

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**Carrera de Ingeniería de la Energía**



**DIMENSIONAMIENTO DE UN DUCTO  
CONVERGENTE PARA INCREMENTAR LA  
VELOCIDAD DEL VIENTO Y SU APLICACIÓN  
PARA UN AEROGENERADOR DE BAJA  
POTENCIA**

**SIZING OF A CONVERGENT PIPELINE TO  
INCREASE THE WIND VELOCITY AND ITS  
APPLICATION FOR A LOW POWER WIND  
TURBINE**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de la Energía

**Hugo Adán de La Cruz Zuñiga**

**Código 201210068**

**Asesores**

Eunice Villicaña Ortiz  
Ximena Guardia Muguruza

Lima – Perú

Marzo 2018

La tesis

**DIMENSIONAMIENTO DE UN DUCTO CONVERGENTE PARA  
INCREMENTAR LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y SU APLICACIÓN PARA UN  
AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA**

Ha sido aprobada

-----  
Julien Noel

-----  
Eunice Villicaña Ortiz

-----  
Elmer Ramírez Quiroz



*Dedicatoria:*

*Dedico el esfuerzo de la realización de la presente  
tesis a mis padres, por ser las personas cuyo  
principal objetivo es la de impulsar a sus hijos a  
tener un mejor camino.*

*Agradecimientos:*

*Agradezco a mis profesores y asesores que han sido partícipes en el desarrollo de la presente tesis*

# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	i
OBJETIVOS.....	1
ANTECEDENTES .....	2
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....	5
1.1. ¿Qué es la energía eólica? .....	5
1.2. Sistema de generación de energía eólica.....	5
1.2.1. Parque eólico.....	5
1.2.2. Sistema eólico de baja potencia .....	7
1.3. Potencial de energía eólica en el Perú.....	9
1.4. Marco normativo .....	11
1.4.1. Políticas y Planes.....	11
1.4.2. Marco Regulatorio.....	12
1.5. Escenario económico .....	13
1.5.1. Subastas .....	13
1.5.2. Cooperación Internacional.....	14
1.5.3. Otros .....	14
1.6. Dinámica de fluidos .....	14
1.7. Sistemas de simulación computacional de fluidos .....	16
1.7.1. ANSYS Fluent .....	17
1.8. Ducto convergente .....	17
1.8.1. Tobera.....	18
1.8.2. Principio de Funcionamiento del ducto convergente .....	18

CAPITULO II: METODOLOGÍA .....	23
2.1. Análisis del comportamiento del viento dentro de un ducto convergente .....	23
2.1.1. Análisis de la posición de una partícula dentro de un ducto convergente .....	23
2.1.2. Análisis de la deformación de las partículas.....	23
2.2. Análisis de la velocidad del viento a la salida del ducto convergente .....	24
2.2.1. Modelado del ducto convergente .....	24
2.3. Análisis del impacto mecánico del acoplamiento de un ducto convergente a un aerogenerador .....	34
2.4. Diseñar el modelo de un conducto convergente óptimo para un aerogenerador de baja potencia .....	35
CAPÍTULO III: RESULTADOS .....	36
3.1. Comportamiento del viento dentro de un ducto convergente.....	36
3.1.1. Posición de una partícula de viento dentro de un ducto convergente .....	36
3.1.2. Deformación de las partículas del fluido .....	37
3.2. Velocidad del viento a la salida del ducto convergente .....	39
3.2.1. Modelo del ducto convergente .....	39
3.2.2. Relación de la velocidad de viento con las dimensiones del ducto convergente	40
3.3. Impacto mecánico del acoplamiento de un ducto convergente a un aerogenerador	43
3.4. Diseño del modelo de un ducto convergente óptimo para un aerogenerador de baja potencia	45
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES .....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
ANEXOS.....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parques Eólicos en operación del Perú.....	9
Tabla 2 Programa de Simulación de fluidos .....	16
Tabla 3 Vistas del diagrama del ducto convergente .....	25



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema difusor – aerogenerador.....	3
Figura 2 Sistema difusor – aerogenerador.....	3
Figura 3 Parque eólico Marcona.....	5
Figura 4 Componentes principales de un aerogenerador .....	7
Figura 5 Sistema eólico doméstico .....	8
Figura 6 Mapa de velocidad media anual del viento a 100 m (UMT-WGS84-S18).....	10
Figura 7 Sección transversal de una tobera.....	18
Figura 8 Vista de perfil de un ducto convergente.....	19
Figura 9 Ducto convergente con extensión en la salida.....	20
Figura 10 Esquema de Proyecto .....	25
Figura 11 Diseño del ducto convergente3D .....	27
Figura 12 Ducto convergente dentro de un volumen de control .....	27
Figura 13 Nombramiento de las zonas del volumen de control .....	28
Figura 14 Mallado del ducto convergente.....	29
Figura 15 Mallado del volumen de control .....	29
Figura 16 Ventana panorámica del apartado Setup del software .....	30
Figura 17 Selección del modelo viscoso k-epsilon (2 eqn).....	31
Figura 18 Condiciones de los materiales del sistema: (a) aire y (b) aluminio .....	32
Figura 19 Condiciones del fluido (aire) .....	33
Figura 20 Módulo de las opciones de cálculo .....	33
Figura 21 Deformación del arreglo de partículas de un fluido dentro de un ducto convergente en un tiempo dado.....	38
Figura 22 6 vistas 2D del ducto convergente .....	39
Figura 23 Vista 3D del ducto convergente.....	40
Figura 24 Esquema 3D del ducto convergente en el software ANSYS Fluent.....	40

Figura 25 Primera relación de la velocidad del viento en la salida del ducto convergente con la longitud y el ángulo de direccionamiento .....	41
Figura 26 Segunda relación de la velocidad del viento en la salida del ducto convergente con la longitud y el ángulo de direccionamiento .....	42

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Campo de Presión .....	15
Ecuación 2 Campo de Velocidad.....	15
Ecuación 3 Campo de aceleración .....	15
Ecuación 4 Conservación de la masa .....	20
Ecuación 5 Conservación de la masa (diferencial).....	20
Ecuación 6 Conservación de la masa en condición estacionaria.....	21
Ecuación 7 Balance de volúmenes en un sistema incompresible .....	21
Ecuación 8 Balance de flujo de volúmenes en un sistema incompresible .....	22
Ecuación 9 Relación del volumen y área en dos secciones de un conducto .....	22
Ecuación 10 Posición de una partícula de fluido en un instante dado .....	24
Ecuación 11 Segunda ley de Newton.....	34
Ecuación 12 Fórmula general del torque .....	34
Ecuación 13 Relación entre el torque del sistema y el torque del aerogenerador a velocidad máxima y el ducto convergente .....	35
Ecuación 14 Ecuación de la posición x de una partícula de un fluido en un tiempo t.....	36
Ecuación 15 Ecuación de la posición y de una partícula de un fluido en un tiempo t.....	36
Ecuación 16 Volumen de un fluido en un plano tridimensional .....	38
Ecuación 17 Relación entre la velocidad de salida en un ducto convergente con sus dimensiones .....	42
Ecuación 18 Torque aplicado al mástil por el área de barrido de las aspas de un aerogenerador .....	44

Ecuación 19 Torque aplicado al mástil por el área de barrido de las aspas de un aerogenerador y un ducto convergente .....	44
--	----

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Especificaciones Técnicas del Aerogenerador Air X .....	53
ANEXO 2: Arreglo de partículas a lo largo de un ducto convergente .....	55
ANEXO 3: Variación de las velocidades de salida por la variación del ángulo de direccionamiento.....	56
ANEXO 4: Velocidades de viento en la salida del ducto convergente para distintos ángulos de direccionamiento y para distintas longitudes.....	58
ANEXO 5: Especificación del aerogenerador de baja potencia.....	61

# INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en el escenario energético mundial se aprecia que la oferta de energía eléctrica tiene una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, teniendo estos últimos una participación en la matriz energética mundial del 66.7% [1]. Por otro lado, la demanda de energía eléctrica ha venido creciendo, desde el 2010 al 2014, a una tasa de 3.06% [2].

La continuidad de este escenario energético no es sostenible en el mediano plazo, dado que, dos fuentes de energías fósiles (el petróleo y el gas natural), cuya participación en la producción de energía eléctrica en el mundo es de 25.9% [1], tienen reservas proyectadas a un consumo no mayor a 50 años [3].

La posible ausencia del petróleo y gas natural en el futuro, sumada a la creciente demanda de energía eléctrica, genera una incertidumbre en el precio y suministro de esta última. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de diversificar la matriz energética, fomentando el desarrollo de otras fuentes de energía.

Tomando en cuenta este panorama, además de considerar que los combustibles fósiles son la fuente de generación de energía con mayor participación y tienen altos impactos negativos al ambiente, diversas instituciones vienen fomentando el uso de fuentes energéticas alternativas como las energías renovables.

Dentro de las energías renovables se puede citar a la eólica como una de las que ha tenido un crecimiento importante en los últimos años, pues la capacidad mundial instalada bordea los 430,000 MW [4] habiendo multiplicado en el periodo 2005 - 2015 poco más de 7 veces su potencia instalada.

En el Perú, la energía eólica tiene un gran potencial de desarrollo, debido a que en la actualidad solo se tiene instalado el 1.07% de los 22,500 MW de potencia que se podrían aprovechar [5].

Parte de este potencial eólico se concentra en lugares donde la velocidad del viento tiene índices entre valores de 3 a 6 m/s [6]. Esta situación hace que la energía eólica no pueda

ser aprovechada al máximo, pues los aerogeneradores de baja potencia comerciales están diseñadas para generar energía en cantidades significativas en un rango de velocidad de 13 a 14 m/s [7].

Para que la generación de energía eólica se desarrolle en estos lugares, es necesario que las condiciones del viento, en especial su velocidad, mejoren. Una forma de lograrlo es mediante el diseño de nuevos aerogeneradores que operen en un rango de velocidades bajas, pero otra opción interesante es lograr el incremento de las velocidades de viento haciendo uso de los mismos aerogeneradores.

La presente tesis se alinea con el segundo método, buscando desarrollar un equipo que incremente la velocidad del viento mediante un ducto convergente, y así aprovechar la energía eólica en lugares donde las velocidades de viento son bajas.

La presente tesis desarrollará el estudio de los efectos físicos que ocurren cuando el viento atraviesa un ducto convergente, para así determinar el dimensionamiento óptimo de un ducto convergente para un aerogenerador de baja potencia e incrementar su producción de energía. El objetivo será de describir el comportamiento del viento a lo largo del conducto convergente, y determinar una relación matemática que vincule la velocidad aumentada con las dimensiones del ducto convergente. Para ello se hará uso de principios físicos y la herramienta computacional ANSYS Fluent 17.1, que servirán para la obtención de relaciones matemáticas que se utilicen para el dimensionamiento de un ducto convergente para un aerogenerador de baja potencia.

# OBJETIVOS

## General

- Dimensionar un ducto convergente para incrementar la velocidad del viento y favorecer la producción de energía en un aerogenerador de baja potencia.

## Específicos

- Analizar el comportamiento de las partículas de viento dentro del ducto convergente.
- Analizar simulaciones computacionales del comportamiento del viento dentro de un ducto convergente empleando el software ANSYS Fluent.
- Determinar la correlación matemática entre la velocidad de salida del ducto convergente respecto a sus parámetros de diseño a partir de las simulaciones computacionales obtenidas.
- Determinar el impacto mecánico que tiene la instalación del ducto convergente en un aerogenerador comercial de baja potencia.
- Determinar el dimensionamiento óptimo de un ducto convergente para un aerogenerador de baja potencia.

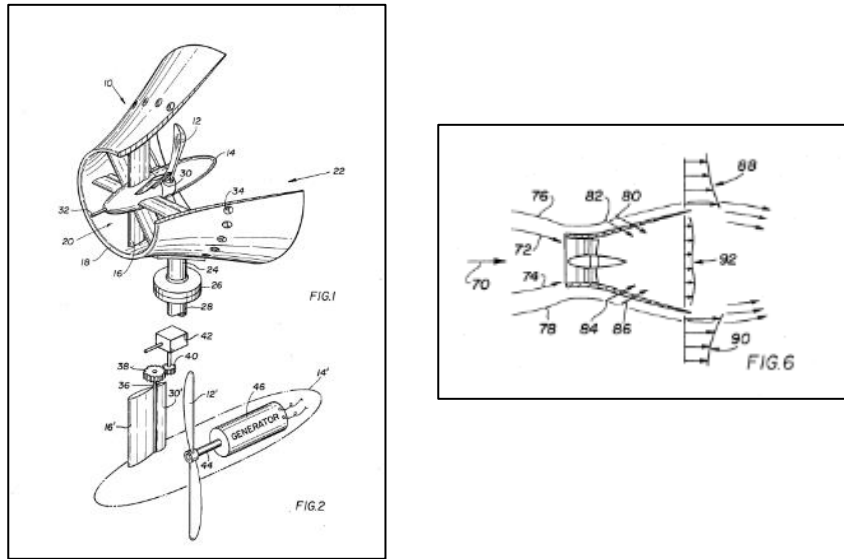


## ANTECEDENTES

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable más utilizada en todo el mundo [8]. Una de las primeras formas para su aprovechamiento fue mediante molinos de viento para moler cereales o bombear agua. Hoy en día la forma más común de aprovechamiento es la generación de energía eléctrica mediante el empleo de aerogeneradores de diferentes potencias, siendo los más comunes los de media y alta potencia, cuyas capacidades superan los 100 kW [9].

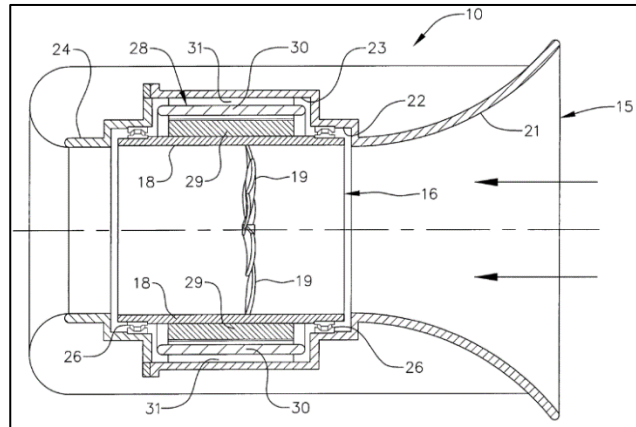
Los aerogeneradores de baja potencia, cuyas capacidades son inferiores a 100 kW, tienen una menor participación en el escenario actual, más aun los que tienen unas aspas con un diámetro menor a 5 metros, dado que, usualmente son instalados en viviendas, donde el coste que implica su compra e instalación es elevado. Su desarrollo se encuentra en una etapa muy temprana, siendo las cooperaciones internacionales u ONG's, las instituciones que intentan expandir estas tecnologías en zonas urbanas, sin aún conseguir la masificación de estas tecnologías en el mundo.

En busca de incrementar la eficiencia del sistema eólico con aerogeneradores de baja potencia, en el año 1978 se publicó la primera patente referida a un difusor que mejora las condiciones de aprovechamiento de energía eólica para un aerogenerador [10], donde el rotor y las palas se encuentran dispuestos dentro de un difusor, el cual hace que la presión del viento que atraviese las palas disminuyan debido al frenado por parte de las palas y por la mayor velocidad de viento a la salida del difusor que no lo atravesaron, y con ello incrementan la velocidad a la entrada del difusor para tener un mejor rendimiento del sistema, tal como se aprecia en la Figura 1 [10].



**Figura 1** Sistema difusor – aerogenerador  
Fuente: Patente US 4075500 A, 1978

Esta publicación despertó interés en muchos investigadores, por lo que la idea de rodear el aerogenerador con un difusor ha tenido ligeras modificaciones en distintas patentes en los últimos 25 años, siendo la patente publicada en el 2007 “Diffuser-augmented wind turbine” [11], la que utiliza el mismo sistema que encierra al aerogenerador.



**Figura 2** Sistema difusor – aerogenerador  
Fuente: Patente US 7218011, 2007

Sin embargo, esta última utiliza un dispositivo adicional, con respecto al sistema difusor patentado en 1978, que cumple la función de una tobera, tal como se visualiza en Figura 2 [11]. El principio de esta tobera es aumentar la velocidad del viento incidente en las

palas del aerogenerador a causa de la reducción de sección del conducto, generando así una reducción de presión y consecuentemente, un incremento de velocidad. La finalidad es la misma, incrementar la eficiencia del sistema incluyendo un concentrador de viento al sistema difusor.

La idea de colocar un difusor o tobera alrededor de un aerogenerador ha tomado una importancia significativa, tal es así que existen algunas empresas que han desarrollado estos dispositivos adicionales al sistema eólico convencional tales como Elena Energie, FloDesign-Ogin, Wind Tamer Corporation, los cuales en la actualidad comercializan sus productos en pequeña escala orientados a universidades o a instituciones emblemáticas de algunos países.

En el Perú no se ha realizado ninguna investigación respecto a equipos que incrementen la velocidad de viento con fines de aprovechamiento energético, dado a que el desarrollo de las tecnologías eólicas en el país aún se encuentra en etapas tempranas, especialmente en el caso de aerogeneradores de baja potencia para uso residencial. Muestra de este argumento es el 1.07% de potencia instalada que se ha aprovechado de todo el potencial descrito anteriormente, el cual proviene en su totalidad de plantas eólicas con aerogeneradores de alta potencia.

Este trabajo se encarga de dar inicio a nuevos estudios que mejoren las condiciones técnicas de un ducto convergente para que su aplicación en lugares de bajas velocidades se muestre atractiva.

# CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

## 1.1. ¿Qué es la energía eólica?

La energía eólica es un tipo de energía generada por el movimiento, a causa del viento, de las aspas de los “molinos de viento”, conocidos comercialmente como aerogeneradores. Esta energía es clasificada como renovable, dado que la fuente energética que la origina, el sol, es prácticamente inagotable. Además, también es considerada como una fuente limpia porque su generación no produce emisiones que impactan negativamente al medio ambiente.

## 1.2. Sistema de generación de energía eólica

### 1.2.1. Parque eólico

Es un conjunto de aerogeneradores, de altura significativa, que transforman la energía del viento en energía eléctrica. Estos aerogeneradores se pueden instalar en extensiones terrestres como marítimos, siendo los primeros los más comunes. Un ejemplo de parque eólico se muestra en la Figura 3.



**Figura 3** Parque eólico Marcona

Fuente: Proyecto Parque Eólico Marcona de Grupo Cobra con fideicomiso de La Fiduciaria

El número de aerogeneradores que se instalen en un parque eólico es variable y depende en gran medida por la superficie disponible y por las condiciones del viento en el lugar.

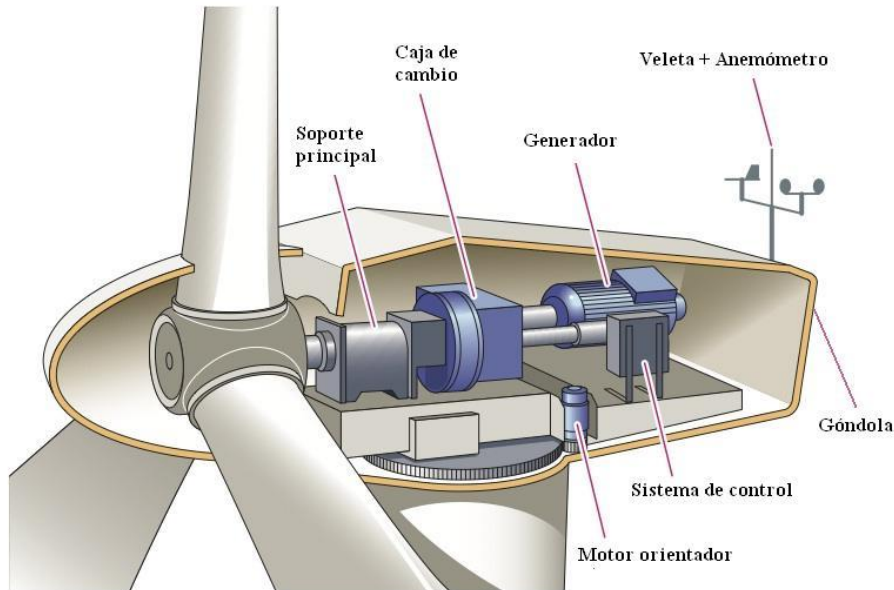
Los aerogeneradores producen la energía debido al movimiento de sus aspas, que a través de un sistema mecánico de engranajes consigue accionar un generador, que es el equipo eléctrico que produce la energía eléctrica.

Los principales componentes de los aerogeneradores utilizados en los parques eólicos son los siguientes [13]:

- **La góndola:** es la carcasa que protege los componentes clave del aerogenerador.
- **Las palas del rotor:** capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. Tienen una longitud de 20m.
- **El buje:** es un elemento que une las palas del rotor con el eje de baja velocidad.
- **Eje de baja velocidad:** conecta el buje del rotor al multiplicador. Gira muy lento, a 30 rpm.
- **El multiplicador:** permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad.
- **Eje de alta velocidad:** gira aproximadamente a 1.500 rpm, lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico.
- **El generador eléctrico:** en los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 6 y 12 MW.
- **El controlador electrónico:** es un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y controla el mecanismo de orientación.
- **La unidad de refrigeración:** contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico.
- **La torre:** soporta la góndola y el rotor. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta a medida que nos alejamos del nivel del suelo
- **El mecanismo de orientación:** está activado por el controlador electrónico, que controla la dirección del viento utilizando el panel.

- **El anemómetro y el panel:** las señales electrónicas del anemómetro conectan el aerogenerador cuando el viento tiene una velocidad aproximada de 5m/s.

Los componentes principales dentro de la góndola se muestran en la Figura 4.



**Figura 4** Componentes principales de un aerogenerador  
Fuente: <http://www.greatenergy.com.mx/0eolica.html>

### 1.2.2. Sistema eólico de baja potencia

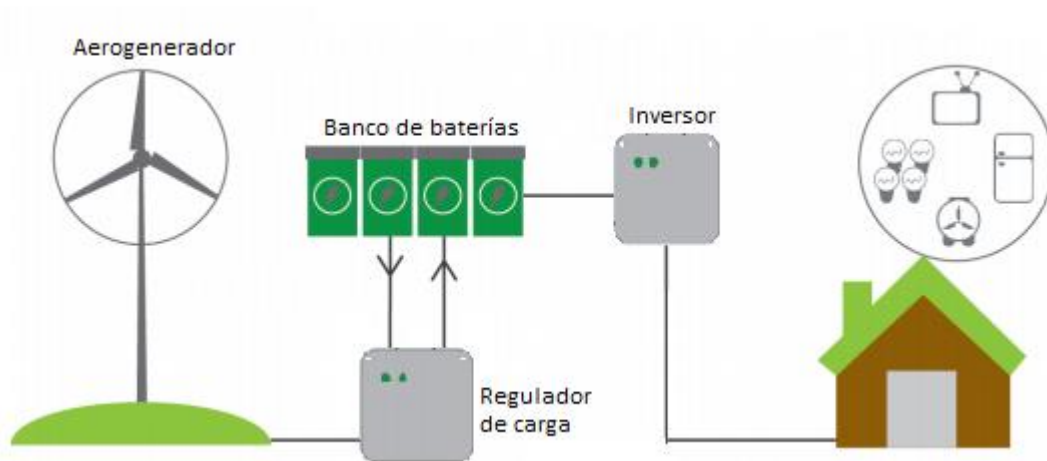
A diferencia de los grandes parques eólicos, cuyos aerogeneradores tienen componentes internos más sofisticados, en las viviendas los aerogeneradores tienen un tamaño pequeño que se adecuan con el emplazamiento disponible, generalmente, de la parte superior de una casa.

En el sistema eólico doméstico se dejan de usar muchos de los componentes que, en el parque eólico, y se incluyen equipos que permiten que la energía generada sirva de alimentación directa a los equipos eléctricos de la vivienda y que se almacenen. Un sistema eólico consta básicamente de los siguientes componentes:

- **Aerogenerador:** de dimensiones pequeñas, adecuadas con el espacio disponible de la vivienda. Debe ser colocado en la parte más elevada.

- **Inversor:** se encargará de transformar la corriente eléctrica continua producida por el aerogenerador a corriente alterna, para que esta pueda ser usada por los equipos eléctricos de las viviendas.
- **Banco de baterías:** almacenará la energía producida por el aerogenerador y suministrará de energía a los equipos eléctricos de las viviendas cuando el aerogenerador no produzca energía.
- **Regulador de carga/ Controlador:** se encargará de controlar constantemente el estado de carga de las baterías, también regulará la intensidad de corriente que se produzca por la energía que entrega el aerogenerador a fin de alargar la vida útil de las baterías.
- **Cables:** se encargarán de transportar la energía eléctrica entre los equipos eléctricos involucrados en el sistema eólico.

Los componentes del sistema eólico doméstico se muestran en la Figura 5.



**Figura 5** Sistema eólico doméstico  
Fuente: Universidad de Buenos Aires

### 1.3. Potencial de energía eólica en el Perú

De acuerdo a estudios encomendados por el MINEM, se ha determinado que el Perú tiene 22,540 MW de capacidad potencial para la generación de energía eléctrica proveniente de energía eólica [5]. En la actualidad, de este potencial, sólo se viene explotando el 1% en los 4 parques eólicos que se encuentran en operación, tal como se muestra en la Tabla 1.

Nombre del Parque	Ubicación	Potencia Instalada [kW]
<b>Cupisnique</b>	La Libertad	80,000
<b>Marcona</b>	Ica	32,000
<b>Talara</b>	Piura	30,000
<b>Tres Hermanas</b>	Ica	97,150
<b>TOTAL</b>		<b>239.150</b>

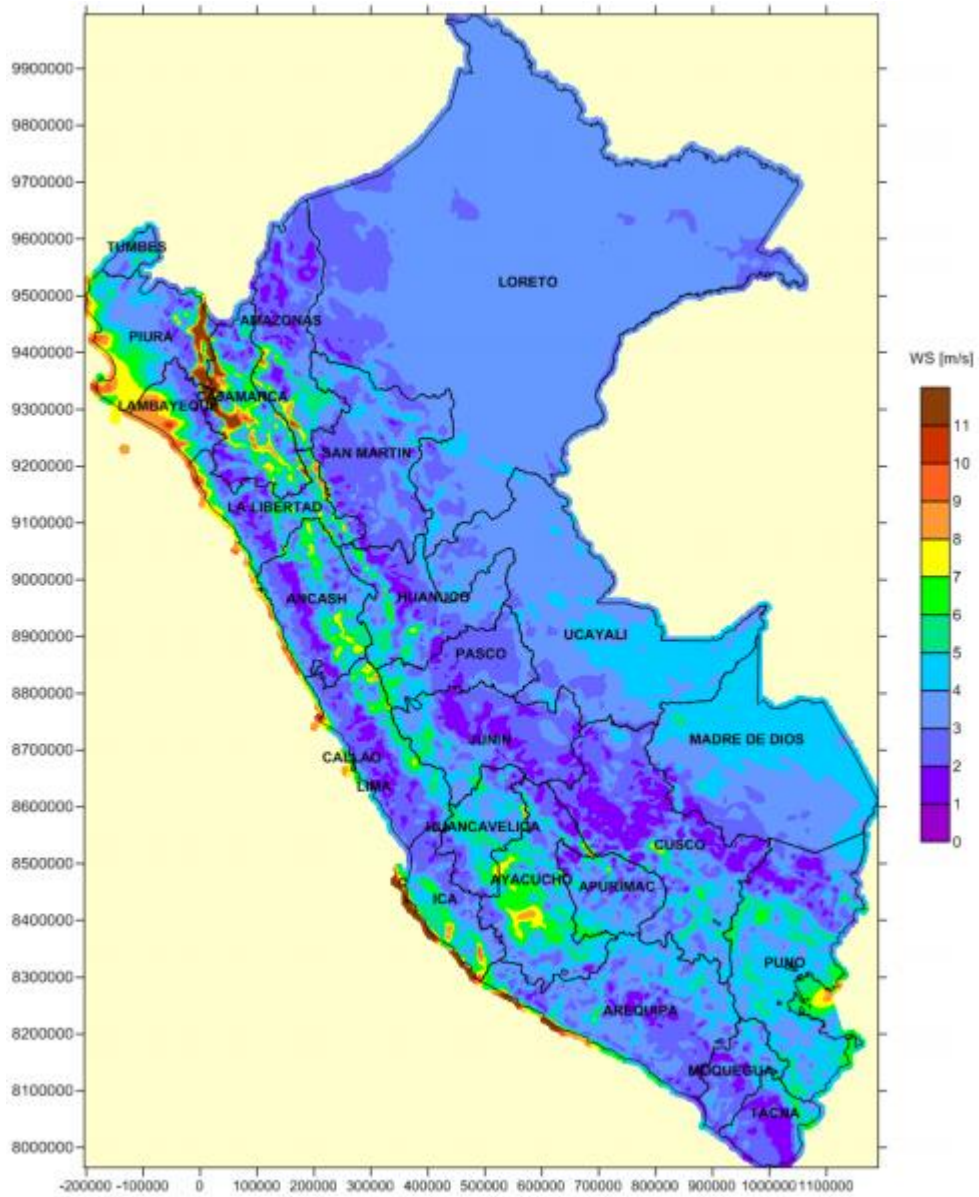
**Tabla 1** Parques Eólicos en operación del Perú  
Fuente: OSINERGMIN

Desde el 2009, cada dos años en el Perú se vienen realizando subastas de energía de fuentes renovables, donde muchas empresas participan presentando proyectos de este tipo. A causa de ello, la potencia instalada de la tecnología eólica ha venido creciendo significativamente. Así, por ejemplo, en la última subasta se adjudicó el mayor proyecto en tecnología eólica, “Parque eólico Nazca”, propuesto por la compañía Enel, con una potencia instalada de 160 MW que entrará en operaciones en el primer trimestre del 2018.

Con todos los proyectos adjudicados en operación se tendría una potencia instalada total de 362.010 MW, lo que significa el 1.6% del potencial eólico total. Esto pone de manifiesto que las subastas son herramientas importantes que facilitan el desarrollo de los proyectos renovables en el país y que poco a poco, son más las empresas que se inclinan por invertir en este tipo de proyectos.

Todos los proyectos eólicos antes mencionados se encuentran en la zona costera del Perú, dado que el recurso eólico en esa zona tiene velocidades significativas que oscilan entre 7 y 10 m/s, mientras que las demás zonas del Perú no tienen un recurso eólico aprovechable para los aerogeneradores de gran tamaño, pues sus velocidades son menores y oscilan entre 2 y 4 m/s [6].





**Figura 6** Mapa de velocidad media anual del viento a 100 m (UMT-WGS84-S18)  
 Fuente: Atlas Eólico del Perú – MINEM

De la Figura 6 se puede apreciar que en el Perú las velocidades de viento predominantes se encuentran en el rango de 2 a 4 m/s, estas que no son significativas para la producción masiva de energía mediante aerogeneradores de gran potencia, dado que esos valores de velocidad de viento son los mínimos requeridos para hacer funcionar los aerogeneradores [15].

Son pocas las zonas donde las velocidades de viento superan los 5 m/s, encontrándose estas en zonas costeras y en partes de la cordillera de los Andes.

#### **1.4. Marco normativo**

El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) con el propósito de incluir las energías renovables en la matriz energética del Perú ha decretado una serie de políticas, planes y leyes que promueven y dan seguridad a los inversionistas del sector.

##### **1.4.1. Políticas y Planes**

###### **Política energética nacional del Perú 2010-2040 (Decreto Supremo N° 064-2010-EM)**

Establece los objetivos de la política energética, incluyendo el plan para contar con una matriz energética diversificada; promover la energía de fuentes renovables y eficiencia energética, así como también desarrollar un sector energético con impacto mínimo en el medio ambiente y bajas emisiones de carbono.

###### **Plan de Acceso Universal a la Energía 2013-2022 (R.M. N° 203-2013-MEM/DM).**

Objetivo general: Promover, desde el ámbito energético, un desarrollo económico eficiente, sustentable con el medio ambiente y con equidad, implementando proyectos que permitan ampliar el acceso universal al suministro energético, priorizando el uso de fuentes energéticas disponibles, debiendo establecer su viabilidad técnica, social y geográfica de los proyectos mencionados, con el objeto de generar una mayor y mejor calidad de vida de las poblaciones de menores recursos en el país, en el periodo 2013-2022.

Mecanismos asociados:

- Masificación del uso del gas natural (residencial y vehicular);
- Promoción y/o compensación para el acceso al GLP;
- Desarrollo de nuevos suministros: Programa de sistemas fotovoltaicos rurales;
- Mejorar el uso energético con sustitución de equipos y tecnologías poco eficientes e incorporación de energías renovables.

#### **1.4.2. Marco Regulatorio**

##### **Ley sobre la promoción de la inversión para la generación de electricidad mediante el uso de energías renovables (Decreto Legislativo 1002 de 2008) y su reglamento (Decreto Supremo N° 012-2011-EM)**

Indica que la promoción de energías renovables debe ser una prioridad para el país y propone metas por la participación porcentual de los Recursos Energéticos Renovables (RER) al consumo de los hogares, a nivel nacional, de electricidad, dando preferencia al despacho de energía de fuentes renovables al sistema.

##### **Ley de Concesiones (Ley N°25844), Eléctricas y su Reglamento (D.S. N°009-93-EM).**

Regula, aun hoy, todo lo relacionado con la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica. En efecto, el suministro regular de energía eléctrica, hasta los límites de potencia fijados por el reglamento, la transmisión y la distribución de electricidad son consideradas servicios públicos. Estas actividades se pueden desarrollar únicamente a través de concesiones otorgadas por el gobierno.

##### **Ley General de Electrificación Rural (Ley N°28749), (30/05/2006) y su Reglamento (D.S. N°025-2007-EM).**

Establece el marco normativo para la promoción y el desarrollo eficiente y sostenible de la electrificación de zonas rurales, localidades aisladas y de frontera del país, declarándolos necesidades nacionales y utilidad pública. Incluye los sistemas eléctricos rurales con suministros no convencionales (p.ej.: sistema propio fotovoltaico y conexión domiciliaria con equipo de medición).

##### **Ley que Adecua los Parámetros de Aplicación del Fondo de Compensación Eléctrica (FOSE) para los Usuarios de los Sistemas Eléctricos Urbano Rural de los Sectores Típicos 4, 5 y 6 (Ley N°30319).**

El fin de esta ley es atenuar el impacto tarifario en las regiones con mayor índice de pobreza. Las familias peruanas pertenecientes a las zonas urbano-rural y rural se beneficiarán

de este subsidio siempre y cuando sus consumos de energía eléctrica sean menores o iguales a 10 kWh/mes.

## **1.5. Escenario económico**

Hoy en día en el Perú, los mecanismos de financiamiento que posibilitan la construcción de proyectos de energía renovables son escasos, en comparación con otros países cuyas políticas favorecen la inversión en estas tecnologías. Esto se da debido a que los criterios de evaluación de un proyecto de energías renovables son muy estrictos, ya que, estos proyectos tienen un alto grado de incertidumbre por la intermitencia, estacionalidad o escases de recurso.

En el Perú el desarrollo de proyectos con tecnología renovable se ha materializado dado a mecanismos de promoción como las subastas y cooperaciones internacionales.

### **1.5.1. Subastas**

Este mecanismo de promoción se viene llevando a cabo a partir del año 2009 en el Perú. Es convocado por el OSINERGMIN en el marco del Decreto Legislativo N°1002, otorgándole a los proyectos adjudicados el beneficio de inyectar toda la energía que producen a la red. Al día de hoy, se han realizado 4 subastas de proyectos de energía renovable que han conseguido adjudicar 1,060.98 MW de potencia instalada [16].

Las tecnologías adjudicadas en su mayoría han sido tecnologías hidroeléctricas. Sin embargo, en la cuarta subasta se adjudicaron proyectos grandes de otras tecnologías como la solar y la eólica, destacando el parque solar “Rubí” de 144.48 MW y el parque eólico “Nazca” con 126 MW de potencia instalada, ambos pertenecientes a la empresa Enel Green Power Perú S.A.

A su vez, en el Perú existe una entidad encargada de promover la inversión privada con el fin de impulsar su competitividad, PROINVERSION. Esta entidad ofrece una cartera de proyectos de distintos sectores, siendo uno de estos el de generación de energía, y es en este sector donde ha impulsado el crecimiento de la generación de energía mediante fuentes

hídricas, fuentes que son consideradas renovables cuando no supera una capacidad de 20 MW.

### **1.5.2. Cooperación Internacional**

Existen entidades internacionales en el Perú, como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Global Green Growth Institute, la Embajada Alemana, JICA, entre otros; los cuales poseen fondos destinados para promover proyectos que se encuentren dentro del marco de la sostenibilidad de los recursos en el mundo como los recursos energéticos. Es así como estas entidades invierten en proyectos, muchas veces de carácter local, generando así iniciativas que buscan replicabilidad en las entidades privadas.

### **1.5.3. Otros**

Existen otros mecanismos económicos que facilitan la generación eléctrica con energías renovables no convencionales, tal es el caso del “Feed-In Tariff”. Éste último es un instrumento normativo que establece una tarifa especial para la generación de energía con fuentes renovables, promoviendo así su desarrollo.

El “Feed-In Tariff” es un instrumento que aún no se ha establecido en Perú, sin embargo, hay muchos otros países que lo tienen entre sus bases normativas, alrededor de 50 [17].

## **1.6. Dinámica de fluidos**

La dinámica de fluidos es la ciencia que estudia el movimiento de los fluidos. A diferencia de la dinámica de cuerpos sólidos en planos bidimensionales, la dinámica de fluidos incorpora componentes complejos que dificultan su análisis. Esta complejidad radica en que un fluido es un conjunto de moléculas en constante interacción, que se encuentran sometidas a distintas fuerzas, donde cada partícula tiene una respuesta particular.

En la dinámica de fluidos se encuentran dos tipos de descripciones que detallan su estudio: La descripción Lagrangiana y la descripción Euleriana. La primera identifica las posiciones del fluido mientras este se desplaza en todas las direcciones, además considera las interacciones entre las partículas del fluido. La segunda, que es la que se utiliza en la presente

tesis, define un volumen finito, comúnmente denominado volumen de control, donde se considera una zona por donde el flujo ingresa y otra por donde sale.

La descripción Euleriana también resulta útil para determinar la posición de las partículas de un fluido cuando se encuentra en movimiento, pero a diferencia de la descripción Lagrangiana, resulta más sencillo porque introduce variables de campo, las que se encuentran en función del tiempo y el espacio, que analizan el comportamiento del fluido por agrupación de partículas. Las variables de campo se muestran en las ecuaciones: Ecuación 1, Ecuación 2, Ecuación 3.

**Ecuación 1** Campo de Presión

$$P = P(x, y, z, t)$$

Donde:

$P$  = Campo vectorial de presión

$x$  = Posición en el eje x en un instante dado

$y$  = Posición en el eje y en un instante dado

$z$  = Posición en el eje z en un instante dado

$t$  = Tiempo

**Ecuación 2** Campo de Velocidad

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$$

Donde:

$\vec{V}$  = Campo vectorial de velocidad

**Ecuación 3** Campo de aceleración

$$\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t)$$

Donde:

$\vec{a}$  = Campo vectorial de aceleración

La descripción euleriana no contempla el comportamiento de las partículas del fluido de manera individual; a cambio de ello, toma importancia en las variables de presión, velocidad, entre otros; con las que facilita la determinación de la posición de las partículas en cualquier momento dado.

### 1.7. Sistemas de simulación computacional de fluidos

En el diseño de estructuras, la construcción de un prototipo implica inversión de tiempo y dinero. Hoy en día, se utilizan programas de simulación numérica que permiten evaluar el comportamiento de sistemas sometidos a distintas condiciones.

En este caso, para el análisis del viento, existe una amplia gama de programas que simulan el comportamiento de los sólidos cuando son atravesados por flujos de aire, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Programas de Simulación de Fluidos	
Fluent CFD (Ansys)	Gridgen (Point Wise)
START-CD (Adapco)	SC/Tetra (Cradle)
CFD2000 (AAadaptative Research)	Flow-3D (Flow Science Inc.)
Comsol Multiphysics (Comsol AB)	Flo++ (Sofflo)

**Tabla 2** Programa de Simulación de fluidos  
Fuente: Elaboración propia

Los programas antes mencionados se diferencian por la amigabilidad de su interfaz, y por los recursos libres que ofrecen con sus licencias estudiantiles. También guardan muchas características comunes, estas se muestran a continuación:

- Mallas fijas o móviles
- Reacciones químicas
- Estados de fase
- Transferencia de calor: conducción convección y radiación
- Flujo laminar y turbulento
- Mallado hexaédrico, tetraédrico, piramidal, tipo cuña e híbrido

Estos programas realizan simulaciones mediante la solución iterativa de ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son ecuaciones no lineales que describen el movimiento de un fluido. Además, los cálculos son regidos por los tres principios de conservación expresados en términos de ecuación matemática: Conservación de la masa, conservación del momento y conservación de la energía (Sargsyan 2010).

La exactitud de los resultados que se obtengan de las simulaciones va a depender primordialmente del correcto diseño de las estructuras físicas y el tipo de mallado que se apliquen a todos los componentes del sistema. Una característica importante a señalar es que mientras más minucioso y detallado sea el mallado de los objetos que comprenden el sistema, entonces mayor será el tiempo que tardará el programa en mostrar los resultados.

### **1.7.1. ANSYS Fluent**

El software utilizado en la presente tesis es ANSYS Fluent 17.1 porque es una herramienta de alto nivel en dinámica de fluidos computacional (CFD), además, tiene un rápido proceso de cálculo y optimiza el rendimiento de los ordenadores donde se instala. Dispone de capacidades de modelados de flujo, turbulencia, transferencia de calor, entre otros.

En este caso, el fluido a modelar será el viento a través de un conducto que reduce su sección transversal. El viento circulará dentro de un volumen de control, cuyas características serán introducidas al software para tener resultados cercanos a la realidad.

### **1.8. Ducto convergente**

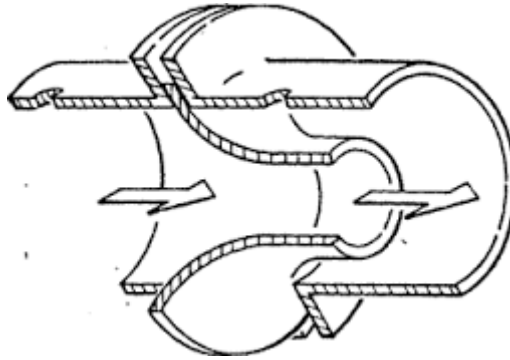
Un ducto convergente es un dispositivo que posibilita el aumento de la velocidad del fluido una vez que atraviesa a este mismo. El ducto convergente en estudio tiene la forma de una tobera y cumple el mismo efecto que este cuando un fluido lo atraviesa desde su mayor sección hasta su menor sección, el cual es incrementar la velocidad del fluido.



### 1.8.1. Tobera

Es un dispositivo que tiene la forma de un conducto, cuya sección transversal se reduce a lo largo de su estructura. Tiene especial aplicación en las turbomáquinas, y máquinas como inyectores, surtidores, entre otros.

Este dispositivo hace que el fluido que lo atraviese sufra un aumento de velocidad acompañado de una caída de presión y temperatura, este comportamiento se da, ya que el sistema se rige al principio de la conservación de la energía. La forma estructural de una tobera se puede apreciar en la Figura 7.

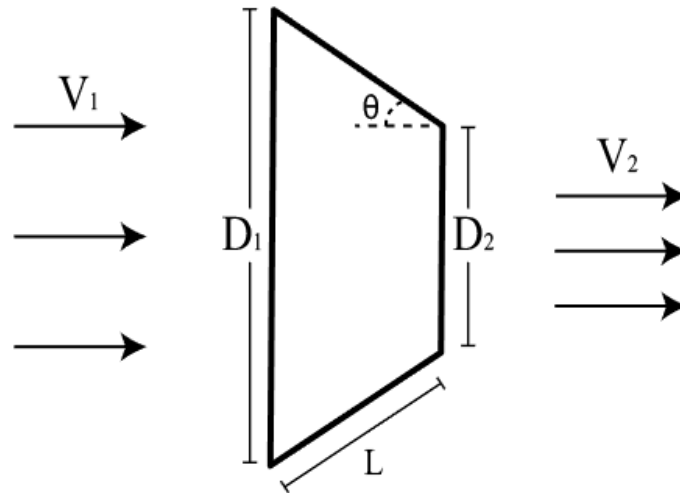


**Figura 7** Sección transversal de una tobera.  
Fuente: Universidad de los Andes

### 1.8.2. Principio de Funcionamiento del ducto convergente

En el presente estudio se referencia a algunas de las partes del ducto convergente que no son fáciles de reconocer por un nombre común, motivo por el cual en la Figura 8 se

describen los nombres que en adelante se utilizarán para referenciar las partes de un ducto convergente.



**Figura 8** Vista de perfil de un ducto convergente  
Fuente: Elaboración Propia

Donde:

$V_1$ = Velocidad de entrada

$V_2$ = Velocidad de salida

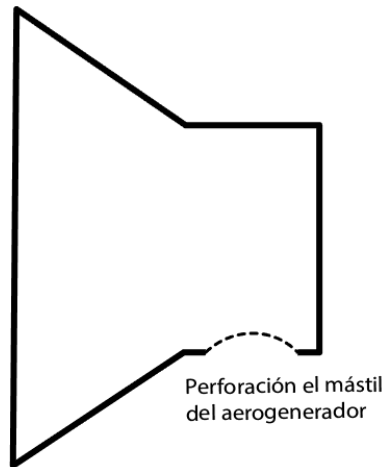
$D_1$ = Diámetro de entrada

$D_2$ =Diámetro de salida

$L$ = Longitud

$\theta$ = Ángulo de direccionamiento

El ducto convergente analizado en este estudio posee una extensión (perforada) en la zona de salida para que permita el encaje con el aerogenerador y se mantenga estático respecto a este. Esta extensión se muestra en la Figura 9.



**Figura 9** Ducto convergente con extensión en la salida  
Fuente: Elaboración Propia

El ducto convergente hace posible el incremento de la velocidad del fluido que lo atraviese desde su mayor sección hasta su menor sección debido a principios físicos como la conservación de la masa y el principio de Bernoulli.

El incremento de la velocidad de viento en este componente se explica con el principio de la conservación de la masa del aire, principio descrito en la Ecuación 4. Este principio indica que la transferencia de masa de aire hacia dentro o fuera de un volumen de control durante un intervalo de tiempo es igual a la variación neta de la masa de aire que se encuentra dentro del volumen de control en el transcurso de ese tiempo.

**Ecuación 4** Conservación de la masa

$$m_{ent} - m_{sal} = \Delta m_{VC} \quad [kg]$$

Donde  $m_{ent}$  y  $m_{sal}$  son las masas de aire que entran y salen del volumen de control durante un intervalo de tiempo, y  $\Delta m_{VC}$  es el cambio de masa de aire en el volumen de control en ese mismo intervalo de tiempo.

También es posible expresar esta ecuación en forma de flujos como se muestra en la Ecuación 5.

**Ecuación 5** Conservación de la masa (diferencial)

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = dm_{VC}/dt \quad [kg/s]$$

Donde  $\dot{m}_{ent}$  y  $\dot{m}_{sal}$  son los flujos de aire en la entrada y salida del volumen de control, y  $dm_{VC}/dt$  es la razón de cambio de masa de aire dentro de los límites del volumen de control.

Tomando en cuenta la condición estacionaria del viento se puede definir un balance de masa, como se muestra en la Ecuación 6, el cual describiría que la cantidad total de masa de aire que se encuentra dentro del volumen de control no varía con el tiempo, es decir que para determinado intervalo de tiempo la masa de aire que sale del volumen de control es igual a la masa de aire que entra a éste.

**Ecuación 6** Conservación de la masa en condición estacionaria

$$\Sigma \dot{m}_{ent} = \Sigma \dot{m}_{sal} \quad [kg/s]$$

Además, la condición incompresible que presenta el viento facilita la relación del balance del flujo másico de aire, ya que las densidades son iguales en todos los puntos de su trayecto pudiendo simplificarse.

Considerando la relación de la masa con la densidad:

$$\dot{m} = \dot{v} \times \rho$$

Donde:

$\dot{m}$ = Flujo de masa [kg/s]

$\dot{v}$ = Caudal [m<sup>3</sup>/s]

$\rho$  = Densidad [kg/ m<sup>3</sup>]

El balance del flujo másico se simplifica como se muestra a continuación:

$$\Sigma \dot{m}_{ent} = \Sigma \dot{m}_{sal} \quad [kg/s]$$

$$\Sigma \dot{v}_{ent} \times \rho = \Sigma \dot{v}_{sal} \times \rho$$

**Ecuación 7** Balance de volúmenes en un sistema incompresible

$$\Sigma \dot{v}_{ent} = \Sigma \dot{v}_{sal} \quad [m^3/s]$$

El ducto convergente solo cuenta con una corriente de flujo (el viento), por lo que el comportamiento del fluido se describe como se muestra en la Ecuación 8 y en la Ecuación 9.

**Ecuación 8** Balance de flujo de volúmenes en un sistema incompresible

$$\dot{v}_1 = \dot{v}_2 \quad [m^3/s]$$

**Ecuación 9** Relación del volumen y área en dos secciones de un conducto

$$\vec{V}_1 \times A_1 = \vec{V}_2 \times A_2$$

Donde  $V_1$  y  $A_1$  representan la velocidad del viento y la sección del ducto convergente de entrada respectivamente y  $V_2$  y  $A_2$  la velocidad del viento y la sección del ducto convergente de salida.

De este modo, se establece la relación que tiene la velocidad del viento con la sección del conducto que esta atraviesa, pudiéndose incrementar si se encuentra en la sección del conducto más pequeña.

## CAPITULO II: METODOLOGÍA

### 2.1. Análisis del comportamiento del viento dentro de un ducto convergente

Se empezará determinando la trayectoria recorrida por cada partícula de viento cuando esta se encuentra dentro de un ducto convergente. Además, también se determinará el cambio de forma que experimentan estas partículas a lo largo de su trayecto.

#### 2.1.1. Análisis de la posición de una partícula dentro de un ducto convergente

Se analizará la posición de una partícula de viento dentro de un conducto convergente y se realizará un trazado gráfico que describa su trayectoria.

Para el análisis se hará uso de la Ecuación 2, la que será procesada por operadores matemáticos diferenciales para la obtención de las coordenadas que ubiquen a una partícula de viento en un tiempo dado.

$$\vec{V} = (V_0 + bx)\vec{i} - by\vec{j}$$

Donde:

$\vec{V}$  = Campo vectorial de velocidad

$x$  = Posición en el eje x de la partícula del fluido

$y$  = Posición en el eje y de la partícula del fluido

$V_0$  = Velocidad horizontal en el tiempo cero

$b$  = Valor de la velocidad resultante en un punto dado

#### 2.1.2. Análisis de la deformación de las partículas

Dada las relaciones matemáticas que describan la posición relativa de las partículas de viento en un instante dado, se analizará las variaciones en su forma a lo largo de su trayectoria de recorrido. Se realiza este análisis debido a que el espacio de entrada es distinto al de salida, y para que se cumpla la ecuación de continuidad, que es un derivado del principio de la conservación de la masa, en este fluido debe existir una variación en la forma de las partículas.

Para el análisis se tomará en cuenta la información en coordenadas de los resultados obtenidos en la sección 2.1.1, y con ello evaluar dos arreglos de posiciones de partículas en tiempos diferentes.

**Ecuación 10** Posición de una partícula de fluido en un instante dado

$$\text{Posición}(x, y, t) = \left( \frac{dV_{x\text{-particula}}}{dt}, \frac{dV_{y\text{-particula}}}{dt} \right)$$

Donde:

$\text{Posición}(x, y, t)$  = Posición de la partícula de fluido en un instante dado

$\frac{dV_{x\text{-particula}}}{dt}$  = Posición en el eje x de la partícula del fluido en un instante dado

$\frac{dV_{y\text{-particula}}}{dt}$  = Posición en el eje y de la partícula del fluido en un instante dado

## **2.2. Análisis de la velocidad del viento a la salida del ducto convergente**

Se realizarán una serie de simulaciones computacionales con el software ANSYS Fluent, donde se variarán las dimensiones del ducto convergente y se analizará la relación que tiene la velocidad de salida con la variación de sus dimensiones. De ese modo, se generarán gráficas que muestren esta dependencia del valor de la velocidad del viento en la salida del ducto convergente.

### **2.2.1. Modelado del ducto convergente**

Se realizará un diagramado del ducto convergente de viento en 6 vistas, la cuales se muestran en la Tabla 3, y en 3D, ello con el fin de ser el modelo base a introducir en la simulación computacional.

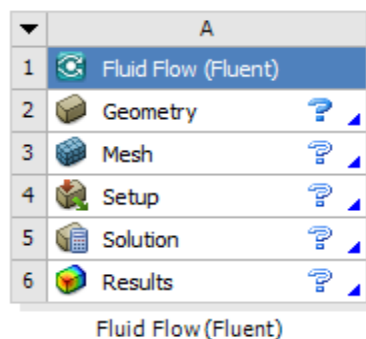
Vista
Vista Lateral Derecha
Vista Lateral Izquierda
Vista Frontal
Vista Inferior
Vista Superior
Vista Posterior

**Tabla 3** Vistas del diagrama del ducto convergente  
Fuente: Elaboración propia

### **Analizar la relación de la velocidad de viento con las dimensiones del ducto convergente**

Se realizarán simulaciones computacionales con el software ANSYS Fluent del ducto convergente expuesto a una corriente de viento, a fin de evaluar los valores de velocidad que presenta el viento en su salida. El modo de evaluación se hará estableciendo una velocidad de viento aleatoria, por ejemplo, 4 m/s, en la entrada con dirección a la salida, y se variará el ángulo de direccionamiento del ducto convergente.

La dinámica de fluidos computacional se iniciará abriendo el programa y generando un esquema de proyecto (Fluid Flow – Fluent), como el mostrado en la Figura 10, que será el entorno donde se incluirán los parámetros simulación.



**Figura 10** Esquema de Proyecto

El esquema de proyecto Fluid Flow – Fluent se presenta como una lista vertical de apartados enumerados del 1 al 6. Cada uno de estos se describen a continuación:

1. Fluid Flow (Fluent): Es el entorno de simulación de fluidos que se compone de los apartados subsiguientes.

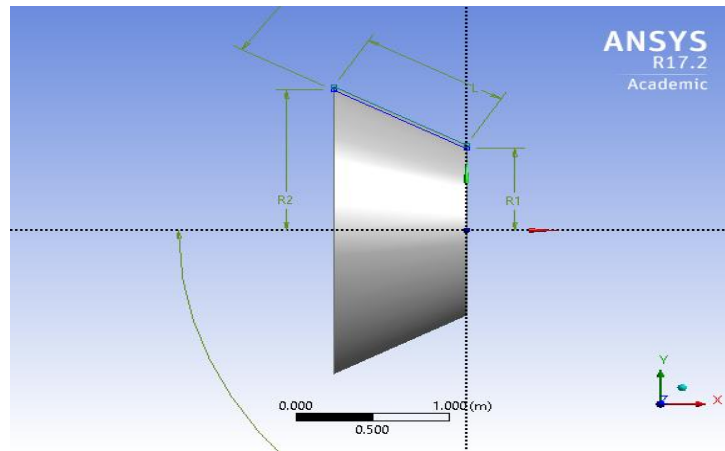


2. Geometry: Apartado donde se realiza el modelamiento de los objetos sólidos que intervienen dentro de la simulación.
3. Mesh: Apartado donde se aplica el mallado a los objetos que intervienen en la simulación. Hay 2 formas de mallar los objetos: Mallado automático, donde el software toma en cuenta la geometría y topología del modelo mediante algoritmos, y el mallado manual, donde el usuario indica al software en qué lugares desea mallar de una manera más fina. El mallado aplicado determinará el grado de exactitud de los resultados, así como el tiempo que toma los cálculos de la simulación.
4. Setup: Apartado donde se introducen las variables físicas de los sólidos creados y del fluido seleccionado. Además, posibilita su modificación en cualquier momento, característica que ayudan a adecuar en mejor medida la simulación. Así, por ejemplo, se pueden colocar las variables físicas para el aire como la densidad y la viscosidad.
5. Solution: Apartado donde se determina la cantidad de iteraciones que se realizará en base a las ecuaciones seleccionadas para la simulación. Además, permite la visualización en tiempo real del comportamiento de las variables introducidas. El rango de iteraciones no se encuentra limitado, incrementando con el número la confiabilidad de los resultados, pero también el tiempo de procesamiento. Es recomendable que el número de iteraciones tenga el menor valor donde la curva de resultados empiece a tener valores constantes.
6. Results: Apartado donde se muestra una amplia gama de alternativas para la visualización de los resultados tales como vectores, líneas de contornos, gráficas, entre otros.

### **Generación de los Sólidos**

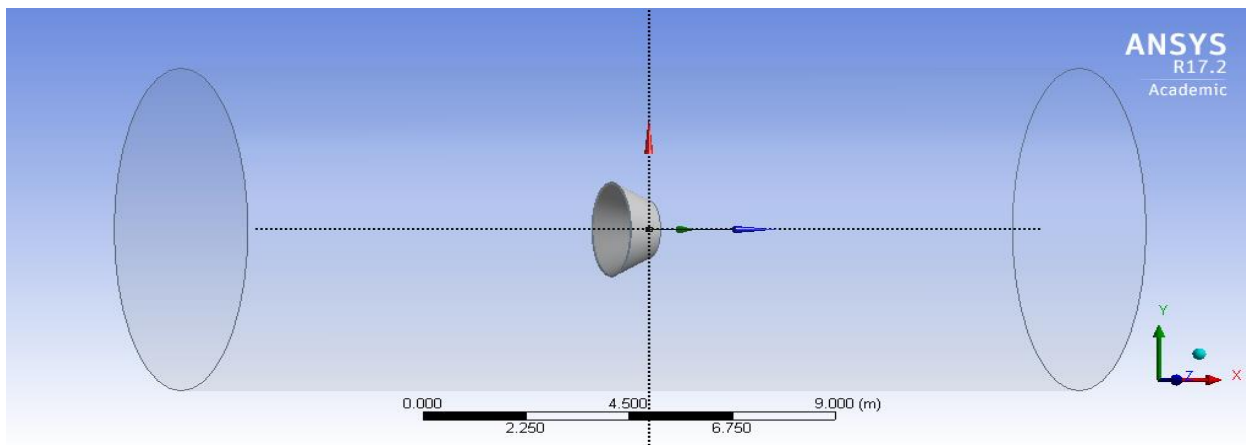
En el apartado Geometry se puede abrir el entorno de modelado predeterminado “Design Modeler” para establecer el diseño del ducto convergente en 3D con distintas dimensiones para su análisis en los distintos escenarios que se plantearán. En la Figura 11 se puede apreciar un ejemplo particular del diseño de un ducto convergente 3D, donde las

variables de entrada son: los radios de entrada y salida, la longitud del ducto convergente y el ángulo de expansión.



**Figura 11** Diseño del ducto convergente 3D  
Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

Luego de ser modelado el ducto convergente, se define un volumen de control cilíndrico que será abarcado por el fluido (aire), así como se puede apreciar en la Figura 12.

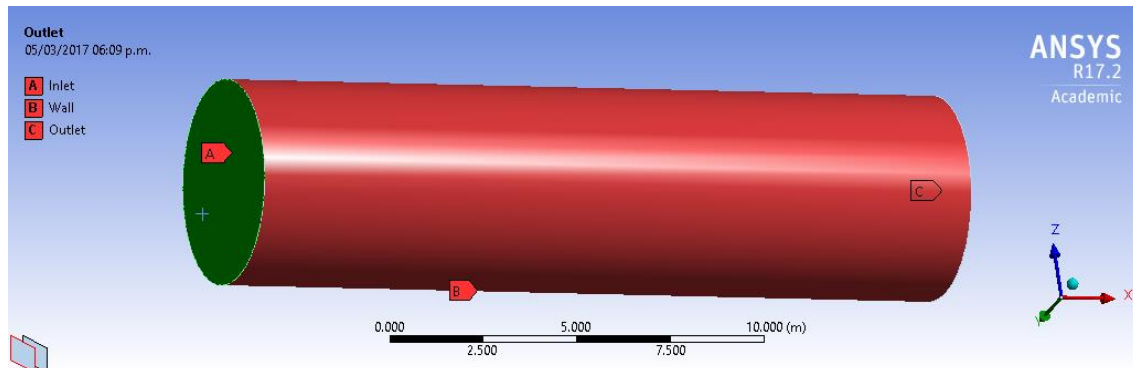


**Figura 12** Ducto convergente dentro de un volumen de control  
Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

## Mallado

Después de definir el volumen de control del fluido y los sólidos que se encontrarán expuestos se realiza el mallado utilizando el apartado 3 “Mesh”.

Se empezará por nombrar las zonas del volumen de control, con la finalidad de referenciar las zonas por donde se direccionará el fluido, así como se puede apreciar en la Figura 13.



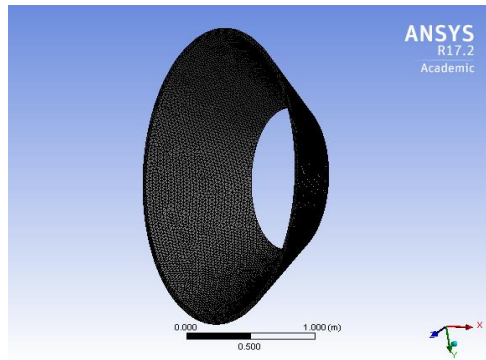
**Figura 13** Nombramiento de las zonas del volumen de control

Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

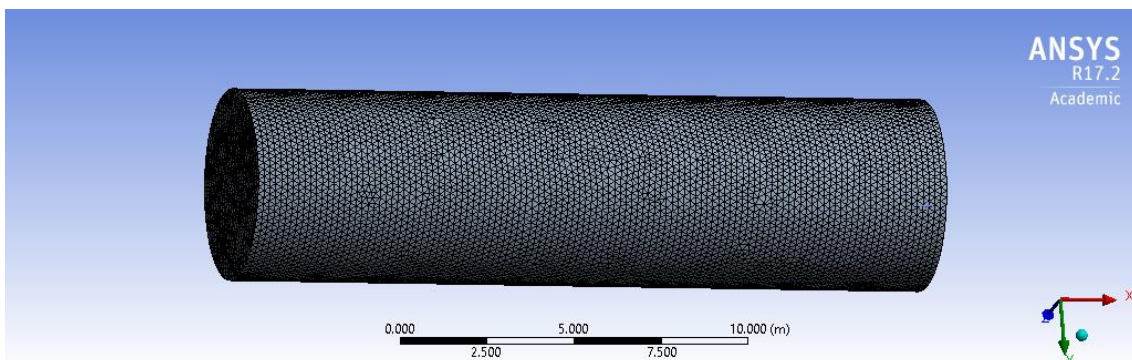
Luego se realiza el mallado manual al sistema, donde las áreas de malla más fina son aplicadas en los bordes del sistema, pues son esas regiones críticas en el estudio por su influencia en el origen de regiones de turbulencia.

A la tobera se le define un tamaño de celda de 3 cm, siendo este un valor adecuado dado que, consigue la mayor cantidad de elementos que se pueden obtener con la licencia del software en uso, y a mayor cantidad de elementos, mayor es la exactitud de cálculo [19]. Por otro lado, se utilizará un volumen de control con un tamaño de celda de 10 cm (menos fino), dado que la longitud que presenta este es mucho más largo que la tobera (20 m) y que su geometría no es compleja.

Con ello se obtiene una cantidad de nodos del orden de los 50,000 y una cantidad de elementos del orden de los 300,000, teniendo ligeras variaciones para cada caso simulado dado que se variarán las dimensiones de la tobera. Con esto se obtendrán resultados visuales como los que se muestran en la Figura 14 y en la Figura 15.



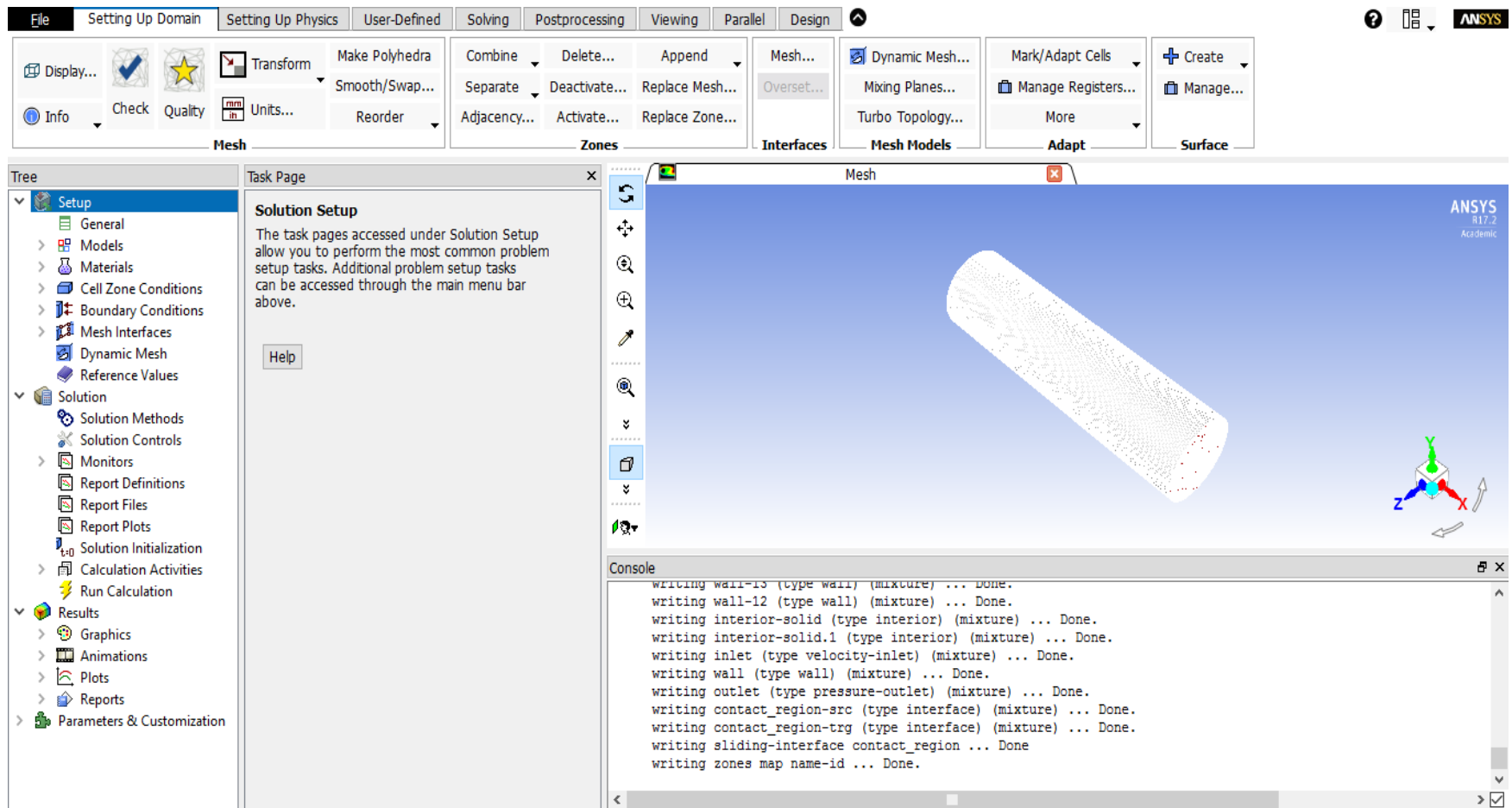
**Figura 14** Mallado del ducto convergente  
Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent



**Figura 15** Mallado del volumen de control  
Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

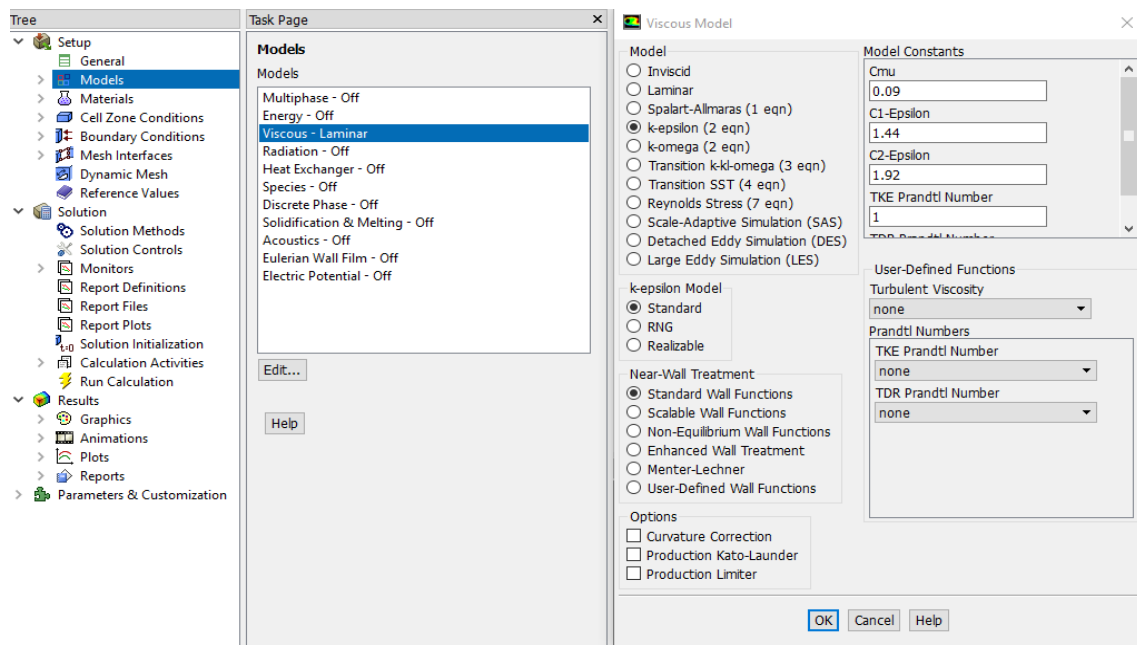
### **Variables del sistema**

Una vez creado el mallado, se seleccionará el apartado “Setup” para indicar los parámetros a considerar en el programa durante los cálculos. La visualización de este apartado debe ser similar a la presentada en la Figura 16.



**Figura 16** Ventana panorámica del apartado Setup del software  
 Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

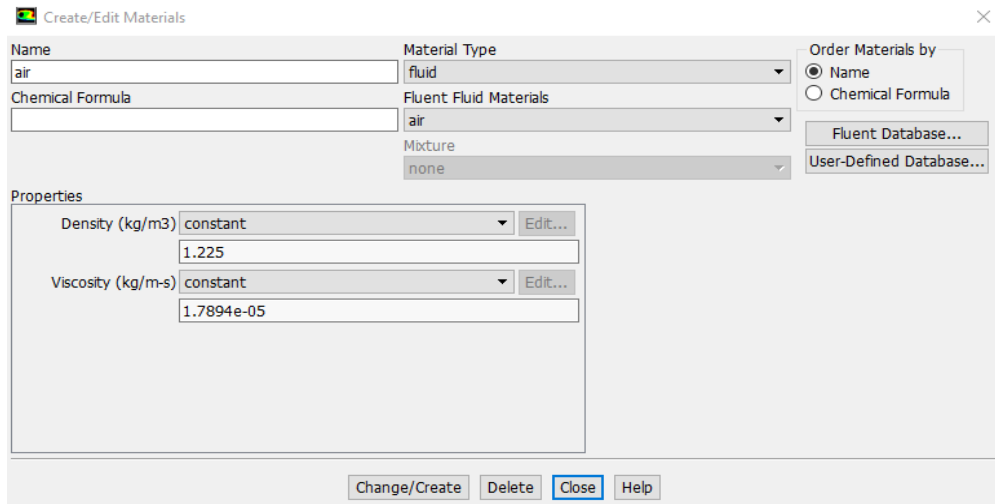
La primera variable por seleccionar es el modelo matemático. Para el caso del presente estudio se seleccionará el modelo Viscoso k-epsilon (2 eqn), dada su amplia utilización en sistemas de fluidos y su practicidad frente a otros modelos. Según Zamora [20]: “su robustez, economía y precisión razonable para un amplio rango de flujos turbulentos, explica su popularidad en simulaciones de flujos y transmisión de calor”. De entre las opciones que muestra el modelo k-epsilon se selecciona el modelo Standard, así como se muestra en la Figura 17, dado que es el modelo de menor complejidad que presenta mejor comportamiento en el momento de los cálculos computacionales.



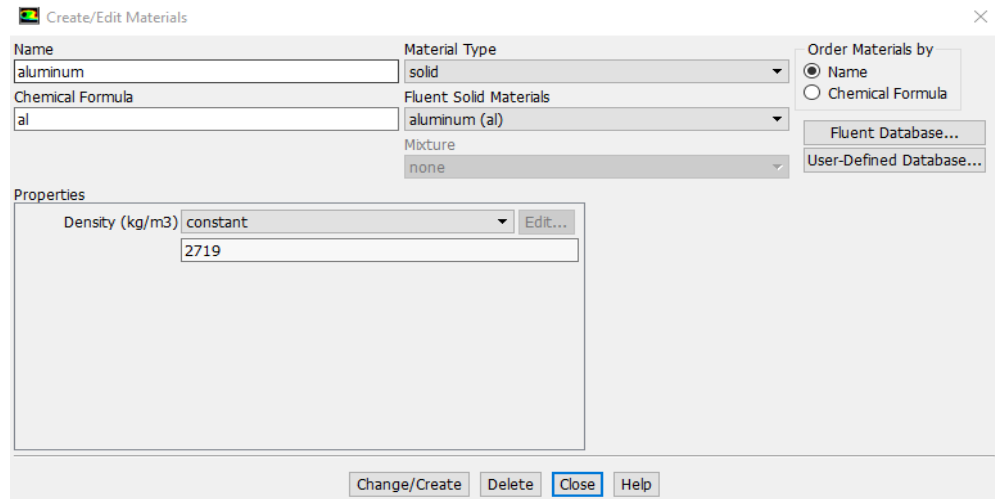
**Figura 17** Selección del modelo viscoso k-epsilon (2 eqn)

Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

Después de definir el modelo matemático a utilizar, se procede a definir el tipo de material y fluido que interviene en la simulación, siendo el material el aluminio y el fluido el aire, este último predeterminado en el sistema. Los datos por ingresar se aprecian en la Figura 18.



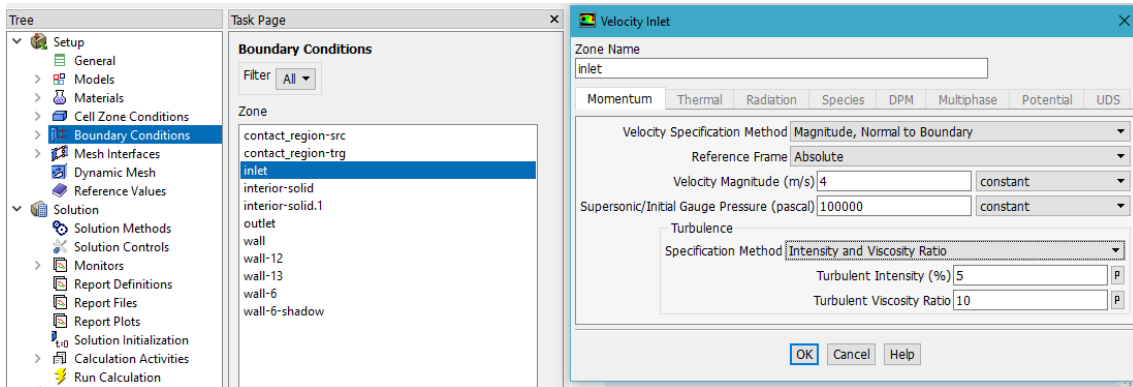
(a)



(b)

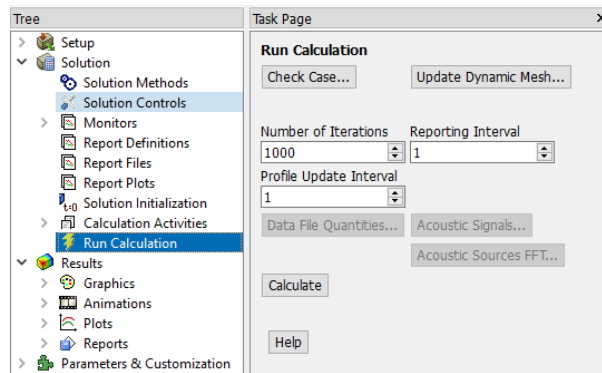
**Figura 18** Condiciones de los materiales del sistema: (a) aire y (b) aluminio  
Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

A continuación, se define las condiciones del viento para determinar su comportamiento al atravesar el ducto convergente. Las variables por considerar en este paso son la velocidad y presión de entrada. En el apartado de “Boundary Conditions” se selecciona “Inlet”, luego se especifican los valores de velocidad y presión y se finaliza presionando OK. Estas referencias se muestran en la Figura 19.



**Figura 19** Condiciones del fluido (aire)  
 Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent

Como paso final se configura el número de iteraciones que realizará el software, recalcando que a mayor número de iteraciones los resultados serán más precisos; sin embargo, a mayor número de iteraciones también hay mayor tiempo de espera de la simulación. Para el presente estudio se establecerán 1000 iteraciones (ver Figura 20), lo cual se considera representativo porque se realizó simulaciones previas, donde aproximadamente a partir de la iteración 750 la gráfica de resultados empezaba a presentar valores constantes.



**Figura 20** Módulo de las opciones de cálculo  
 Fuente: Elaboración propia – ANSYS Fluent



### 2.3. Análisis del impacto mecánico del acoplamiento de un ducto convergente a un aerogenerador

De acuerdo con la variación de dimensiones que se estudiarán en la sección 2.2, que tendrá influencia directa en la velocidad de salida del ducto convergente, a su vez presentará un incremento del torque que tendrá que resistir el mástil del aerogenerador donde se instale.

El torque se verá incrementado por el aumento de sección, debido al ducto convergente, donde incidirá el flujo de viento. Por ello se analizará la relación que tiene la variación de las dimensiones del ducto convergente con el torque que se genera en un punto del mástil del aerogenerador.

Para este análisis se hará uso de la segunda ley de Newton y de la fórmula general del torque, las que se muestran en la Ecuación 11 y la Ecuación 12.

**Ecuación 11** Segunda ley de Newton

$$F = m \times \left( \frac{V_f - V_o}{\Delta t} \right) [N]$$

Donde:

$F$  = Fuerza [N]

$m$  = masa del fluido [kg]

$V_f$  = Velocidad final [m/s]

$V_o$  = Velocidad inicial [m/s]

$\Delta t$  = Variación del tiempo [s]

**Ecuación 12** Fórmula general del torque

$$T = F \times d [Nm]$$

Donde

$T$  = Torque [Nm]

$d$  = Distancia [m]

## 2.4. Diseñar el modelo de un conducto convergente óptimo para un aerogenerador de baja potencia

Con los resultados obtenidos en las secciones 2.1, 2.2 y 2.3 será posible determinar los límites que presenta un aerogenerador para el dimensionamiento del ducto convergente que se le acople. Estos límites surgen a causa de las características de diseño del mismo aerogenerador con todos sus componentes.

El diseño se iniciará con el análisis del soporte del torque máximo que tiene el aerogenerador a causa de la máxima velocidad de viento que soporta, donde después del acoplamiento del ducto convergente esta máxima velocidad tendrá un distinto valor, porque después de atravesar el ducto convergente aceleraría su velocidad y estaría fuera del límite de soporte del aerogenerador.

Entonces, se establecerá una equivalencia entre el torque máximo del aerogenerador, obtenida de la Ecuación 12, cuando opera sola con el torque que se genera por la operación del aerogenerador con el ducto convergente. Esta equivalencia se muestra en la Ecuación 13.

**Ecuación 13** Relación entre el torque del sistema y el torque del aerogenerador a velocidad máxima y el ducto convergente

$$T_{sistema} = T_{aerogenerador/velocidad\ máxima}$$

$$T_{sistema} = T_{aerogenerador/nueva\ velocidad\ máxima} + T_{ducto\ convergente}$$

Donde:

$$T_{sistema} = \text{Torque del sistema}$$

$$T_{aerogenerador/velocidad\ máxima} = \text{Torque del aerogenerador a velocidad máxima}$$

$$T_{aerogenerador/nueva\ velocidad\ máxima} = \text{Torque del aerogenerador a nueva velocidad máxima}$$

$$T_{ducto\ convergente} = \text{Torque del ducto convergente}$$

## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### 3.1. Comportamiento del viento dentro de un ducto convergente

Se analizó el comportamiento del viento dentro de un ducto convergente. En el análisis se determinó las ecuaciones que describen las posiciones de los fluidos en cualquier instante de tiempo, y con ello se consiguió demostrar que las partículas de un fluido a lo largo de un ducto convergente son incompresibles.

#### 3.1.1. Posición de una partícula de viento dentro de un ducto convergente

A partir de la Ecuación 2, se definió las ecuaciones matemáticas que entregan información de la posición de las partículas del viento en un momento dado. El procedimiento del análisis matemático se muestra en el ANEXO 1.

Las ecuaciones que resultaron del análisis se muestran en la Ecuación 14 y la Ecuación 15

**Ecuación 14** Ecuación de la posición  $x$  de una partícula de un fluido en un tiempo  $t$

$$x = \frac{1}{b} [(V_o + bx_n) \times e^{bt} - V_o]$$

Donde:

$x$  = Posición en el eje  $x$  de la partícula del fluido

$V_o$  = Velocidad horizontal en el tiempo cero

$b$  = Valor de la velocidad resultante en un punto dado

$x_n$  = Posición de partida en el eje  $x$

$t$  = Tiempo

**Ecuación 15** Ecuación de la posición  $y$  de una partícula de un fluido en un tiempo  $t$

$$y = y_n \times e^{-bt}$$

Donde:

$y$  = Posición en el eje  $y$  de la partícula del fluido

$y_n$  = Posición de partida en el eje x

Entonces las ecuaciones anteriormente analizadas indican que una partícula después de un tiempo t se encontrará en la posición:

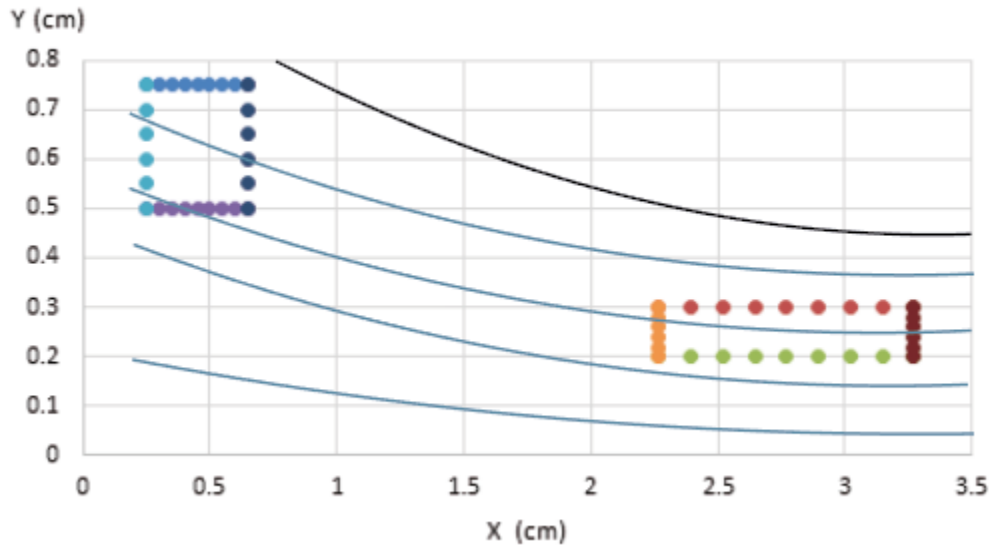
$$Posición(x, y, t) = \left( \frac{1}{b} [(V_o + bx_n) \times e^{bt} - V_o]; y_n \times e^{-bt} \right)$$

### 3.1.2. Deformación de las partículas del fluido

Además, se analizó el comportamiento de las formas de las partículas al largo de su trayectoria dentro del ducto convergente. Para que el principio de conservación de masa se cumpla estas se deforman en su trayecto.

A partir de la Ecuación 14 y la Ecuación 15, obtenidas en la sección anterior, se determinó el comportamiento que tiene un arreglo de partículas a lo largo de su trayectoria. Estos arreglos se deforman mientras se acercan a la salida del ducto, y esto se debe a que en la salida todas las partículas que ingresaron no se frenan, por lo tanto, reestructuran sus posiciones para que no obstruyan a las partículas que se encuentran aguas arriba.

Se estableció un arreglo de partículas, ANEXO 2, en el ingreso de del ducto convergente con una forma definida, y mediante la Ecuación 14 y la Ecuación 15 se determinó el cambio de su forma. Estos resultados se muestran en la Figura 21



**Figura 21** Deformación del arreglo de partículas de un fluido dentro de un ducto convergente en un tiempo dado  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21 se puede apreciar que el arreglo de partículas de fluido inicial se ha deformado en su trayecto. Sin embargo, esta deformación no significa un cambio de volumen en su estructura, es decir, el cambio de forma de las partículas no vuelve compresible al fluido. Esto se demuestra con un ejemplo de aplicación utilizando la Ecuación 14 y la Ecuación 15.

Se tiene que los volúmenes de los arreglos de partículas del fluido como se muestran en la Ecuación 16.

**Ecuación 16** Volumen de un fluido en un plano tridimensional

$$Volumen_1 = \Delta x_1 \times \Delta y_1 \times \Delta z_1$$

$$Volumen_2 = \Delta x_2 \times \Delta y_2 \times \Delta z_2$$

Considerando los valores utilizados para demostrar la deformación del arreglo de partículas, ANEXO 2, y tomando en cuenta que la profundidad en ambos casos es igual por ser un análisis bidimensional, se tiene:

$$(0.5) \times (0.5) \times \Delta z_1 = (3.5225 - 2.2679)(0.49815 - 0.29889) \times \Delta z_2$$

$$0.25 = 0.25$$

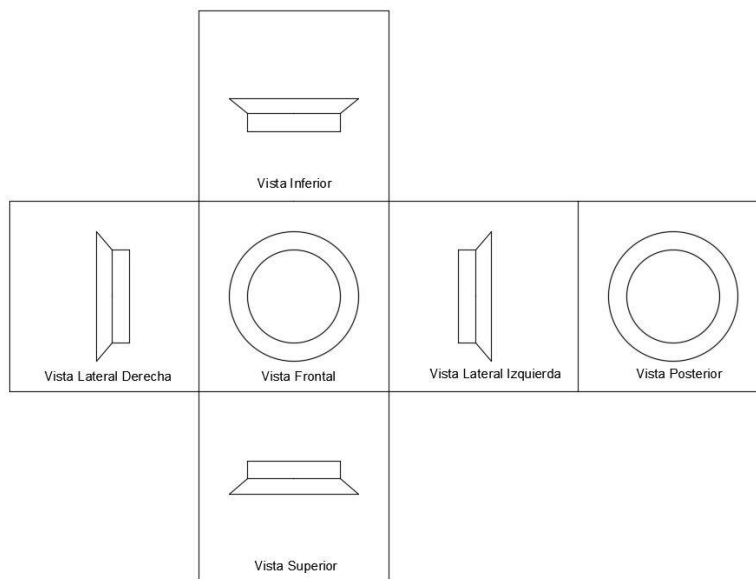
Con ello se demuestra que no existe un cambio de volumen en la deformación del arreglo de las partículas, es decir, se demuestra la incompresibilidad del flujo a lo largo del ducto convergente.

### 3.2. Velocidad del viento a la salida del ducto convergente

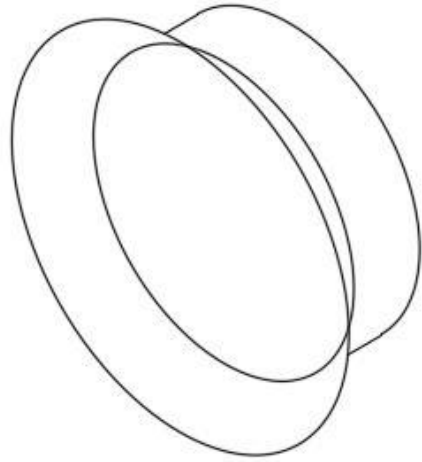
En esta sección se definió el modelo del ducto convergente para su comprensión en cuanto a instalación en el aerogenerador, además se realizó simulaciones numéricas en el software ANSYS Fluent, para determinar comportamiento de la velocidad del viento en la salida del ducto convergente variando su longitud y ángulo de direccionamiento. Finalmente, a partir de las gráficas obtenidas por el software, se elaboró la relación matemática que vincula la velocidad de salida del ducto convergente con sus dimensiones.

#### 3.2.1. Modelo del ducto convergente

De acuerdo con la forma de un aerogenerador de baja potencia, se elaboró el modelo de ducto convergente que se muestra en la Figura 22, y cuya vista 3D se puede ver en la Figura 23.

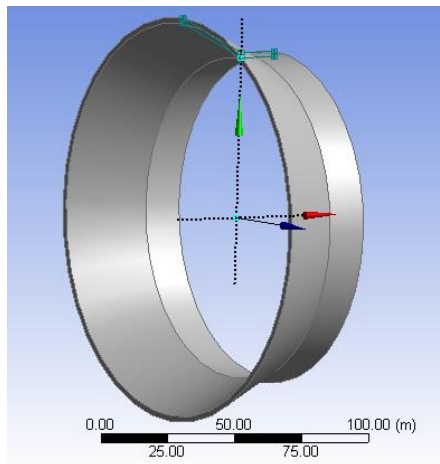


**Figura 22** 6 vistas 2D del ducto convergente  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 23** Vista 3D del ducto convergente  
Fuente: Elaboración propia

El modelo fue esquematizado en el software para las simulaciones de viento. Esto se puede apreciar en la Figura 24



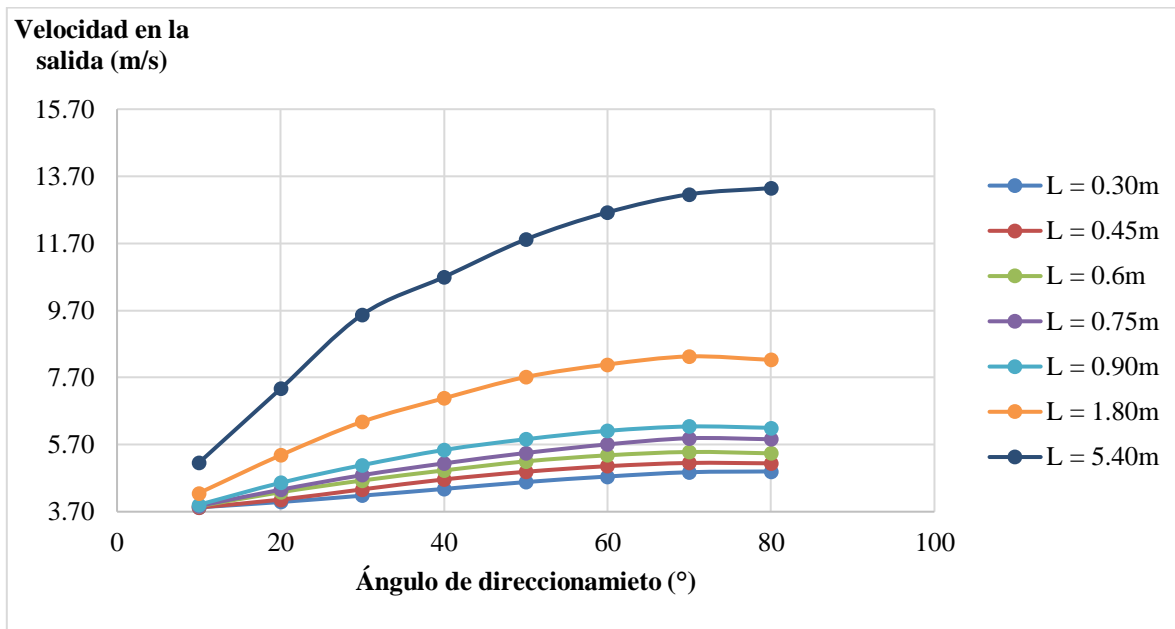
**Figura 24** Esquema 3D del ducto convergente en el software ANSYS Fluent  
Fuente: Elaboración propia

### **3.2.2. Relación de la velocidad de viento con las dimensiones del ducto convergente**

Se realizaron simulaciones computacionales con el software ANSYS Fluent donde se definió las características del fluido (viento) y del sólido en contacto (ducto convergente) para evaluar el incremento de la velocidad de salida respecto de la entrada. Para distintos

ángulos de direccionamiento se obtuvieron diferentes velocidades de salida en el ducto convergente, las cuáles se pueden visualizar con ilustraciones en el ANEXO 3 y en forma de resultados numéricos en el ANEXO 4.

El resumen de estos resultados se puede apreciar en la Figura 25.

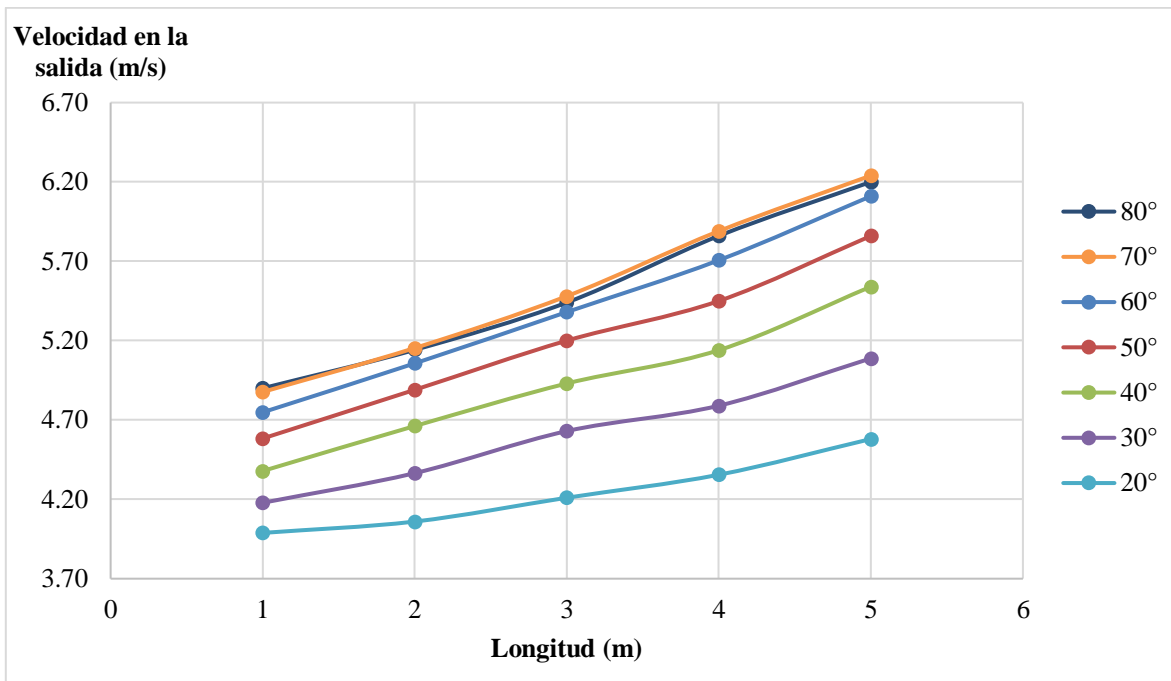


**Figura 25** Primera relación de la velocidad del viento en la salida del ducto convergente con la longitud y el ángulo de direccionamiento  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 se puede apreciar que la velocidad del viento incrementa a medida que el ángulo de direccionamiento crece. Además, se puede apreciar que en la mayoría de los casos existe un pico de valor para el ángulo de direccionamiento de 70° (Esto se puede apreciar mejor en el ANEXO 4). Esto último ocurre debido a que cuando este ángulo se incrementa las partículas de viento cambian de dirección de manera brusca hacia la garganta del ducto convergente, por lo tanto, su velocidad empieza a reducir.

Los ángulos cercanos y menores que 70° presentan menores aumentos respecto a ángulos mucho menores, tales como 10°, 20° y 30°, esto se explica con lo antes mencionado, para ángulos de direccionamiento pequeños, la velocidad de viento no sufre un cambio significativo en su dirección, por ello su vector velocidad no reduce mucho su valor.





**Figura 26** Segunda relación de la velocidad del viento en la salida del ducto convergente con la longitud y el ángulo de direccionamiento  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 26 muestra que a medida que se incrementa la longitud del ducto convergente la velocidad de viento crecerá para un mismo ángulo de direccionamiento. En este caso no se muestra una restricción con respecto a un límite de longitud donde la velocidad de viento deje de crecer.

Con la información de las curvas antes mostradas, de la Figura 25 y de la Figura 26, se consiguió realizar una ecuación que da por resultado la velocidad de salida introduciendo como dato la velocidad de entrada, la longitud, el diámetro de entrada y diámetro de salida del ducto convergente.

**Ecuación 17** Relación entre la velocidad de salida en un ducto convergente con sus dimensiones

$$V = V_o \times \left( 1.02 + 0.6 \times L \times \arcsen \left( \frac{D_1 - D_2}{2 \times L} \right) / 70 \right)$$

$$0 < D_1 - D_2 < 0.94 \times L$$

Donde:

$V$  = Velocidad en la salida del ducto convergente [m/s]

$V_o$  = Velocidad de entrada [m/s]

$L$  = Longitud del ducto convergente [m]

$D_1$  = Diámetro de entrada

$D_2$  = Diámetro de salida

Con la Ecuación 17 se puede determinar la velocidad del viento en la salida del ducto convergente, a su vez indica que la diferencia entre los diámetros del ducto no puede superar el valor de 0.94 veces la longitud, dado que sobre este valor la velocidad deja de aumentar como se mostró en la Figura 26.

### 3.3. Impacto mecánico del acoplamiento de un ducto convergente a un aerogenerador

Junto con el incremento de velocidad, el aumento de las dimensiones del ducto convergente genera un mayor torque al mástil, que es el elemento que sostiene aerogenerador y al ducto convergente. Este incremento de torque va a ser directamente proporcional al área normal donde inciden las líneas de viento.

De la Ecuación 11 se tiene:

$$F = m \times a$$

$$F = m \times \left( \frac{V_o \times \cos\theta - V_o}{\Delta t} \right)$$

$$F = \dot{m} \times V_o \times (\cos\theta - 1)$$

$$F = \rho \times A \times V_o^2 \times (\cos\theta - 1)$$

Donde:

$F$  = Fuerza del viento [N]

$\rho$  = Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  = Área [m<sup>2</sup>]

$V_o$  = Velocidad del viento [m/s]

$\theta$  = Ángulo de direccionamiento

De la Ecuación 12 se tiene:

$$T = F \times d$$

**Ecuación 18** Torque aplicado al mástil por el área de barrido de las aspas de un aerogenerador

$$T_{aerogenerador} = \rho \times A_{aerogenerador} \times V_o^2 \times (\cos\theta - 1) \times d$$

**Ecuación 19** Torque aplicado al mástil por el área de barrido de las aspas de un aerogenerador y un ducto convergente

$$T_{aerogenerador \text{ y ducto}} = \rho \times A_{aerogenerador \text{ y ducto}} \times V_o^2 \times (\cos\theta - 1) \times d$$

Donde:

$$A_{aerogenerador} = \pi \times \left( \frac{D_{aerogenerador}}{2} \right)^2$$

$$A_{aerogenerador \text{ y ducto}} = \pi \times \left( \frac{D_{1ducto} + D_{2ducto}}{2} \right) \times L + \pi \times \left( \frac{D_{aerogenerador}}{2} \right)^2$$

Donde:

$T_{aerogenerador}$  = Torque ejercido al aerogenerador [Nm]

$T_{aerogenerador \text{ y ducto}}$  = Torque aplicado al aerogenerador y el ducto

$A_{aerogenerador}$  = Área de las palas barrido del aerogenerador

$A_{aerogenerador \text{ y ducto}}$  = Área de las palas de barrido del aerogenerador y el ducto convergente

$D_{aerogenerador}$  = Diámetro de las palas del aerogenerador

$D_{1ducto}$  = Diámetro de entrada del ducto convergente

$D_{2ducto}$  = Diámetro de salida del ducto convergente

### 3.4. Diseño del modelo de un ducto convergente óptimo para un aerogenerador de baja potencia

En esta sección se diseñó un ducto convergente para un aerogenerador baja potencia. Dado que en las secciones anteriores se ha estudiado en la influencia que tiene instalar un ducto convergente en un aerogenerador y que de acuerdo con la variación de las dimensiones de este último se obtendrán diferentes resultados, es que en esta sección se seleccionó de manera aleatoria un aerogenerador de baja potencia, cuyas características técnicas se muestran en el ANEXO 5, que con ayuda de las secciones anteriores se determinará cuáles son las consideraciones para el diseño del ducto convergente óptimo que debiera instalarse.

Para el análisis se consideró las características técnicas del aerogenerador que tienen relación con las condiciones críticas de funcionamiento. En este caso es la velocidad máxima que soporta el aerogenerador, cuyo valor es de 60m/s.

Se empezó definiendo el torque máximo que soporta el mástil, y este se obtuvo con la velocidad máxima de viento que soporta el aerogenerador.

De la Ecuación 18 para el aerogenerador seleccionada se tiene:

$$T_{aerogenerador} = -10,416.33 \times d \text{ [Nm]}$$

Este es el torque máximo que soporta el aerogenerador para una velocidad de 60m/s. Siendo  $-10,416.33d$  Nm el resultado de la aplicación de la Ecuación 18 con las características técnicas del aerogenerador seleccionado.

De la Ecuación 19 se obtiene el torque total del nuevo sistema:

$$T_{sistema} = T_{aerogenerador} + T_{ducto}$$

$$T_{sistema} \leq -10,416.33 \times d \text{ [Nm]}$$

$$T_{aerogenerador} + T_{ducto} \leq -10,416.33 \times d \text{ [Nm]}$$

$$\rho \times \vec{V}_1 \times A_{aerogenerador} (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \times d + \rho \times \vec{V} \times A_{ducto} (\vec{V}_3 - \vec{V}_1) \times d \leq -10,416.33 \times d \text{ [Nm]}$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del aire

$\vec{V}_1$  = Velocidad de entrada

$\vec{V}_2$  = Velocidad después del aerogenerador

$\vec{V}_3$  = Velocidad en la salida del ducto

$d$  = Distancia del mástil

Reemplazando la eficiencia del aerogenerador y el cambio de dirección del golpe de las partículas en el ducto se tiene:

$$\rho \times \vec{V}_1 \times A_{aerogenerador} (\vec{V}_1 \times (\sqrt{1-n}) - \vec{V}_1) + \rho \times \vec{V} \times A_{ducto} (\vec{V}_1 \times \cos\theta - \vec{V}_1) \leq -10,416 [Nm]$$

Donde  $n$  es la eficiencia del aerogenerador y  $\theta$  es el ángulo de direccionamiento. Reemplazando el valor de la densidad del aire por  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , las variables del área de barrido de las aspas del aerogenerador y del ducto, y el ángulo de direccionamiento que brinda el mayor valor de velocidad, según gráficas ( $70^\circ$ ), se tiene:

$$\vec{V}_1 \times (1.95 \times L^2 + 5.92 \times L + 2.38) \leq 8,503.13 [Nm]$$

Considerando que la velocidad de salida de ducto no puede superar los  $60 \text{ m/s}$  de velocidad máxima de soporte del aerogenerador, de la Ecuación 17 se tiene:

$$V = V_o \times \left( 1.02 + 0.6 \times L \times \arcsen\left(\frac{D_1 - D_2}{2 \times L}\right) / 70 \right)$$

Entonces:

$$60 \text{ m/s} > V_o \times \left( 1.02 + 0.6 \times L \times \arcsen\left(\frac{D_1 - D_2}{2 \times L}\right) / 70 \right)$$

Reemplazando L máximo:

$$60 \text{ m/s} > V_o \times \left( 1.02 + 0.4 \times \sqrt{\frac{8,503.13}{V_o^2}} - 2.38 / 70 \right)$$

$$V_o < 26 \text{ m/s}$$

Reemplazando el valor máximo soportado por el nuevo sistema, se tiene:

$$L_{max} = 43 \text{ cm}$$

$$V_f = 1.27 \times V_o$$

$$Potencia_f = 1.27 \times Potencia_o$$

Con lo analizado se puede determinar que el ducto convergente para el aerogenerador seleccionado no debe superar una longitud de 43 centímetros, y no debe instalarse en las zonas donde se supere una velocidad de 26 m/s, dado que en esa condición se presenta una situación crítica para el sistema. La velocidad máxima que se puede obtener para ese aerogenerador es 1.27 veces el valor de la velocidad del lugar, con que se obtendría el doble de potencia, y esto se da con la mayor longitud del ducto convergente.

## CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

La simulación computacional es una herramienta importante que facilita el análisis de sistemas complejos, como el analizado en la presente tesis. El software computacional Ansys Fluent fue indispensable para evaluar el comportamiento del viento a lo largo del ducto convergente y de ese modo determinar la relación matemática que vincula la velocidad de salida con las dimensiones del ducto convergente. Las simulaciones realizadas con la misma contienen 600 iteraciones, puesto que, a partir de ese valor las curvas resultantes empezaban a tender un comportamiento constante.

Se verificó, a través de la simulación computacional, que la velocidad del viento incrementa cuando atraviesa un conducto que reduce su sección transversal. Para la presente tesis se determinó una relación matemática que vincula a la velocidad de salida con las dimensiones del ducto convergente. Para el ejemplo de aplicación se determinó que el ducto convergente acoplado al aerogenerador seleccionado podría producir energía hasta 1.27 veces más que el aerogenerador operando solo, incrementando su potencia en 100%.

El dimensionamiento óptimo del ducto convergente para el aerogenerador seleccionado indica que la longitud menor a 43 cm, y un ángulo de direccionamiento de 70° como máximo.

La tecnología eólica aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo, solo se ha explotado 1% del potencial total de energía eólica del Perú. Para su desarrollo es necesario establecer políticas y leyes que promuevan la inversión en este sector, otorgando seguridad a los inversionistas.

Se elaboró una metodología que determina el dimensionamiento óptimo de un ducto convergente para incrementar la velocidad de viento, la misma que puede ser aplicada a distintos aerogeneradores de baja potencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Energy Agency, «Key Electricity Trends,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyElectricityTrends.pdf>.
- [2] International Energy Agency, «Electricity and Heat for 2005 - 2016,» 30 03 2017. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?country=WORLD&product=electricityandheat&year=2014>.
- [3] British Petroleum, «Statistical Review of World Energy 2014,» 2014. [En línea]. Available: [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de\\_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf).
- [4] Global Wind Energy Council, «Global Wind Report 2015,» Bélgica, 2016.
- [5] A. V. J. T. y J. S. , La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático., Lima: Gráfica Biblios S.A., 2017.
- [6] Ministerio de Energía y Minas, Atlas Eólico del Perú, Lima, 2016.
- [7] EOLICCAT, «Preguntas Frecuentes,» 31 03 2017. [En línea]. Available: <http://eoliccat.net/la-tecnologia/preguntas-frecuentes/?lang=es>.
- [8] REN21, «Energías Renovables 2016 – Reporte de la Situación Mundial,» REN21 Secretariat, París, 2016.
- [9] M. G. Fernandez, «Generador Eólico de Baja Potencia,» Buenos Aires, 2012.
- [10] R. O. y K. F. .Patente US 4075500 A, 1978.
- [11] C. H. y G. K. .Patente US 7218011, 2007.
- [12] ENDESA, «Parques Eólicos,» [En línea]. Available: [http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiii.-las-centrales-eolicas](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiii.-las-centrales-eolicas). [Último acceso: 16 05 2017].
- [13] N. Esteve Gomez, «Energización de las zonas no interconectadas a partir de las renovables Solar y Eólica,» Bogotá, 2011.



- [14] OSINERGMIN, «Subastas de Energías Renovables,» Lima, 2017.
- [15] Central Energía, «Central de información y discusión de energía en Chile,» 18 04 2017. [En línea]. Available: <http://www.centralenergia.cl/2010/07/13/feed-in-tariff/>.
- [16] R. Mott, Mecánica de Fluidos, México: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [17] B. Zamora Parra, P. G. Vicente Quiles y A. Sánchez Káiser, «Notas sobre simulación numérica de flujos de fluidos,» Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2008.
- [18] U.S. Energy Information Administration, «Electricity,» 30 03 2017. [En línea]. Available: [https://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa\\_04\\_01.html](https://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa_04_01.html).
- [19] J. S. Cotrina, Z. M. Cabrera y R. D. Montes, «Senamhi,» 2006. [En línea]. Available: [http://www.senamhi.gob.pe/pdf/bol\\_cont\\_atmos0606.pdf](http://www.senamhi.gob.pe/pdf/bol_cont_atmos0606.pdf).
- [20] «Ecology,» 20 04 2017. [En línea]. Available: <http://www.ecology.com/2011/09/08/bright-future-wind-power/>.
- [21] «Ecured,» 20 04 2017. [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Análisis\\_multicriterio](https://www.ecured.cu/Análisis_multicriterio).
- [22] Universidad de los Andes, «Universidad de los Andes,» 04 22 2017. [En línea]. Available: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index\\_archivos/INST\\_Flujo/medidoresflujovolumetrico/toberadeflujo.html](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/medidoresflujovolumetrico/toberadeflujo.html).
- [23] C. Aching Guzmán, E. Court Monteverde y J. L. Aching Samatelo, Matemáticas Financieras, Lima: CENGAGE LEARNING, 2009.
- [24] SENAMHI, «<http://www.senamhi.gob.pe>,» [En línea]. Available: [http://www.senamhi.gob.pe/main\\_mapa.php?t=dHi](http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi). [Último acceso: 18 05 2017].
- [25] J. M. Guevara Díaz, «Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica,» Caracas, 2013.
- [26] OSINERG, «Pliego Tarifario Máximo del Servicio Público de Electricidad,» [En línea]. Available: <http://www2.osinerg.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegosTarifariosUsuarioFinal.aspx?Id=150000>. [Último acceso: 18 05 2017].
- [27] A. L. Neumman, «LA ENERGÍA EÓLICA: Principios Básicos y Tecnología,» Leganes, Madrid, 2002.

- [28] JINGYUAN, «Green Power Changes the World,» [En línea]. Available: <http://www.turbine-generator.cn/500w-wind-turbine.html>. [Último acceso: 18 04 2017].
- [29] Bornay, «Bornay Aerogeneradores,» [En línea]. Available: [file:///C:/Users/Hugo%20De%20La%20Cruz/Downloads/Bornay%20600%20Rev%206%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Hugo%20De%20La%20Cruz/Downloads/Bornay%20600%20Rev%206%20(1).pdf). [Último acceso: 18 04 2017].
- [30] G. Postigo, Interviewee, *Surco es uno de los distritos con mayor oferta y demanda de inmuebles*. [Entrevista]. 07 09 2015.
- [31] Enernaval, «Enernaval,» [En línea]. Available: <http://www.enernaval.es/PDF/Aerogeneradores.pdf>. [Último acceso: 12 05 2017].
- [32] Revosolar Shop, «Revosolar Shop,» [En línea]. Available: <http://www.revosolar.com/tienda-online-solar/es/inversores-cargadores/158-inversor-solar-expert-3000-mppt.html>. [Último acceso: 12 05 2017].
- [33] Damia Solar, «Damia Solar,» [En línea]. Available: <https://www.damiasolar.com/consejos-solares>. [Último acceso: 2017 05 20].
- [34] SENAMHI, «Productos - Ambiental,» [En línea]. Available: <http://www.senamhi.gob.pe/sig.php?p=024>. [Último acceso: 12 05 2017].
- [35] Proactivo, «Proyecto Parque Eólico Marcona de Grupo Cobra con fideicomiso de La Fiduciaria,» [En línea]. Available: <http://proactivo.com.pe/proyecto-parque-eolico-marcona-de-grupo-cobra-con-fideicomiso-de-la-fiduciaria/>. [Último acceso: 16 05 2017].
- [36] GreatEnergy, «Que es energia Eolica?.q,» [En línea]. Available: <http://www.greatenergy.com.mx/0eolica.html>. [Último acceso: 16 05 2017].
- [37] OSINERGMIN, «Informe de Resultados Encuesta Residencial de Uso y Consumo de Energía,» Lima, 2014-2015.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1: Especificaciones Técnicas del Aerogenerador Air X

Se tiene el campo vectorial de velocidad para un flujo de un fluido:

$$\vec{V} = (V_0 + bx)\vec{i} - by\vec{j}$$

### Determinación de la posición x de la partícula del fluido

Se deriva respecto de x la velocidad del fluido:

$$\frac{dx_{particula}}{dt} = V_0 + bx$$

$$dt = \frac{dx}{V_0 + bx}$$

Se integra a ambos miembros, obteniéndose lo siguiente:

$$\frac{1}{b} \times \ln(V_0 + bx) = t - \frac{1}{b} \times \ln C_1$$

$$\ln(C_1 (V_0 + bx)) = t$$

De esto se obtiene:

$$V_0 + bx = C_2 \times e^{bt}$$

Entonces, la posición de la partícula de viento a cualquier instante es:

$$x = \frac{1}{b} [(V_0 + bx_n) \times e^{bt} - V_0]$$

### Determinación de la posición y de la partícula del fluido

Se deriva respecto de y la velocidad del fluido:

$$\vec{V} = (V_0 + bx)\vec{i} - by\vec{j}$$

$$\frac{dy_{particula}}{dt} = -by_{particula}$$

$$\frac{dy}{y} = -bdt$$

Se integra a ambos miembros, obteniéndose lo siguiente:

$$\ln y = -bt - \ln C_1$$

$$\ln(C_1 \times y) = -t$$

$$y = C_2 \times e^{-bt}$$

$$y = y_n \times e^{-bt}$$

Finalmente se obtiene el par ordenado que muestra la posición de una partícula para un tiempo dado:

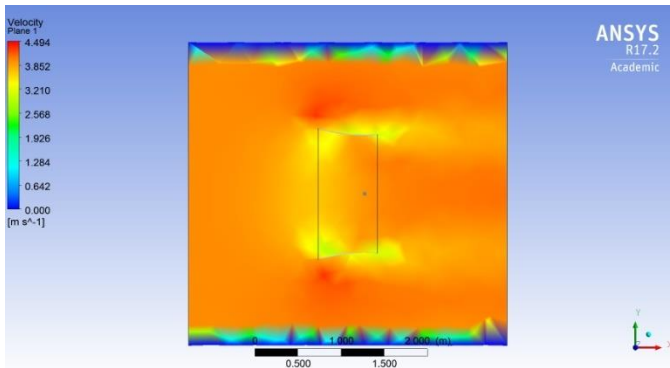
$$\text{Posición}(x, y, t) = \left( \frac{1}{b} [(V_o + bx_n) \times e^{bt} - V_o]; y_n \times e^{-bt} \right)$$

## ANEXO 2: Arreglo de partículas a lo largo de un ducto convergente

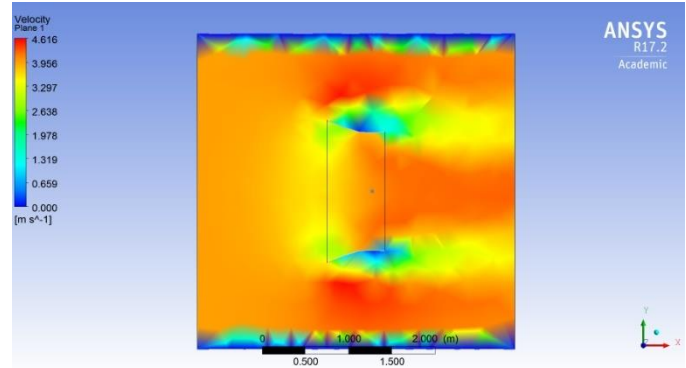
X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub> = 0.75		Y <sub>n</sub> = 0.50	
	x	y	x	y
0.25	2.268	0.2989	2.268	0.1993
0.30	2.393	0.2989	2.393	0.1993
0.35	2.518	0.2989	2.518	0.1993
0.40	2.644	0.2989	2.644	0.1993
0.45	2.769	0.2989	2.769	0.1993
0.50	2.895	0.2989	2.895	0.1993
0.55	3.02	0.2989	3.02	0.1993
0.60	3.146	0.2989	3.146	0.1993
0.65	3.271	0.2989	3.271	0.1993

Y <sub>n</sub>	X <sub>n</sub> = 0.25		X <sub>n</sub> = 0.65	
	x	y	x	y
0.50	2.268	0.1993	3.271	0.1993
0.55	2.268	0.2192	3.271	0.2192
0.60	2.268	0.2391	3.271	0.2391
0.65	2.268	0.2591	3.271	0.2591
0.70	2.268	0.279	3.271	0.279
0.75	2.268	0.2989	3.271	0.2989
0.80	2.268	0.3188	3.271	0.3188
0.85	2.268	0.3388	3.271	0.3388
0.90	2.268	0.3587	3.271	0.3587

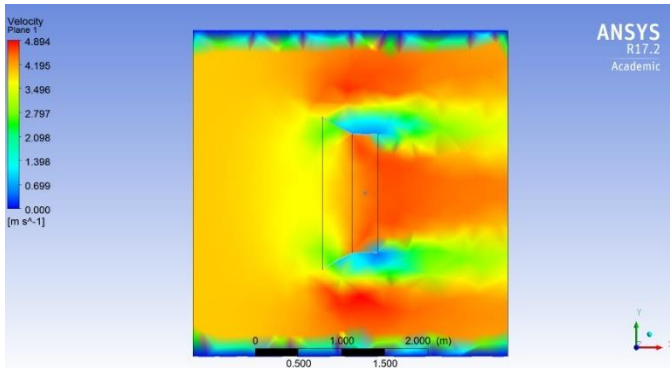
### ANEXO 3: Variación de las velocidades de salida por la variación del ángulo de direccionamiento



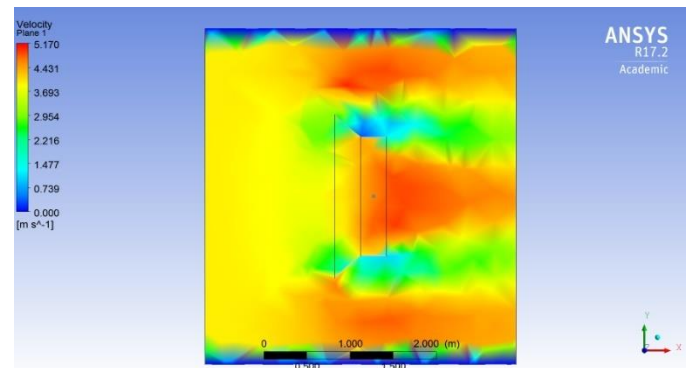
(a)



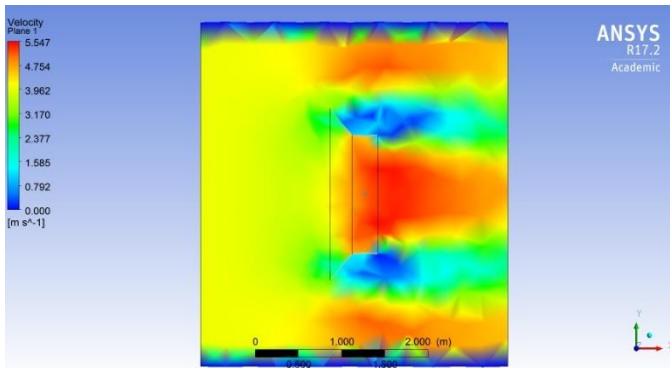
(b)



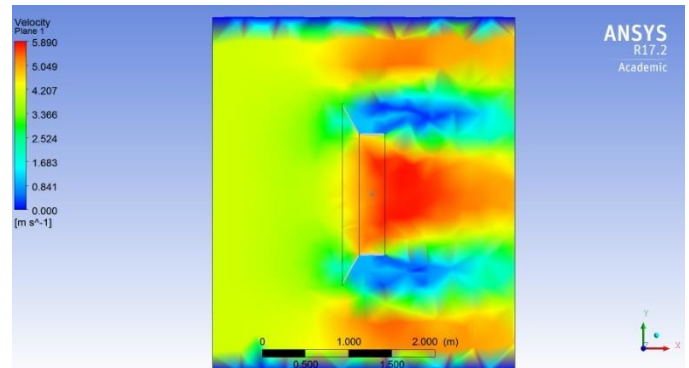
(c)



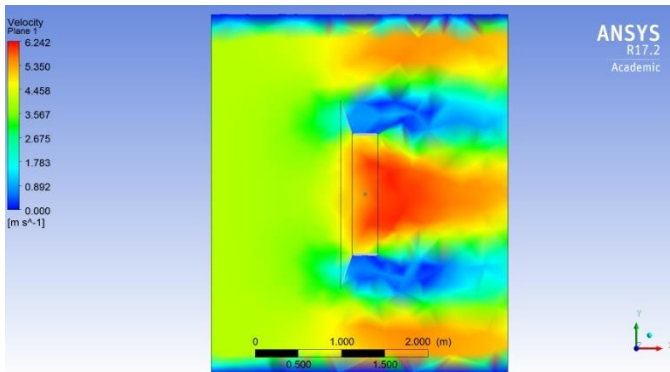
(d)



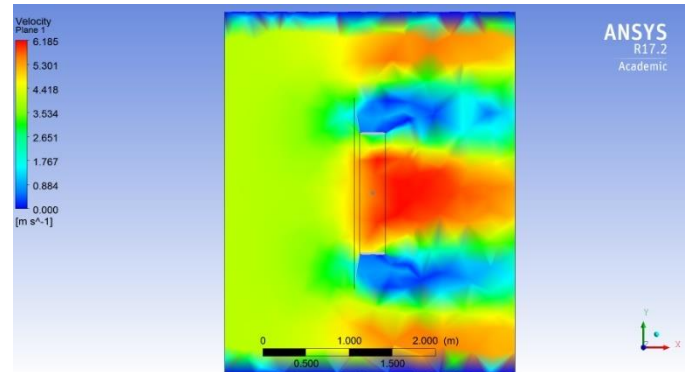
(e)



(f)



(g)



(h)

- a: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $10^\circ$
- b: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $20^\circ$
- c: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $30^\circ$
- d: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $40^\circ$
- e: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $50^\circ$
- f: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $60^\circ$
- g: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $70^\circ$
- h: Simulación con un ángulo de direccionamiento de  $80^\circ$



**ANEXO 4: Velocidades de viento en la salida del ducto convergente para distintos ángulos de direccionamiento y para distintas longitudes**

L = 0.15 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.35	3.84	3.86	3.95	4.14	4.18	4.28	4.32	4.47
Vout (m/s) x.0 y.0	3.85	3.86	3.96	4.07	4.15	4.28	4.25	4.37
Vout (m/s) x.0 y.-35	3.85	3.9	3.96	4.07	4.14	4.31	4.31	4.42
Vout (m/s) x.10 y.35	3.89	3.91	3.83	4.1	4.18	4.35	4.33	4.38
Vout (m/s) x.10 y.0	3.89	3.91	4	4.12	4.15	4.33	4.32	4.43
Vout (m/s) x.10 y.-35	3.88	3.91	3.94	4.11	4.14	4.34	4.15	4.47
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>3.87</b>	<b>3.89</b>	<b>3.94</b>	<b>4.10</b>	<b>4.16</b>	<b>4.32</b>	<b>4.28</b>	<b>4.42</b>

L = 0.3 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.35	3.81	3.94	4.18	4.38	4.52	4.72	4.87	4.86
Vout (m/s) x.0 y.0	3.81	3.93	4.15	4.24	4.53	4.7	4.76	4.84
Vout (m/s) x.0 y.-35	3.81	3.96	4.17	4.34	4.51	4.69	4.84	4.83
Vout (m/s) x.10 y.35	3.85	4.06	4.22	4.46	4.66	4.78	5.01	4.99
Vout (m/s) x.10 y.0	3.86	4.03	4.2	4.4	4.63	4.79	4.93	4.95
Vout (m/s) x.10 y.-35	3.84	4.01	4.15	4.45	4.65	4.81	4.85	4.93
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>3.83</b>	<b>3.99</b>	<b>4.18</b>	<b>4.38</b>	<b>4.58</b>	<b>4.75</b>	<b>4.88</b>	<b>4.90</b>

L = 0.45 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.35	3.82	4.08	4.29	4.57	4.91	5.02	5.12	5.13
Vout (m/s) x.0 y.0	3.81	3.95	4.28	4.62	4.84	4.97	5.01	5.07
Vout (m/s) x.0 y.-35	3.83	3.93	4.26	4.6	4.85	4.99	4.98	5.1
Vout (m/s) x.10 y.35	3.84	4.15	4.49	4.75	4.94	5.08	5.32	5.31
Vout (m/s) x.10 y.0	3.86	4.12	4.45	4.73	4.96	5.12	5.29	5.24
Vout (m/s) x.10 y.-35	3.79	4.13	4.42	4.7	4.84	5.16	5.2	5
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>3.83</b>	<b>4.06</b>	<b>4.37</b>	<b>4.66</b>	<b>4.89</b>	<b>5.06</b>	<b>5.15</b>	<b>5.14</b>

L = 0.6 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.30	3.85	4.2	4.52	4.7	4.9	5.18	5.57	5.36
Vout (m/s) x.0 y.0	3.84	4.2	4.56	4.73	5	5.2	5.4	5.35
Vout (m/s) x.0 y.-3	3.85	4.22	4.52	4.68	4.99	5.34	5.25	5.37
Vout (m/s) x.10 y.30	3.89	4.2	4.6	4.84	5.18	5.48	5.52	5.47
Vout (m/s) x.10 y.0	3.89	4.2	4.65	4.88	5.2	5.4	5.65	5.62
Vout (m/s) x.10 y.-30	3.85	4.25	4.62	4.86	5.17	5.59	5.49	5.6
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>3.86</b>	<b>4.28</b>	<b>4.63</b>	<b>4.93</b>	<b>5.20</b>	<b>5.38</b>	<b>5.48</b>	<b>5.44</b>

L = 0.75 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.30	3.84	4.35	4.65	5.05	5.2	5.6	5.94	5.75
Vout (m/s) x.0 y.0	3.84	4.31	4.68	5.01	5.28	5.54	5.76	5.83
Vout (m/s) x.0 y.-3	3.84	4.33	4.62	5.01	5.23	5.64	5.79	5.72
Vout (m/s) x.10 y.30	3.89	4.38	4.74	5.12	5.55	5.79	5.87	6.06
Vout (m/s) x.10 y.0	3.9	4.4	4.78	5.13	5.62	5.83	6.06	6.18
Vout (m/s) x.10 y.-30	3.91	4.36	4.75	5.12	5.59	5.84	6.02	6.08
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>3.87</b>	<b>4.36</b>	<b>4.79</b>	<b>5.14</b>	<b>5.45</b>	<b>5.71</b>	<b>5.89</b>	<b>5.86</b>

L = 0.90 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.30	3.89	4.4	5.1	5.4	5.61	5.85	5.95	6.04
Vout (m/s) x.0 y.0	3.88	4.5	5.04	5.31	5.65	5.85	6	6.08
Vout (m/s) x.0 y.-3	3.92	4.6	5.14	5.49	5.51	5.76	6.03	5.86
Vout (m/s) x.10 y.30	3.9	4.6	4.96	5.55	5.83	5.82	6.18	6.18
Vout (m/s) x.10 y.0	3.95	4.61	5.17	5.59	5.9	6.2	6.38	6.48
Vout (m/s) x.10 y.-30	3.9	4.65	5.12	5.62	5.7	6.06	6.09	6.09
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>3.91</b>	<b>4.56</b>	<b>5.09</b>	<b>5.54</b>	<b>5.86</b>	<b>6.11</b>	<b>6.24</b>	<b>6.20</b>

L = 1.20 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.30	4.02	4.85	5.36	5.73	6.38	6.6	6.88	6.8
Vout (m/s) x.0 y.0	3.99	4.73	5.32	5.76	6.24	6.6	6.7	6.8
Vout (m/s) x.0 y.-3	3.97	4.91	5.3	5.83	6.12	6.65	6.69	6.7
Vout (m/s) x.10 y.30	4.03	4.8	5.42	5.96	6.5	6.8	7.24	6.9
Vout (m/s) x.10 y.0	4.04	4.84	5.5	5.99	6.56	6.9	7.14	7.21
Vout (m/s) x.10 y.-30	4.01	4.98	5.42	6	6.56	6.81	7.16	6.9
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>4.01</b>	<b>4.85</b>	<b>5.44</b>	<b>5.97</b>	<b>6.39</b>	<b>6.73</b>	<b>6.97</b>	<b>6.89</b>

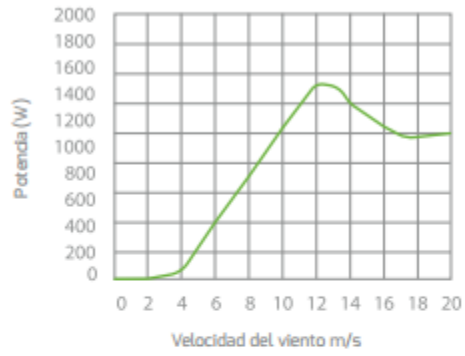
L = 1.80 m	Angulo de Direccionamiento (°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Vout (m/s) x.0 y.30	4.28	5.35	6.35	7.09	7.65	8.06	8.22	8.09
Vout (m/s) x.0 y.0	4.26	5.25	6.24	6.84	7.52	7.84	8.21	8.2
Vout (m/s) x.0 y.-3	4.26	5.32	6.43	6.88	7.59	8.01	8.2	8.2
Vout (m/s) x.10 y.30	4.25	5.46	6.34	7.25	7.69	8.26	8.31	8.02
Vout (m/s) x.10 y.0	4.3	5.42	6.5	7.17	7.94	8.27	8.72	8.76
Vout (m/s) x.10 y.-30	4.17	5.49	6.43	7.25	7.89	8.09	8.31	8.09
<b>PROMEDIO (m/s)</b>	<b>4.25</b>	<b>5.38</b>	<b>6.38</b>	<b>7.08</b>	<b>7.71</b>	<b>8.09</b>	<b>8.33</b>	<b>8.23</b>

## ANEXO 5: Especificación del aerogenerador de baja potencia

Número de hélices	2
Diámetro	2,86 m
Material	Fibra de vidrio / carbono
Dirección de rotación	En sentido contrario a las agujas del reloj
Sistema de control	1) Regulador electrónico 2) Pasivo por inclinación
<b>Características eléctricas</b>	
Alternador	Trifásico de imanes permanentes
Imanes	Neodimio
Potencia nominal	1500 W
Voltaje nominal	220 Vac
RPM	@ 600
Controladores	Regulador MPPT Wind+ Multitensión: 12, 24, 48 Vdc Intensidad: Max. 125 Amp Tipo de batería: Inundada, AGM, Gel Lithio
	Interface Wind+ Bombeo directo de agua AC ó DC Telecom Conexión a red
<b>Velocidad de viento</b>	
Rango de funcionamiento	2 -30 m/s
Para arranque	3 m/s
Para potencia nominal	12 m/s
Para frenado automático	14 m/s
Máxima velocidad de viento	60 m/s
<b>Características físicas</b>	
Peso aerogenerador	41 kg
Peso regulador	30 kg
Peso interface	20 kg
Embalaje	50 x 77 x 57 cm - 79 Kg
Dimensiones - peso	153 x 27 x 7 cm - 7 Kg
Total	0,22 m <sup>3</sup> - 86 Kg
Garantía	3 años

### Curva de potencia

---



### Energía

---

