 |
| <b>Figura 63</b> Creación de grafica de velocidades del viento en relación a la posición en x.....          | 91 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1</b> Condiciones de frontera utilizadas en las simulaciones.....                           | 35 |
| <b>Tabla 2</b> Valores de las variables del elemento exterior para el diseño factorial.....          | 49 |
| <b>Tabla 3</b> Valores seleccionados de las variables $I$ , $s$ y $\theta$ , para su simulación..... | 49 |

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La idea de concentradores alrededor de una turbina eólica no es reciente, el objetivo de este añadido es concentrar el viento y aumentar la velocidad del viento localmente. Al concepto de una turbina eólica, en conjunto con un concentrador, se le denomina turbina eólica aumentada con difusor (DAWT por sus siglas en ingles), aunque el nombre puede variar según el autor.

Uno de los primeros estudios acerca de los difusores fue patrocinado por la Asociación de Investigación Eléctrica de Estados Unidos en 1954 y publicado posteriormente en 1956 por el Colegio de Aeronáutica de Cranfield (Lilley y Rainbird, 1956). En este estudio titulado “Reporte preliminar en el diseño y rendimiento de molinos de viento entubados”, los autores demostraron que la ganancia en el rendimiento de las turbinas eólicas entubadas se debe a: a) la reducción en la pérdida del flujo másico en las puntas de las aspas y b) el incremento de la velocidad axial a través de la turbina eólica por el efecto de control en la difusión de la corriente de aire; igualmente, realizaron un análisis teórico de flujo unidimensional en el que se encontró que, con un diseño adecuado del ducto, la ganancia en la potencia de salida sería de un 65% en comparación con la potencia de salida ideal de un molino de viento sin ducto.

Fue hasta finales de los años 70 y principios de los 80 cuando los diseños de los difusores retomaron la atención del medio científico. En esos años se desarrollaron las técnicas y conceptos en los que actualmente se basan los difusores modernos.

En 1978 se realizó la primera prueba experimental en túnel de viento de un difusor (B. L. Gilbert, 1978). En esos experimentos se pusieron a prueba variaciones en el ángulo de inclinación del difusor, la relación de área de salida del difusor y el área de las aspas de la turbina eólica y la utilización de ranuras o *slots* en el difusor y el número de éstos (Figura 1), con el objetivo de calcular el aumento de potencia de salida,  $P$ , que propone un difusor en relación a una turbina eólica sin este dispositivo.

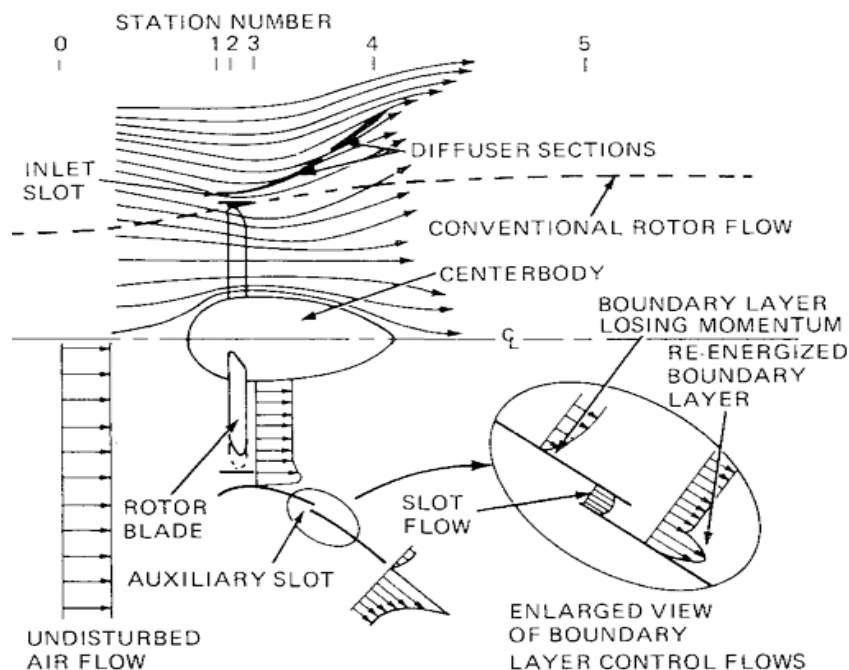


Figura 1 Esquema de la sección transversal de un difusor, haciendo énfasis en la ubicación de *slots* a la entrada del difusor y a la mitad de su longitud (B. L. Gilbert, 1978)

Los experimentos se realizaron en un túnel de viento abierto a velocidades uniformes de 13 m/s, la turbina eólica fue sustituida por una gaza porosa simulando un disco actuador, el cual crea un cambio de presión y velocidad del viento similar a los que generarían las aspas de una turbina eólica en movimiento.

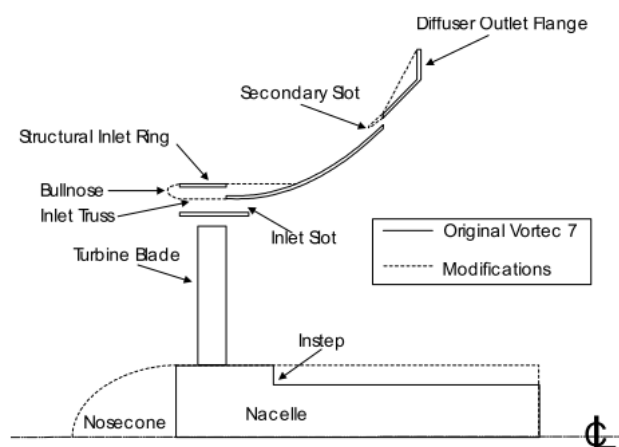
Los resultados de los experimentos coincidieron con las predicciones de un análisis unidimensional utilizando la teoría del momento lineal. Como resultados más importantes del estudio, se pueden resaltar que: a) es necesaria una sección constante detrás de la turbina para poder accionar el proceso de difusión, esto es, la longitud del difusor debe continuar después del plano de la turbina eólica y b) El aumento máximo de potencia ocurrió cuando la relación de áreas es cercana a 3 (área de salida/área de la turbina eólica).

En 1998 en Nueva Zelanda, fue construida la primera turbina eólica aumentada con un difusor a escala real para pruebas en campo. El difusor estaba formado por “multi-*slots*” que permitían la introducción de flujo másico al interior del dispositivo (Phillips, Flay y Nash, 1999).

El objetivo principal del prototipo era medir y optimizar el rendimiento en la generación de potencia con la finalidad de confirmar el costo de la producción de energía generada por la turbina eólica haciendo uso del difusor.

El estudio de la turbina eólica de 7.3 m de diámetro se realizó en las costas de Nueva Zelanda, junto con un análisis unidireccional y una simulación computacional de dinámica de fluidos (CFD por sus siglas en inglés) para contrastar las mediciones. De acuerdo al análisis unidimensional realizado, fue posible predecir un aumento de la velocidad del viento cercana al doble y un aumento en la potencia de salida de 4 veces la potencia de salida ideal, sin embargo, el prototipo no logró demostrar tales resultados, asumiéndose que la baja velocidad del viento cercano al eje de giro de la turbina eólica fuera la responsable, esto, debido a un mal diseño aerodinámico de la nariz de la turbina.

En un estudio posterior (D.G. Phillips, 2008) se realizó el rediseño del prototipo por medio de una simulación CFD, con el fin de mejorar los resultados obtenidos en la prueba de campo realizada en 1998. Para validar los resultados, se realizó un modelo a escala en túnel de viento utilizando dos técnicas diferentes para medir el cambio de velocidad y presión en el interior del difusor; una pantalla de gaza como disco actuador y un modelo con una turbina eólica a escala.



**Figura 2** Esquema de los cambios realizados en la geometría del difusor Vortec 7 para evitar la separación del flujo másico del eje de giro de la turbina eólica (D.G. Phillips, 2008)

Primeramente, se modeló el diseño original del prototipo y se analizó en una simulación dinámica de fluidos computacional para comparar los resultados con los

datos de campo. Se comprobó que existía una separación del flujo de aire en el centro del eje de giro de la turbina eólica del diseño original, por lo que se modificó su geometría de forma que permitiera el paso del viento de una manera más suave, con una nariz redondeada (Figura 2). Con esta corrección se logró un aumento en la velocidad del flujo de viento de un 10% en el plano de las aspas de la turbina y un 20% en las puntas de estas mismas. A pesar de la mejora en su desempeño, el difusor aun no era viable por el costo-beneficio de su implementación, por lo que un nuevo rediseño se está estudiando.

Ohya et al. (2008) adoptaron un enfoque diferente en el diseño del difusor, se diferenciaba en la incorporación de un reborde circular en el extremo posterior en el área de salida. El reborde creaba una zona de baja presión en esta zona, aumentando la velocidad del viento en la zona de entrada del difusor (Figura 3).

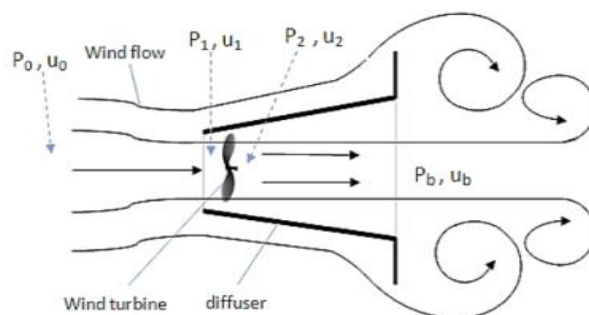


Figura 3 Esquema del mecanismo de flujo alrededor de un difusor con reborde (Ohya et al., 2008)

El diseño demostró en una prueba de campo un aumento en la velocidad del viento que iba de 1.6 a 2.4 veces su valor original y un factor de aumento en la producción de energía de salida entre 2 y 5 veces en comparación con una turbina eólica sin difusor

En la Figura 4 se puede observar la Potencia de salida vs velocidad del viento en la prueba de campo para una turbina de 500 W. La línea sólida indica la curva de potencia de salida de una turbina eólica utilizando un coeficiente de potencia  $C_w=1.4$ , esta curva muestra un comportamiento que se ajusta a los datos obtenidos por las mediciones en la prueba de campo de la turbina eólica con difusor representados por los puntos morados, siendo estos valores, muy superiores a la potencia de salida de una turbina eólica sin difusor, la cual posee un coeficiente de potencia de  $C_w=0.35$ .



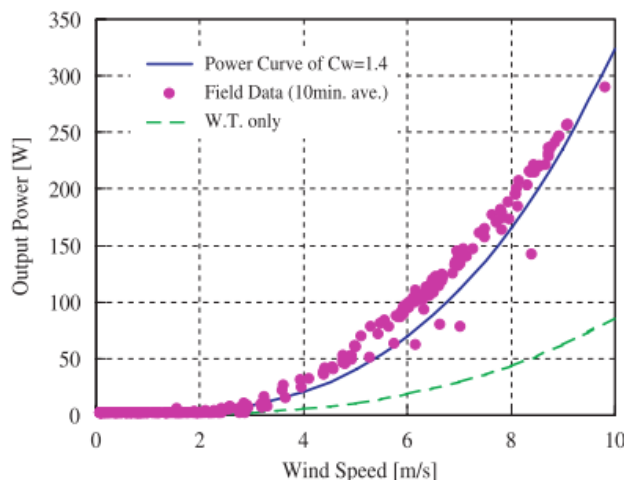


Figura 4 Potencia de salida vs velocidad del viento de una turbina eólica con difusor (Ohya et al., 2008)

Aunque Ohya et al. (2008), habían obtenido buenos resultados en el aumento del flujo de viento, el tamaño del difusor resultante era demasiado grande para poderse implementar, debido a esto, Ohya y Karasudani (2010) generaron un nuevo diseño a partir de pruebas en túnel de viento sobre varios prototipos con un diseño de difusor más pequeño, con el objetivo de reducir su tamaño.

Los prototipos variaron la relación de longitud  $L_t/D$  y la relación de áreas de entrada y salida,  $\mu$ , además de variar la forma de su sección por una sección ligeramente curva, las formas de la sección de los difusores se muestran en la Figura 5.

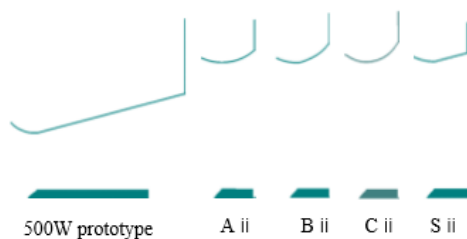


Table 1. Parameters of wind-lens shapes

| Diffuser | Prototype | A ii  | B ii  | C ii  | S ii  |
|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| $L_t/D$  | 1.470     | 0.225 | 0.221 | 0.221 | 0.225 |
| $\mu$    | 2.345     | 1.173 | 1.288 | 1.294 | 1.119 |

Figura 5 Secciones de los difusores compactos para pruebas en túnel de viento (Ohya y Karasudani, 2010)

Al comparar el coeficiente de potencia de todos los prototipos variando la velocidad tangencial en las puntas de las aspas, el prototipo de difusor, Cii, obtuvo los mejores

resultados al ser superior a los otros difusores en su coeficiente de potencia  $C_w$ . Posteriormente partiendo del diseño Cii, se hicieron nuevas pruebas en el túnel de viento variando la relación de longitud  $L/D$  de ese difusor, para conocer de qué manera afecta esto, a la potencia generada por la turbina.

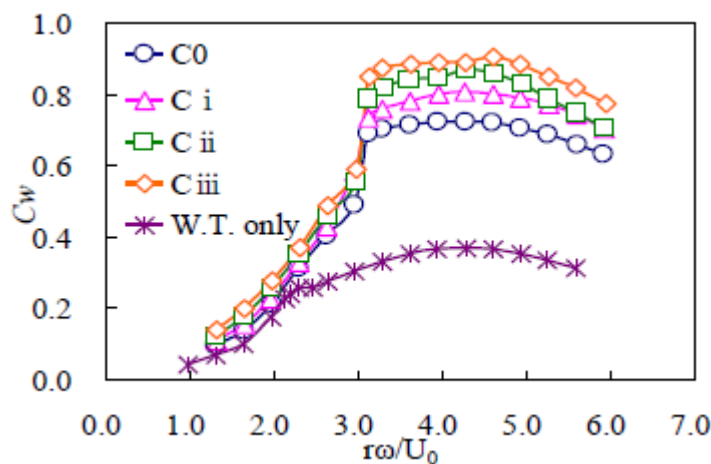


Figura 6 Comparación del coeficiente de potencia de los prototipos de difusores C, variando su velocidad tangencial en las puntas de las aspas (Ohya y Karasudani, 2010)

La Figura 6 muestra los resultados de la comparación de los prototipos C0, Ci, Cii, Ciii y una turbina eólica sin difusor, la longitud de los prototipos  $L/D$ , es de 0.1, 0.137, 0.221 y 0.371 respectivamente.

La longitud del difusor de mejor rendimiento y que se decidió utilizar para una prueba de campo posterior fue un difusor corto con una sección ligeramente curva de  $L=0.22D$  que incluía un reborde circular posterior con una altura  $h=0.1D$ . Dicha prueba de campo demostró que la turbina junto a un difusor de pequeñas dimensiones pudo generar un coeficiente de potencia  $C_w=1.0$ , esto quiere decir, una potencia de salida 2.5 veces superior a una turbina eólica de las mismas características sin difusor.

El diseño de los difusores ha evolucionado gracias a las aportaciones de cada nueva investigación, originalmente planteados como cilindros de gran tamaño y longitud (Lilley y Rainbird, 1956), pasaron a tener forma de tubo de Venturi (Fletcher et al., 2007), para posteriormente, estar formados por una superficie inclinada con una

ligera curvatura en la abertura de entrada (Ohya y Karasudani, 2010), esta última geometría muy parecida a la superficie de la sección un perfil aerodinámico.

Por la semejanza en la sección curvada de los difusores y los perfiles aerodinámicos, Aranake, Lakshminarayan y Duraisamy (2013) analizaron el comportamiento de diferentes perfiles aerodinámicos extruidos anularmente como sustitución de un difusor. En ese estudio, se eligieron 4 perfiles diseñados para lograr coeficientes de sustentación altos en comparación con otros perfiles aerodinámicos bajo las mismas condiciones (velocidad del viento, ángulo de ataque, número de Reynolds); Eppler E423, Selig S1223, NACA0006 modificado (utilizada por Ohya) y el FX 74-CL5-140, ver Figura 7.

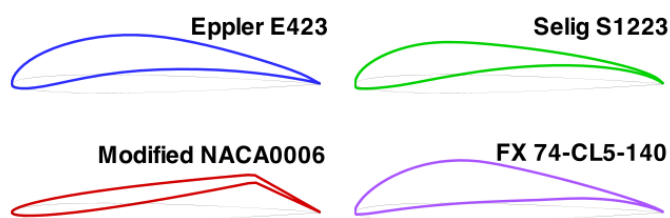


Figura 7 Secciones de perfiles aerodinámicos elegidos para ser analizadas como difusores (Aranake, Lakshminarayan y Duraisamy, 2013)

El estudio consistió en el cálculo del flujo másico de cada perfil, obteniendo los datos de las velocidades generadas por los perfiles en un análisis dinámico de flujo computacional en dos dimensiones, para posteriormente realizar análisis dinámicos de flujo computacional en tres dimensiones con el objetivo de analizar el desempeño del difusor en comparación con una turbina eólica sin difusor.

Al realizar el análisis de flujo másico de los 4 perfiles aerodinámicos, el perfil S1223 demostró ser el perfil que generó el mayor flujo de masa de aire a un ángulo de 15 grados, debido a la posición de su punto de estancamiento en el borde de ataque, capaz de introducir una mayor cantidad de corriente en comparación a ángulos menores, como se aprecia en la Figura 8. Posteriormente, seleccionado el perfil S1223, se realizó la simulación en tres dimensiones, con el objetivo de calcular el coeficiente de sustentación del perfil, el coeficiente de potencia y el aumento de éste último en relación al coeficiente de potencia ideal. El difusor con forma de perfil aerodinámico logró un aumento máximo en el coeficiente de potencia de 1.91 veces

el coeficiente de potencia ideal a una velocidad de entrada de viento de 5 m/s, demostrando de esta forma, la eficiencia de un difusor para turbina eólica con sección en forma de perfil aerodinámico.

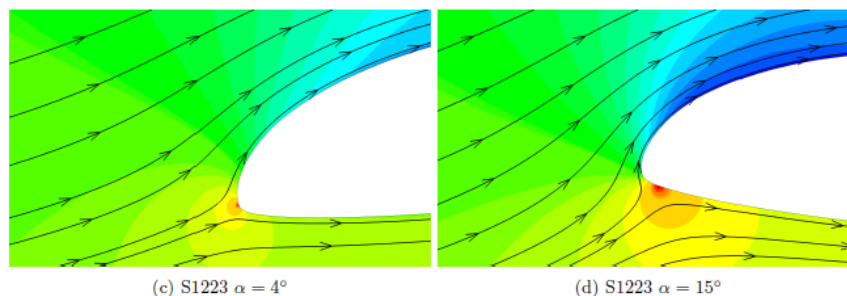


Figura 8 Contornos de presión alrededor del punto de estancamiento del perfil S1223 a (c) 4 grados y (d) 15 grados (Aranake, Lakshminarayan y Duraisamy, 2013)

Comprobado el funcionamiento de los difusores, su diseño se encuentra en un estado de innovación, estudiándose nuevas ideas tomadas de la industria aeronáutica como difusores con forma de perfiles aerodinámicos, difusores de dos o más elementos separados por espacios vacíos utilizando los principios de funcionamiento de los *flaps* en las alas de los aviones o difusores con paletas que direccionan el viento como turbinas de avión.

## 1.2 Justificación

Los estudios sobre el recurso eólico demuestran que la mayor parte del territorio del planeta no cumple con las condiciones de viento deseables para la producción de energía, por medio de turbinas eólicas. Los mapas de distribución eólica señalan que en gran parte de Estados Unidos hay vientos menores a 6 m/s (National Renewable Energy Laboratory, 2010). Las condiciones a nivel mundial distan mucho de ser diferentes. En México existen zonas puntuales con vientos favorables para la generación de energía eólica, como la costa de Yucatán, Tamaulipas, Baja California y Oaxaca (Patel, 2006).

El desarrollo de dispositivos que mejoren el funcionamiento de las turbinas eólicas en zonas con vientos con cierto potencial, ayudará en gran medida a extender esta tecnología a regiones donde antes no era posible utilizarla y traerá beneficios en el

desarrollo de la sociedad, especialmente en regiones que no cuentan con una red de distribución eléctrica.

Conveniencia: Se pretende que los resultados arrojados por la investigación ofrezcan a los diseñadores de turbinas eólicas e investigadores, conocimiento sobre los efectos en el viento causados por la distribución de los elementos de un difusor de una turbina eólica y su arreglo óptimo.

Relevancia social: Los resultados obtenidos de esta investigación permitirán el aprovechamiento de la energía eólica en regiones donde el recurso eólico es limitado y permitirá cubrir la necesidad de energía limpia a un número mayor de personas.

Valor teórico: La investigación servirá para apoyar la teoría de los difusores de turbinas eólicas, ampliando el número de diseños de difusores existentes; en el caso de esta investigación, el diseño constará de dos elementos: un elemento interior con forma de perfil aerodinámico y un elemento exterior, separados por una abertura.

Viabilidad: La investigación es viable ya que se tiene acceso a las herramientas computacionales necesarias para los análisis correspondientes de simulación y el apoyo e instalaciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la configuración del elemento exterior en relación al elemento interior de un difusor compuesto por dos elementos para una mini turbina eólica que maximice la velocidad del viento localmente en su interior.

### **1.3.2 Objetivos particulares**

Analizar el diseño y la posición de perfiles aerodinámicos, utilizando sus coeficientes de sustentación, ángulos de ataque y relaciones  $C_L/C_D$  para definir la forma del elemento interior del difusor.

Analizar de forma independiente cada una de las variables de posición del elemento exterior para conocer sus efectos en el sistema del difusor y obtener un número menor de valores para someterse al diseño factorial.

Evaluar por medio de un diseño factorial las variables independientes del elemento exterior para obtener el arreglo de ambos elementos del difusor que genere el mayor aumento en la velocidad del viento en su interior.

## **1.4 Contenido**

Este trabajo está organizado en 5 capítulos; Un primer capítulo en el cual se hace una introducción a los antecedentes realizados en materia de difusores, sirviendo de punto de partida para esta investigación, además de la justificación, alcance y los objetivos a lograr; el capítulo II se refiere al marco conceptual, en el que se desarrollan los conceptos en relación a las turbinas eólicas, perfiles aerodinámicos y una breve introducción a la simulación dinámica de flujos computacional; el capítulo III describe los procedimientos seguidos para alcanzar los objetivos de tesis, este capítulo se ha organizado para una mayor comprensión de acuerdo al orden en el que se realizaron las comprobaciones: preliminares, elemento interior, elemento exterior, diseño factorial y comprobación experimental; En el capítulo IV se muestran los resultados y discusiones; Finalmente en el capítulo V se expresan las conclusiones alcanzadas.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Introducción a las turbinas eólicas

##### 2.1.1 La energía disponible en el viento

Para comprender cómo genera electricidad una turbina eólica y cómo un difusor puede mejorar la generación de esta misma, es indispensable conocer el recurso de donde se obtiene inicialmente la energía. Erich Hau desarrolla en su libro “*Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*” (Hau, 2013) los fundamentos de la extracción de energía del viento por las turbinas.

Las turbinas eólicas transforman la energía cinética del viento, en energía eléctrica. La energía cinética,  $E$ , de una masa de aire,  $m$ , moviéndose a velocidad  $V$ , está dada por:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad \text{Ec. 1}$$

La cantidad de masa en un volumen de aire que se mueve en un periodo de tiempo en una sección de área  $A$ , a una velocidad  $V$ , dependerá de su densidad, esto es:

$$m = \text{flujo de masa por segundo} = \rho AV \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire expresada en Kilogramos por metro cubico,  $A$ , el área de la sección de los límites del sistema considerado en metros cuadrados y  $V$ , la velocidad del aire en metros por segundo (Boyle, 2004). Por lo tanto, sustituyendo  $m$  en la ecuación. 1:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}(\rho AV)V^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad \text{Ec. 3}$$

Sería deseable que la totalidad de la energía cinética disponible en el viento fuera transformada en energía eléctrica por una turbina eólica, sin embargo, esto no es así. La energía mecánica extraída del viento por una turbina eólica es la diferencia entre

la energía cinética en la corriente de entrada y la corriente de salida, esto es, antes y después de pasar por las aspas de la turbina.

$$P_0 = E_1 - E_2 = \frac{1}{2}\rho A_1 V_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 V_2^3 \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

$P_0$  es la energía mecánica extraída por el rotor,  $V_1$  es la velocidad viento a la entrada de las aspas del rotor, y  $V_2$  la velocidad viento a la salida de las aspas del rotor. Sin embargo, para mantener el equilibrio en la teoría de conservación de la materia:

$$m = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad \text{Ec. 5}$$

Por lo tanto:

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho A_1 V_1 (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_2^2) \quad \text{Ec. 6}$$

Macroscópicamente, la velocidad del viento es discontinua de  $V_1$  a  $V_2$  en el plano de las aspas del rotor, con un promedio de  $(V_1+V_2)/2$ . Multiplicando la densidad del aire por el promedio de velocidades, entonces, obtendremos el flujo de masa de aire por segundo que pasa la sección  $A$ , a través las aspas (Patel 2006).

$$m = \rho A \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{Ec. 7}$$

Sustituyendo  $m$  en la ecuación 6, la potencia de la turbina eólica es:

$$P_0 = \frac{1}{2}\left(\rho A \frac{V_1 + V_2}{2}\right)(V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4}\rho A (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad \text{Ec. 8}$$

### 2.1.2 Límite de Betz

Existe una limitante en la extracción mecánica de energía del viento por una turbina eólica, como se puede observar en la ecuación 8.

La mayor potencia es alcanzada cuando  $V_2$  es cero, sin embargo, esta afirmación no tiene sentido físicamente. Si la velocidad  $V_2$  es cero, quiere decir que la velocidad



antes de llegar a la turbina eólica también debe de ser cero, esto implica que no existiría un flujo de viento que atravesase la turbina por lo que no se generaría energía alguna.

Sin embargo, es posible deducir que existe una relación entre  $V_1$  y  $V_2$  en donde se alcance una potencia máxima de salida.

Para tener una referencia acerca de la potencia de salida de la turbina eólica, ésta es comparada con la potencia de un flujo de aire que fluye en una misma área de sección transversal sin extracción mecánica de potencia, lo que genera la ecuación de la energía cinética del viento (Hau, 2013).

La relación entre la potencia extraída mecánicamente por la turbina eólica y la potencia del flujo sin ninguna modificación es llamada Coeficiente de potencia  $C_w$ .

$$C_w = \frac{P_0}{E_c} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{\frac{1}{2}\rho AV_1^3} \quad \text{Ec. 9}$$

Reordenando algebraicamente la ecuación, el coeficiente de potencia puede especificarse directamente como una función entre las velocidades:

$$C_w = \frac{P_0}{E_c} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

Ahora, calcular la potencia de salida de una turbina eólica analíticamente sería posible al considerar la relación entre las velocidades corriente arriba y corriente abajo en la fórmula de potencia de la turbina como un coeficiente:

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho AV^3 C_w \quad \text{Ec. 11}$$

Donde  $C_w$  sería el coeficiente de potencia de la propia turbina, el cual es un porcentaje de qué tan eficiente es para aprovechar la energía cinética del viento, este coeficiente depende del número de aspas y del diseño del perfil aerodinámico utilizado, entre otros aspectos mecánicos.

En la Figura 9 se puede observar el  $C_w$  graficado en una relación  $V_2/V_1$ . Ignorando las condiciones de diseño de la propia turbina, el coeficiente de potencia máximo ideal es alcanzado cuando  $V_2/V_1 = 1/3$

$$C_w = \frac{16}{27} = 0.593$$

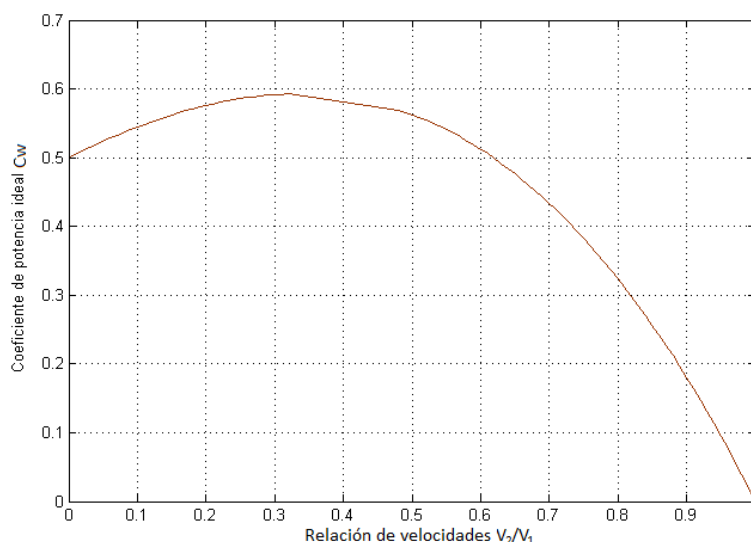


Figura 9 Coeficiente de potencia en relación a la velocidad corriente arriba y corriente abajo

## 2.2 Turbinas eólicas

### 2.2.1 Concepto de turbina eólica

Una turbina eólica (también conocida como aerogenerador) transforma la energía cinética proveniente del viento en energía mecánica sobre un eje y finalmente por medio de un generador a energía eléctrica (Rosado, 2013).

### 2.2.2 Clasificación de turbinas eólicas

La clasificación más común de las turbinas eólicas se hace de acuerdo a la dirección en la que está orientado el eje de rotación de las aspas del rotor, pudiendo estar orientado de dos formas: las turbinas eólicas de eje vertical y las turbinas eólicas de eje horizontal.

Otra clasificación importante se hace de acuerdo al funcionamiento de sus aspas, estas pueden aprovechar la energía cinética del aire para girar sobre su eje por medio del efecto de arrastre o de sustentación. Esta clasificación está relacionada

comúnmente con su eje de rotación, ya que normalmente las turbinas eólicas de eje vertical basan su funcionamiento en el efecto de arrastre y las turbinas eólicas de eje horizontal en el efecto de sustentación.

Aunque no existe una clasificación normalizada y sus categorías puedan variar de acuerdo a los diferentes autores, las turbinas de eje horizontal se pueden clasificar por el tamaño del diámetro de sus aspas. De acuerdo a la clasificación hecha por Paul Gipe (2009), los tamaños de las turbinas eólicas pueden ser: Gran escala, escala comercial, mini turbinas y micro turbinas.

En este trabajo, el difusor fue diseñado para una mini turbina eólica de eje horizontal, ya que las mini turbinas se encuentran entre los tamaños de 1.5 y 3.5 m de diámetro y pueden producir hasta 4000 KW por año trabajando a velocidades de viento de 5.5 m/s; los que son, el tamaño, producción de energía y velocidad idónea para el uso de difusores.

## **2.3 Perfiles aerodinámicos**

### **2.3.1 Descripción del perfil aerodinámico**

Un perfil aerodinámico es un cuerpo diseñado para producir una fuerza de sustentación generada por el movimiento de un fluido. Específicamente, la sustentación es el resultado de la circulación del flujo producido por el perfil aerodinámico (T. Crowe et al., 2009).

La silueta de su geometría puede variar en la longitud de su cuerda o amplitud de su comba, su simetría respecto a su cuerda y la agudeza de su borde de salida, sin embargo, su figura general siempre será la de una gota alargada.

Existen dos tipos de perfiles aerodinámicos: simétricos y asimétricos, ambos tienen una superficie convexa en un extremo redondeado llamado borde de entrada y un borde final agudo llamado borde de salida, la diferencia entre los perfiles simétricos y asimétricos se encuentra en la superficie inferior. En el perfil asimétrico la superficie inferior está diseñada para aumentar la sustentación mientras que en el perfil simétrico se trata de mantener un mismo nivel de sustentación sin importar la dirección y ángulo del viento (Boyle, 2004).

El ángulo con el que embiste la dirección del aire a una línea de referencia de un objeto es llamado ángulo de ataque. La línea de referencia en los perfiles aerodinámicos para calcular el ángulo de ataque recibe el nombre de línea de cuerda, esta es la línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida.

### 2.3.2 Principios de sustentabilidad en los perfiles aerodinámicos

El propósito fundamental de los perfiles aerodinámicos es generar una fuerza de sustentación. De la mecánica de fluidos se sabe que es necesario un gradiente de presión para curvar las líneas de corriente; el gradiente de presión actúa como la fuerza centrípeta sobre una partícula en movimiento circular. Si existe una presión atmosférica a una distancia lejana de un perfil, y también existe una presión menor de la atmosférica en la superficie superior del perfil generada por el movimiento del aire y una presión mayor a la atmosférica en la superficie inferior del perfil, entonces, ésta diferencia de presiones creará una fuerza de sustentación.

El perfil aerodinámico acelera el flujo de aire sobre la superficie de mayor convexidad, esto produce una gran pérdida de presión sobre la parte superior que resulta en un efecto de succión que eleva el perfil aerodinámico.

Las fuerzas de arrastre y sustentación dependen de la densidad,  $\rho$ , del fluido, la velocidad,  $V$ , de la corriente, del tamaño, forma y orientación del cuerpo. Se ha encontrado una forma conveniente para trabajar con números adimensionales que representen el arrastre y la sustentación característica de un cuerpo. Estos números son los coeficientes de arrastre,  $C_D$ , y coeficiente de sustentación,  $C_L$  (A. Cengel y M. Cimbala, 2006).

Coeficiente de arrastre:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 c} \quad \text{Ec. 12}$$

Coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{l}{\frac{1}{2}\rho V^2 c} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde  $D$  y  $l$ , son las fuerzas de arrastre y sustentación, respectivamente,  $c$ , es ordinariamente el área frontal del cuerpo; en el caso específico de los perfiles aerodinámicos, es el área vista desde la parte superior a lo largo de la cuerda. Los

coeficientes de arrastre y sustentación están en función de la forma del cuerpo de estudio, sin embargo, también depende del número de Reynolds.

El fluido y la superficie del perfil aerodinámico generan una fricción que depende de la rugosidad del material, la viscosidad del aire y su velocidad. Es posible utilizar un valor adimensional que mida la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de viscosidad, describiendo el grado de turbulencia o laminar de la corriente de flujo generada por la fricción. Este valor es conocido como el número de Reynolds.

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu} \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

$V$ , es la velocidad del viento en metros sobre segundos (m/s),  $l$ , es la longitud de cuerda en metros (m) y  $\nu$ , es la viscosidad cinemática del aire expresada en metros cuadrados sobre segundo (m<sup>2</sup>/s).

Convenientemente, un coeficiente de sustentación alto es deseable en un perfil aerodinámico, esto se logra al aumentar el ángulo de ataque del perfil, sin embargo, esto aumenta el coeficiente de arrastre, lo que genera la separación del flujo de la corriente de viento sobre la superficie del perfil, que no es deseable.

### 2.3.3 Flaps

Es posible aumentar la fuerza de sustentación de un perfil aerodinámico cambiando la silueta de su forma usando un borde de salida movable (*flap*). Los flaps son usados para alterar la silueta de la forma del perfil aerodinámico de las alas de un avión durante los despegues y los aterrizajes para maximizar la fuerza de sustentación (A. Cengel y M. Cimbala, 2006). Si el *flap* de un perfil aerodinámico se encuentra separado de este por un espacio vacío, el espacio entre estos, prevendrá la separación de la corriente de la superficie del perfil, permitiendo un mayor rango de inclinación antes de entrar en pérdida, por lo que la fuerza de sustentación será mayor (Figura 10).

Algunos diseños de difusores hacen uso de una o varias ranuras (*slots*), emulando los efectos generados por un *flap*, en el caso del diseño del *Vortec 7* (D.G. Phillips,

2008), el efecto de un *slot* secundario generó un aumento de la velocidad local de forma evidente, a pesar de que aún persistía una pequeña separación en la corriente de aire respecto al difusor.

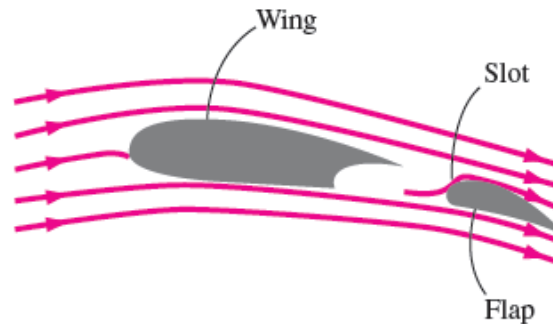


Figura 10 La función de un flap es prevenir la separación de la corriente de aire de la capa de frontera en la superficie de un perfil aerodinámico. (A. Cengel y M. Cimbala, 2006)

Un mayor ángulo de inclinación por parte de los difusores con una forma de perfil aerodinámico, generaría una mayor fuerza de sustentación, esto implicaría, un aumento en la velocidad del viento localmente. El problema es prevenir la separación de la capa límite en la superficie del difusor bajo la acción de un gradiente de presión adverso muy alto al inclinarse el perfil por encima del límite al que fue diseñado. Una forma de lograr esto es por medio de la introducción de la energía suficiente para que la corriente de flujo se mantenga en la superficie del difusor. Un *slot* permite la introducción de aire del exterior y su respectiva energía, lo que puede prevenir la separación de la corriente de aire del difusor como se requiere.

El diseño del difusor de este estudio, se basó en el funcionamiento de los perfiles aerodinámicos, utilizando un slot entre el elemento interior, con forma de perfil aerodinámico, y un *flap*, como elemento exterior. El *flap* se consideró fijo, esto es, sin un movimiento que permita aumentar o disminuir su grado de inclinación respecto al elemento interior, siendo parte de los objetivos de la presente investigación, encontrar la posición del *flap* que permita el máximo aumento en la velocidad del viento localmente.

## 2.4 Dispositivos de concentración y difusión

Las pretensiones de optimizar y aumentar la generación de energía producida por una turbina eólica se enfocaron en el diseño de aditamentos o dispositivos, así como nuevos diseños de turbinas eólicas con este fin. Los dispositivos de concentración y difusión fueron propuestos en estos trabajos; han sido estudiados y comercializados, estos últimos prometiendo un aumento en la generación de energía muy superior a la de una turbina eólica sin aditamentos, polémica aparte respecto a su efectividad.

Una turbina eólica aumentada con un difusor (DAWT) tiene un ducto que envuelve las aspas de la turbina eólica y que aumenta el tamaño de su área de sección en dirección a la corriente de viento. La presión sub atmosférica resultante dentro del difusor atrae más aire a través del plano de las aspas y, por lo tanto, más potencia puede ser generada en comparación a una turbina eólica del mismo diámetro, pero sin difusor (D.G. Phillips, 2008).

El diseño de un difusor debe tener el menor costo estructural posible, aunque debe mantener una presión sub atmosférica apreciable a la salida del plano de la turbina y una recuperación de presión alta en el interior del difusor (B. L. Gilbert, 1978).

El presente trabajo presenta un diseño de difusor partiendo de los estudios realizados por Gilbert, Phillips y Ouya, pero proponiendo un difusor en el que su sección es un perfil aerodinámico y presentando un *flap* en su borde de salida, con el objetivo de evitar la separación del flujo respecto a la superficie del difusor.

## 2.5 Principios físicos de la mecánica de fluidos

Antes de seguir avanzando en los capítulos subsecuentes, es indispensable definir la materia prima con la que estamos trabajando y de ahí partir para definir fenómenos y principios que sustentan las ideas propuestas en esta investigación, así como los medios analíticos y matemáticos utilizados para lograrlas.

### 2.5.1 Descripción de los fluidos

Una definición clara de un fluido, estrictamente hablando en el área de la mecánica de fluidos y su comportamiento es: una sustancia que se deforma continuamente

bajo la aplicación de un esfuerzo de corte (tangencial), sin importar cuán pequeño pueda ser este esfuerzo (W. Fox y T. McDonald, 1995).

Todos los fluidos están formados por moléculas que se encuentran en constante movimiento, sin embargo, macroscópicamente el fluido se moverá en una sola dirección, es por esto que podemos considerar a un fluido como un conjunto molecular y no analizar el comportamiento de cada molécula individualmente, es decir, un medio continuo.

Es posible clasificar un medio continuo de acuerdo a las características mismas de un fluido como se muestra en la Figura 11.

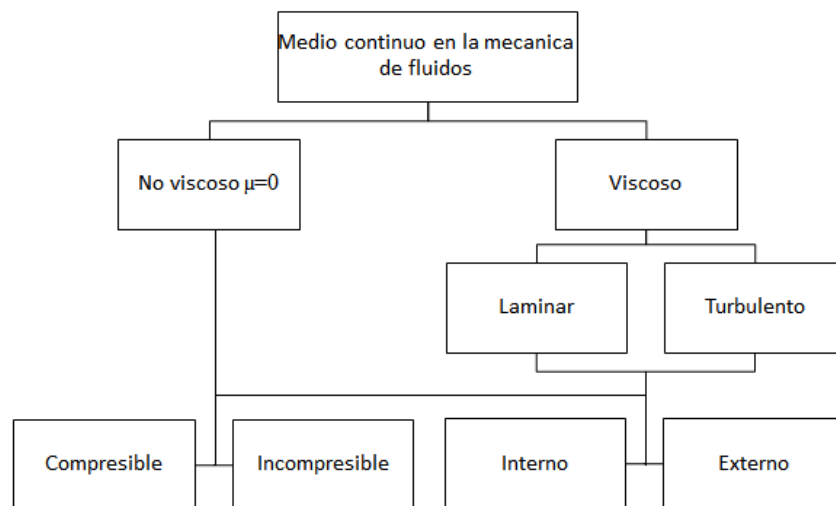


Figura 11 Clasificación de medios continuos en la mecánica de fluidos (W. Fox y T. McDonald, 1995)

- Flujos viscosos y no viscosos: Se considera un fluido viscoso cuando este se deforma bajo la acción de un esfuerzo de corte, si esta relación entre el esfuerzo y la deformación son proporcionales, podemos hablar de un fluido newtoniano. En un fluido no viscoso la viscosidad  $\mu$ , es igual a cero o es despreciable.
- Flujos laminares y turbulentos: En el régimen laminar, la estructura de flujo se caracteriza por un movimiento continuo en láminas, o capas. En cambio, la estructura de flujo en el régimen turbulento se caracteriza por movimientos tridimensionales al azar de partículas de fluido que se suman al movimiento promedio (W. Fox y T. McDonald, 1995).



- Flujos incompresibles y compresibles: Las variaciones en la densidad de los fluidos crean una compresibilidad, puede que las variaciones sean tan pequeñas que puedan ser despreciadas, esto es un flujo incompresible.
- Flujos internos y externos: Los flujos internos se encuentran en el interior de un sistema delimitado por fronteras físicas, mientras que un flujo externo es un dominio libre sin fronteras físicas.

De acuerdo a la clasificación y a las características del medio del que se trate se puede hacer un análisis matemático para resolver problemas de mecánica de fluidos, existen ecuaciones que pueden modelar el comportamiento de un fluido, estas ecuaciones resuelven derivadas parciales de la posición de una partícula del fluido en un campo vectorial, para obtener las propiedades de densidad, temperatura, velocidad, etc. que se consideran como funciones continuas de la posición y el tiempo.

### 2.5.2 Ecuaciones generales del movimiento de fluidos

- Ecuación de conservación de la masa

Para estudiar las propiedades de un fluido como un medio continuo es necesario definir un campo escalar, pues las propiedades del flujo no serán las mismas a diferentes ubicaciones en un instante dado. Utilizando coordenadas rectangulares, en un volumen de control de tamaño infinitesimal en forma de cubo cuyos lados tengan una longitud  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , la densidad estaría ubicada en su centro y su velocidad estaría dada por  $\vec{V} = \hat{i}u + \hat{j}v + \hat{k}w$  (W. Fox y T. McDonald, 1995).

Como la masa dentro de ese volumen de control en cualquier instante es la densidad  $\rho$ , multiplicado por el volumen  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , la relación de cambio de su masa sería:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad \text{Ec. 15}$$

La ecuación diferencial para la conservación de la masa, utilizando el sistema de coordenadas rectangulares definido estaría dado por:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 16}$$

Sabiendo que el operador matemático nabra,  $\nabla$ , en coordenadas rectangulares es:

$$\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad \text{Ec. 17}$$

Multiplicando  $\nabla$  por los componentes de vector velocidad  $\vec{V}$ , y la densidad se obtiene:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad \text{Ec. 18}$$

Por lo que la ecuación de la conservación de la masa puede escribirse de manera simplificada como:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 19}$$

- Ecuación de conservación del momento

La ecuación de conservación del momento describe el movimiento del fluido mediante la aplicación de la segunda ley de Newton incluyendo todas las fuerzas másicas y fuerzas de superficie. Nuevamente considerando un volumen de control de tamaño  $dx dy dz$  en un campo de coordenadas rectangulares la ecuación es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde  $p$ , es la presión estática,  $\rho \vec{g}$  y  $\vec{F}$  son la fuerza gravitacional y las fuerzas externas sobre el cuerpo, respectivamente.

- Navier-Stokes

Partiendo de la ecuación de conservación del momento y utilizando los esfuerzos expresados en términos de gradientes de velocidad en un sistema de coordenadas rectangulares, se puede modelar el movimiento de un fluido. Este conjunto de

ecuaciones es llamado de Navier-Stokes. Las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible y con viscosidad constante son:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. 21}$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. 22}$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. 23}$$

## 2.6 Dinámica de fluidos computacional CFD

### 2.6.1 Simulaciones CFD

La dinámica de fluidos computacional o CFD es una rama de la mecánica de fluidos que se centra en el análisis del movimiento de los fluidos y en ocasiones, de otros fenómenos asociados (transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc.) empleando la computadora (Ballesteros, 2003).

Los aspectos físicos de los fluidos están regidos por los siguientes principios: la conservación de la masa, la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la energía. Estos principios pueden ser expresados en términos de ecuaciones diferenciales. La dinámica de fluidos computacional es, en parte, el arte de discretizar las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de los fluidos por medio de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas por métodos numéricos con la ayuda de las computadoras (Anderson et al., 1992).

El objetivo de las simulaciones CFD puede resumirse en la resolución matemática de las ecuaciones de la conservación de masa, la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la energía que manualmente podría ser muy complicado. El conjunto de estas ecuaciones se integra en un sistema de expresiones matemáticas conocidas como Ecuaciones de Navier-Stokes.

## 2.6.2 Proceso de solución de una simulación CFD

En la solución de un problema por medio de una simulación CFD se deben de seguir ciertos pasos que deben ser definidos, En la Figura 12, Andersson et al. (2012) definen los pasos recomendados para la solución de una simulación CFD.

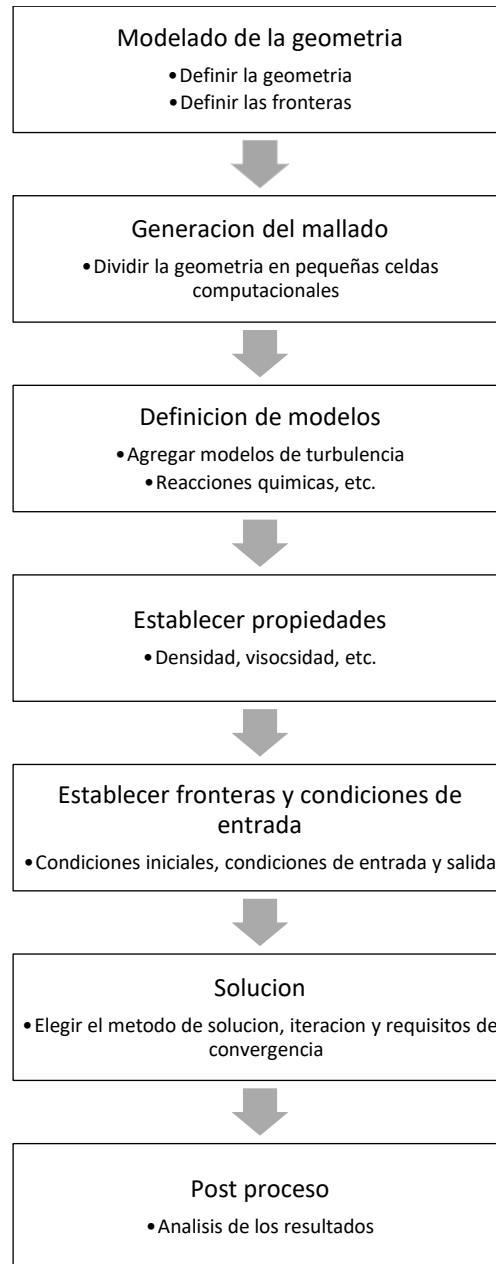


Figura 12 Pasos en una simulación CFD (Andersson et al., 2012)

### 2.6.3 Geometría

La geometría es el primer paso para resolver un problema CFD, este primer paso consiste en el dibujo en dos dimensiones (2D) o en tres dimensiones (3D) del sistema a analizar.

El sistema está formado por el dominio y por el objeto. En el caso de un sistema en 2D, el dibujo del objeto será abstraído del dominio, de esta forma, se creará la malla sobre el fluido. En un sistema en 3D el mallado se hace sobre el dibujo del modelo del objeto.

### 2.6.4 Mallado

La discretización espacial consiste en dividir el dominio continuo en pequeñas regiones o subdominios, llamados elementos, los cuales están distribuidos ordenadamente y están conectados entre sí por sus nodos (Abraham, 2012).

El tipo de discretización espacial (malla) a emplear, depende de la memoria que se disponga para almacenar los valores de las variables, así como la complejidad de la geometría del dominio.

Un mallado de mala calidad, es posible que genere resultados de baja precisión, debido a la relación de aspecto de cada celda y su estiramiento lineal o rotacional, por lo que debe ser evaluado.

### 2.6.5 Modelos

Para una corriente laminar de una fase, las ecuaciones de Navier-Stokes podrían resolverse directamente, pero para una corriente multi-fase y turbulenta, el usuario deberá seleccionar el modelo más apropiado. Existen unos pocos modelos de turbulencia y corriente multi-fase aceptados generalmente, pero hay cientos de modelos para elegir (Anderson et al., 1992).

*ANSYS Fluent* hace uso de los siguientes modelos de turbulencia (Fluent, 2015):

- Modelo Spallart-Allmaras. Es un modelo que consta de una sola ecuación de transporte para la viscosidad cinemática de turbulencia. Este modelo fue específicamente diseñado para aplicaciones aeroespaciales, pero ha

demostrado buenos resultados para flujos con capas límite sujetas a gradientes de presión adversas.

- Modelo k- $\epsilon$ . Es uno de los modelos de turbulencia más comunes. Es un modelo con dos ecuaciones de transporte para representar las propiedades turbulentas del flujo, esto permite poder conocer los efectos de convección y difusión de la energía turbulenta. La primera variable de este modelo es la energía cinética turbulenta (k), dicha variable determina la energía en la turbulencia mientras que la segunda variable representa la disipación turbulenta ( $\epsilon$ ). *Fluent* maneja tres variantes de este modelo:
  - Modelo *Standard* k- $\epsilon$ . Es un modelo semi-empírico, en el que la obtención de las ecuaciones está basada en consideraciones fenomenológicas y el empirismo.
  - Modelo RNG k- $\epsilon$ . Es un modelo obtenido utilizando una técnica estadística llamada teoría de la renormalización de grupo. Es similar al *Standard* k- $\epsilon$ , pero incluye los siguientes refinamientos: cuenta con un término adicional en su ecuación  $\epsilon$  que mejora la aproximación en flujos rápidamente afectados, el efecto de los remolinos en la turbulencia está incluido en el modelo, cuenta con una fórmula analítica para determinar el número de Prandtl y dispone de una fórmula para la viscosidad efectiva que toma en cuenta los efectos del bajo número de Reynolds.
  - Modelo Realizable k- $\epsilon$ . Es un modelo recientemente desarrollado que difiere del *Standard* k- $\epsilon$  en que: contiene una nueva formulación para la viscosidad turbulenta y que cuenta con una nueva ecuación de transporte para la razón,  $\epsilon$ .
- Modelo k- $\omega$ . Es un modelo empírico basado en ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y la razón de disipación específica ( $\omega$ ).
- Modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM). Es el modelo de turbulencia más elaborado que proporciona el *Fluent*. En el modelo se abandona la hipótesis isotrópica de la viscosidad y se resuelven las ecuaciones para los esfuerzos

de Reynolds. Esto significa que se necesitaran 4 ecuaciones de transporte adicionales para flujos en 2-D y siete ecuaciones para flujos en 3-D.

- Modelo Large Eddy simulation (LES). Es un modelo primeramente propuesto para simular corrientes de aire atmosférico, LES ha crecido rápidamente y se emplea actualmente en una amplia variedad de aplicaciones de ingeniería, incluyendo la combustión, la acústica y la simulación de la capa límite atmosférica. El LES opera en las ecuaciones de Navier-Stokes para reducir el rango de longitud de escalas de solución, lo que minimiza el coste computacional.

### 2.6.6 Propiedades

Al ser una simulación computacional, el programa por sí mismo, no reconoce o no sabe a qué tipo de fluido estamos haciendo referencia en el estudio, es por esto, que es necesario introducir todas las propiedades físicas necesarias de los fluidos para que el programa pueda calcular su comportamiento. Entre las propiedades físicas están la viscosidad, densidad, temperatura y presión.

### 2.6.7 Fronteras y condiciones iniciales

La finalidad de las condiciones de contorno es simular el comportamiento que tendrían los límites reales de un fluido, tales como paredes, entradas en tuberías, salidas al exterior, etc. (Abraham, 2012).

### 2.6.8 Solución

Para resolver se puede elegir entre una solución segregada, basada en presión o en densidad, y para problemas inestables, se debe elegir entre el método de pasos implícito o explícito. Esquemas numéricos para alcanzar la convergencia y la calidad de una solución aceptable en términos de un criterio de convergencia también deben ser definidos (Andersson et al., 2012).

### 2.6.9 Análisis

En este último paso se cerciora que la solución obtenida por la simulación sea precisa y confiable en lo que concierne a representar fielmente el comportamiento del

fluido simulado. Así también, se deben comparar los resultados obtenidos en la simulación (velocidades de viento, presiones locales, temperaturas, etc.) con otros análisis numéricos, mediciones en campo, pruebas físicas en túneles de viento o resultados correspondientes de otras investigaciones.



## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

Este capítulo reúne los procedimientos realizados para la obtención del mejor diseño posible del difusor que tiene como propósito aumentar la velocidad del viento localmente en su interior.

Para la realización de las simulaciones de esta investigación, se utilizó un software especializado en el que se implementó el procedimiento ilustrado en la sección 2.6.2. Para la generación de las geometrías, se utilizó el programa *AutoCAD* en su versión 2012 (Autodesk, 2016) y para la realización de los pasos necesarios para llevar a cabo las simulaciones, se utilizó un conjunto de programas contenidos en *ANSYS 15* (Ansys, 2016).

La manera en que los procedimientos realizados en esta investigación se organizaron, fue consecuencia del orden de su ejecución; inicialmente, en las secciones 3.1, 3.2 y 3.3 se definieron los parámetros y características de los sistemas a simular; posteriormente, en las secciones 3.4 y 3.5, se utilizaron estos parámetros para definir el análisis del elemento interior y del elemento exterior. Finalmente, en las secciones 3.6 y 3.7, se definió un diseño factorial de estudio y se expuso la validación de los experimentos realizados, respectivamente.

#### 3.1 Modelado de la geometría

##### 3.1.1 Creación de la geometría

El modelado de la geometría consiste en el proceso de definir la geometría del modelo a simular, así como su entorno conocido como “dominio”. El diseño de la geometría se realizó en dos etapas, la primera consistió en la realización del dibujo de la geometría en *Autodesk AutoCAD*, posteriormente, utilizando el programa *Design Modeler* se crearon las superficies a simular partiendo de la geometría elaborada en *AutoCAD*.

La geometría para una simulación CFD depende del tipo de simulación a realizar existiendo dos posibilidades: la creación de volúmenes de sólidos para simulaciones

en tres dimensiones y la creación de superficies para simulaciones en dos dimensiones; debido a los propósitos y alcances de este trabajo, se llevó a cabo el análisis de un sistema en 2 dimensiones, por lo que se utilizó una geometría integrada únicamente por superficies.

Tomando como referencia artículos del mismo tema (Aranake, Lakshminarayan y Duraisamy, 2013), (D.G. Phillips, 2008) y teniendo en consideración que el difusor diseñado es una geometría simétrica, se decidió utilizar únicamente una mitad de este, lo que permitió una menor carga en el proceso y tiempo de simulación.

En la primera etapa se dibujaron los perfiles aerodinámicos y el dominio únicamente utilizando líneas vectoriales en *AutoCAD*; los perfiles aerodinámicos se dibujaron por medio de coordenadas geométricas obtenidas de la base de datos de la University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC por sus siglas en inglés) (Illinois s.f.) teniendo como coordenada de origen (0,0) un punto en el borde de ataque del perfil aerodinámico que forma el elemento interior; al tomar como referencia estas coordenadas, se generó una geometría de tamaño unitario, la cual fue necesario ser modificada para adecuar su longitud, ángulo de ataque y posición (Figura 13).

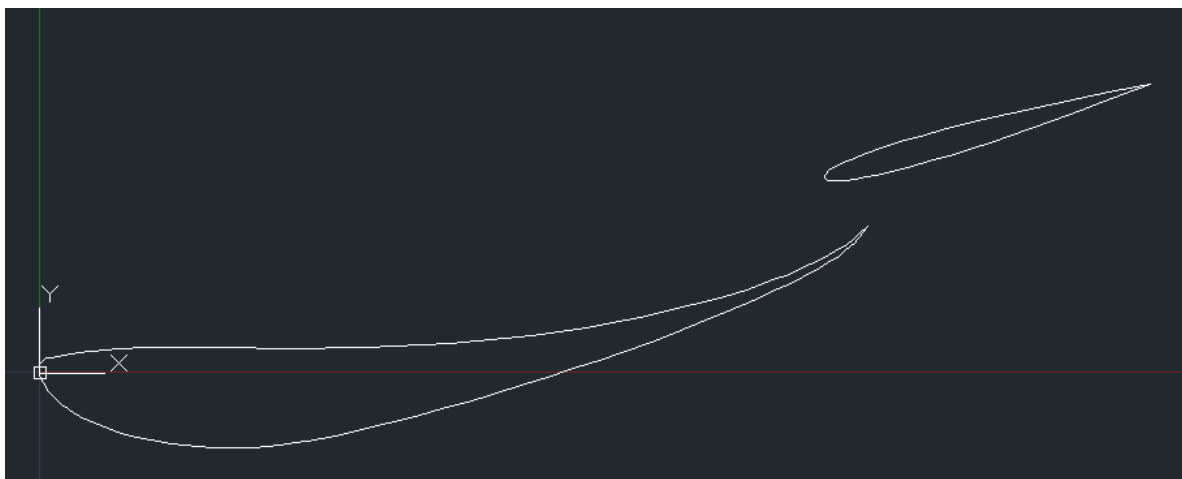


Figura 13 Dibujo de los perfiles aerodinámicos en AutoCAD

Posteriormente, se procedió al dibujo de un dominio de forma rectangular simétrica, cuyo eje de simetría se encontraba ubicado en el borde del límite inferior, que correspondería al eje de rotación de una turbina eólica situado en el centro del difusor. Con el eje de simetría como base del dominio, se dibujó el rectángulo

completo con medidas de 28 x 10 metros, concluyendo esta primera etapa del dibujo, se procedió con el guardado y exportación del mismo a un archivo con extensión “.iges” reconocible por el programa *ANSYS*.

### 3.1.2 Creación de las superficies

En la segunda etapa la geometría generada en *AutoCAD* fue importada a *Design Modeler*. Para las simulaciones en dos dimensiones se utilizan únicamente superficies; al ser realizados los dibujos de las geometrías utilizando líneas vectoriales, es necesaria la creación de superficies dentro de los límites de cada área cerrada dibujada.

La elaboración de las superficies para simulaciones en dos dimensiones consiste en la creación de áreas cerradas en las zonas geométricas que corresponden a fluidos y a sólidos, estas últimas deben ser eliminadas para formar vacíos; resultando que permanecen únicamente superficies con propiedades de fluidos, en las cuales se realizó una discretización por medio de la creación de un mallado. En este trabajo, la única superficie que permaneció, fue la superficie del dominio rectangular, habiendo sido eliminadas de su interior las superficies correspondientes a ambos perfiles aerodinámicos (elemento interior y elemento exterior).

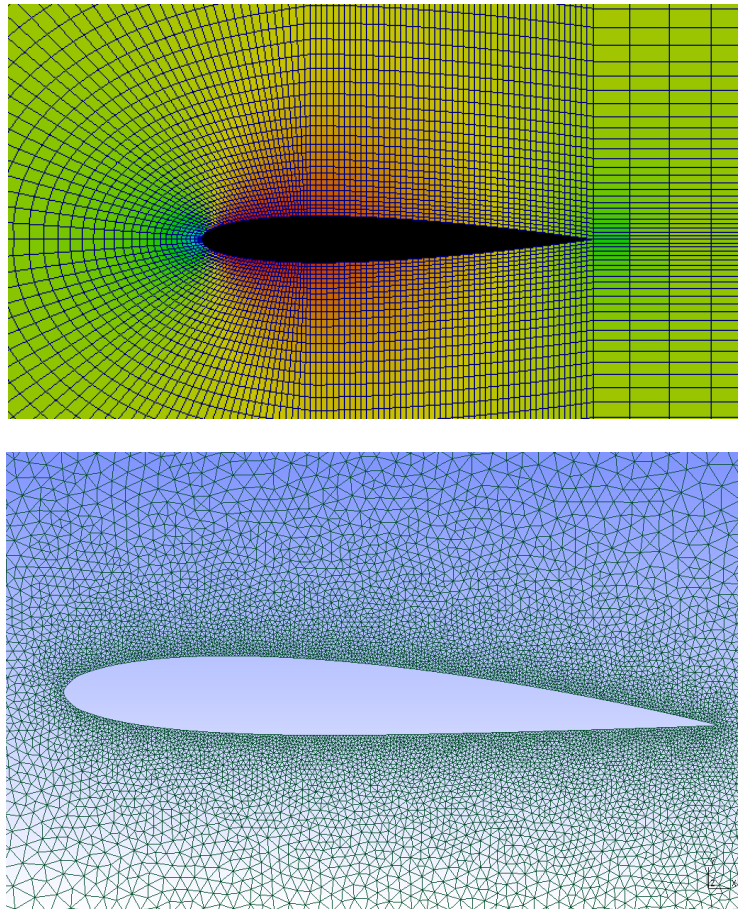
## 3.2 Generación del mallado

### 3.2.1 Tipo de mallado

El primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, consiste en la discretización espacial del dominio para posteriormente calcular sobre la misma la aproximación numérica de los flujos, esta discretización corresponde al mallado de las superficies en dos dimensiones y al mallado de los volúmenes en tres dimensiones. Existen generalmente dos tipos de mallado:

- **Mallados estructurados:** cada punto de la malla está identificado por los índices  $i, j, k$ , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en el caso de dos dimensiones, la intención de este mallado es mantener la proporción y la deformación de cada celda lo más uniforme posible (Figura 14).

- **Mallados no estructurados:** las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla en este caso se adaptan a la geometría modificando su proporción y deformación, pudiendo tener forma de cuadriláteros y triángulos en dos dimensiones (Figura 14).



**Figura 14 Ejemplos de mallado estructurado (arriba) y mallado no estructurado (abajo)**

En el caso particular de este trabajo y todas las simulaciones realizadas, se hizo uso de una malla no estructurada de celdas triangulares, la principal ventaja de estos mallados es que se puede generar automáticamente definiendo algunos parámetros y propiedades de las celdas para garantizar su calidad, esta característica permite generar una gran cantidad de mallados en diferentes geometrías que varían la posición de sus elementos, como en el caso de este trabajo en el que se utilizaron más de 50 geometrías distintas.

### 3.2.2 Algoritmo y propiedades del mallado no estructurado

Se definió un mallado no estructurado de algoritmo triangular como discretización del dominio, aplicándose en la superficie de la geometría rectangular, en donde se encontraban los perfiles aerodinámicos, una discretización triangular que permitió una deformación menor de sus celdas, en comparación de la deformación que se obtendría con una discretización rectangular, esto es, en el caso de un mallado no estructurado; así mismo, para mejorar la calidad en el mallado generado automáticamente, se activaron y configuraron funciones de tamaño en el programa *Meshing*.

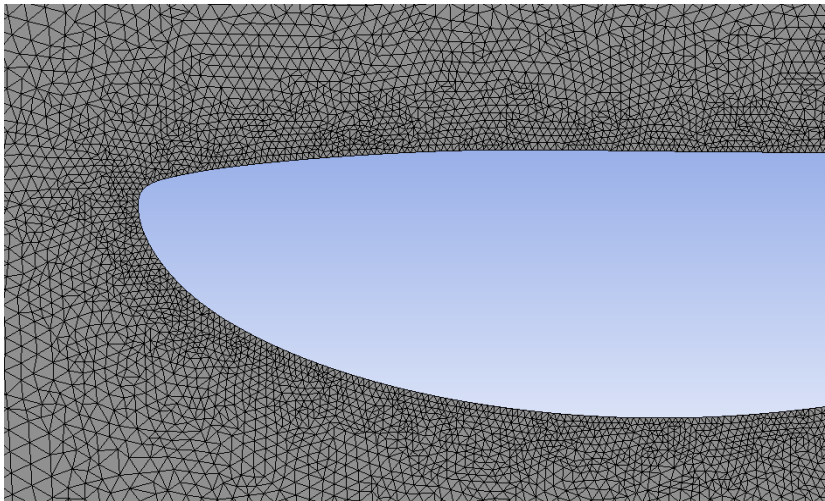


Figura 15 Detalle del mallado utilizado en las simulaciones

Las funciones de tamaño proveen un mayor control sobre la relación de aspecto de las celdas y la distribución del mallado en las superficies. Estableciendo funciones de tamaño, es posible lograr un tamaño y forma de celdas más preciso, esto permite la generación de una malla no estructurada sin perder calidad, sobre todo en las zonas donde se necesite mayor precisión como se observa en la Figura 15.

Para la realización del mallado en este trabajo se activaron las siguientes funciones de tamaño:

- Tamaño mínimo de las celdas:  $1 \times 10^{-4} \text{m}$
- Su porcentaje de crecimiento: 1.06
- Centro de pertinencia: bueno
- Suavizado: alto

En las cercanías de los bordes de los perfiles aerodinámicos se necesitó un número mayor de celdas y de menor tamaño para un análisis de mayor precisión de la capa límite, para esto, se dividió el borde del elemento interior en 700 partes y el elemento exterior en 300, generando de esta forma un mallado más fino en las cercanías de estos elementos.

### 3.2.3 Calidad de los elementos

Los resultados en una simulación CFD están asociados con la deformación de las celdas del mallado, es por esto que se deben controlar sus propiedades y algoritmos. Entre las condiciones de calidad del mallado se encuentra la cantidad de nodos, celdas y deformación.

La cantidad de nodos y celdas en las simulaciones de este trabajo no son uniformes por las propias características de un mallado no estructurado, el cual se adecúa a la geometría presente, generando variaciones en la cantidad y forma de las celdas, sin embargo, de acuerdo a las propiedades paramétricas definidas, resultaron mallados consistentes con valores promedios de 26,285 nodos y 51,342 elementos.

La calidad del mallado es considerada en un rango de 0 a 1, en donde el 0 es un mallado de baja calidad por la deformación en sus celdas, entre estos valores hay un valor mínimo crítico de calidad que se presenta a un valor de 0.01. En los mallados de este trabajo se obtuvieron valores promedios de 0.59, tomándose este valor como una calidad aceptable.

### 3.2.4 Especificación de tipo de límites de frontera y zonas

Los diferentes tipos de zonas de la geometría, especifican las características físicas y operacionales del modelo simulado, definiendo sus fronteras y las regiones en el interior del dominio. El manual de Fluent (2015) identifica dos tipos de zonas:

- Zona tipo frontera
- Zona tipo continuo

Las especificaciones tipo frontera definen las características físicas y operacionales del modelo en las entidades topológicas que representan sus límites. Estas fronteras pueden ser solidas o fluidas:

- Predominantemente fluidos:
  - *Inlet*: especifica los flujos que entran al dominio.
  - *Outlet*: determina flujos de salida.
  - *Opening*: los fluidos pueden entrar y salir del dominio.
- Predominantemente solidos:
  - *Wall*: limite impenetrable para un flujo de fluido
  - *Symmetry Plane*: un plano simétrico geoméricamente hablando.

Las zonas tipo continuo se refieren a superficies con características físicas que pueden simularse como fluidos o sólidos.

En este trabajo los límites de frontera y zonas se determinaron como se muestra en la Tabla 1 y en la Figura 16.

| Condiciones de frontera |                        |   |
|-------------------------|------------------------|---|
| Nombre                  | Frontera               | Propiedad   |
| Perfiles aerodinámicos  | <i>Wall</i>            | Velocidad cero en su superficie, de modo que el flujo no lo atraviesa |
| Techo del dominio       | <i>Wall</i>            | Velocidad cero en su superficie, de modo que el flujo no lo atraviesa |
| Piso del dominio        | <i>Symmetry</i>        | Pared sin fricción. Plano de simetría                                 |
| Entrada                 | <i>Velocity inlet</i>  | Contorno de entrada de flujo a una velocidad definida                 |
| Salida                  | <i>Pressure outlet</i> | Contorno de salida de flujo a una presión definida                    |

Tabla 1 Condiciones de frontera utilizadas en las simulaciones

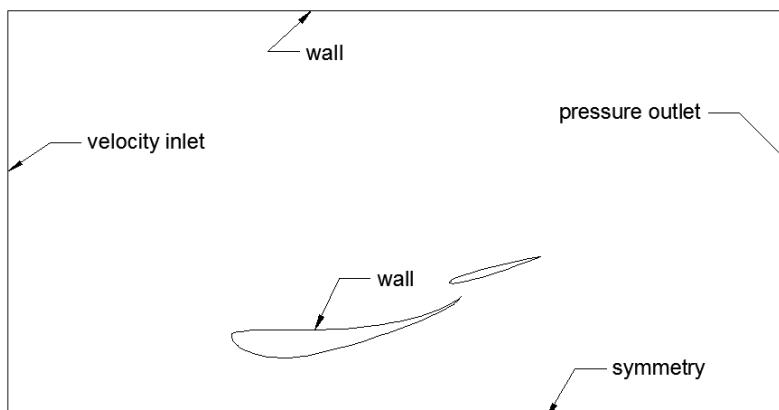


Figura 16 Condiciones de frontera del dominio

### 3.3 Propiedades y modelos de turbulencia

Esta sección abarca la configuración de los parámetros de la simulación CFD que permite el correcto funcionamiento en el comportamiento del fluido y su interacción con los objetos presentes en su trayectoria. Para las simulaciones CFD se ha empleado el programa *Fluent* 15, la aceptación generalizada en el uso de este programa en el área de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional y la disponibilidad de licencias para uso académico por parte de ANSYS, fueron los motivos principales de su elección

#### 3.3.1 Características de la simulación

Se realizaron las simulaciones en dos dimensiones de dos elementos con forma de perfil aerodinámico dentro de un dominio rectangular simétrico mallado con un algoritmo triangular no estructurado, con el objetivo de obtener el comportamiento del viento en las cercanías de los perfiles aerodinámicos, teniendo como origen de cálculo un fluido con las propiedades del aire bajo condiciones estándar, a una velocidad de entrada en el dominio de 6 m/s.

#### 3.3.2 Ejecución del programa

Primeramente, se definió la precisión de la solución existiendo dos posibles opciones: precisión simple y precisión doble, la diferencia entre los dos tipos de precisión radica en la cantidad de bits utilizada por los datos, en la precisión simple cada número decimal está representado por 32 bits y la precisión doble emplea 64 bits. Para las simulaciones de este trabajo se empleó una precisión doble, que a pesar de que requiere para su uso una mayor cantidad de memoria y tiempo de cálculo, los rangos máximos y mínimos que puedan alcanzar las magnitudes decimales son mayores permitiendo una mayor exactitud en los cálculos.

La solución de los cálculos de las simulaciones requiere una gran cantidad de iteraciones de cálculo para alcanzar una convergencia, *Fluent* 15 ofrece la posibilidad de elegir el tipo de procesamiento de los cálculos, los cuales pueden realizarse de forma seriada o de forma paralela, esto es, si se cuenta con un procesador (CPU) de



un único núcleo o un procesador de varios núcleos y/o unidad de procesamiento gráfico (GPU).

Un procesamiento en paralelo incrementa el poder de solución de un modelo acelerando considerablemente el tiempo de su solución. En este trabajo se utilizó un procesamiento en paralelo utilizando 4 núcleos de CPU y 1 GPU.

### 3.3.3 Revisión del mallado

La revisión del mallado consiste en el aseguramiento de la calidad y en la detección de posibles errores en la ortogonalidad de las celdas de la malla. El programa *Fluent* 15 permite la revisión de las estadísticas de volumen de la malla, estas son: extensión del dominio, volumen del dominio, topología de la malla, información de las fronteras, posición de los nodos respecto al plano de simetría y ortogonalidad, entre otros.

Entre las evaluaciones realizadas, el resumen general de calidad de ortogonalidad obtuvo como resultado las dimensiones del dominio que correspondieron a las del mallado generado en *Meshing* y una calidad aceptable de 0.6 en una escala de 0 a 1, donde 0 o los valores cercanos a 0 corresponden a un mallado deficiente y valores cercanos a 1 corresponden a un mallado deseable.

### 3.3.4 Metodología de solución

La metodología de solución de las ecuaciones numéricas no especifica el cómo se resuelven las ecuaciones que rigen los fluidos, si no que especifican los diferentes tipos de análisis a realizar con dependencia de las características del flujo y del dominio del modelo.

El programa requiere la determinación de 4 parámetros básicos definidos de la siguiente manera:

- Tipo de solución basado en presión o densidad: la solución basada en presión fue originalmente desarrollada para simulaciones incompresibles a bajas velocidades, mientras que las soluciones basadas en densidad, para velocidades altas, sin embargo, ambos métodos han sido reformulados para funcionar en un amplio rango de situaciones. Sin embargo, en este trabajo se

decidió usar un método de solución basado en presión debido a que la solución basada en densidad es aplicable cuando existe un alto grado de acoplamiento o interdependencia entre densidad, energía y momento, como es en los casos de flujos compresibles a altas velocidades y que se encuentran en combustión o flujos hipersónicos, caso contrario a las situaciones presentadas en las simulaciones de esta investigación, en las que se usan velocidades bajas y se ignora el efecto de compresibilidad del flujo.

- Tiempo de solución estacionario o transitorio: se determinó un flujo estacionario, debido a que se desea registrar las velocidades y presiones medias estabilizadas en el modelo. Casi todos los flujos en la naturaleza son transitorios, sin embargo, es posible utilizar una solución estacionaria cuando se ignoran las fluctuaciones transitorias de los flujos empleando un promedio de las velocidades en el tiempo, facilitando el análisis de los datos y un menor consumo computacional.
- Formulación de velocidad absoluta o relativa: la formulación de velocidad absoluta es preferible en aplicaciones en las cuales el flujo en el dominio no se encuentra mayormente rotando. La formulación relativa es preferible cuando la mayor parte del flujo se encuentra rotando, como puede ser cuando existe un ventilador en un cuarto o una mezcladora en un tanque. Aunque es posible utilizar cualquiera de las dos formulaciones para la mayoría de las aplicaciones, se decidió utilizar la formulación absoluta, ya que las simulaciones realizadas no presentan ninguna clase de flujo en rotación.
- Espacio 2d: Se definió un espacio del dominio plano y no simétrico, pues el dominio rectangular del modelo ya fue especificado como simétrico en su frontera inferior.

### 3.3.5 Ecuación de la energía

Una de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la dinámica de fluidos es la ecuación de la energía, sin embargo, para flujos de baja velocidad menores a la velocidad del sonido, los efectos de compresibilidad son despreciables, por lo que

pueden ser definidos como flujos incompresibles, esto permite omitir la solución de las ecuaciones de la energía en el sistema de nuestro modelo.

### 3.3.6 Modelos de turbulencia

Para la realización de una simulación CFD es necesario seleccionar un modelo de turbulencia encargado de realizar las operaciones numéricas en la solución de las ecuaciones que gobiernan los flujos. La selección de un modelo de turbulencia depende de las características del fluido y del flujo, así como la aplicación de los objetos a simular.

Las simulaciones de este trabajo fueron realizadas con el modelo de turbulencia Spalart-Allmaras; este modelo fue diseñado específicamente para la industria aeroespacial, demostrando buenos resultados en presencia de diferenciales de presión, además de trabajar efectivamente a números de Reynolds bajos. Se seleccionó el modelo Spalart-Allmaras por ser un modelo de una sola ecuación y contar con un tratamiento de capa límite, el cual permite la aplicación del modelo independientemente de una solución exacta en el mallado en las cercanías de las superficies sin importar la precisión en la calidad de la malla, recordando que se utilizó un mallado no estructurado.

### 3.3.7 Materiales

Las propiedades de los materiales de los elementos dentro del sistema de simulación deben definirse para poder predecir un comportamiento correcto. La viscosidad, densidad, temperatura y estado físico de estos materiales depende de la formulación del modelo utilizado para su solución.

Se seleccionaron los materiales tanto para fluido como para sólido de las listas de materiales predeterminadas del programa, las características definidas para estos materiales coincidieron con las características deseadas para las simulaciones. Para el fluido se definió como material el aire y las características predeterminadas del programa cuando éste se encuentra a 20°C de temperatura y a 1 ATM de presión. Para el material sólido se seleccionó el aluminio, considerando la poca injerencia que tiene la interacción entre el material sólido y fluido en los resultados de este tipo de

simulación, ya que la rugosidad del aluminio, fibra de vidrio, fibra de carbono y materiales compuestos con los que se elaboran las aspas de las turbinas eólicas son muy parecidos.

### 3.3.8 Condiciones de inicio

Las condiciones de inicio son los valores iniciales de operación para la solución del modelo de turbulencia, estos valores se aplican en las zonas de fronteras definidas por los tipos de materiales utilizados.

El valor de inicio para este trabajo se definió como una condición de velocidad inicial aplicada en dirección normal al límite de frontera de entrada seleccionada en el dominio, se seleccionó una velocidad de 6 m/s, la cual corresponde a una velocidad media presente en lugares con condiciones no deseables para la producción de energía eólica a gran escala, pero que cumplen con cierto potencial para la aplicación de turbinas eólicas con difusor, como sería el caso particular de la ciudad de Mérida y sus alrededores.

### 3.3.9 Métodos de solución

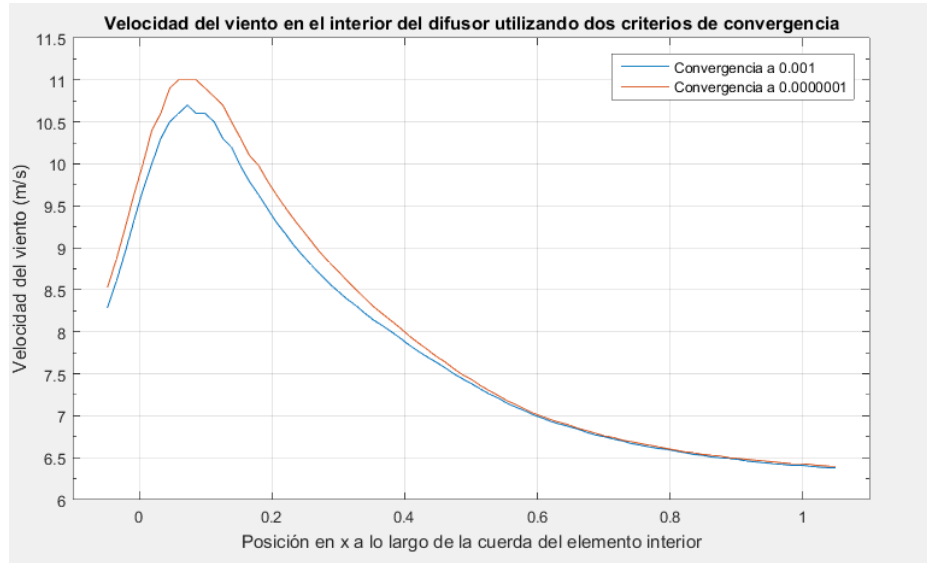
Existen dos métodos de solución en *Fluent 15*: *SIMPLE* y *Coupled*, el primero resuelve la presión y velocidad del flujo en pasos separados, mientras que el segundo lo hace simultáneamente.

Se utilizó el método *SIMPLE* para las simulaciones de este trabajo, utilizando discretización de segundo orden con el objetivo de obtener una mayor precisión en los resultados, este método es usado para modelos de flujos laminares y turbulentos en un mismo caso.

### 3.3.10 Criterios de convergencia

El criterio de convergencia es la aproximación del error entre iteraciones de la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan los fluidos por el modelo de turbulencia, siendo el residuo la diferencia entre los valores de dos iteraciones seguidas, por lo tanto, el criterio de convergencia es un grado de precisión de la solución.

La solución de las simulaciones realizadas fue establecida con un criterio de convergencia de 0.001 de error entre iteraciones, logrando la convergencia entre las 800 y 1500 iteraciones.



**Figura 17 Comparación de las velocidades del viento a 95cm del eje de la turbina utilizando un error de convergencia de 0.001 y 0.0000001**

Para garantizar un nivel de certidumbre aceptable en el valor de error de convergencia, se sometió a simulación un mismo caso; el primero con un error de 0.001 y el segundo, con un error de convergencia de 0.0000001 (Figura 17). En ambos casos los valores de velocidad del viento presentaron valores muy similares con un error máximo de 3%, equivalente a una diferencia de 0.4 m/s, siempre presentando, una diferencia de velocidad a mayor, sin embargo, el tiempo de convergencia de la simulación aumentó de 10 minutos en promedio a más de 50 minutos. Debido a la cantidad de simulaciones a realizar y que el porcentaje de error es pequeño y mantiene siempre un ligero aumento en la velocidad del viento, se prefirió utilizar un error de 0.001, con este valor se garantiza un resultado fiable y un tiempo de simulación menor.

### 3.3.11 Puntos de referencia

Para la obtención de valores de la velocidad de viento en el interior del difusor y su posterior comparación, se establecieron puntos de referencia localizados por medio

de coordenadas con origen en el borde de entrada del elemento interior localizado en el interior del dominio rectangular.

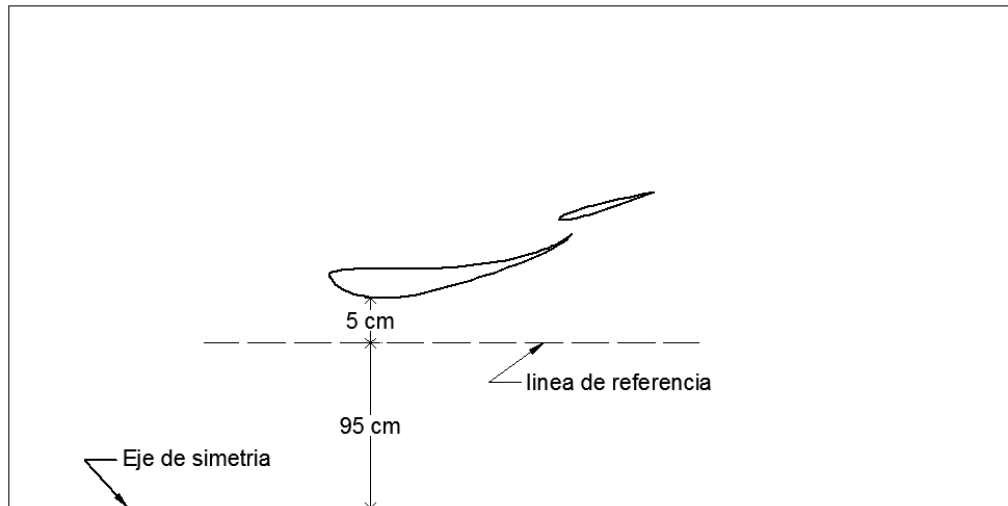


Figura 18 Puntos de referencia para la obtención de las velocidades de viento

Los puntos de referencia se crearon con el programa *Post CFD*, se generó una línea que unía dos puntos de coordenadas (1.894,-0.086) y (2.106,-0.086), esta línea se encontraba separada 5 cm de la superficie más cercana del elemento interior y a 95 cm del eje de simetría (Figura 18). De esta línea se obtuvieron 300 muestras de valores a lo largo de toda su longitud, permitiendo conocer la velocidad del viento antes, en y después del difusor. La separación entre la línea y la superficie más cercana se definió debido a que corresponde a la posición de las puntas de las aspas y por la importancia que tiene la velocidad del viento en estas para la generación de la velocidad tangencial en una turbina eólica, siendo este, la posición más favorable para un mayor rendimiento.

### 3.4 Selección del elemento interior

El objetivo de esta sección es determinar la forma y tamaño del perfil aerodinámico que formará el elemento interior del difusor.

Se seleccionaron 3 perfiles de la base de datos de coordenadas de perfiles aerodinámicos del departamento de ingeniería aeroespacial perteneciente a la UIUC (Airfoil coordinates database, Illinois). Estos perfiles, el S1223, el FX63137 y el N10, se seleccionaron de entre los demás, debido a que poseen el coeficiente de

sustentación más alto a números de Reynolds de entre 130,000 y 200,000, rango correspondiente a la relación existente entre la velocidad del viento y el tamaño del difusor que se usaron en esta investigación.

El propósito de analizar el comportamiento de los perfiles aerodinámicos, fue conocer el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación; este último, relacionado directamente con el aumento en la velocidad del viento que pasa por el interior del difusor, por lo que, a mayor coeficiente de sustentación, mayor el aumento en la velocidad del viento que pasa por esa sección. Igualmente, otro objetivo de este análisis fue el de obtener el ángulo de ataque de los perfiles aerodinámicos seleccionados, en el que se obtiene el mayor coeficiente de sustentación.

### 3.4.1 Perfil Selig 1223 (S1223)

Este perfil es usado en pruebas de baja velocidad por la UIUC, es el siguiente en la serie S, después del S1210, tiene un estimado de 30% más fuerza de sustentación que el perfil FX 63-137, que es uno de los que tienen más alta sustentación entre este tipo de perfiles. El S1223 no está diseñado para comportarse de manera óptima a valores de Reynolds menores a 200,000, sin embargo, será considerado para su uso en este estudio para valores de Reynolds entre los 130,000 y los 200,000, debido a los altos coeficientes de sustentación que se generan en este rango de Re (Ec. 14), como se mencionó anteriormente (Figura 19).

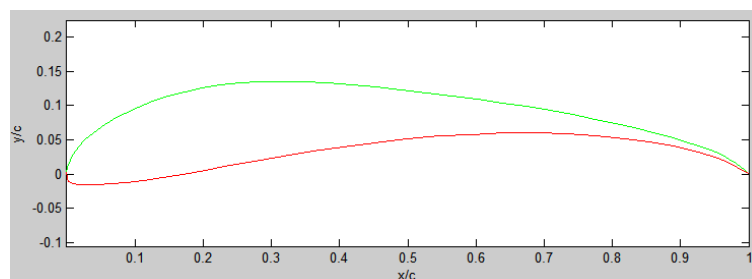


Figura 19 Geometría del perfil Selig S1223

### 3.4.2 Perfil FX 63-137

Fue el primer perfil aerodinámico diseñado para ser utilizado con números de Reynolds por debajo de un millón, tiene un borde de salida relativamente delgado, haciéndolo difícil de construir. En diseño es muy similar al S1223 y al igual que éste,

su desempeño óptimo opera para valores de  $Re$  desde los 200,000 hasta los 400,000 (Figura 20).

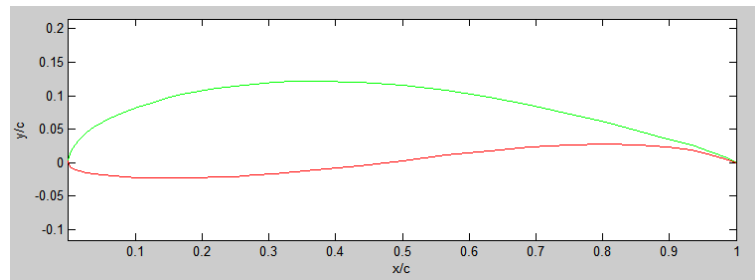


Figura 20 Geometría del perfil FX 63-137

### 3.4.3 Perfil N-10

El perfil N-10 es un perfil aerodinámico de un grosor máximo del 11.2% de la longitud de la cuerda, ubicado al 30% de ésta misma. Tiene una comba de 2.6% respecto a la cuerda y está ubicada al 40% de la longitud de esta (Figura 21).

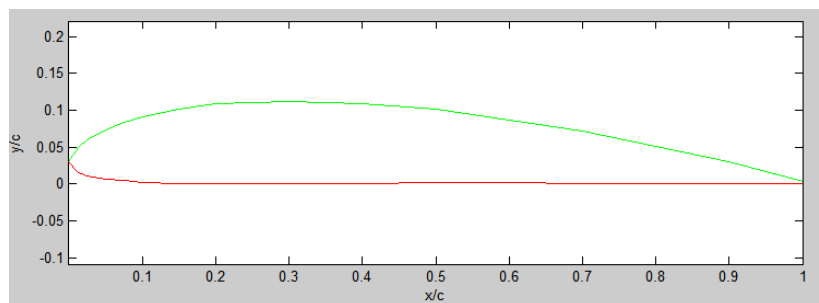


Figura 21 Geometría del perfil N10

### 3.4.4 Procedimiento del cálculo de selección del elemento interior

Para facilitar la realización del gran número de iteraciones necesarias para el cálculo de los coeficientes y de las fuerzas de arrastre y sustentación, se ha empleado el programa *Xfoil* y su interfaz gráfica programada en *Matlab* 2010a.

Inicialmente fue necesario tener la geometría de los perfiles aerodinámicos en un archivo de datos, este archivo debe contener las coordenadas de la geometría del perfil aerodinámico en pares ordenados, esto es, dos columnas; la primera columna con los valores de  $x$  y la segunda con los valores de  $y$ , separados por comas ( $x, y$ ).

Una vez abierto el programa *Matlab* 2010a y cargado el código denominado *Xfoil Interface*, se especificaron dos condiciones necesarias para adecuar el cálculo. Estas



dos condiciones son: el número de Reynolds (160,000) y el rango de variación del ángulo de ataque ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ ) con incrementos de  $0.1^\circ$ , estos valores de ángulo se tomaron de los rangos habituales de uso de los perfiles aerodinámicos.

Para la selección del perfil aerodinámico que forma el elemento interior del difusor, se tomó en cuenta el comportamiento de los coeficientes de sustentación y arrastre en relación al cambio del ángulo de ataque de cada perfil. Por medio de las gráficas obtenidas de estos valores se pudo observar que perfil aerodinámico tuvo un coeficiente de sustentación más estable sin presentar caídas bruscas del mismo al alcanzar el estado de pérdida aerodinámica, además de obtener el coeficiente de sustentación más alto y la relación entre coeficientes de sustentación y arrastre ( $C_L/C_D$ ) más cercanos a 1.

Por el análisis de los valores obtenidos, en conveniencia de alcanzar las mayores velocidades de viento en sus cercanías generadas por la fuerza de sustentación de su silueta y su ángulo de ataque, se seleccionó el perfil aerodinámico S1223.

### **3.5 Elemento exterior**

Se definió el elemento exterior como un perfil aerodinámico simétrico modelo NACA0008 debido a la simplicidad en su construcción y forma de su silueta, se consideraron los siguientes parámetros de longitud y ángulo de ataque, para aprovechar su máximo rendimiento en la posición inicial de las simulaciones que evaluarán las variables independientes de experimentación. La longitud de su cuerda se definió de 20 cm, esto es, 0.1 veces el diámetro de la turbina eólica, esta longitud es el valor óptimo obtenido de los resultados en la investigación “*A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology*” (Ohya y Karasudani, 2010), en ese trabajo, entre las características estudiadas en un difusor, se encuentra la longitud del reborde posterior, el cual, equipara la función de *flap* que desempeña el elemento exterior en este trabajo.

El ángulo de ataque base se estableció a  $8^\circ$  de acuerdo a las curvas del coeficiente de sustentación del perfil NACA0008, este valor corresponde a la mayor aceleración del viento antes de entrar en pérdida aerodinámica, manteniendo un rango de

seguridad para evitar la entrada y salida en pérdida aerodinámica constante en presencia de variaciones normales en la velocidad del viento (Figura 22).

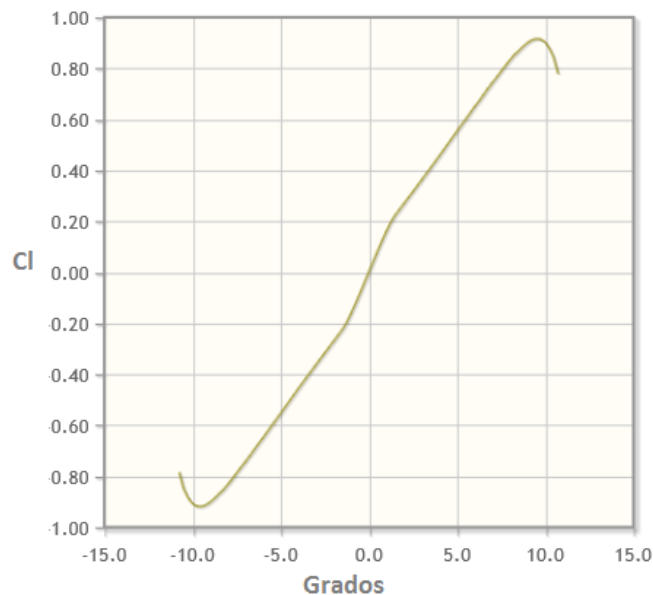


Figura 22  $C_l$  del perfil NACA0008 a 200,000Re variando su ángulo (Illinois s.f.)

El propósito de agregar un segundo elemento (elemento exterior) al elemento interior del difusor, consistió en aumentar la velocidad del viento al interior del difusor, tomando como sustento los estudios realizados sobre los rebordes posteriores en difusores y la teoría de *flaps* expuesta en la sección 2.3.3.

Para evaluar los efectos de la presencia del elemento exterior, se establecieron 3 variables que modifican la posición del elemento exterior en relación al elemento interior y modifican los efectos generados por el elemento interior en la corriente de viento; ya sea por medio de generar una zona de baja presión viento abajo, al aumentar el ángulo entre la cuerdas de estos dos elementos; o por el efecto de alargamiento de la cuerda del elemento interior, al estar el elemento exterior lo más cerca posible del elemento interior a ángulos de inclinación pequeños, o el aumento en el paso de corriente al variar la separación entre ambos elementos.

Cada una de las variables se estudió independientemente de las demás por medio de simulaciones CFD; esto es, la variable de estudio modificó su posición en un rango definido de valores, partiendo de una posición inicial sin modificar las 2 variables restantes.

Las variables de posición del elemento exterior se definen a continuación (Figura 23):

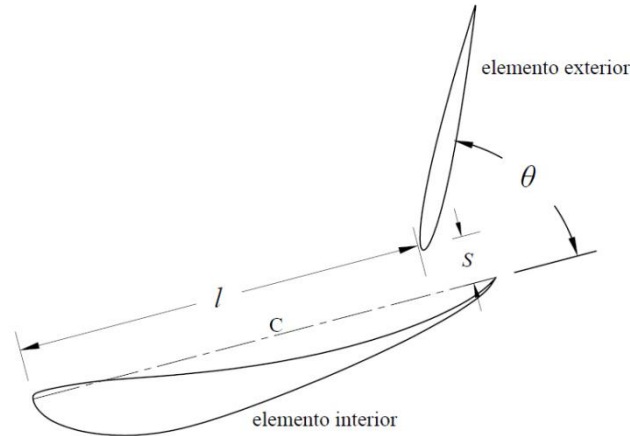


Figura 23 Variables  $s$ ,  $l$  y  $\theta$  de posición del elemento exterior en relación a la cuerda  $c$ , del elemento interior.

“ $s$ ”, es la distancia de separación entre la superficie más próxima del elemento interior y el elemento exterior en dirección perpendicular a la cuerda del elemento interior.

“ $l$ ”, es la posición del borde de entrada del elemento exterior a lo largo de la cuerda del elemento interior

“ $\theta$ ”, es el ángulo de inclinación del elemento exterior en relación a la cuerda del elemento interior.

### 3.5.1 Valores de las variables

Para conocer el comportamiento en la velocidad del viento al interior del difusor al variar los valores de cada una de las variables, se realizó un barrido de simulaciones CFD con cada una de las variables.

Para la variable “ $s$ ”, únicamente se realizaron tres simulaciones, se definieron 3 valores iniciales de estudio separados por 1 cm, iniciando con  $s=1.5\text{cm}$ , este valor, es el menor posible debido a que la curvatura de la silueta de la superficie del elemento interior en su borde de salida haría contacto con la superficie del elemento exterior que se encuentra inclinado a  $8^\circ$ , si fuera menor. Considerando que a una distancia de  $s=4\text{cm}$  los efectos sobre la aceleración del viento disminuyen considerablemente,

de acuerdo a la tendencia mostrada en las simulaciones realizadas, los valores " $s$ " se definieron como:  $s=1.5$ ,  $2.5$  y  $3.5$  centímetros, siendo estos tres valores suficientes para conocer el comportamiento del viento, debido a la variación de esta variable, haciendo innecesaria la realización de un mayor número de simulaciones.

Para el estudio del comportamiento de la variable " $l$ ", se realizaron 7 simulaciones con valores de:  $36$ ,  $36.8$ ,  $37.6$ ,  $39.2$ ,  $40$ ,  $41.6$  y  $43.2$  centímetros, donde el borde de ataque del elemento interior es la cota  $0$  y el borde de salida la cota  $40$ , teniendo así, dos valores que se encuentran a una distancia mayor que la longitud total de la cuerda del elemento interior,  $41.6$  y  $43.2$ , tomados debido a la tendencia de aumento mostrada en la velocidad del viento.

Para los valores de ángulo  $\theta$  se utilizaron primeramente valores entre  $6$  y  $10$  grados, pues es el rango de ángulos en los que se encuentran los mayores coeficientes de sustentación del perfil aerodinámico NACA0008, sin embargo al realizar las simulaciones, se presentó un aumento mayor en la velocidad al interior del difusor a valores  $\theta$  más altos, esto, sin llegar a pérdida aerodinámica por parte del elemento interior, por lo que se realizaron 8 simulaciones en total, ampliando el rango de valores de ángulos de  $\theta$  entre  $4$  y  $20$  grados.

De las simulaciones realizadas con cada una de las variables, se utilizaron 3 valores, de acuerdo a los resultados obtenidos de la velocidad del viento en los puntos de referencia ubicados a  $5\text{cm}$  de la superficie más cercana del elemento interior. Los valores utilizados para cada variable fueron: el valor que logró el mayor aumento en la velocidad del viento y un valor próximo anterior y posterior a éste. En total, se utilizaron 9 valores de las variables en estudio: 3 distancias " $s$ ", 3 posiciones " $l$ " y 3 ángulos " $\theta$ ", con los cuales, se realizó un diseño factorial con el propósito de encontrar la combinación de los valores de las variables que lograra generar el mayor aumento en la velocidad del viento en el interior del difusor. Los valores de las variables seleccionados fueron:

| Variable | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 |
|----------|---------|---------|---------|
| $\theta$ | 17.0    | 18.0    | 19.0    |
| $l$      | 39.2    | 40.2    | 41.6    |
| $s$      | 02.0    | 02.5    | 03.0    |

Tabla 2 Valores de las variables del elemento exterior para el diseño factorial

### 3.6 Diseño factorial

En este último conjunto de simulaciones utilizando la dinámica de fluidos computacional, se propuso y realizó un diseño factorial con los 3 valores seleccionados de las 3 variables:  $l$ ,  $s$  y  $\theta$ , con el objetivo de analizar los efectos que las diferentes combinaciones de las variables, relacionadas con la posición del elemento exterior, tienen sobre la velocidad del aire en el interior del difusor y seleccionar aquella con la que se obtenga el mayor incremento en esta velocidad.

Un diseño factorial de variables consiste en analizar experimentalmente el efecto que sobre las variables dependientes tiene la manipulación de más de una variable independiente. Los diseños factoriales manipulan dos o más variables independientes e incluyen dos o más niveles o modalidades de presencia en cada una de las variables independientes (Hernandez Sampieri, 2014). En el presente estudio se experimentaron con las combinaciones de la Tabla 3 generadas por los valores o niveles 1, 2 y 3 de las variables  $l$ ,  $s$  y  $\theta$ , generando un código de identificación ordenado como: ángulo–posición-separación, esto es,  $\theta_i-l_j-s_k$ .

El criterio de selección de los valores o niveles de cada variable se mencionaron en cada una de las secciones en las que se calcularon, sin embargo, para el tercer valor de  $l$ , en el que se utilizó  $l=43.2$  se decidió no incluirlo en el diseño factorial final debido al comportamiento inestable que presentó y será discutido en el Capítulo 4, en sustitución, se utilizó  $l=39.2$ .

|            | $S_1$     |         |           | $S_2$       |           |             | $S_3$     |         |           |
|------------|-----------|---------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|---------|-----------|
|            | $l_1$     | $l_2$   | $l_3$     | $l_1$       | $l_2$     | $l_3$       | $l_1$     | $l_2$   | $l_3$     |
| $\theta_1$ | 17-39.2-2 | 17-40-2 | 17-41.6-2 | 17-39.2-2.5 | 17-40-2.5 | 17-41.6-2.5 | 17-39.2-3 | 17-40-3 | 17-41.6-3 |
| $\theta_2$ | 18-39.2-2 | 18-40-2 | 18-41.6-2 | 18-39.2-2.5 | 18-40-2.5 | 18-41.6-2.5 | 18-39.2-3 | 18-40-3 | 18-41.6-3 |
| $\theta_3$ | 19-39.2-2 | 19-40-2 | 19-41.6-2 | 19-39.2-2.5 | 19-40-2.5 | 19-41.6-2.5 | 19-39.2-3 | 19-40-3 | 19-41.6-3 |

Tabla 3 Valores seleccionados de las variables  $l$ ,  $s$  y  $\theta$ , para su simulación

### 3.7 Comprobación de resultados

Las simulaciones CFD permiten la reducción sustancial de tiempos y costos en las pruebas de nuevos diseños, con la posibilidad de analizar condiciones muy difíciles de experimentar físicamente mediante modelos en túnel de viento, aunado a esto, ofrece una gran flexibilidad para probar pequeñas modificaciones y variaciones a los objetos simulados, evitando utilizar una gran cantidad de modelos físicos.

Sin embargo, en una simulación CFD no siempre es posible llegar a obtener resultados suficientemente precisos y también existe, la posibilidad de obtener resultados erróneos. Es por esto, que es necesario validar los resultados obtenidos en la simulación con resultados confiables.

La validación deseable de los resultados de una simulación CFD de un diseño nuevo siempre será la puesta en prueba del objeto simulado en un túnel de viento o una prueba experimental de campo con un prototipo para comparar los resultados, sin embargo, muchas veces no es posible hacer esto debido a los recursos materiales o económicos disponibles.

La comprobación de los resultados obtenidos en las simulaciones del elemento interior de esta investigación, fueron verificados mediante la comparación de los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil aerodinámico S1223 obtenidos en las simulaciones y los coeficientes de dos fuentes con datos verificados, la primera, un estudio experimental sobre el diseño del perfil S1223 en pruebas en túnel de viento (Seilig y Guglielmo, 1997) y la segunda, la base de datos del departamento de ingeniería aeroespacial perteneciente a la UIUC obtenidos mediante simulaciones utilizando el programa *Xfoil*, por lo tanto, se mantuvo un alto nivel de certidumbre en los resultados obtenidos en esta investigación, sin realizar, una validación experimental en un túnel de viento.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Selección del diseño del elemento interior

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los análisis realizados con el objetivo particular de elegir el diseño del perfil aerodinámico del elemento interior de la selección de tres perfiles propuestos.

##### 4.1.1 Parámetros físicos preliminares

Para la realización del análisis de los perfiles aerodinámicos, fue necesario obtener un número de Reynolds (Ec. 14) de acuerdo a las características y condiciones a las que estarán sometidos dichos perfiles.

Una de las justificaciones de este estudio, consiste en lograr que se puedan utilizar turbinas eólicas en lugares donde las velocidades de viento no son suficientes para operar de manera óptima, es por esto, que la velocidad de viento utilizada en este trabajo es el promedio que se presenta en algunas ciudades con velocidades de viento con cierto potencial; para este caso, se tomó la velocidad promedio del viento de 6m/s en la ciudad de Mérida, Yucatán (Patel, 2006)

El difusor está diseñado para su uso en turbinas no mayores a 3 metros de diámetro; para turbinas de mayor tamaño, el uso de un difusor demandaría mayor material de construcción, torre y cimentaciones muy grandes que pondrían en duda la conveniencia de la implementación de éste. La longitud de cuerda ( $l$ ) se estableció para una turbina de 2 metros de diámetro a una relación de  $l = 0.2D$ , donde  $D$ , es el diámetro de la turbina, por lo que  $l=0.4m$ .

La viscosidad cinemática se ha considerado en condiciones estándar a 20°C de temperatura y a 1 ATM de presión, por lo que  $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu} = \frac{(6 \text{ m/s}) \cdot (0.4 \text{ m})}{1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 158,825 \cong 160,000$$

Con este número de Reynolds se realizaron las pruebas para la selección del elemento interior en el programa *Xfoil*.

#### 4.1.2 Cálculo de los coeficientes de sustentación y arrastre en *Xfoil*

Utilizando el programa *Xfoil* por medio de la interfaz gráfica para *Matlab*, se llevaron a cabo los cálculos de los coeficientes de sustentación y arrastre de los tres perfiles aerodinámicos propuestos para conformar el elemento interior. Se corrió el código y el programa realizó los cálculos mostrando una representación gráfica de los valores de los coeficientes al variar el ángulo de inclinación (Figura 24).

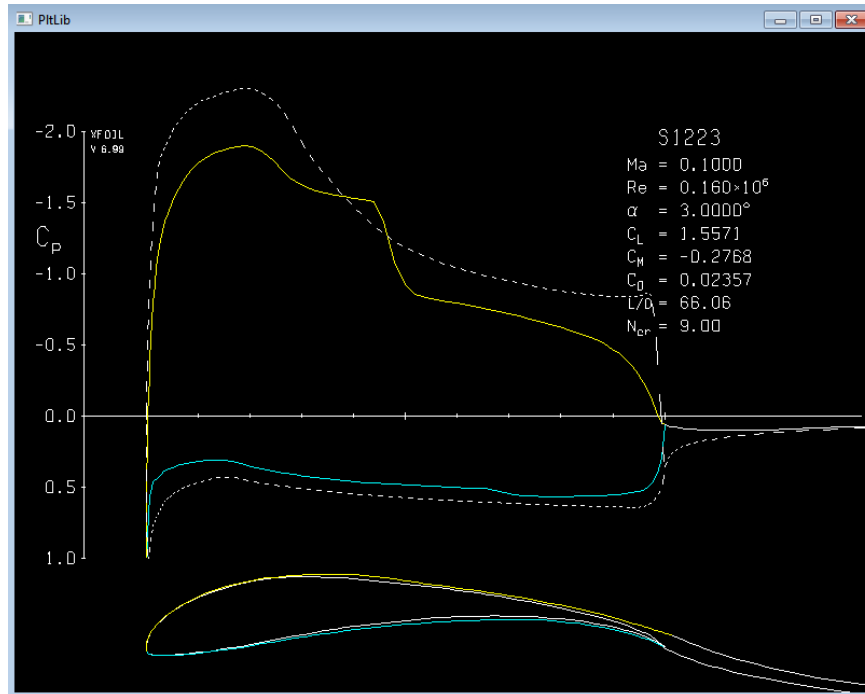


Figura 24 Valores de los coeficientes de sustentación y arrastre, del perfil aerodinámico S1223, al variar el ángulo de inclinación. Se utilizó el programa *Xfoil* por medio de la interfaz gráfica para *Matlab*.

Los resultados fueron procesados en *Matlab* y se representaron gráficamente sus coeficientes de sustentación y arrastre, así como la relación entre estos coeficientes para los tres perfiles seleccionados, Ilustraciones 25 y 26.



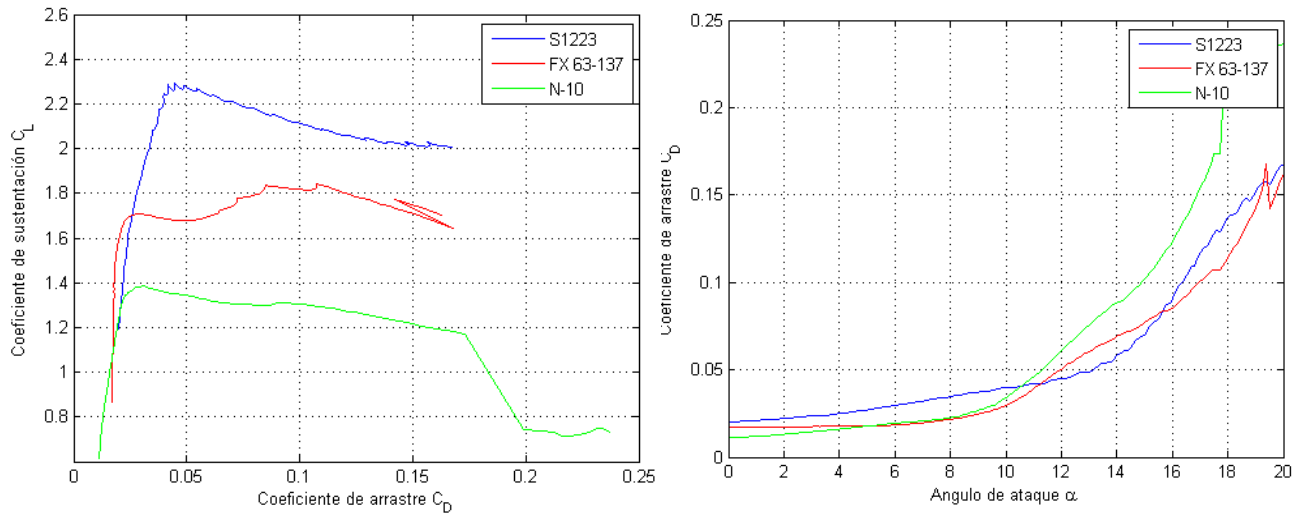


Figura 25 (a) Gráfica del coeficiente de sustentación vs coeficiente de arrastre y (b) Gráfica del coeficiente de arrastre vs ángulo de ataque.

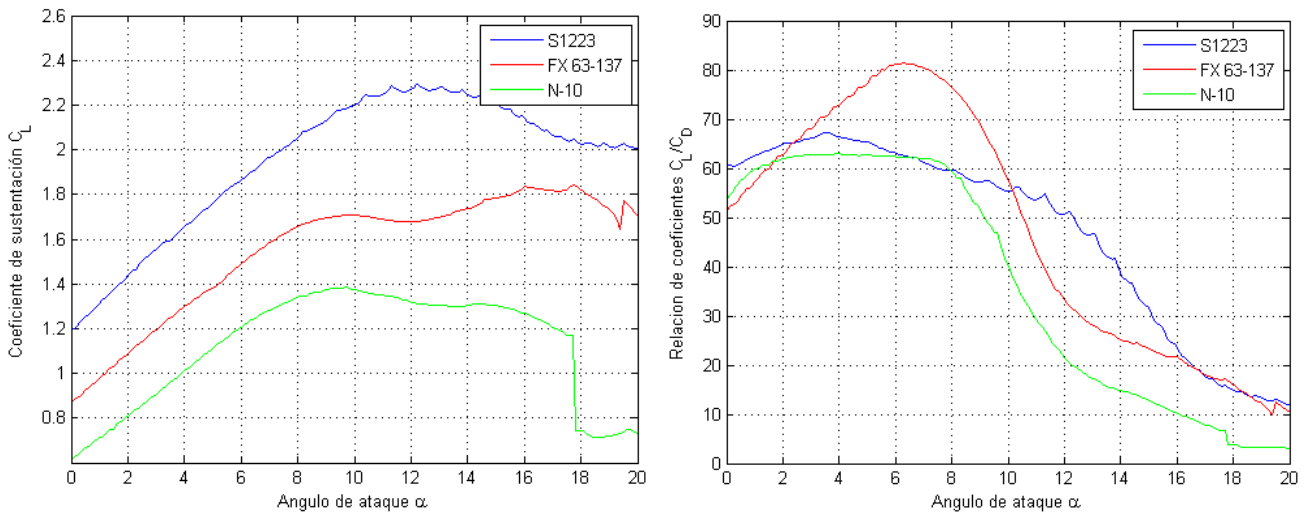


Figura 26 (a) Gráfica del coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque y (b) Gráfica de la relación coeficiente de sustentación/coeficiente de arrastre vs ángulo de ataque.

#### 4.1.3 Selección del perfil

Como consecuencia del análisis de los resultados obtenidos de los tres perfiles simulados en este trabajo con *Xfoil*, se seleccionó para emplear como elemento interior el diseño del difusor del perfil S1223, debido a las siguientes razones:

1. Posee el coeficiente de sustentación más alto de los tres perfiles analizados a cualquier ángulo de inclinación de ataque (Ilustración 26a).

2. Posee un coeficiente de sustentación muy superior a los demás perfiles cuando se tienen los coeficientes de arrastre más bajos, esto indica, que presentará una menor resistencia al flujo de viento, reduciendo de esta manera las fuerzas de fricción y presión sobre la estructura (Ilustración 25a).
3. El coeficiente de arrastre es similar en todos los casos, por lo que no es un factor a considerar por sí mismo en la elección entre estos perfiles (Ilustración 25b).

Si bien, el valor más alto registrado del  $C_L$  del perfil aerodinámico S1223 es alcanzado a un ángulo de ataque de 12 grados, se optó por utilizar un ángulo de ataque de 10 grados, de esta manera, se tiene un mayor margen de correcta operación antes de entrar en pérdida aerodinámica generada por la separación de las corrientes laminares.

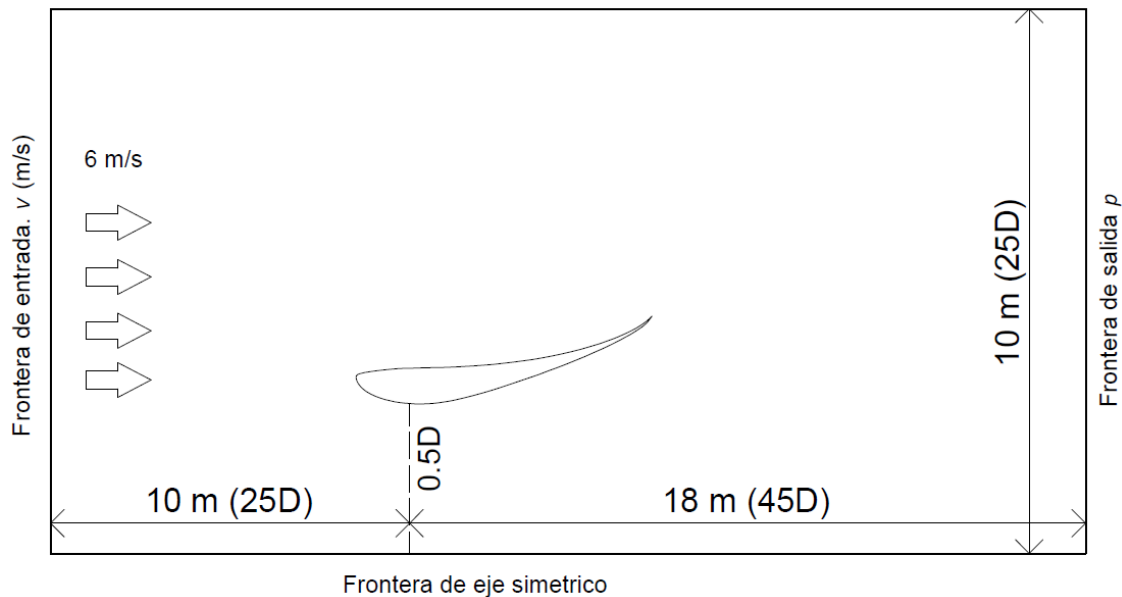
De acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones, se decidió utilizar el diseño del perfil aerodinámico S1223 para el elemento interior del difusor, con un ángulo de ataque fijo de 10 grados y con una longitud de cuerda de 40 cm para una turbina de 2 m de diámetro.

La longitud de 40 cm fue establecida de acuerdo a los resultados obtenidos por Ohya y Karasudani (2010) en los cuales, se demostró un mayor aumento en la velocidad del viento en el interior del difusor cuando existe una relación de la longitud de 0.2 veces el diámetro de las aspas de la turbina eólica.

## **4.2 Posición del plano de las aspas respecto a la cuerda del perfil S1223**

Definido el diseño del elemento interior del difusor, de forma complementaria se calculó la posición del plano de las aspas de una turbina eólica supuesta, respecto a la longitud de la cuerda del perfil aerodinámico del elemento interior. Se encontró la posición que presenta el mayor aumento en la velocidad del viento a lo largo de la sección interior del difusor a diferentes alturas a partir del eje del centro de la turbina eólica.

Para la obtención de los valores de la velocidad del viento en los diferentes puntos, se trazaron 5 ejes de medición paralelos al eje de giro de una turbina eólica supuesta ubicados a distancias de 0.19 m, 0.38 m, 0.57 m, 0.76 m y 0.95 m de su eje, con el propósito de conocer el aumento de la velocidad del viento a diferentes distancias del centro de la turbina, con un interés principal en conocer las velocidades a la altura de las puntas de las aspas. La velocidad de entrada se estableció en 6 m/s y las dimensiones del dominio para realizar la simulación CFD se definieron, por simetría, como se muestra en la Figura 27.

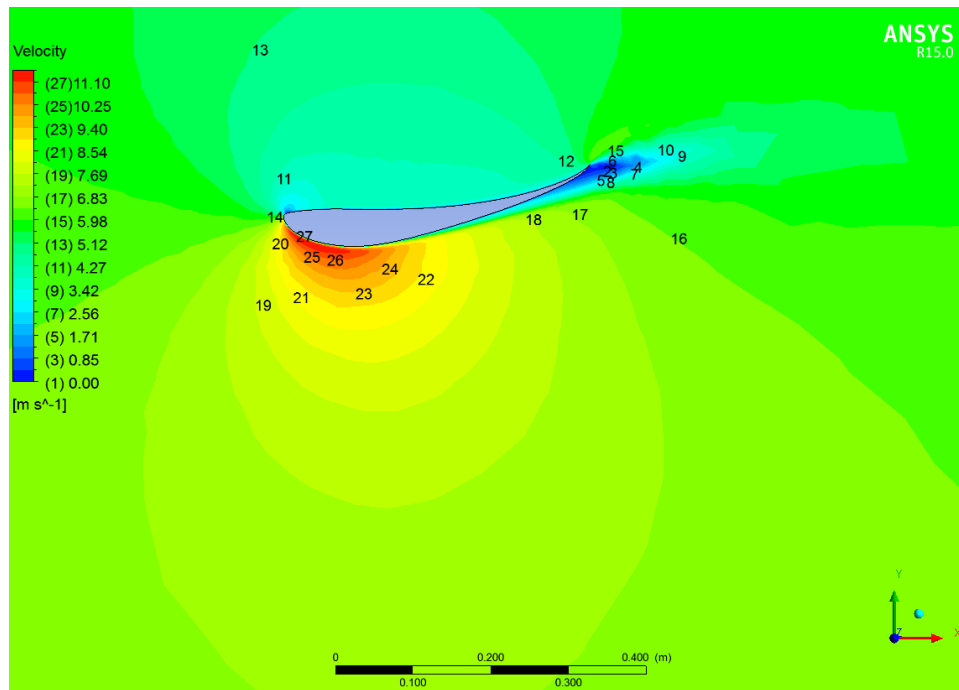


**Figura 27 Dimensiones del dominio (sin escala).**

El cálculo de la posición del plano de las aspas de una turbina supuesta a lo largo del difusor se realizó por medio de una simulación CFD utilizando el Modelo Realizable Sapalart-Allmaras.

El procedimiento para el desarrollo y solución de una simulación CFD, planteada a partir de la sección 2.6.2, consistente en el modelado de la geometría, generación del mallado, definición de modelos, etc., se presenta de forma detallada en el Apéndice A de este trabajo con el propósito de evitar la repetitividad del uso del procedimiento a lo largo de la tesis, aclarando las modificaciones y las condiciones particulares utilizadas en cada caso de simulación.

Como resultado de esta primera simulación CFD, se presentó un aumento de velocidad local del viento en la zona de la comba del perfil aerodinámico al interior del difusor que comprende desde el borde de entrada hasta 1/3 de la longitud de la cuerda del mismo, como se puede observar en la Figura 28, demostrando un incremento en el potencial de generación de energía.



**Figura 28** Contorno de velocidades del perfil S1223 representando el aumento de la velocidad del viento en el interior del difusor.

Los valores de las velocidades de viento más altas ubicadas a lo largo de los ejes de medición se pueden observar en la Figura 29. Es posible determinar que los puntos en donde se presentan las velocidades de viento más altas en todos los ejes de medición, se encuentran ubicados a una distancia del 10% de la longitud del perfil S1223 desde su borde de ataque. Así mismo, la velocidad del viento más alta con valor de 9.66 m/s se presentó en el eje de medición que se encuentra a una distancia de 0.95 m del eje de rotación de una turbina eólica supuesta, esta distancia coincide con la posición de las puntas de las aspas de la turbina eólica.

El aumento en la velocidad del viento al interior del difusor utilizando como elemento interior el perfil aerodinámico S1223, generó por lo tanto, un aumento de 1.61 veces

la velocidad del viento de entrada al sistema de 6 m/s, a la altura de las puntas de las aspas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la posición idónea del plano de las aspas de una turbina eólica supuesta, se encontró a una distancia del 10% de la longitud del elemento interior del difusor, esto es, a 0.04 m del borde de ataque del perfil S1223.

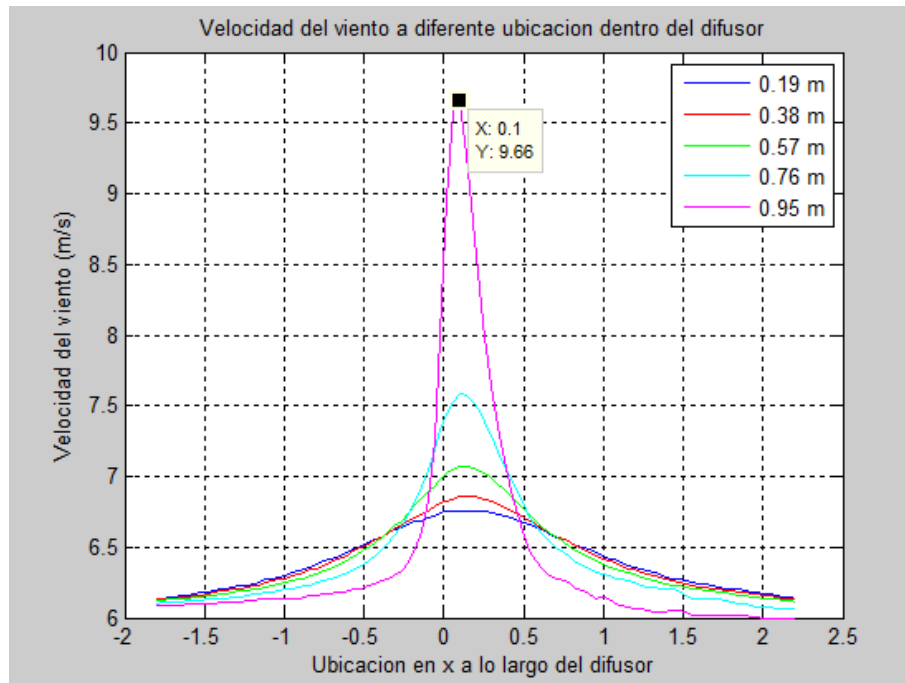


Figura 29 Velocidades del viento en el interior del difusor a diferentes distancias al centro del eje de una turbina eólica

#### 4.2.1 Comprobación de resultados

Para garantizar un alto grado de certidumbre en los resultados obtenidos en esta investigación y la veracidad de las simulaciones CFD realizadas, se realizó la comparación de los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil S1223 obtenidos por medio de una simulación CFD en el programa *ANSYS Fluent* y los valores de dos fuentes de referencias confiables. Se tomaron como referencias los coeficientes de la base de datos de la UIUC y los coeficientes de la investigación titulada *High-Lift Low Reynolds number airfoil design* (Seilig y Guglielmo, 1997).

El procedimiento para el desarrollo y solución de una simulación CFD ha sido planteada con anterioridad en la sección 2.6.2 y se presenta de forma detallada en el

Apéndice A de este trabajo, para el caso específico de las siguientes simulaciones, se cambió la orientación del perfil aerodinámico, invirtiéndolo horizontalmente a partir de su posición original; la longitud de la cuerda del perfil se modificó para que tuviera dimensión unitaria (1m), variando su ángulo de ataque de  $0^\circ$  a  $12^\circ$  y haciendo una simulación a cada 2 grados; así mismo, la simulaciones se realizaron a 200,000 Re, numero de Reynolds utilizado en las pruebas en túnel de viento y en la base de datos de la UIUC, de tal manera que las fuerzas calculadas en la simulación pudieran ser equivalentes y permitieran su comparación.

En la prueba de la investigación de Seilig se utilizó un túnel de viento de 2.8x4.0 pies de sección y 8 pies de largo, el modelo del perfil aerodinámico tenía una longitud de cuerda de 12 pies, la velocidad del viento fue controlada para poder establecer con estas dimensiones un número de Reynolds de 200,000.

Para los datos referenciados de la base de datos de la UIUC, los coeficientes se calcularon por medio del uso del programa *Xfoil*, usando las coordenadas del perfil S1223 de manera adimensional, estableciendo el número de Reynolds en 200,000.

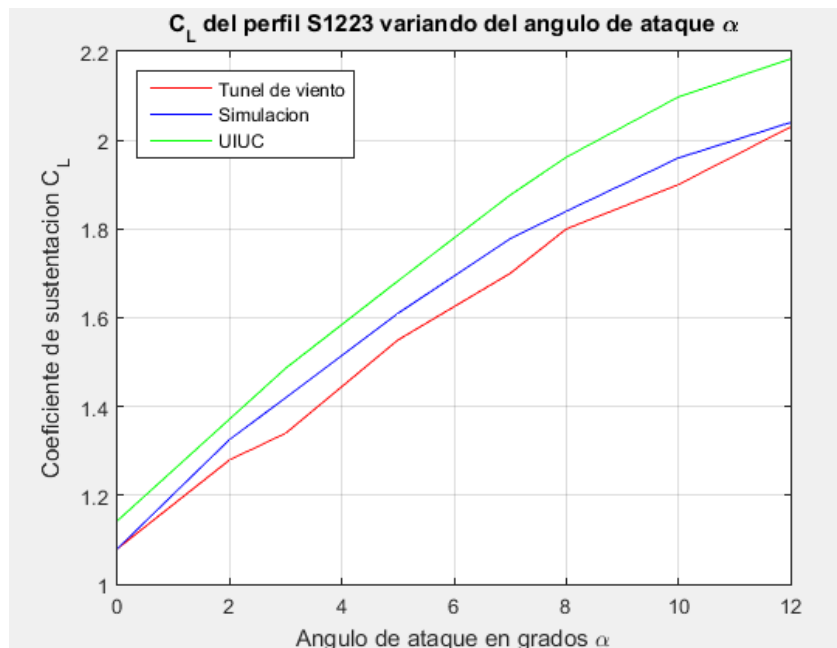


Figura 30 Comparación de  $C_L$  de referencia para la validación de la simulación CFD

Al comparar los coeficientes de las dos fuentes de referencia y los obtenidos de las simulaciones de esta investigación en la Figura 30, se observó que las curvas de

coeficientes obedecen a un comportamiento similar con resultados muy parecidos. Existe un error porcentual promedio del 3% equivalente a un error absoluto de 0.04 puntos del coeficiente de sustentación.

### 4.3 Variables del elemento exterior

#### 4.3.1 Separación de la variable “ $s$ ”

Para la elección de los valores de la variable “ $s$ ”, se definieron 3 valores iniciales de estudio separados por un centímetro, iniciando con  $s=1.5\text{cm}$ , el cual, es el valor menor posible debido a que, de ser menor, la curvatura de la silueta de la superficie del elemento interior en su borde de salida haría contacto con la superficie del elemento exterior que se encuentra inclinado a  $8^\circ$ . Considerando que a una distancia mayor a  $s=4\text{cm}$  los efectos sobre la aceleración del viento disminuyen considerablemente por la gran separación entre ambos elementos, por lo tanto, los valores “ $s$ ” se definieron como:  $s=1.5, 2.5$  y  $3.5$  centímetros.

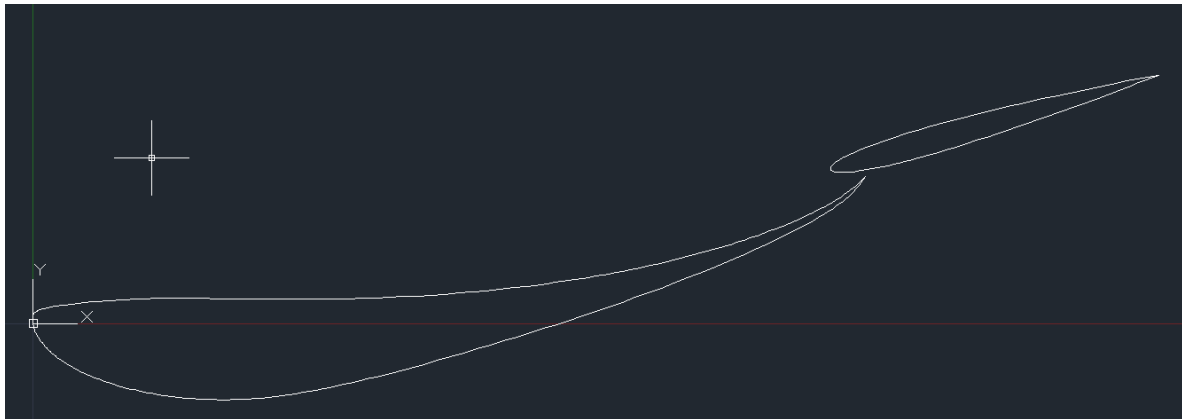


Figura 31 Sección de la geometría inicial en AutoCAD del difusor a  $s=1.5$

La geometría mostrada en la Figura 31 se definió con el elemento exterior a  $\theta=8^\circ$ ,  $s=1.5\text{cm}$ ,  $l=0.8\text{cm}$  para en las siguientes simulaciones variar a  $s=2.5$  y  $s=3.5$ .

El procedimiento para el desarrollo y solución de la simulación CFD se presenta de forma detallada en el Apéndice A de este trabajo, todos los parámetros de la simulación permanecieron iguales, a excepción de la geometría del modelo en el dominio, al cual, se le agregó el elemento exterior.

En las imágenes de contornos de velocidades obtenidas como resultado de las simulaciones, se puede observar que:

- a) Cuando el elemento exterior se encuentra muy cercano a la superficie del elemento interior, la velocidad del viento disminuye viento abajo en la cercanía del borde de salida. A pesar de que existe un aumento de velocidad del 67.83% en relación a una turbina eólica sin presencia del elemento interior y de un 4.24% en presencia del elemento interior únicamente, puede suponerse la obtención de resultados muy similares, sustituyendo el elemento exterior por el alargamiento de la cuerda ( $c$ ) del elemento interior equivalente a la longitud de la suma de la cuerda de ambos elementos (Figura 32a), y
- b) Cuando el elemento exterior se encuentra a  $s=3.5$  (Figura 32c) se presenta un aumento de velocidad (color amarillo) entre ambos elementos, generado por la fuerza de sustentación propia de su geometría, sin embargo debido a la lejanía del elemento interior, el efecto es poco percibido, efecto que si ayuda a acelerar el viento en el borde de salida del elemento interior a una separación  $s=2.5$  (disminución de la zona azul de la Figura 32b).



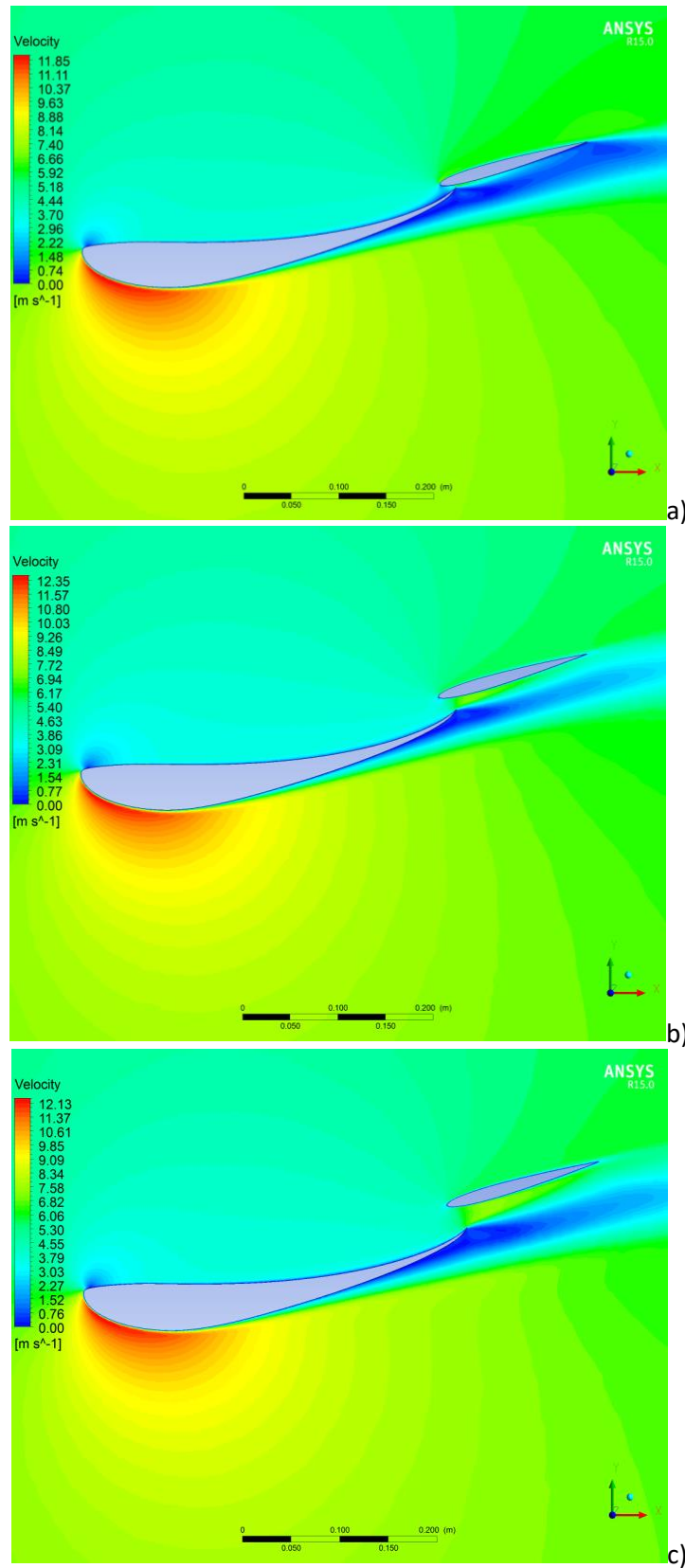


Figura 32 Diferencias en los contornos de velocidad resultado de las simulaciones CFD a diferentes valores de la variable  $s$ :  
a) 1.5 b) 2.5 y c) 3.5

El comportamiento de las curvas de velocidad a diferentes valores de “ $s$ ” es el mismo en las tres separaciones, así mismo, en  $s=2.5$  se presentó la velocidad máxima del viento con un valor de 10.07 m/s en las puntas de las aspas (Figura 33).

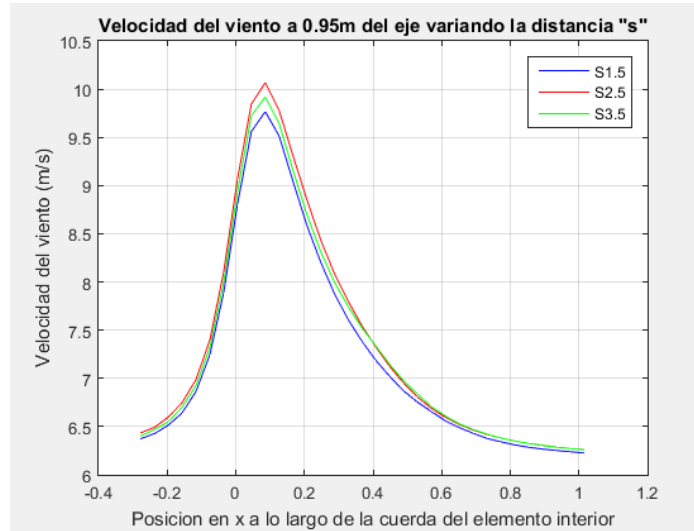


Figura 33 Curvas de velocidad de viento en el interior del difusor a diferentes valores de  $s$

La tendencia en la velocidad del viento en el interior del difusor está marcada por una curva en la que la velocidad va aumentando al irse separando ambos elementos hasta llegar a una separación máxima, alcanzado la mayor velocidad del viento posible, para posteriormente volver a descender (Figura 34).

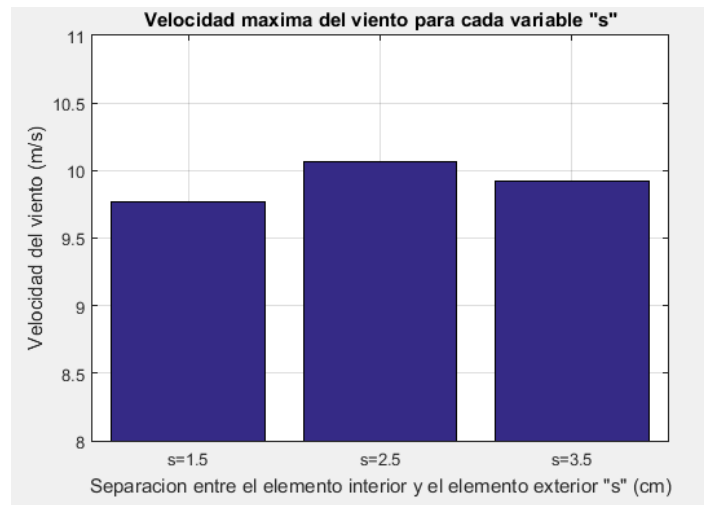


Figura 34 Velocidades máximas alcanzadas en las puntas de las aspas a diferentes  $s$

Conforme a los resultados, se seleccionaron los valores cercanos a la separación de 2.5 centímetros,  $s=2$ ,  $s=2.5$  y  $s=3$  para la combinación de variables en el diseño factorial.

#### 4.3.2 Posición de la variable “ $l$ ”

Para el estudio del comportamiento de la variable “ $l$ ”, se realizaron 7 simulaciones con valores de: 36, 36.8, 37.6, 39.2, 40, 41.6 y 43.2 centímetros, donde el borde de ataque del elemento interior es la cota 0 y su borde de salida la cota 40, teniendo así, dos valores que se encuentran a una distancia mayor que la longitud total de la cuerda del elemento interior, 41.6 y 43.2, tomados debido a la tendencia de aumento mostrada en la velocidad del viento.

Las simulaciones CFD siguieron el mismo procedimiento mencionado en la sección anterior (Apéndice A), en esta ocasión, la variación en la posición del elemento exterior en cada una de las 7 simulaciones fue la variable  $l$ , por lo tanto,  $s$  y  $\theta$  se mantuvieron constantes, como 2.5 cm y  $6^\circ$  respectivamente.

Las velocidades más altas alcanzadas en el interior del difusor se presentaron en las posiciones de  $l$  más cercanas a su borde de salida, de las cuales, en  $l=41.6$  se obtuvo la velocidad del viento más alta con un valor de 9.98 m/s (Figura 35 y 37).

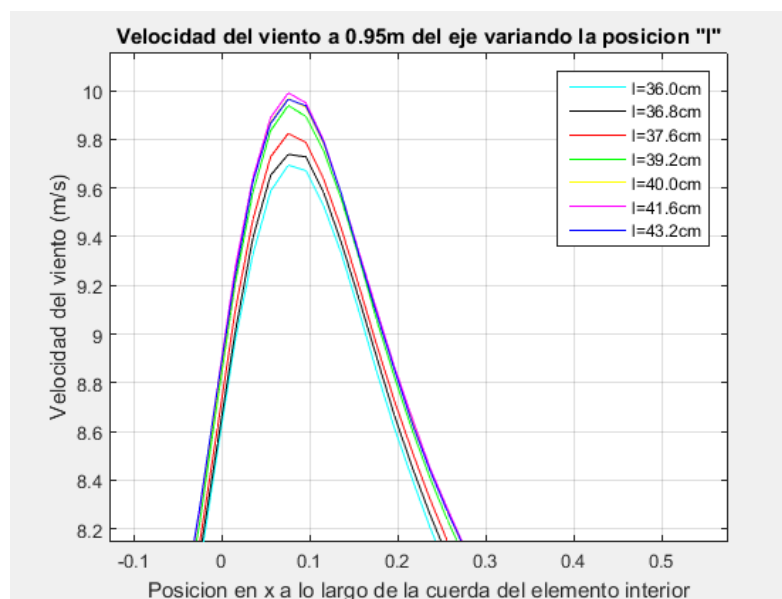


Figura 35 Curvas de velocidad de viento en el interior del difusor a diferentes valores de  $l$

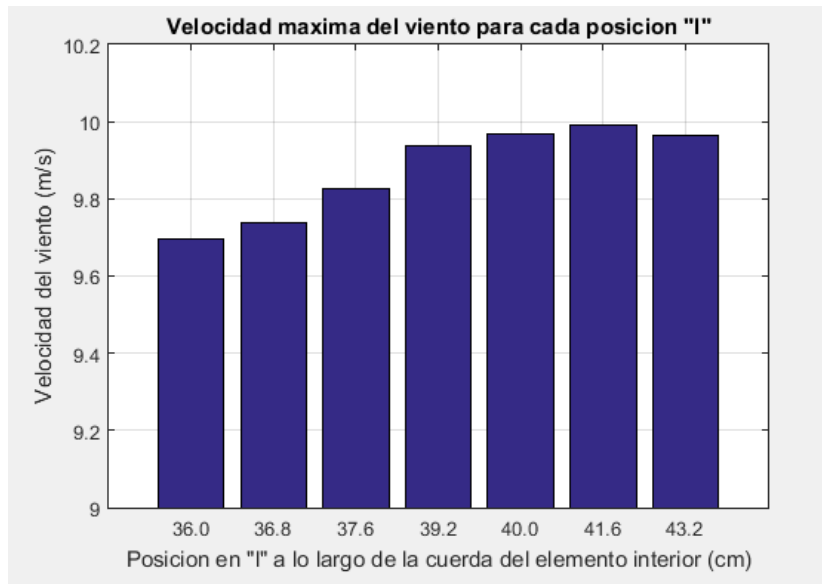


Figura 36 Velocidades máximas alcanzadas en las puntas de las aspas a diferentes  $l$

En las imágenes de contorno (Figura 37) se pueden observar los cambios en la velocidad del viento en el borde de ataque y salida de ambos elementos y la influencia de la posición  $l$  en la máxima velocidad.

Por las velocidades más altas obtenidas, se pudo considerar que la influencia que tiene la variable  $l$  en la velocidad del viento al interior del difusor, es menor que la influencia que puede tener la variable  $s$ , sin embargo, se esperan mejores resultados, cuando las variables actúen en conjunto, utilizando la combinación de los valores óptimos de cada una de las variables.

Se seleccionó el valor  $l=41.6\text{cm}$ , ubicado en la cota máxima de la cuerda del elemento interior, así como los valores próximos menor y mayor,  $l=40.0\text{cm}$ , y  $l=43.2\text{cm}$ , para utilizarlas en las simulaciones de combinación de variables en el diseño factorial.

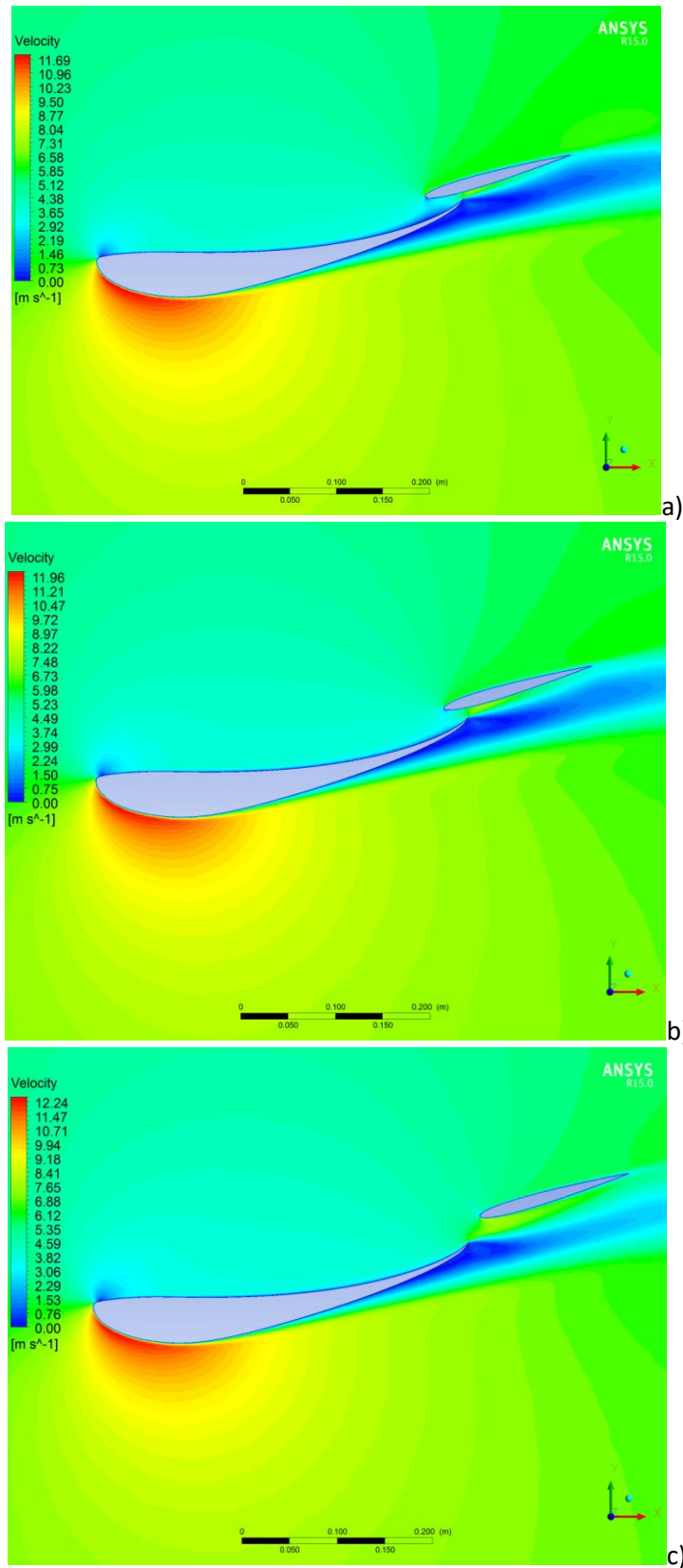


Figura 37 Diferencias en los contornos de velocidad resultado de las simulaciones CFD a diferentes valores de la variable  $l$ : a) 36, b) 37.6, c) 41.6

### 4.3.3 Angulo de la variable “ $\theta$ ”

Se realizó una serie de simulaciones para la obtención de los valores de ángulo  $\theta$  en los cuales la velocidad del viento al interior del difusor fueran los más altos. En un principio se utilizaron los valores de  $\theta$  entre 6 y 10 grados, considerando que es el rango de ángulos en los que se encuentran los valores de coeficientes de sustentación más altos del perfil aerodinámico de su silueta (Figura 22), sin embargo, al realizar las simulaciones, se comprobó que se presenta un mayor aumento en la velocidad al interior del difusor a valores de  $\theta$  más altos, esto se da, sin llegar a la pérdida aerodinámica del elemento interior. El cambio en las velocidades de viento obtenidas del elemento exterior en ángulos más altos, es atribuido a la presencia del elemento interior, el cual influye en la trayectoria de las corrientes de aire, así como en su velocidad.

Por lo tanto, como ultima variable a analizar, se realizaron 8 simulaciones con valores de  $\theta$  de entre 4 y 20 grados. Se realizaron las simulaciones con el mismo procedimiento señalado en el apéndice A bajo las mismas condiciones, se varió la posición del ángulo de 4 a 20 grados a cada 2 grados, con valores fijos de  $l$  y  $s$  de 37.6 cm y 2.5 cm respectivamente.

Se presentan gráficamente los valores de las velocidades máximas alcanzadas para cada valor de ángulo  $\theta$ , el cual alcanza un máximo en  $\theta=18$  (Figura 38).

Igualmente, en la Figura 39 se presenta el comportamiento de la velocidad del viento a lo largo de la cuerda del elemento interior en la cercanía del punto donde se generan las velocidades más altas.

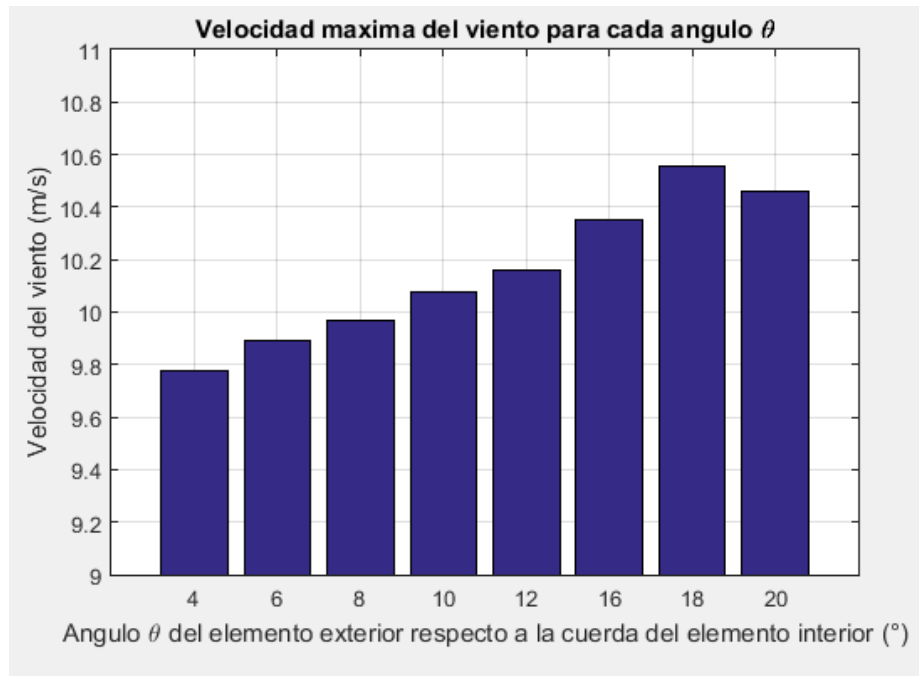


Figura 38 Velocidades máximas alcanzadas en las puntas de las aspas a diferentes  $\theta$

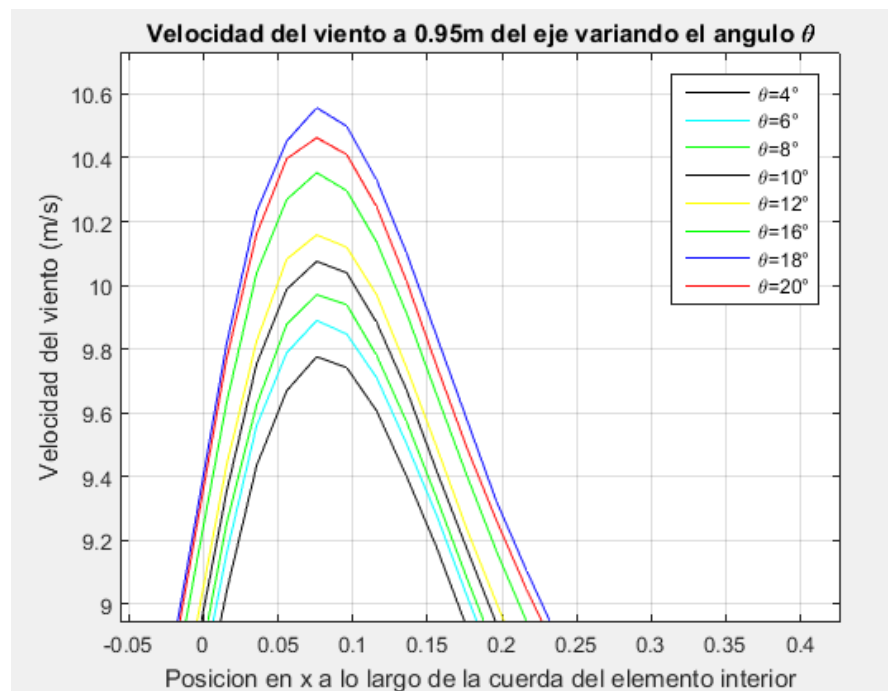


Figura 39 Curvas de velocidad de viento en el interior del difusor a diferentes valores de  $\theta$

En la Figura 40 se muestran los contornos de velocidad de las simulaciones realizadas, es posible apreciar que, a pesar de aumentar el ángulo de ataque del elemento exterior, en ninguna ilustración muestra pérdida de sustentación, sin

embargo, una zona azul muestra un ligero aumento en la parte inferior del borde de salida del elemento interior, esto representa una disminución en la velocidad del viento, provocando una disminución en la circulación del aire en esa región (Figura 40c).

Un ángulo de ataque del elemento exterior de 18 grados es muy superior al ángulo de ataque de 8 grados en el cual, la fuerza de sustentabilidad generada por su propia silueta es la más alta, sin embargo, el aumento en la sustentabilidad en el elemento exterior no es la finalidad de su presencia en el sistema del difusor. Un ángulo mayor genera una zona de baja presión en la parte posterior del difusor, no obstante, al aumentar el ángulo de ataque del elemento exterior con valores mayores a los 18 grados, genera un aumento en la vorticidad en la zona del borde de salida del elemento interior, esto a su vez, provoca la separación del flujo laminar de la superficie del elemento interior produciendo de esta manera, pérdida aerodinámica y reduciendo consecuentemente el aumento en la velocidad dentro del difusor.

Por las velocidades alcanzadas al interior del difusor se eligieron los ángulos de 17, 18 y 19 grados para la formación de las simulaciones del diseño factorial.



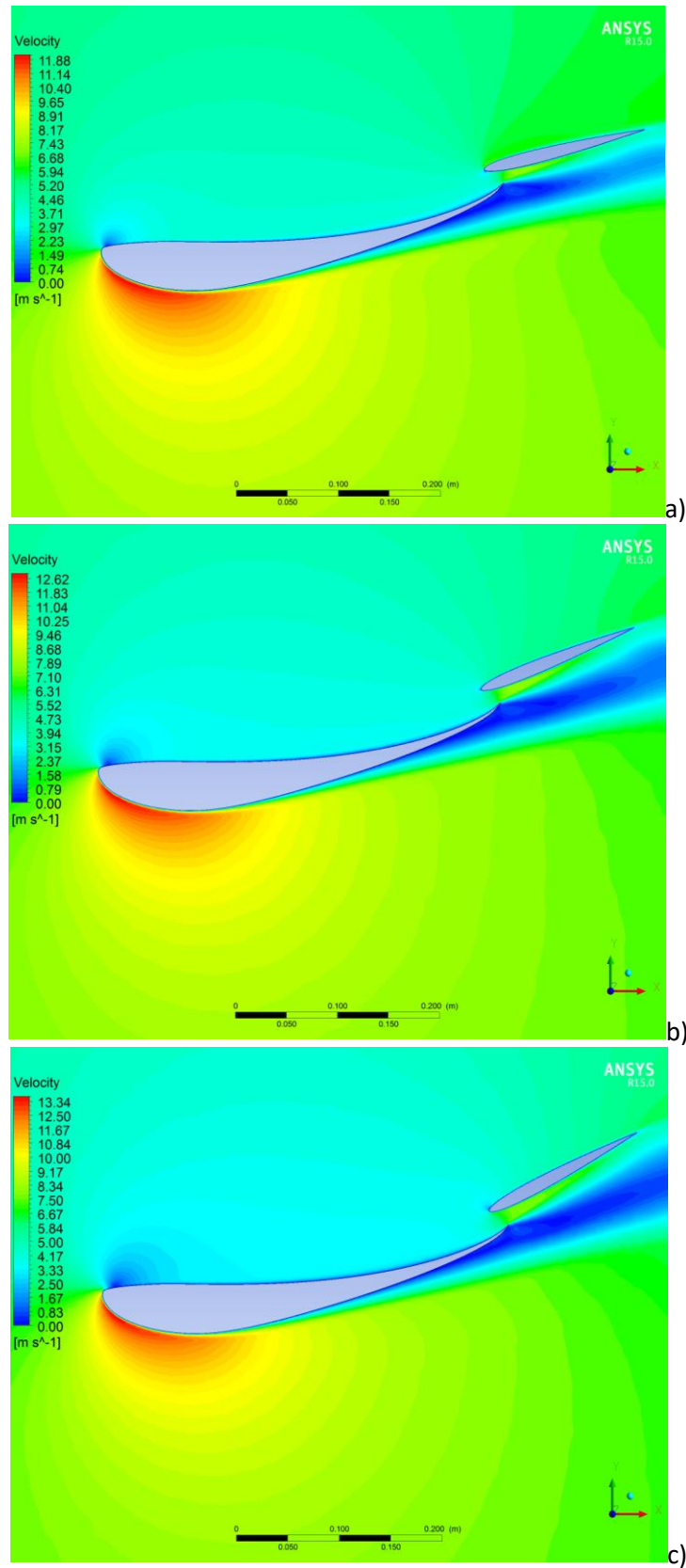


Figura 40 Diferencias en los contornos de velocidad resultado de las simulaciones CFD a diferentes valores de la variable  $\theta$ : a) 4, b) 10 y c) 18

#### 4.4 Combinación óptima de variables

Se realizaron 27 simulaciones CFD siguiendo el procedimiento detallado en el Apéndice A y adecuando la geometría para cada uno de los diferentes arreglos de los elementos; en cada simulación se cambió la posición del elemento exterior según la Tabla 3.

La velocidad de viento máxima alcanzada fue de 10.67 m/s utilizando el arreglo “19-40-2.5”. Esta velocidad de viento es un metro por segundo más alta que la alcanzada por el difusor de un solo elemento interior con forma de perfil S1223 y un aumento del 77% respecto a la velocidad de entrada de 6 m/s de una turbina eólica sin difusor a alturas cercanas a la de las puntas de las aspas. Las velocidades máximas alcanzadas por cada arreglo se muestran en la Figura 41.

En la Figura 42 se muestra un comportamiento similar en la velocidad del viento a lo largo de la cuerda del elemento interior en todos los arreglos, sin embargo, el punto de la velocidad máxima ha sido modificado ligeramente en algunos casos variando entre el 7% y 9% de la cuerda. Los arreglos con velocidades más altas fueron el conjunto 19-40-2.5, seguido del 19-39.2-3 y del 17-41.6-2.5.

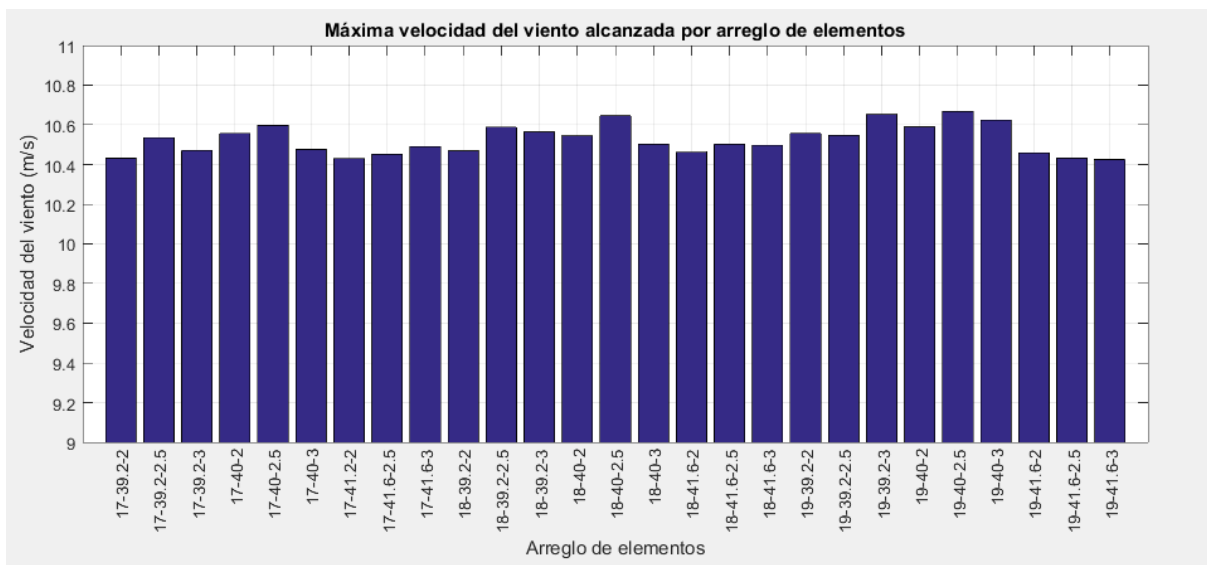
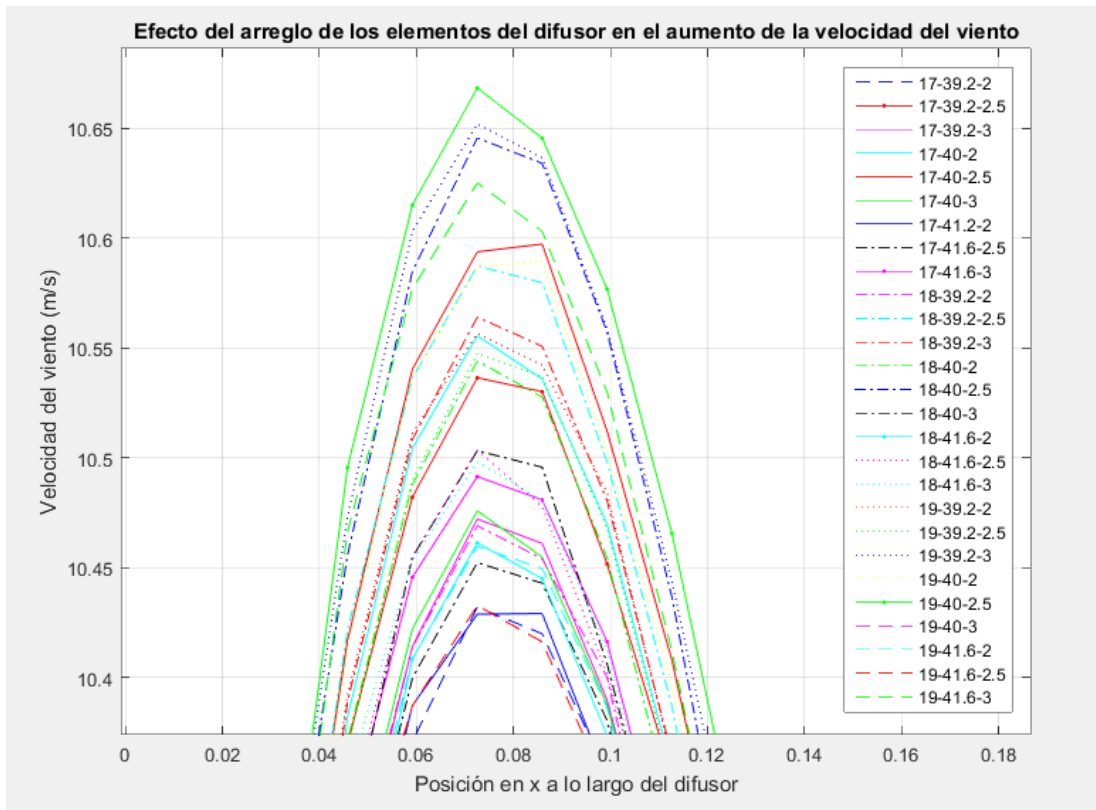


Figura 41 Velocidades máximas del viento por arreglo de elementos



**Figura 42 Comportamiento de la velocidad del viento en los diferentes arreglos**

## CAPITULO V

# CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de esta investigación experimental realizada en gran parte por simulaciones CFD, han demostrado que el difusor de doble elemento propuesto por este estudio, es capaz de generar un aumento en la velocidad del viento localmente, permitiendo de esta manera, aumentar la eficiencia de mini turbinas eólicas en sitios con velocidades de viento promedio de 6 m/s.

Así mismo, se demostró que el grado del aumento en la velocidad del viento se encuentra relacionado con la posición de los elementos que conforman el difusor. El ángulo, la separación y la ubicación del elemento exterior en relación al elemento interior, son variables que afectan directamente la velocidad del viento en las cercanías del sistema del difusor:

El ángulo del elemento interior genera un mayor aumento en la velocidad del viento al aumentar su grado de apertura, un ángulo mayor genera una zona de baja presión en la parte posterior del difusor, no obstante, al aumentar el ángulo de ataque del elemento exterior con valores mayores a los 18 grados, genera un aumento en la vorticidad en la zona del borde de salida del elemento interior, creando una separación de las corrientes laminares en la capa límite de la silueta del elemento interior y reduciendo el aumento en la velocidad dentro del difusor.

La separación idónea del elemento exterior en relación al elemento interior se encuentra a 2.5 cm. Cuando el elemento exterior se encuentra muy cercano a la superficie del elemento interior existe un aumento de velocidad del viento, sin embargo, por la gran cercanía entre estos, puede suponerse la obtención de resultados muy similares, sustituyendo el elemento exterior por el alargamiento de la cuerda ( $c$ ) del elemento interior equivalente a la longitud de la suma de la cuerda de ambos elementos. Por otra parte, cuando el elemento exterior se encuentra muy separado del elemento interior, por la lejanía de su ubicación, el efecto es poco percibido.

La posición del elemento exterior a lo largo de la cuerda del elemento interior, fue la variable que presentó el menor aumento en la velocidad de viento en comparación a las otras dos variables, teniendo como la posición óptima, justo el borde de salida del elemento interior, esto debido a que, en esta ubicación, el elemento interior no obstruye el paso de la corriente del viento desde el interior del difusor hacia el elemento exterior.

Igualmente, se pudo concluir que los valores de las variables con los que se registraron los valores más altos de las velocidades de viento en sus estudios individuales, concuerdan con los mismos valores utilizados en la combinación de variables, con los que se alcanzó la velocidad de viento más alta por el sistema del difusor.

Tomando los resultados obtenidos en esta tesis, el diseño del difusor de dos elementos para una mini turbina eólica de 2 metros de diámetro, se definió con las siguientes características: un elemento interior con forma de perfil aerodinámico modelo S1223 de 40 cm de longitud y un ángulo de ataque de 10 grados; un elemento exterior con forma de perfil aerodinámico modelo NACA0008 de 20 cm de longitud, inclinado a un ángulo de 19 grados, ubicado en el borde de ataque y a una separación de 2.5 cm de la superficie más cerca del elemento interior.

La velocidad de viento máxima alcanzada por el arreglo seleccionado "19-40-2.5", fue de 10.67 m/s, esto representa un aumento de hasta 77% de la velocidad original de entrada al sistema de 6 m/s; estas velocidades alcanzadas se encuentran ubicadas en las cercanías de la superficie del elemento interior, esto es, a una separación de 5 cm, distancia en la cual se encontrarían las puntas de las aspas de una supuesta turbina eólica.

Es posible considerar que la incorporación de un elemento exterior al difusor no genere una ganancia significativa en la velocidad del viento, ya que la sola presencia del elemento interior, es capaz de generar un aumento en la velocidad del viento, alcanzando velocidades máximas de hasta 9.6 m/s, tan solo un metro sobre segundo menor al mejor valor obtenido en este trabajo. Así mismo, la diferencia en la velocidad del viento entre las combinaciones de variables del elemento exterior

estudiadas en el diseño factorial, demostró que entre la combinación que generó la velocidad más baja y la que generó la velocidad de viento más alta, existe únicamente una diferencia de 0.20 m/s. Sin embargo, si se considera que la potencia generada por una turbina eólica tiene una relación cúbica con la velocidad del viento, es posible considerar la conveniencia del uso de un difusor de doble elemento, ya que un ligero aumento en la velocidad del viento, conllevaría un aumento mayor en la potencia generada por la turbina, esto, teniendo en cuenta un estudio posterior de factibilidad económica y de generación energética.

A falta de poder validar experimentalmente en un túnel de viento el diseño del difusor completo, se consideró adecuado validar con respecto al error obtenido entre las fuentes de referencia y la simulación del perfil S1223. De tal modo que se compararon los resultados obtenidos en este trabajo con los coeficientes de sustentación del elemento interior del difusor en una prueba de túnel de viento y en una simulación en *Xfoil* realizadas por Seiling (Seilig y Guglielmo, 1997) y la UIUC (Illinois s.f.), respectivamente, obteniéndose un error absoluto promedio de 0.04 en los coeficientes de sustentación.

Finalmente, con el objetivo de complementar y a su vez validar los resultados de esta investigación, se propone un estudio físico en túnel de viento sobre un modelo a escala del difusor utilizando una turbina eólica en su interior, con el objetivo de poner a prueba los posibles efectos que pueda tener la presencia de la turbina eólica sobre el comportamiento en la velocidad del viento en el interior del difusor. Igualmente, sería necesario, un estudio de factibilidad económica, considerando los materiales utilizados para la construcción del difusor y las adecuaciones necesarias en las dimensiones de la torre y cimentación.

## APENDICES

### Apéndice A. Procedimiento para la realización de una simulación CFD

Para la realización de las simulaciones de esta investigación, se utilizó el procedimiento ilustrado en la sección 2.6.2 aplicado a la guía del manual del propio programa de simulación empleado. Para el desarrollo de las geometrías, se utilizó el programa AutoCAD en su versión 2012 y para los pasos necesarios para las simulaciones se utilizó un conjunto de programas contenidos en ANSYS 15.

Los pasos de simulación detallados se organizaron como: Modelado de la geometría, generación del mallado, propiedades y modelos de turbulencia, solución y post proceso.

#### Modelado de la geometría

##### Generación de la geometría en AutoCAD

El dibujo de las geometrías, que incluyen los objetos sólidos y el espacio del dominio donde se ubican los objetos, se realizaron con el programa Autodesk AutoCAD 2012 (Autodesk, 2016). La geometría de los perfiles aerodinámicos tomó como referencia los valores de coordenadas geométricas obtenidos de la base de datos de la UIUC (Illinois s.f.). Para ser utilizado con las herramientas de AutoCAD fue necesario un tratamiento previo de formato y limpieza del archivo “.dat”, el cual consistió en el borrado de elementos, espacios y títulos innecesarios, quedando únicamente los valores de “x” e “y” separados por comas (Figura 43).

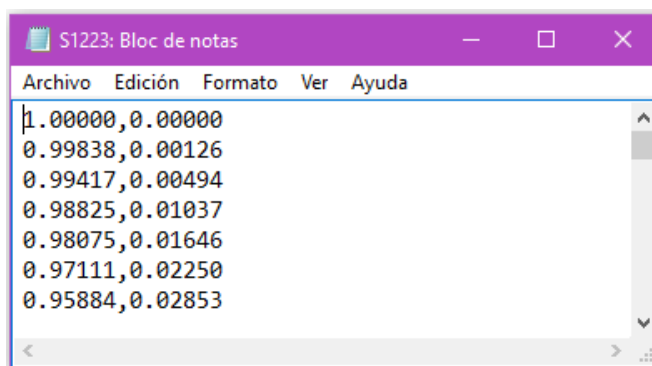


Figura 43 Coordenadas de la geometría del perfil S1223

En un documento nuevo abierto en AutoCAD, se activó la herramienta “*Spline*”, la cual, permite dibujar una serie de líneas curvas generadas por puntos especificados por medio de coordenadas; después de activar el comando, se copió y pegó directamente las coordenadas del archivo “.dat” del perfil aerodinámico en la barra de comandos (Figura 44), esto generó la geometría deseada teniendo como origen las coordenadas (0,0), un ángulo de 0° y una longitud de 1 unidad.

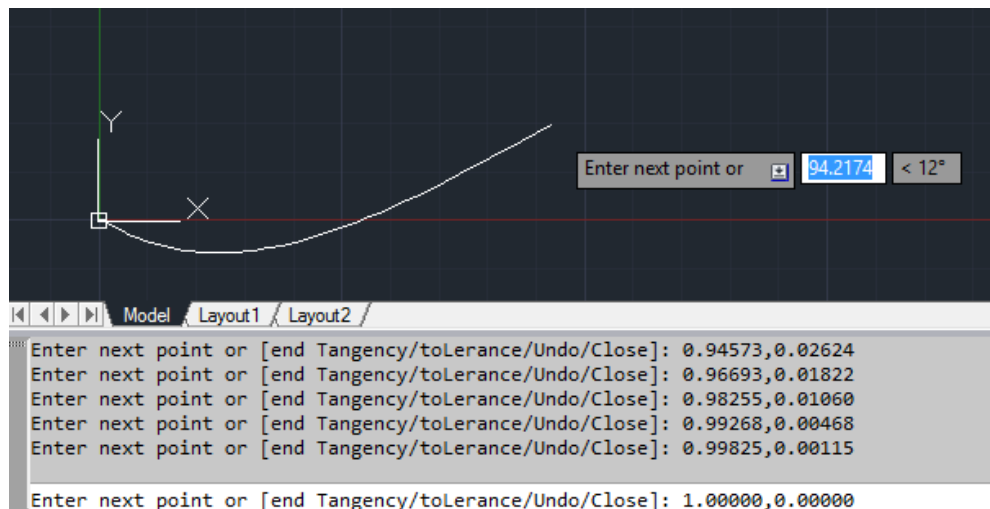


Figura 44 Generación de la geometría por medio de coordenadas utilizando el comando "Spline"

Para adecuar la orientación, dimensión y posición del perfil aerodinámico, se utilizaron los comandos: “*Rotate*”, “*Scale*” y “*Move*” respectivamente. Utilizando estos mismos comandos, se adecuaron las diferentes geometrías simuladas a lo largo de la tesis cambiando su ángulo de ataque, la posición a lo largo de la cuerda del elemento exterior y la separación entre ambos elementos.

Posteriormente se procedió a la elaboración de un dominio de forma rectangular simétrica, cuyo eje de simetría se encuentra ubicado en el borde del límite inferior que corresponde al eje de rotación de una turbina eólica situado en el centro del difusor.

Tomando en cuenta que el diámetro de la turbina eólica propuesta para el difusor es de 2 metros, se ubicó como marca de referencia para trazar la línea del límite inferior del dominio, el punto localizado a una distancia de 1 metro entre la superficie más cercana del elemento interior y el eje de rotación imaginario de la turbina eólica como



se muestra en la Figura 45. Ubicado este punto se trazó una línea hacia la izquierda de 10m (25D) y una línea hacia la derecha de 18m (45D), formando el límite inferior del dominio.

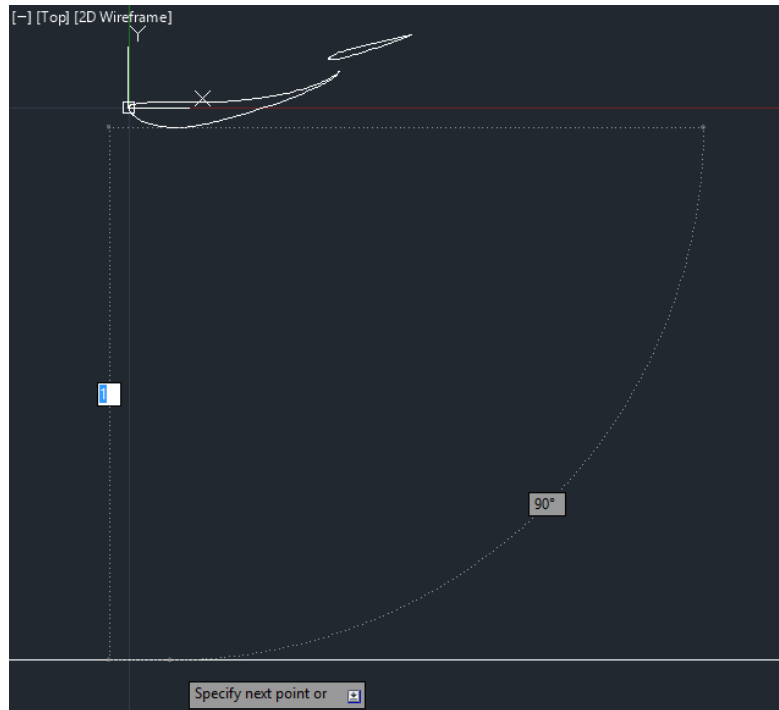


Figura 45 Distancia entre el elemento interior y el límite inferior del dominio

Con el eje de simetría como base del dominio, se dibujó el rectángulo completo con medidas de 28 x 10 metros como se muestra en la Figura 27 de la sección 4.3. Concluyendo el proceso de dibujo de las geometrías en AutoCAD, se procedió con el almacenamiento y exportación del dibujo a un archivo reconocible por el programa ANSYS, mediante las opciones “Export”, “Other programs” y selección el tipo de archivo “.iges”

### Creación de Superficies con Design Modeler

A continuación, fue necesario crear las superficies que deberían ser malladas para la solución de las ecuaciones de propiedades de los fluidos por medio de los modelos de turbulencia, para las simulaciones de esta tesis por ser en dos dimensiones, la superficie mallada fue el dominio.

Utilizando el programa Design Modeler instalado dentro del paquete de simulación de Workbench ANSYS, se importó el archivo .iges creado en AutoCAD con la herramienta “*Import external geometry file*” ubicado en el menú “*File*”. Antes de generar la geometría importada, se activó la opción “*Line Bodies*” y desactivaron las opciones “*Solid Bodies*” y “*Surface Bodies*” (Figura 46).

| Details View             |  |
|--------------------------|--|
| Details of Import1       |  |
| Import                   | Import1  |
| Source                   | C:\Users\Juan Pablo\OneDrive\Doc...\17-40-3.iges |
| Base Plane               | XYPlane  |
| Operation                | Add Frozen                                       |
| Solid Bodies             | No   |
| Surface Bodies           | No   |
| Line Bodies              | Yes  |
| Simplify Geometry        | No   |
| Simplify Topology        | No   |
| Heal Bodies              | Yes  |
| Clean Bodies             | Normal   |
| Stitch Surfaces          | Yes  |
| Tolerance                | Normal   |
| Replace Missing Geometry | No   |

Figura 46 Parámetros de importación de la geometría dibujada en AutoCAD

Con las líneas creadas después de generar las geometrías en Design Modeler, se crearon las superficies de todas las geometrías por medio de la herramienta “*Surface from Edges*” desde el menú “*Concept*” seleccionando las líneas de cada uno de los elementos, para las simulaciones de esta tesis fueron necesarias crear las superficies del elemento interior, elemento exterior y del dominio.

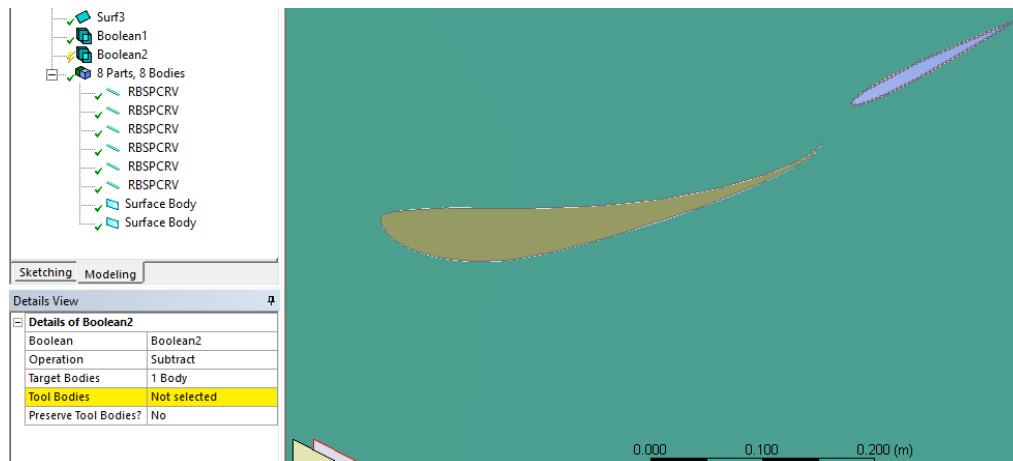


Figura 47 Utilización de la herramienta "Boolean" en geometrías en Design Modeler

Al ser una simulación en dos dimensiones, como ya se había mencionado únicamente estuvo presente la superficie en donde se malló, por lo tanto, se

suprimieron las superficies creadas de los perfiles aerodinámicos con la herramienta “*Boolean*” seleccionando como operación “*Subtract*” y utilizando como “*Target Bodies*” la superficie de dominio y como “*Tool Bodies*” el perfil aerodinámico (Figura 47). Finalmente, la superficie del dominio final se marcó como “*fluid*” en la ventana de detalles y se aseguró que el grosor de la superficie fuera cero y se almacenaran los cambios.

## Generación del mallado

Continuando con el proceso, se realizó el mallado en la superficie del dominio utilizando el programa Meshing de Workbench. Primeramente, se configuró el mallado general desde la ventana de detalles del programa cambiando los siguientes parámetros “*Sizing*”

- Relevance Center: Fine
- Smoothing: High
- Min Size:  $1 \times 10^{-4} \text{m}$
- Growth Rate: 1.06

Los otros parámetros no fueron modificados quedando como se muestra en la Figura 48.

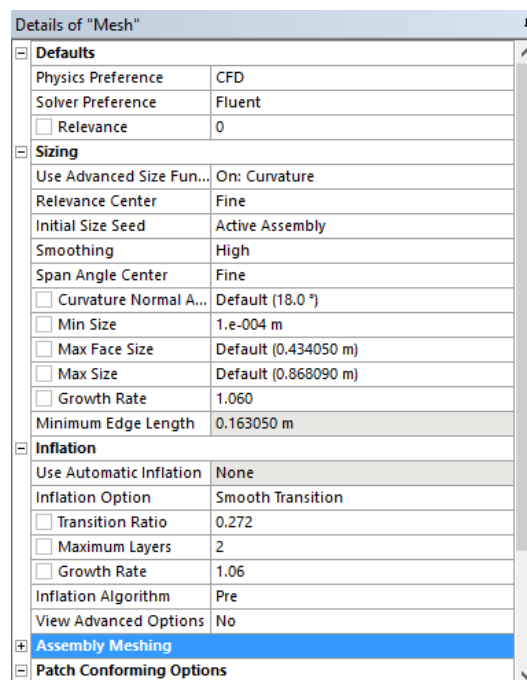


Figura 48 Parámetros generales del mallado

El siguiente paso consistió en la creación del método de mallado, se configuró un mallado triangular seleccionando la opción “*Automatic Method*” desde el menú contextual de la herramienta “*mesh*” en la ventana “*outline*”. Se seleccionó la superficie del dominio como el área de mallado eligiendo la opción “*Triangles*”.

Igualmente fue necesario adecuar el tamaño del mallado en la cercanía de los bordes de los perfiles aerodinámicos mediante la herramienta “*Edges sizing*”, la cual fracciona los bordes en un número determinado de divisiones. Para el elemento interior se hizo una división de 350 partes, mientras que para el elemento exterior se dividió en 150 partes como se muestra en la Figura 49 definiéndose los parámetros como:

### Edges Sizing

- Type: Number of divisions
- Element Size: 350
- Behavior: Hard

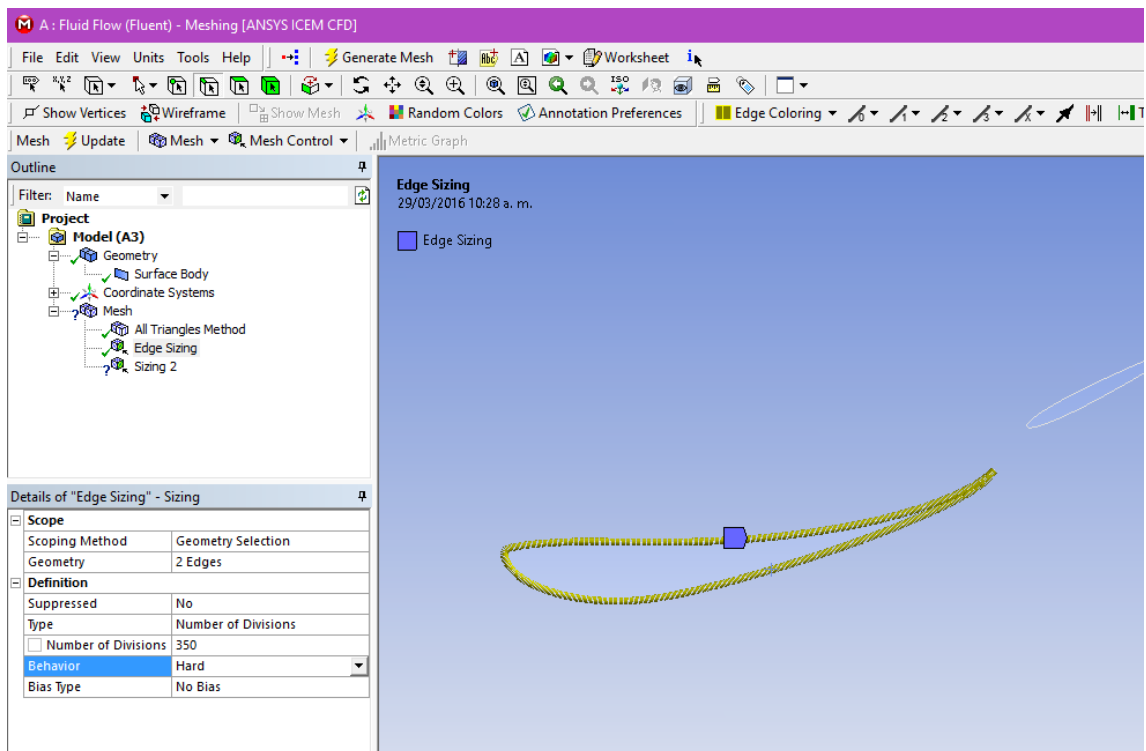


Figura 49 División de las geometrías para adecuar el tamaño del mallado

Posteriormente a la aplicación del “Edge Sizing” en ambos elementos y haber definido las propiedades del mallado general y el tipo de este, se generó el mallado

final con la herramienta “*Generate Mesh*” ubicado en la barra de herramientas, se obtuvo un mallado como se muestra en detalle en la cercanía del borde de ataque del elemento interior en la Figura 50.

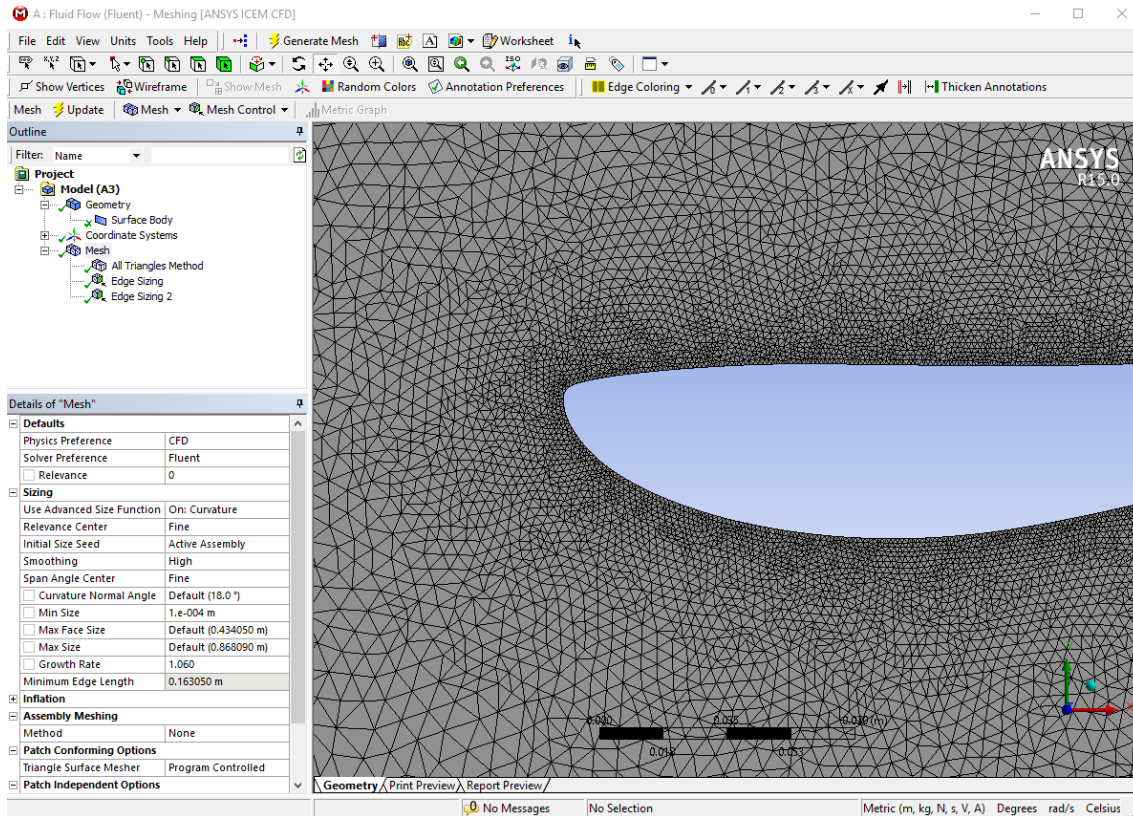


Figura 50 Mallado triangular no estructurado del dominio generado en Meshing

Finalmente, antes de terminar con el procedimiento de mallado, se nombraron todas las líneas que delimitan al dominio, así como los bordes de los perfiles aerodinámicos, esto con el propósito de que el programa Fluent pueda identificar qué parte de la simulación representa cada objeto (Figura 51). Para etiquetar cada elemento se seleccionó con el botón derecho del mouse la línea a definir y se seleccionó desde el menú contextual la opción “*Selection name*”, los nombres o etiquetas utilizadas de acuerdo al manual de Fluent según su función fueron:

- Inlet: la línea del borde izquierdo del dominio, que tiene como función de borde de entrada.
- Outlet: la línea del borde derecho del dominio, que tiene como función de borde de salida.
- Wall: todas las superficies de los perfiles aerodinámicos, tanto del elemento interior (Wall1) como del elemento exterior (Wall2).

- Symmetry: los bordes superior e inferior del dominio, Fluent lo interpreta como una barrera física sin fricción, de esta manera no modifica el sentido y velocidad del flujo simulado.

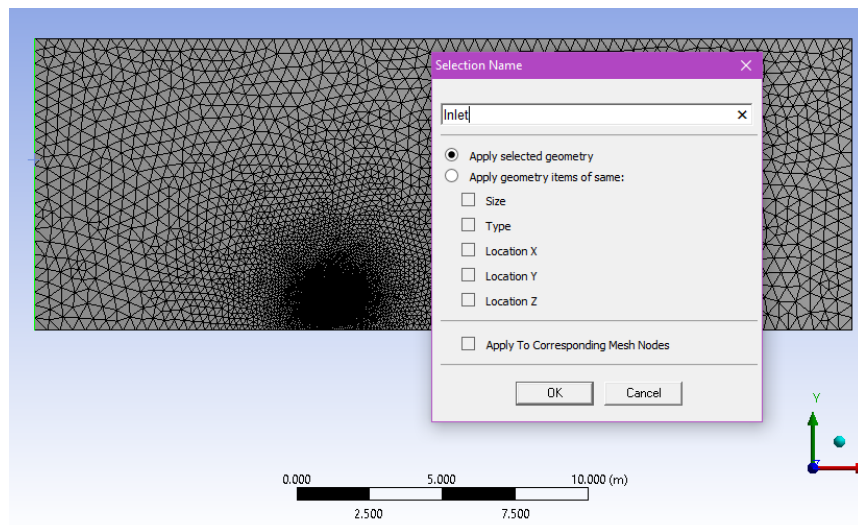


Figura 51 Etiquetado de las selecciones de la geometría del mallado

## Propiedades y modelos de turbulencia

Para las simulaciones CFD se utilizó el programa Fluent 15. Se hizo una simulación en dos dimensiones seleccionado como parámetros de la ventana inicial las opciones mostradas en la Figura 52.

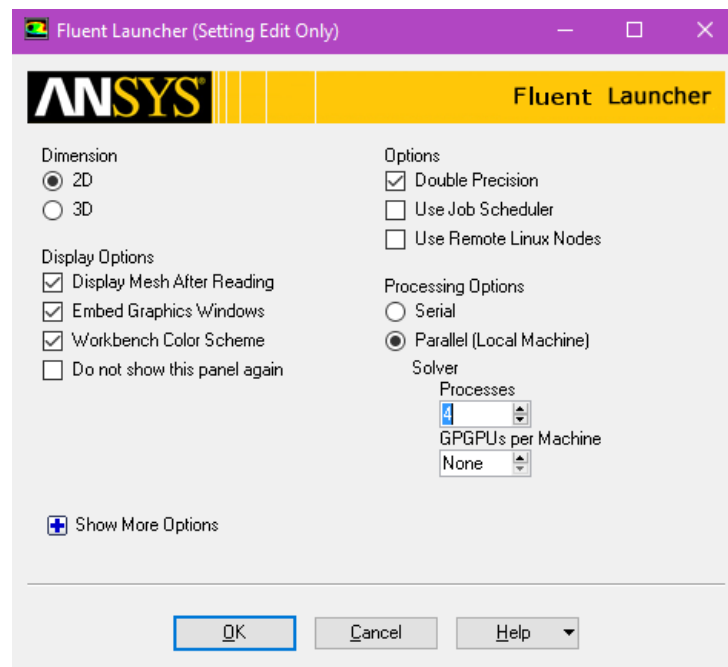


Figura 52 Parámetros iniciales de simulación en Fluent

Al cargar la ventana principal del programa después de haber configurado las opciones iniciales, se revisó el mallado y su calidad desde el panel de tareas “General” con las opciones “Check” y “Report quality”, obteniendo como resultado las dimensiones del dominio que correspondieron a las del mallado generado en Meshing y una calidad aceptable de 0.57 en una escala de 0 a 1 (Figura 53).

```

Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = -9.919521e+00, max (m) = 1.888048e+01
y-coordinate: min (m) = -1.035610e+00, max (m) = 8.964390e+00
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 2.285044e-07
  maximum volume (m3): 1.693544e-01
  total volume (m3): 2.799882e+02
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 5.434919e-04
  maximum face area (m2): 6.882588e-01
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:
Orthogonal Quality ranges from 0 to 1, where values close to 0 correspond to
Minimum Orthogonal Quality = 5.76215e-01
Maximum Aspect Ratio = 6.02127e+00

```

Figura 53 Resultados del reporte de calidad del mallado en Fluent

En el mismo panel de tareas “General” se seleccionó el tipo de simulación a realizar en las opciones “Solver” (Figura 54)

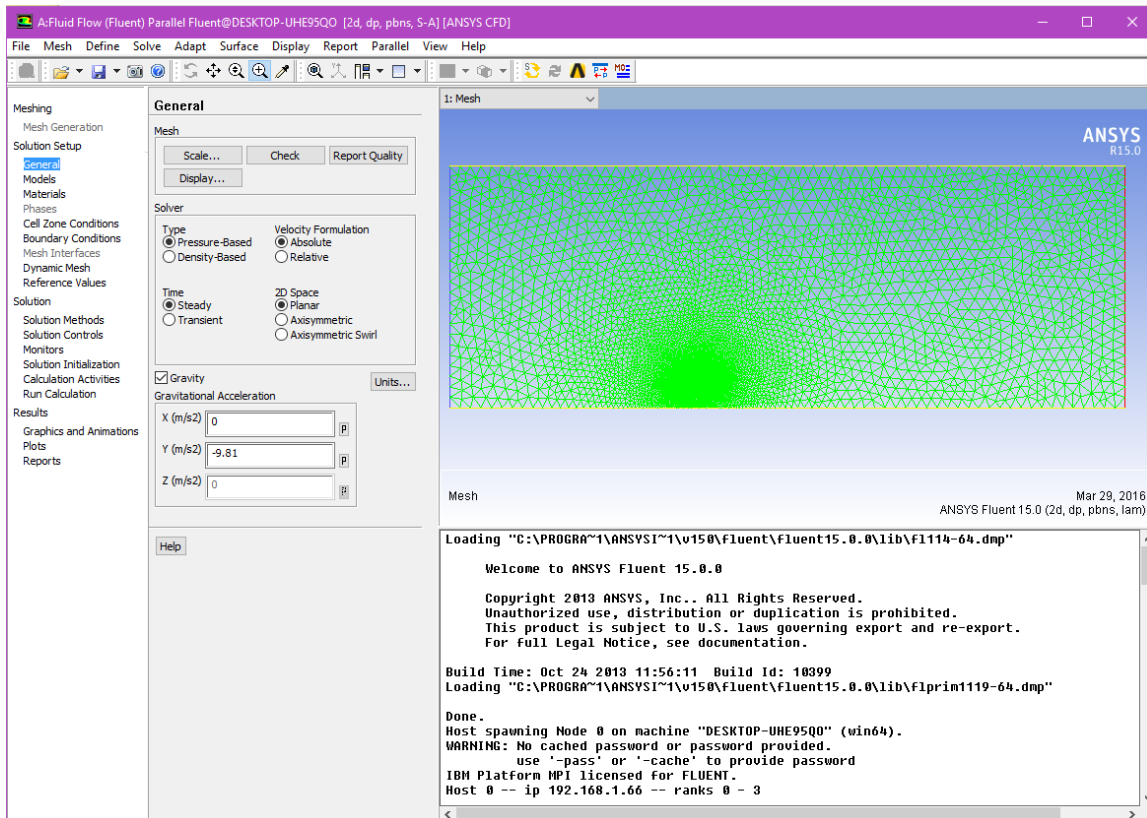


Figura 54 Opciones del panel de tareas "Solver"

En la siguiente sección del panel de navegación situado a la izquierda, se configuraron los tipos de modelos de turbulencia y sistemas de ecuaciones se debía usar. Por la velocidad del aire utilizado como fluido de simulación y su estado físico, se consideró un fluido en una única fase gaseosa y no compresible, por lo que únicamente se activó la solución “*Viscous*” y como modelo de turbulencia para su solución se eligió el modelo Spalart-Allmaras manteniendo las constantes predeterminadas del programa (Figura 55).

Continuando en el panel de navegación, las siguientes opciones a configurar fueron: definir el tipo de fluido y de sólido que se simularía. Como fluido se eligió el material de la base de datos del programa Fluent “*air*”, manteniendo sus propiedades de densidad y viscosidad constantes de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  y  $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$  respectivamente, estos valores se establecieron considerando las condiciones estándar del aire a  $20^\circ\text{C}$  a  $1 \text{ atm}$  (Figura 56). En el caso el material sólido, se estableció el aluminio con sus propiedades determinadas por el programa como material para los perfiles aerodinámicos.



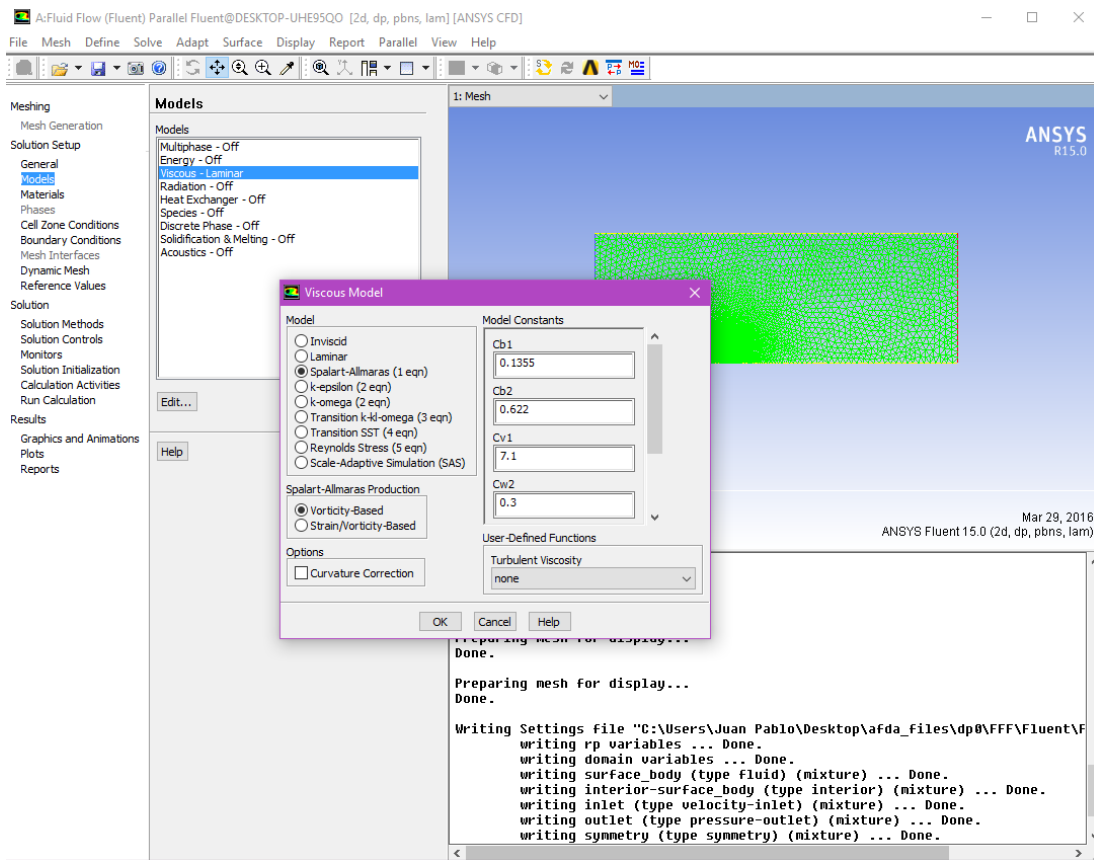


Figura 55 Parámetros de configuración del modelo de turbulencia elegido (Spalart-Allmaras)

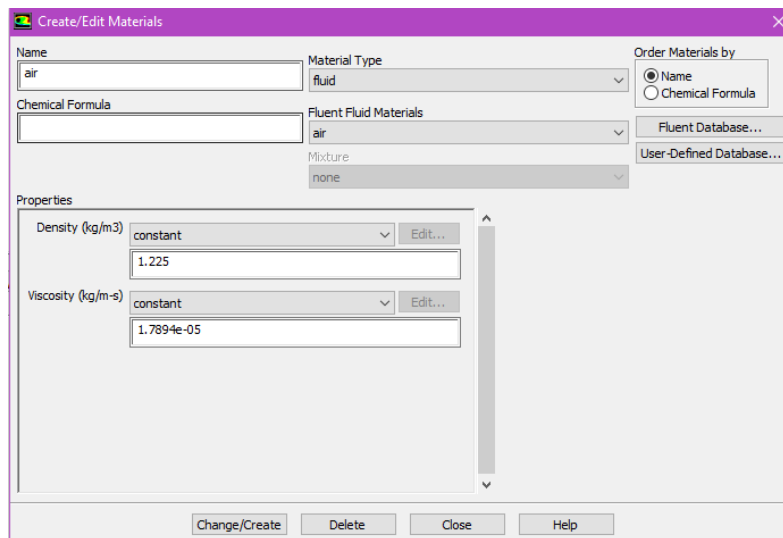


Figura 56 Propiedades del fluido de las simulaciones

La siguiente opción que se configuró en el panel de navegación son las condiciones de los límites del mallado (Boundary conditions), en esta sección, resaltó la importancia de haberle asignado una etiqueta a cada una de las partes de nuestra

geometría durante el mallado en el programa Meshing, debido a esto, el programa identificó y asignó propiedades de sólidos a los bordes de los perfiles aerodinámicos (Aluminio) y de fluidos a los límites del dominio rectangular (Aire), reconociendo el sentido de entrada y salida del fluido dentro del sistema. Se estableció en las propiedades de “*Inlet*” la velocidad de entrada del fluido en sentido perpendicular a la línea del límite del dominio rectangular (*Velocity Specification Method* – Magnitud, *Nomal to Boundary*) y 6 m/s como la magnitud de la velocidad (Figura 57).

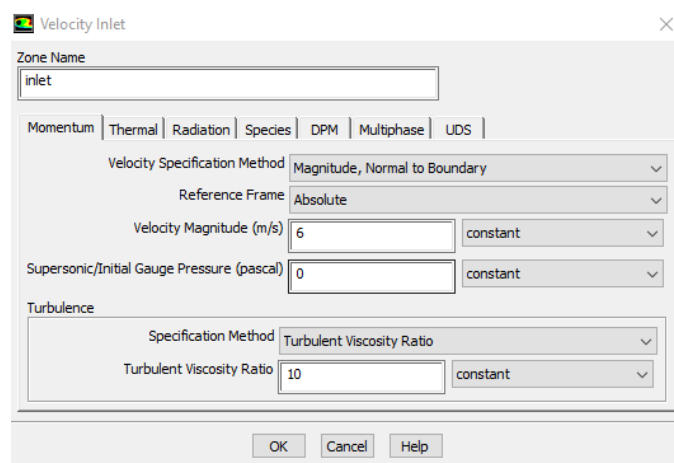


Figura 57 Propiedades del borde de entrada del dominio

En la opción “*Reference values*” se seleccionó que tomara los valores para la simulación desde las condiciones del límite “*Inlet*” anteriormente configurado.

En la siguiente opción del panel de navegación “*Solution Methods*” se configuró el método de solución de las ecuaciones del modelo de turbulencia, se seleccionó el esquema “*Simple*” modificando las ecuaciones de primer a segundo orden (Figura 58).

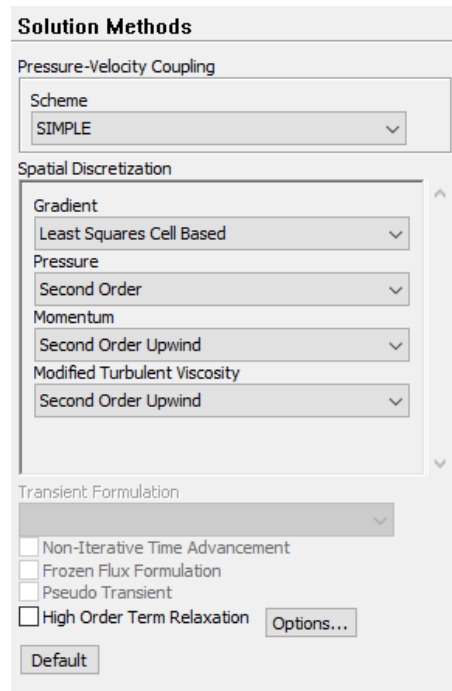


Figura 58 Métodos de solución de las ecuaciones del modelo de turbulencia

Las opciones de “*Monitors*” no fueron modificadas, en esta sección se define el grado de error en la solución de las ecuaciones de la simulación estableciendo un criterio de convergencia, para las simulaciones realizadas se dejaron los límites predeterminado del programa, teniendo como criterio de convergencia un error menor a 0.001 para todas las ecuaciones. Así mismo, se mantuvieron los valores predeterminados para el monitoreo de los datos y graficas de las soluciones como se muestra en la Figura 59.

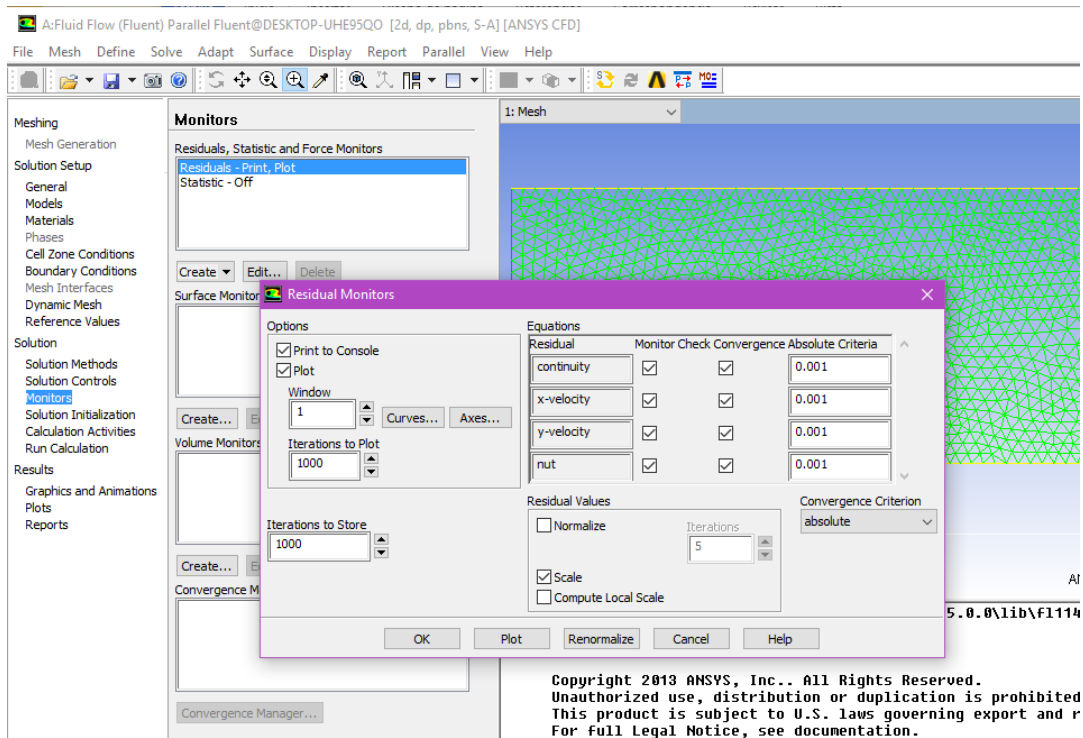


Figura 59 Criterios de convergencia en la solución de las ecuaciones del modelo de turbulencia

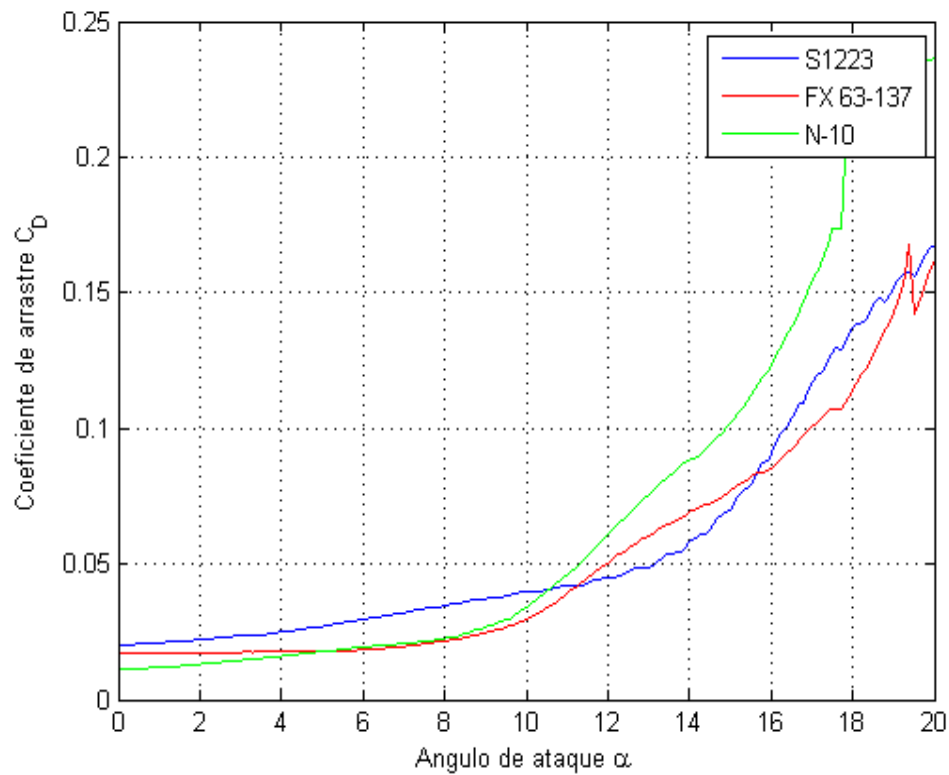


Figura 60 Convergencia de la simulación realizada en Fluent

Finalmente, en esta etapa del proceso, desde la opción "*Run Calculation*" se definió el número máximo de iteraciones en la solución de las ecuaciones en caso de no lograr una convergencia previa, estableciendo un número de iteraciones de 2000. Antes de iniciar el cálculo de la simulación se revisó posibles errores en la configuración del análisis por medio de la opción "*Check Case*"; obteniendo un resultado positivo, se procedió con el cálculo.

Después de varios minutos de cálculo, se logró la convergencia en los resultados como se muestra en la Figura 60, por lo que se guardaron los cambios y se cerró el programa Fluent 15 para continuar con el tratamiento de datos en el post proceso.

### **Post proceso**

En esta última etapa se generaron los contornos de velocidad y se obtuvieron los datos de la velocidad del viento a una separación de 95 cm del centro del eje de rotación de una turbina eólica propuesta. Se utilizó el programa CFD-Post desde el conjunto de programas de Workbench ANSYS.

Al abrir el programa se cargó la simulación realizada en Fluent a la cual se le aplicó un contorno de velocidad utilizando la herramienta "*Contour*," activada la herramienta, en la ventana de detalles se especificó la localización del fluido, la variable a representar y el número de contornos de la representación como se muestra en la Figura 61:

- Domains: All Domains
- Locations: symmetry 1
- Variable: Velocity
- # of Colors: 50

Generada la imagen de contornos de velocidad se continuó con la obtención de los datos de la velocidad del aire, esto, con el propósito de tener una ubicación de referencia para comparar con todas las simulaciones. Para la obtención de los datos, se creó una línea de referencia a partir de dos puntos en el sistema de coordenadas. Se utilizó la herramienta "*Line*" desde el menú "*Locations*", especificando en la ventana de detalles de la herramienta las coordenadas (1.894,-0.086) y (2.106,-0.086) así como la toma de 300 datos en la opción "*Samples*" (Figura 62),

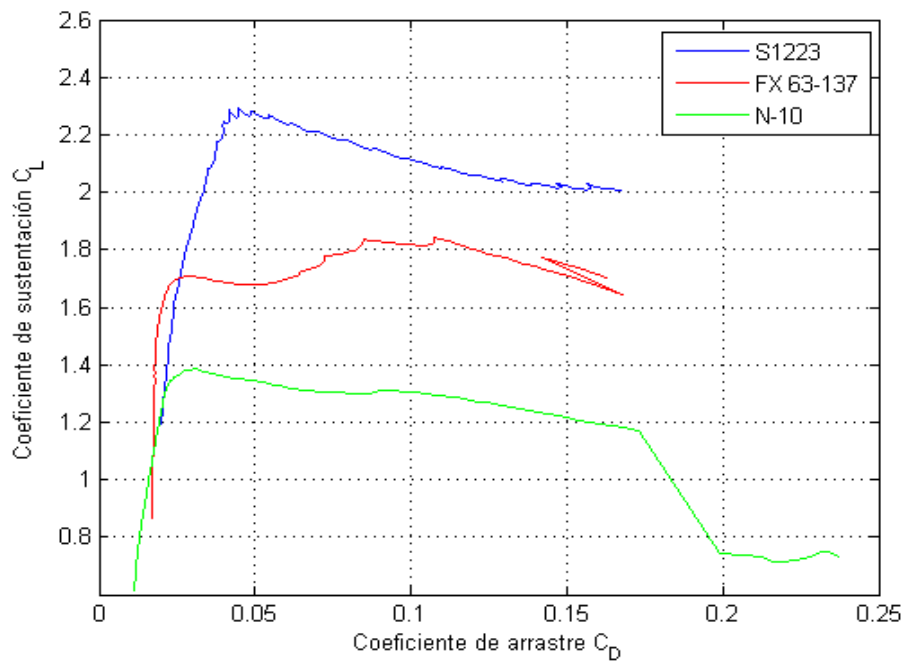


Figura 61 Parámetros de contorno de velocidad

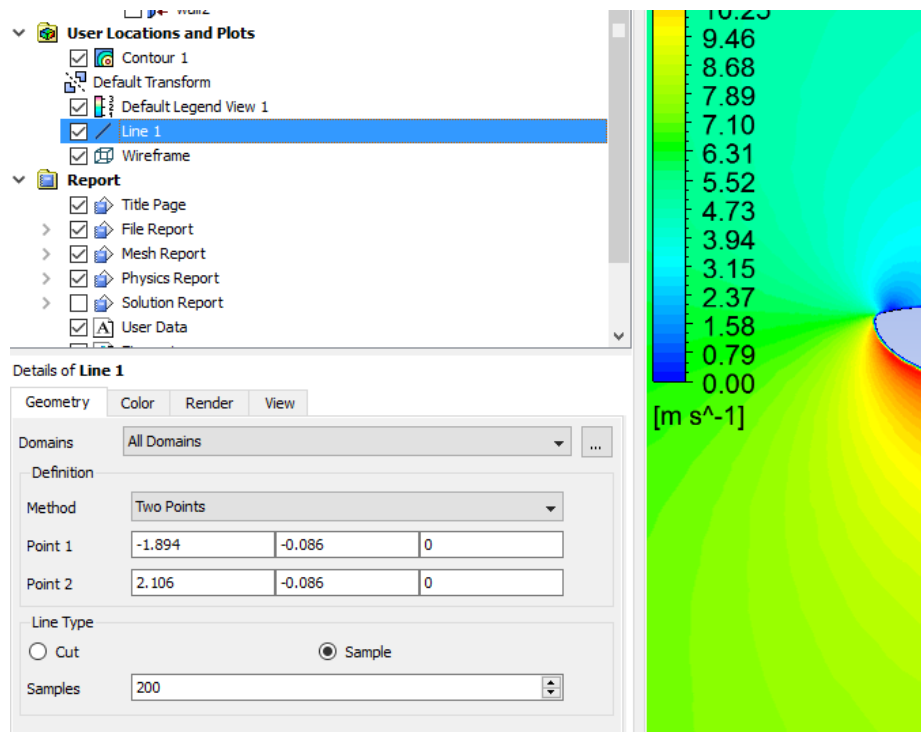
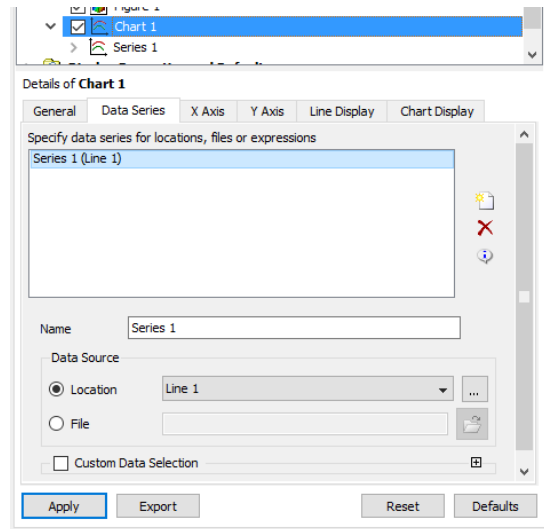


Figura 62 Creación de la línea de referencia para la obtención de datos de velocidad

Finalmente, para el tratamiento y análisis de los resultados de las velocidades en Microsoft Excel y posteriormente Matlab fue necesario exportar los datos en un

archivo .csv. Para la creación del archivo se creó una gráfica en CFD-Post utilizando la herramienta “*Chart*”, seleccionando como origen de los valores, la línea creada de 200 datos desde la opción “*Data Source*” (Figura 63).



**Figura 63 Creación de grafica de velocidades del viento en relación a la posición en x**

Ubicándose en las pestañas del eje x y del eje y de la ventana de detalles de la herramienta Chart, se definieron como valores en el eje x, la posición en X a lo largo de la línea creada y como valores del eje y, la velocidad del viento. Después de haber aplicado y generado la gráfica se exportaron los datos desde las mismas opciones de la herramienta, así como, una captura del contorno de velocidad para su posterior análisis.

## REFERENCIAS

- A. Cengel, Yunus, y John M. Cimbala (2006). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. MCGRAW-HILL.
- Abraham, Pacheco (2012). Determinación de los coeficientes de presión externa en una estructura empleando la simulación CFD. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería, opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Anderson, Degrez, Degroote, Dick, Grundmann, y Vierendeels (1992). Computational Fluid Dynamics: An Introduction. Springer.
- Andersson, Bengt, Ronnie Andersson, Love Hakansson, Mikael Mortensen, Rahman Sudiyo, y Berend Van Wachem (2012). Computational Fluid Dynamics for Engineers. Cambridge University press.
- Aranake, Aniket C., Vinod K. Lakshminarayan, y Karthik Duraisamy (2013). Computational analysis of shrouded wind turbine configurations. 51st AIAA aerospace sciences meeting.
- Ansys (2016). Página oficial de ANSYS. Octubre de 2016. <http://www.ansys.com/>
- Autodesk (2016). Página oficial de AutoCAD. Marzo de 2016. <http://www.autodesk.mx/products/autocad/overview>.
- Ballesteros, R (2003). Técnicas numéricas en mecánica de fluidos. Universidad de Oviedo.
- Boyle, Godfrey (2004). Renewable energy. Power for a sustainable future. Oxford.
- D.G. Phillips, P.J. Richards, R.G.J. Flay (2008). Diffuser development for a diffuser augmented wind turbine using computational fluid dynamics.
- Fletcher, Wang, Bai, Whiteford, y Cullen (2007). Wind tunnel test on a wind turbine with contractor and diffuser arrangement. PowerEng.
- Gilbert, B. L. Oman, K. M Foreman (1978). Fluid dynamics of diffuser-augmented wind turbines. Journal of Energy; 2(6), pp.368–374.



- Gilbert, B.L. Oman, y K.M. Foreman (1983). Experiments with a diffuser-diffuser augmented model wind turbine. Trans. ASME, J. Energy Res. Technol; pp.46-53.
- Gipe, Paul (2009). Wind energy basics.
- Hau, Erich (2013). Wind turbines. Fundamentals, technologies, application, economics. Translated by Horst von Renouard. Springer.
- Hernandez Sampieri, Roberto (2014). Metodología de la investigación. México: McGrawHill.
- Illinois (2015), Departamento de ingeniería aeroespacial de la Universidad de Illinois. UIUC Airfoil data site. Septiembre de 2015. [www.m-selig.ae.illinois.edu/ads.html](http://www.m-selig.ae.illinois.edu/ads.html).
- Lilley, G.M., y W.J. Rainbird (1956). A preliminary report on the design and performance of a ducted windmill. College of aeronautics report.
- Matsushima, T., S. Takagi, y S. Muroyama (2006). Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser. Renew Energy; pp. 1343-1354.
- National Renewable Energy Laboratory (2010). U.S. Department of energy. Energy efficiency & renewable energy. Abril 2015. [www.windpoweringamerica.gov/wind\\_maps.asp](http://www.windpoweringamerica.gov/wind_maps.asp)
- Ohya, Yuji, Takashi Karasudani, Akira Sakurai, Ken-ichi Abe, y Masashiro Inoue (2008). Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics; pp .524-539.
- Ohya, Yuji, y Takashi Karasudani (2010). A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology. Energies; 3,4, pp. 634-649.
- Patel, Mukund R (2006). Wind and solar power systems. Design, analysis and operation. Kings Point, New York. Taylor & Francis.
- Phillips, D.G., R.G.J. Flay, y T.A. Nash (1999). Aerodynamic analysis and monitoring of the Vortec 7 diffuser augmented wind turbine. Proceedings of the IPENZ Transactions; pp. 13-19.
- Rosado, Nidiana (2013). Estudio experimental en túnel de viento de la aerodinámica del aspa de una turbina eólica. Tesis para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería, Opción Energías Renovables, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

- Seilig, Michael S., y James J. Guglielmo (1997). High-Lift Low Reynolds number airfoil design. Journal of aircraft 34.
- T. Crowe, Clayton, Donald F. Elger, Barbara C. Williams, y John A. Roberson (2009). Engineering fluid mechanics. 9. Wiley.
- T. Saravana, Kannan, A. Mutasher Saad, y Y.H. Kenny Lau (2013). Design and flow velocity simulation of diffuser augmented wind turbine using CFD. Journal of Engineering Science and Technology; 4, pp. 372-384.
- W. Fox, Robert, y Alan T. McDonald (1995). Introducción a la mecánica de fluidos. McGrawHill.