

Túnel de viento para ensayos de aerogeneradores de baja potencia nacionales

Paula Nicoletti, Andrea F. Villanueva, María J. Ganiele, Sara O. Montenegro, Sergio D. Lingeri, Daniel C. Anello, Lucio M. E. Ponzoni

RESUMEN

La eficiencia de funcionamiento de un aerogenerador depende de las características propias del lugar en el cual se va a instalar. Por lo tanto, es importante que el aerogenerador se diseñe particularmente para los vientos propios de esa zona.

En este trabajo, se presentan las características de un túnel del viento desarrollado para la prueba de aerogeneradores de baja potencia que permitirá determinar en forma económica y simple, no solo la curva característica del aerogenerador y la potencia generada para diferentes curvas de viento, sino hacer los ajustes de diseño necesarios con el objeto de maximizar la potencia extraída del aerogenerador para su instalación en regiones de la Argentina con diferentes curvas de viento. Además, permitirá realizar una comparación entre distintos modelos, variando determinados parámetros de diseño para evaluar la influencia de los mismos en la performance del aerogenerador.

El túnel de viento constituirá una herramienta fundamental para el desarrollo nacional de aerogeneradores de baja potencia en el país.

ABSTRACT

The operational efficiency of a wind turbine depends on the characteristics of the location where it is going to be installed. Accordingly, it is important that the wind turbine is design specially for the local winds.

In this paper, the characteristics of a wind tunnel were developed for testing low power wind turbines which allows an economic and simple way to not only determinate the characteristic curves of a wind turbine and the power generation for different wind curves, but also make the necessary design adjustments in order to maximize the extracted power from the wind turbine for installation in regions of Argentina with different wind curves. Furthermore, this provides the possibility to make a comparison among different models, modifying specific design parameters to evaluate the influence of them in the performance of the wind turbine.

The wind tunnel will constitute a fundamental tool for the national development of low power wind turbines in the country.

PALABRAS CLAVE

Túnel de viento de baja velocidad, Aerogenerador, Energía renovable

KEY WORDS

Low-Speed Wind Tunnel, Wind Turbine, Renewable Energy

INTRODUCCIÓN

El túnel de viento es una herramienta experimental que sirve para estudiar el comportamiento dinámico, cinemático o estático de un objeto inmerso en un fluido. Es decir, se trata de una sección en la cual se genera un flujo de aire controlado que permite simular las condiciones reales que experimentará un objeto, que puede estar modelado a escala o no, y generar gran cantidad de datos confiables.

La importancia de los túneles de viento radica en que se trata de instrumentos precisos, rápidos y económicos para realizar investigaciones aerodinámicas y obtener datos concretos para respaldar las decisiones de diseño del objeto en cuestión con un considerable ahorro económico.

Los túneles de viento tienen un amplio rango de aplicación, suelen utilizarse para llevar a cabo ensayos aeronáuticos, ingeniería civil, arquitectura, energías renovables, medio ambiente, entrenamiento deportivo e investigación, desarrollo agrícola, entre otros.

Existen múltiples clasificaciones de los túneles de viento, teniendo en cuenta distintos parámetros, por ejemplo a partir de:

1. Velocidad de operación. Es decir, según la velocidad alcanzada en la cámara de prueba y expresada en función del número de Mach.

$$Ma = \frac{V}{V_{sonido}}$$

Tabla N°1: Clasificación de túneles de viento a partir de la velocidad en la sección de prueba [5].

| Número de Mach | Clasificación |
|----------------|---------------|
| Ma<0,8 | Subsónicos |
| 0,8<Ma<1,2 | Transónicos |
| 1,2<Ma<5 | Supersónicos |
| 5<Ma | Hipersónicos |

Fuente: Elaboración propia.

El motivo principal para realizar la clasificación por número de Mach radica en su relación con los efectos de compresibilidad de un gas. Para flujos subsónicos, podemos considerar al fluido incompresible, en cambio, en flujos transónicos y supersónicos, deben considerarse los efectos de compresibilidad. Finalmente, en flujos hipersónicos debemos hacer consideraciones adicionales para el estado químico del gas.

2. Geometría del túnel. Existen dos clasificaciones teniendo en cuenta la estructura del túnel.

2.1. Tipo de retorno.

2.1.1. Retorno abierto. En este caso, el flujo ingresa al túnel directamente de la atmósfera. El flujo es acondicionado y uniformado en la sección de entrada. Después se acelera en una contracción donde a la vez pierde presión y desemboca en la sección de prueba. A continuación se encuentra un difusor que devuelve el aire a la atmósfera a través de la sección de salida. Generalmente encontramos la sección impulsora después de la cámara de ensayos para evitar la interferencia de éste con el flujo.

Este tipo de configuraciones presentan una serie de ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Menores costes de construcción y menor tamaño.
- Permite técnicas de visualización con humo y agregados al aire ya que el flujo no retorna a la cámara de ensayos, siempre que la entrada y el escape estén abiertos a la atmósfera.

Desventajas:

- Fuente de contaminación acústica. El ruido puede causar problemas ambientales, limitar las horas de operaciones y/o requerir un tratamiento de ruido extenso del túnel y la habitación circundante lo cual incrementarían el coste del proyecto.
- Si se encuentra en una habitación, dependiendo del tamaño del túnel hasta el tamaño de la habitación, puede requerir un examen exhaustivo para acondicionar mejor el flujo en la sección de entrada para obtener un flujo de alta calidad.
- Para un tamaño y velocidad determinados, el túnel requerirá más energía para funcionar.

2.1.2. Retorno cerrado. En esta configuración el flujo en el interior del túnel se encuentra aislado de la atmósfera, contenido en un circuito cerrado.

Las siguientes son ventajas y desventajas que presenta este tipo de configuración:

Ventajas:

- Mayor control sobre el comportamiento del flujo. Mediante el uso de paletas y pantallas de giro de esquina, la calidad del flujo puede controlarse bien y lo más importante será independiente de otras actividades en el edificio y las condiciones climáticas.
- Menor contaminación acústica ya que no se difunde el flujo a la atmósfera y la sección impulsora se encuentra aislada de la atmósfera.
- Ofrece la posibilidad de modificar la presión, lo que permite mayor versatilidad de operación y reduce la potencia necesaria para determinados ensayos.
- Requiere menor consumo de energía para un tamaño y velocidad de sección de prueba dados.

Desventajas:

- Alto coste de construcción debido a la mayor complejidad estructural y a la necesidad de mayores instalaciones
- Si el túnel tiene una alta utilización requerirá de sistemas adicionales como compresores, válvulas de alivio, intercambiadores de calor, etc.
- Dificulta la realización de ciertos ensayos con agregados al aire debido al retorno del flujo. Por ejemplo, si se usa ampliamente para experimentos de visualización de flujo de humo o para el funcionamiento de motores de combustión interna, debe haber una forma de purgar el túnel.

2.2. Estructura de la sección de prueba.

2.2.1. Cámara abierta. Este tipo de cámara de prueba se encuentra abierta directamente a la atmósfera. De esta forma se reducen los errores debidos a la proximidad de las paredes al modelo y su interferencia con el flujo. Sin embargo, se conoce a partir de túneles existentes que este tipo de configuración puede ser más ruidosa y provocar inestabilidad en el flujo.

2.2.2. Cámara cerrada. En este caso la cámara de prueba se encuentra como continuación del mismo túnel y no está en contacto con la atmósfera. [6]

COLABORADORES

Romina Tripodi, Julio Sola, María Petraglia.

CONTEXTO

Varios países de Latinoamérica y en particular Argentina, han suscripto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible del programa de las Naciones Unidas [1]. Por lo cual, fomentar la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una de las prioridades en la agenda gubernamental.

La Ley 26.190 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica” y su modificatoria (Ley 27.191), anuncian que “Se establece como objetivo del presente régimen lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el ocho por ciento (8%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2017”. A partir de lo antes mencionado, Argentina apunta en la dirección de disminuir la brecha existente con otros países que se encuentran más avanzados en el uso de tecnología alternativas limpias para la generación de energía eléctrica.

Hoy en día, el desarrollo de las energías renovables en baja potencia comienza a vislumbrarse como un horizonte viable para la generación de energía eléctrica en zonas alejadas de las grandes urbes. Estas zonas, por cuestiones económicas y geográficas, no poseen una conexión eléctrica a la red, por lo que la principal forma de generación de energía es mediante el uso de pequeños generadores eléctricos que usan combustibles fósiles para su funcionamiento, y que muchas veces debido a su complejidad y costos, les es muy difícil repararlos o mantenerlos funcionando.

En particular, la perspectiva en materia de energía eólica en Argentina es francamente alentadora. Se estima que el potencial eólico patagónico, al sur del paralelo 42, encierra una energía decenas de veces mayor a la contenida en toda la producción anual argentina de petróleo. Asimismo, existen numerosas regiones aptas en las provincias de Río Negro y Neuquén, en varias zonas serranas y costeras de la provincia de Buenos Aires, y en muchos otros sitios puntuales de todo el país [2].

El diseño y eficiencia de un aerogenerador depende principalmente de las características del viento de la zona en la cual se va a instalar. Cuestiones como el tipo de aerogenerador (de Eje Horizontal o Eje Vertical), el tipo de perfil a

utilizar, las dimensiones del mismo, generador eléctrico, transmisión, etc. Sin embargo, gran parte de los desarrollos nacionales en materia de aerogeneradores de baja potencia, guían sus esfuerzos en la construcción de la máquina, basando su diseño en la copia de otros aerogeneradores internacionales y delegando a un plano secundario, las características del viento para su diseño, debido básicamente a la falta de infraestructura y complejidad ingenieril que requieren el desarrollo de este tipo de máquinas, y que muchas veces las PyMEs o fabricantes locales carecen. En consecuencia, muchos diseños no satisfacen las condiciones mínimas necesarias para un adecuado funcionamiento, operando solo en ciertos períodos del año o saliendo de funcionamiento por desperfectos de diseño; causando grandes pérdidas para todos aquellos que se benefician de este tipo de tecnología.

Una primera forma de mejorar la calidad de los aerogeneradores nacionales de baja potencia es crear un laboratorio de prueba, para que los mismos fabricantes puedan probar sus propios aerogeneradores y analizar algunos parámetros de funcionamiento como su curva de rendimiento. En este sentido, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) viene trabajando en la certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia, y desarrollando un laboratorio a cielo abierto ubicado en la provincia de Neuquén para probar su funcionamiento con las curvas de vientos que se encuentran en la provincia de Neuquén [3] [4].

Sin embargo, esto no es suficiente, ya que como se dijo anteriormente el diseño de un aerogenerador y su performance, depende básicamente de las características del viento, y actualmente no existe ningún laboratorio nacional desarrollado para que fabricantes nacionales/universidades o centros de investigación puedan probar sus diseños para diferentes condiciones eólicas/viento.

Desde el laboratorio de “Perfil Alar” de la Comisión Nacional de Energía Atómica en conjunto con la Universidad Nacional de Tres de Febrero, se ha conformado un grupo de investigación, que se encuentra trabajando en un laboratorio de prueba de aerogeneradores de baja potencia, de manera que éste sea un laboratorio referente a nivel nacional para la prueba y desarrollo de microaerogeneradores en la Argentina.

Para ello se está trabajando en un método novedoso para la prueba de aerogeneradores de baja potencia basado en las siguientes 3 etapas:

1. Diseño y simulación asistida por computadora en aerogeneradores.
2. Fabricación del modelo en escala mediante impresión 3D.
3. Simulación del modelo en un túnel de viento preparado para la prueba de modelos de microaerogeneradores.

Estas 3 etapas, se desarrollan dentro de un proceso diseñado *ad-hoc* que permite determinar en forma económica y simple, no solo la curva característica del aerogenerador y la potencia generada para diferentes curvas de viento, sino hacer los ajustes/cambios de diseño necesario con el objeto de maximizar la potencia extraída del aerogenerador para su instalación en regiones de la Argentina con diferentes curvas de viento, brindando una herramienta fundamental para el desarrollo nacional de aerogeneradores de baja potencia en el país.

En este trabajo, se presentan las características del túnel del viento desarrollado para la prueba de aerogeneradores de baja potencia (dimensiones generales, características de la sección de prueba, número de Reynolds, etc.).

OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño de un túnel de viento del tipo abierto para la experimentación de modelos a escala de aerogeneradores de baja potencia. Para ello se plantearon algunos objetivos específicos, como:

- Diseño y geometría del Túnel de Viento para ensayos de Aerogeneradores baja potencia.
- Modelado y simulación del túnel de viento en SolidWorks®.
- Análisis de los parámetros importantes en el funcionamiento del túnel.

METODOLOGÍA

Los túneles de viento se fabrican específicamente para cumplir con los requerimientos que suponen los objetos que se van a analizar.

Este túnel de viento se desarrolló exclusivamente para el ensayo de aerogeneradores de eje horizontal y vertical de baja potencia, diseñados dentro del marco del proyecto Aerogenerador Ecosocial que lleva adelante la Universidad Nacional de Tres de Febrero "UNTREF" y la Comisión Nacional de Energía Atómica "CNEA". El túnel de viento permitirá corroborar de forma empírica los resultados obtenidos de modelos numéricos. Esta técnica, posibilitará la comparación entre distintos modelos, variando determinados parámetros de diseño para evaluar su influencia en la performance del aerogenerador.

En este caso, se ha optado por un túnel de viento de tipo abierto, ya que requiere de menor estructura y, por lo tanto, menores costos de construcción. Además, este diseño permite el intercambio directo con la atmósfera en caso de utilizar gases para

la visualización de las líneas de corriente del flujo. Este tipo de túneles apela al efecto Venturi para conseguir mayores velocidades de flujo en la sección de prueba disminuyendo el área en dicha zona.

En líneas generales, se optó por una sección de túnel circular para obtener un flujo más uniforme y laminado debido a la viscosidad del aire y para evitar la concentración de fluido y formación de pequeños vórtices característicos de geometrías con ángulos rectos. La sección de prueba se modeló cerrada, ya que se encuentra entre el ingreso de aire y la salida.

El diseño del túnel se realizó a partir de la bibliografía consultada, teniendo presente nuestras limitantes en cuanto a las dimensiones del laboratorio de Perfil Alar de la CNEA, la posibilidad de obtención de los materiales necesarios y de la factibilidad de su construcción.

Se partió de los siguientes parámetros de diseño:

- Sección de prueba de 348 mm de diámetro.
- Sección de entrada de 580 mm de diámetro.
- Motor de 1 hp y 700 RPM marca Gec Maches L.T.D acoplado en forma directa al ventilador AX630 – 9EK de la marca Blower Chicago Argentina. Como su denominación lo indica se trata de un ventilador axial de 630 mm de diámetro, con 9 álabes con un ángulo de ataque de 27°, definido por el código de letras EK.

A continuación se puede ver una imagen de la sección de prueba del túnel de viento, fabricado con una sección de acrílico transparente que contiene en su interior un modelo de aerogenerador de eje vertical.

Figura N° 1: Sección de Prueba del Túnel de Viento en construcción ubicado en el laboratorio de Perfil Alar. En su interior se encuentra un aerogenerador Savonius en escala impreso en 3D.

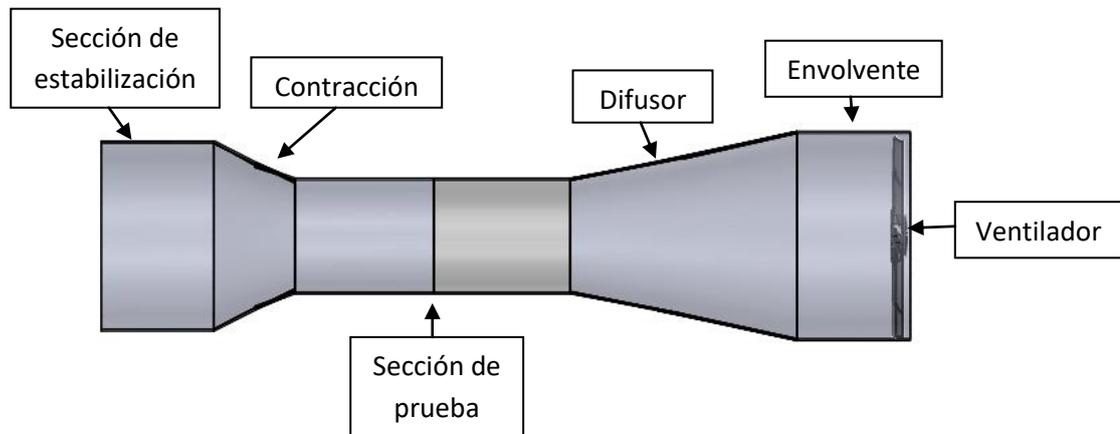


Fuente: Elaboración propia.

El diseño del túnel permite una configuración del ventilador como impulsor en la entrada o como extractor en la salida, factor que le da mayor versatilidad para la prueba de modelos aerodinámicos.

Finalmente, para evaluar su comportamiento, se modeló el túnel en el programa SolidWorks®, como puede observarse en la fig. 2. Luego, se simuló su funcionamiento mediante la herramienta FlowSimulation, un programa de elementos finitos, el cual sirvió para tener una vista preliminar de cómo se comportará el flujo una vez que sea construido.

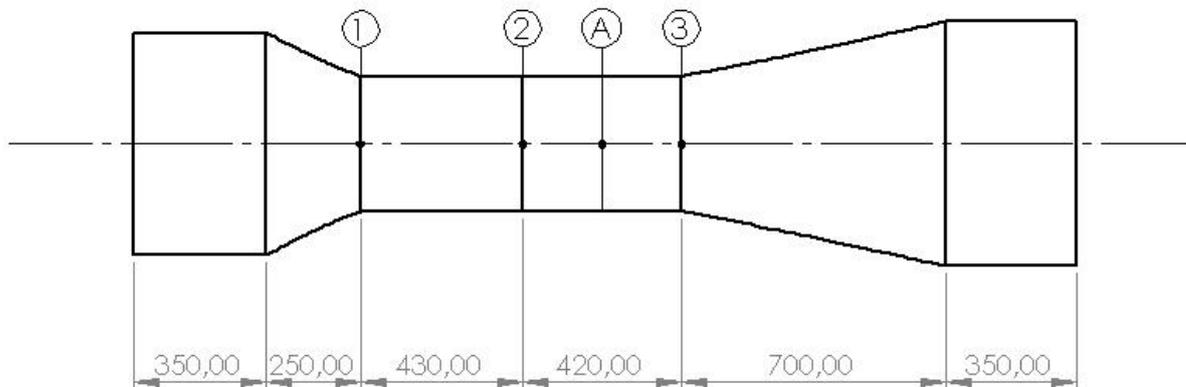
Figura N°2: Túnel de viento ensamblado.



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó una simulación de flujo externo con una región local de rotación, que representa el movimiento realizado por los álabes del ventilador, con una velocidad de rotación de 700¹ rpm y sujeto a condiciones estándar de presión y temperatura.

Figura N°3: Plano del túnel de viento con referencias.



Fuente: Elaboración propia.

¹ Se seleccionó esta velocidad, debido a que el ventilador tiene acoplado un motor eléctrico monofásico de 1Hp de 700 rpm en forma directa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

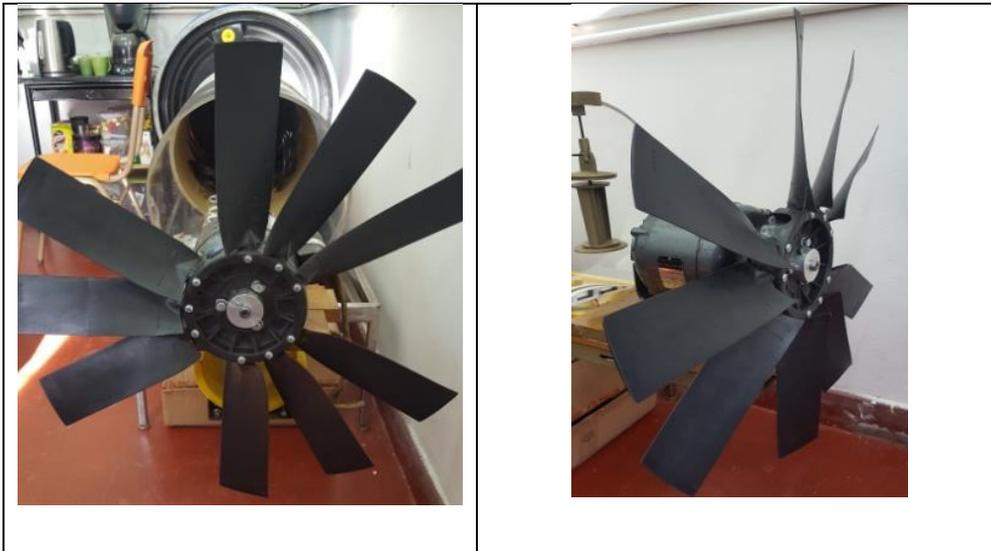
Para el análisis de la performance del túnel en general, se analizaron las líneas de corriente a lo largo de toda la sección del mismo. Las líneas de corriente a lo largo del túnel de viento, deben ser lo más ordenadas posibles, de forma que permita observar cómo influye el objeto de estudio en el flujo.

A su vez, se estudiaron distintos parámetros dentro de la sección de prueba sobre los planos mostrados en la fig.3. Los parámetros más relevantes a analizar fueron la velocidad, la distribución de presiones y el número de Mach. La elección de esta sección para el análisis se debe a que es donde se llevan a cabo los ensayos, es decir, donde se coloca el modelo a estudiar. Por tanto, es importante que las condiciones allí sean las adecuadas para el estudio que se pretenda realizar.

Configuración del ventilador

En el siguiente punto se evaluaron las distintas posibilidades de uso del ventilador. Por un lado, se colocó como impulsor, es decir, soplando aire hacia el interior del túnel, y por otro lado, el ventilador se dispuso como extractor, es decir, aspirando aire desde el interior del túnel. En la fig.4 se muestra una imagen del ventilado a emplear en el desarrollo del túnel de viento.

Figura 4: Modelo de Ventilador a usar en el túnel de viento.



Fuente: Elaboración propia.

La descarga del ventilador axial le proporciona al flujo de aire un movimiento helicoidal. Por lo tanto, en el caso de utilizar al ventilador como impulsor, obtenemos un flujo desordenado, en el que se observan remolinos (fig. 5a) que provocan un

aumento de la presión y la consecuente disminución de la velocidad que se puede obtener en la sección de prueba (principio de Bernoulli).

En la fig. 5b, se colocó un dispositivo enderezador de flujo, de estructura tipo panal de abejas, seguido del ventilador impulsor con el fin de lograr un flujo más ordenado. En esta configuración, se observa un aumento en la presión a lo largo del túnel. A su vez, en la Tabla 2, vemos que la presión dinámica del fluido disminuye, provocando un valor menor de velocidad en la sección de prueba.

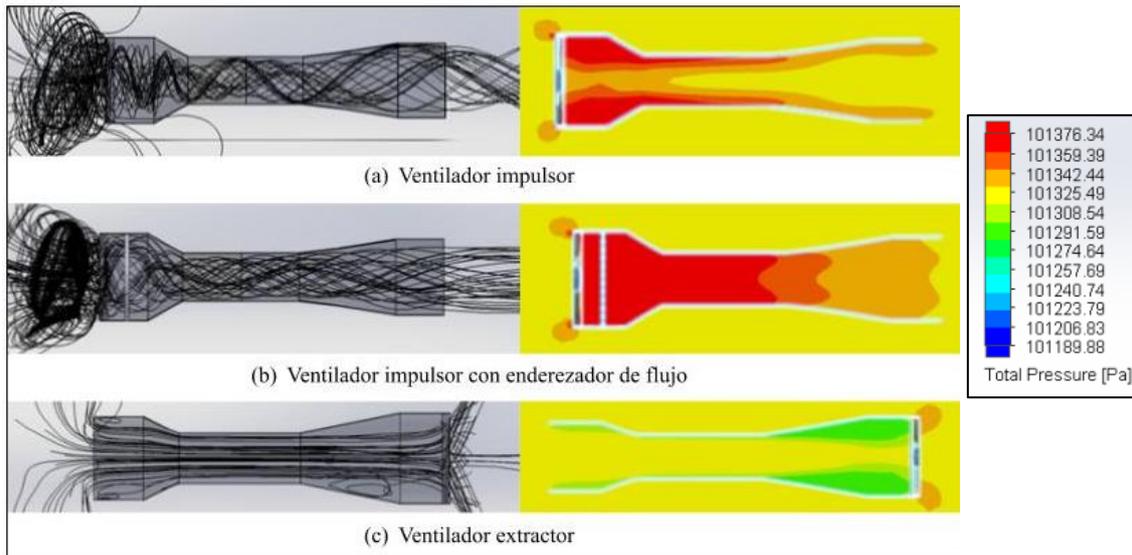
En cambio, al usar la configuración del ventilador como impulsor, como se ve en la fig. 5c, el flujo ingresa al túnel con menor cantidad de remolinos, las líneas de corriente son más ordenadas. Aunque, si se busca un rendimiento aún mejor, sigue siendo necesaria la instalación de accesorios para el enderezamiento del flujo que generarán una pérdida de carga localizada. De todas formas, la presión a lo largo del túnel es relativamente menor lo que conlleva a un aumento en la velocidad alcanzada en la sección de prueba.

Tabla N°2: Resultados en la sección de prueba según la configuración del ventilador.

| Parámetro | Unidad | Ventilador impulsor | Ventilador impulsor con enderezador de flujo | Ventilador extractor |
|------------------|----------------------|---------------------|--|----------------------|
| Presión estática | [Pa] | 101299.00 | 101356.93 | 101294.43 |
| Presión dinámica | [Pa] | 25.68 | 13.13 | 30.39 |
| Presión total | [Pa] | 101324.69 | 101370.06 | 101324.82 |
| Velocidad | [m/s] | 6.532 | 4.669 | 7.106 |
| Velocidad (x) | [m/s] | 0.066 | -0.030 | 0.007 |
| Velocidad (y) | [m/s] | 0.015 | 0.002 | -6.590e-04 |
| Velocidad (z) | [m/s] | 6.532 | 4.479 | 7.106 |
| Densidad | [kg/m ³] | 1.20 | 1.20 | 1.20 |
| Número de Mach | [] | 0.02 | 0.01 | 0.02 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura N°5: Líneas de flujo de aire dentro del túnel para distintas configuraciones del ventilador



Fuente: Elaboración propia.

Sección de estabilización

El principal objetivo de esta sección es la de acondicionar o enderezar el flujo para que éste sea lo más laminar posible. Para cumplir dicho objetivo, se suelen colocar distintos tipo de pantallas de turbulencia que anulen las componentes de velocidad transversal del flujo; aunque estos suponen un obstáculo que disminuye la energía de la componente longitudinal del flujo representado en la corriente del fluido como una pérdida de carga. Esta condición lleva a elegir un diámetro mayor para esta sección que el diámetro de la zona de prueba para disminuir la perdida de carga, ya que la ecuación de Darcy-Weisbach depende del diámetro.

$$H_f = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g}$$

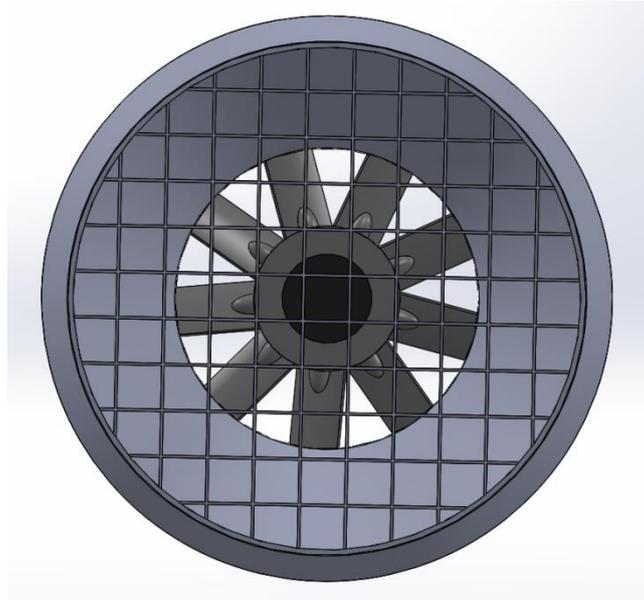
Por otro lado, la configuración del ventilador extractor nos proporciona un flujo considerablemente ordenado, sin embargo, para mejorar la calidad de los ensayos se propone la implementación de una malla cuadriculada de 50x50 mm al momento de la construcción.

Contracción

El objetivo de esta sección es aumentar la velocidad en la sección de prueba apelando a una disminución considerable en el área de paso del flujo.

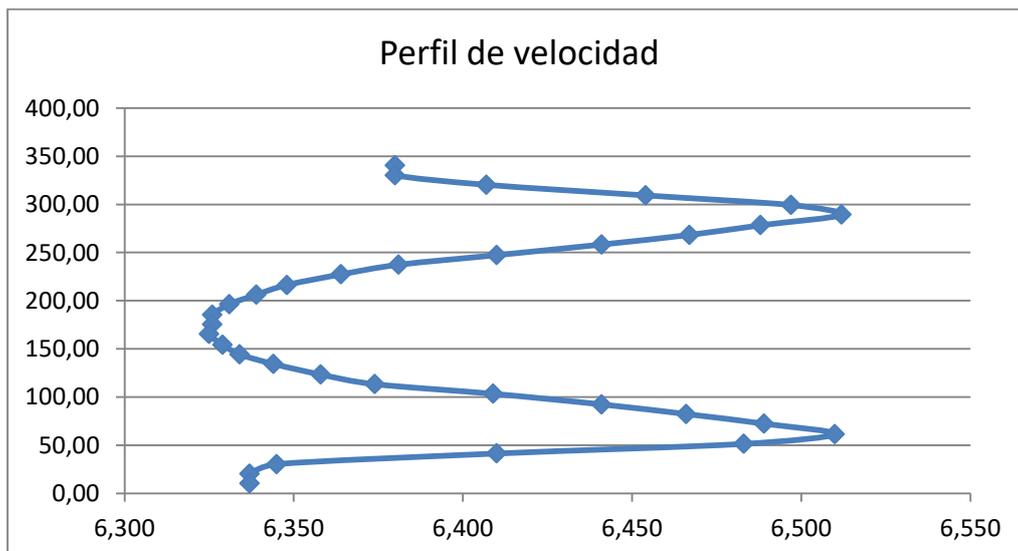
Las paredes de la contracción guían al flujo hasta la sección de menor tamaño, mientras que en la línea central la velocidad decae. De esta forma, a la salida de la contracción se exhibe un perfil de velocidad como el de la fig. 7, en el que los extremos poseen una velocidad mayor que el centro del flujo. Este perfil de velocidad fue tomado a 5 mm de la entrada de la sección de prueba, donde el diámetro interno de la contracción es de 351,34 mm.

Figura N°6: Entrada del túnel con screen cuadrículado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°7: Perfil de velocidad a la salida de la contracción.



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, a la salida de la contracción se coloca una longitud de asentamiento que actúe como estabilizador del perfil de velocidad del flujo. Esta longitud posee el mismo diámetro que la zona de prueba.

Sección de prueba

Esta es la sección más importante del túnel, ya que es el lugar en el que se instala el modelo a analizar. El flujo debe ser uniforme y la capa límite debe ser delgada para maximizar el área de la sección transversal utilizable.

Se optó por una sección de prueba cerrada, para evitar fluctuaciones en el flujo, y de un material transparente que permita observar directamente los fenómenos que ocurren dentro de ella.

Tabla N°3: Valores en la sección de prueba tomados en el punto A (fig. 3) con malla para enderezar el flujo.

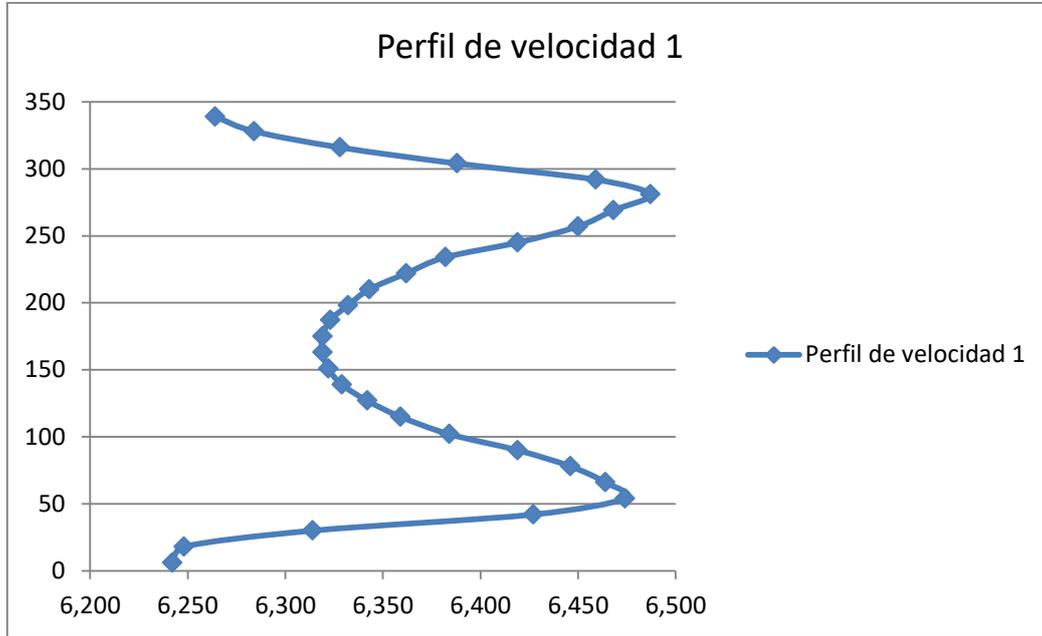
| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------|----------------------|------------|
| Presión estática | [Pa] | 101294.43 |
| Presión dinámica | [Pa] | 30.39 |
| Presión total | [Pa] | 101324.82 |
| Velocidad | [m/s] | 7.106 |
| Velocidad (x) | [m/s] | 0.007 |
| Velocidad (y) | [m/s] | -6.590e-04 |
| Velocidad (z) | [m/s] | 7.106 |
| Número de Mach | [adimensional] | 0.02 |
| Densidad | [kg/m ³] | 1.20 |
| Viscosidad dinámica | [Pa.s] | 1.8145e-05 |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se puede ver el perfil de velocidades en los planos 1, 2 y 3 de la sección de prueba marcados anteriormente en la fig. 3. En los gráficos se omitieron los valores de la velocidad del fluido en los límites sólido-líquido, ya que por condición de no

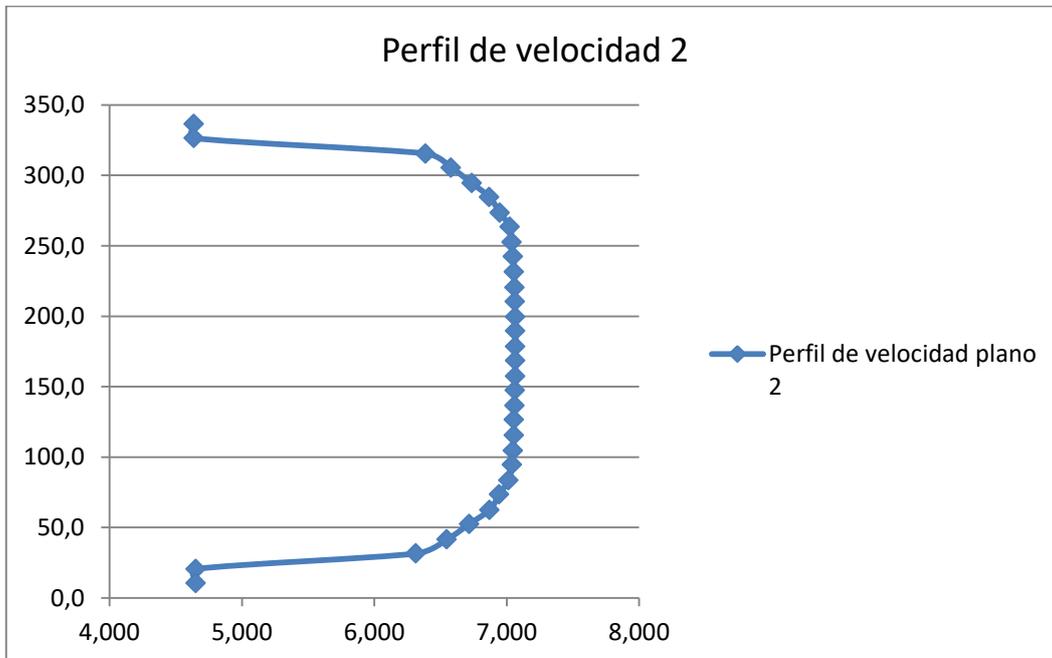
deslizamiento, ese valor es igual a cero y dificulta la observación de los fenómenos que ocurren hacia el centro de la sección analizada.

Figura N°8: Perfil de velocidad en plano 1.



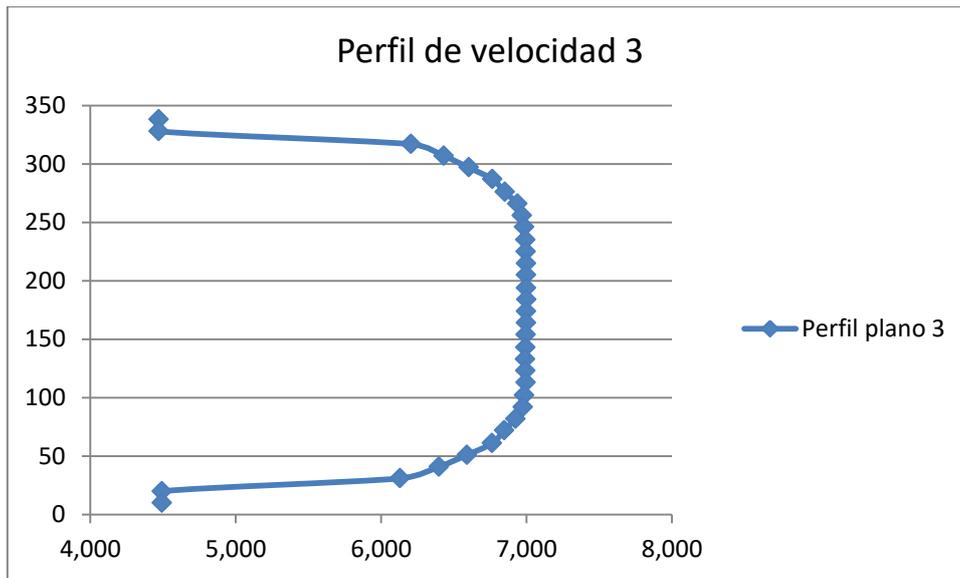
Fuente: Elaboración propia.

Figura N°9: Perfil de velocidad en plano 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°10: Perfil de velocidad en plano 3.

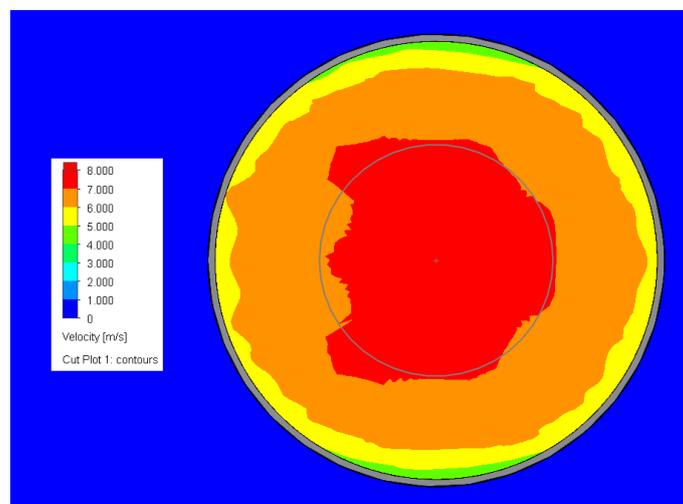


Fuente: Elaboración propia.

En los perfiles graficados en las figuras anteriores podemos ver como el flujo estabiliza su perfil a lo largo de la sección de prueba. En la fig.8 se observa un perfil de velocidades perturbado por los efectos de la contracción; en cambio, en las figs. 9 y 10 se observa una transición hacia un perfil más desarrollado, donde se puede encontrar un perfil Pouseville característico.

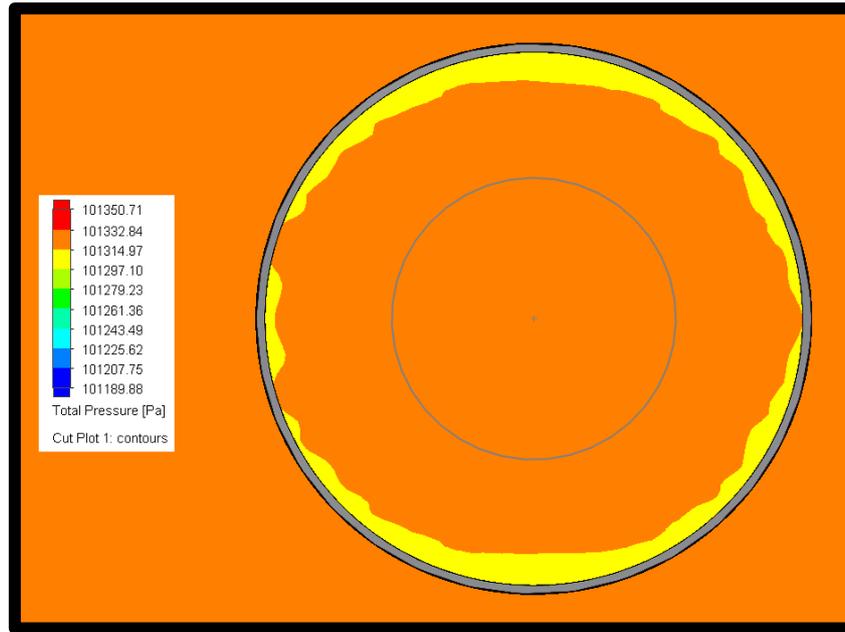
Por lo tanto se analizan la variación de la presión en un plano transversal A, entre los planos 2 y 3.

Figura N°11: Sección de prueba útil y campo de velocidades en plano A.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°12: Sección de prueba útil y campo de presiones en plano A.



Fuente: Elaboración propia.

El flujo exhibe una variación de 0,02% entre el valor promedio de velocidad y la velocidad en la componente principal del fluido (Tabla 3). Por lo que podemos afirmar que el flujo es ordenado.

Al analizar los perfiles de velocidad de las Figs. 9 y 10 podemos determinar el área útil de la sección de prueba del túnel de viento. De forma estricta, muestran una velocidad uniforme a lo largo de la sección de prueba, con una capa límite de aproximadamente 84 mm en cada pared del túnel. Por lo tanto, para evitar que la capa límite cerca de las paredes interfiera en las pruebas de los modelos, se tomará como sección útil del mismo 180 mm de diámetro desde el centro. Como podemos ver en las Figs. 11 y 12, en las cuales se muestra la dimensión de la sección útil.

En la fig. 11 vemos que la velocidad en la sección útil determinada es constante, aunque exhibe leves deformaciones.

Difusor

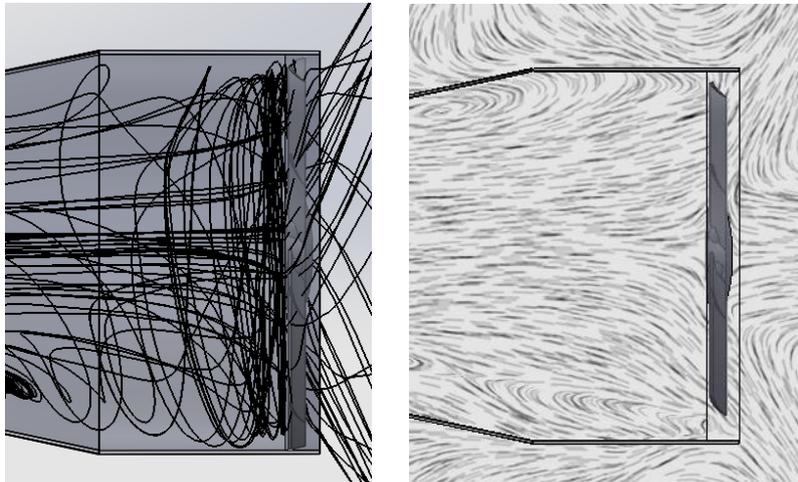
La función principal de esta sección es disminuir la velocidad de salida del flujo, gracias a un incremento del área de paso del fluido. Por consiguiente, se aumenta paulatinamente la presión y se disminuye la velocidad del flujo. Sin embargo, cuanto mayor es el ángulo del difusor, mayor la pérdida por la turbulencia generada entre la línea de flujo y las paredes del mismo.

Envolvente del ventilador

Un detalle a destacar, es la configuración de la sección que recubre el ventilador. En las simulaciones se pudo observar que al existir un espacio libre entre los álabes y las paredes de la sección se generaban cortocircuitos o flujos de recirculación acompañado de remolinos en la sección.

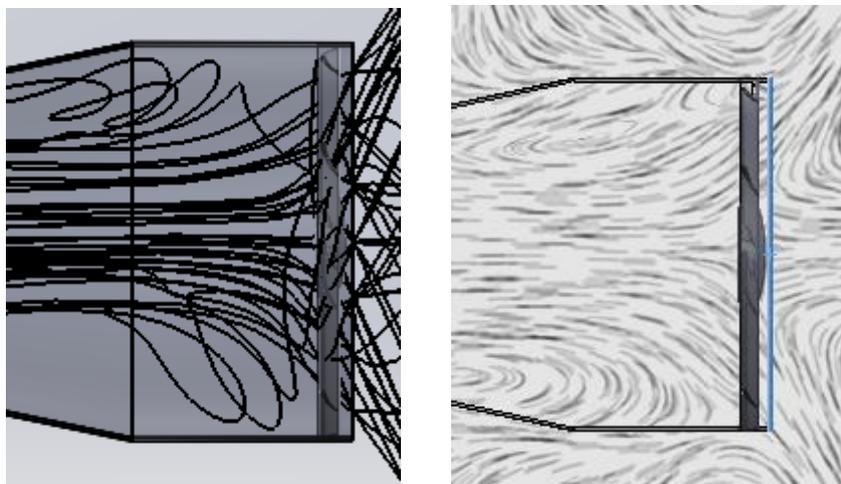
La aparición de estos remolinos se dio con un espacio de 20 mm entre el extremo de los álabes del ventilador y la pared del túnel, fig.13. En cambio, se redujeron al disminuir este espacio. En la fig. 14, se ve que con una diferencia de 5 mm entre álabes y envolvente, prácticamente no aparecen estos remolinos.

Figura N°13: Líneas de corriente en la envolvente del ventilador con una separación de 20 mm entre álabes del ventilador y pared.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°14: Líneas de corriente en la envolvente del ventilador con una separación de 5 mm entre álabes del ventilador y pared.

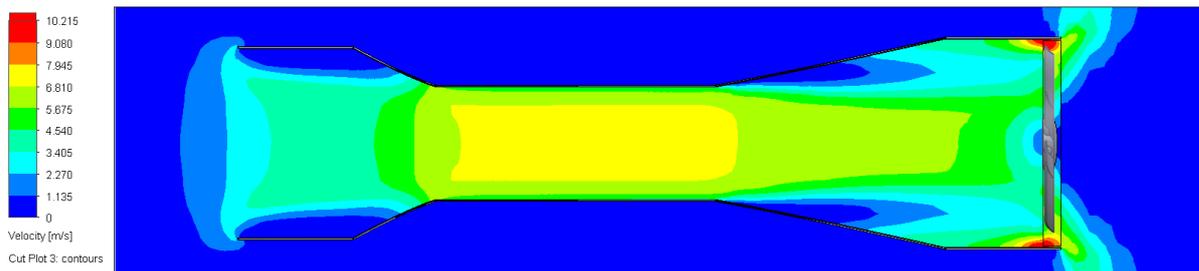


Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a modo de resumen se muestran los resultados de la simulación sobre un plano longitudinal del túnel de viento, en el cual se representa la variación de la presión a lo largo de este, la velocidad, el número de mach y la densidad.

La fig. 15 nos permite observar la velocidad que se obtuvo en cada una de las secciones del túnel, como disminuye en aquellas secciones de mayor área y, al contrario, aumenta en la sección de prueba. La velocidad que más interesa es la de la sección de prueba, que será la que afecte a los experimentos que se realicen dentro del túnel.

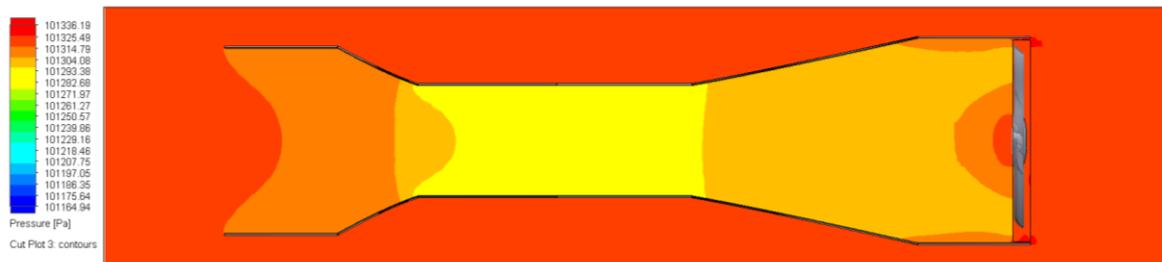
Figura N°15: Variación de la Velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

En la fig. 16 observamos como varía la presión dentro del túnel, manteniendo una relación inversa con la velocidad. Sin embargo, esta variación de presión es casi despreciable, provocando un efecto insignificante en la densidad del aire, como podemos ver en la fig. 18. Por lo tanto, la suposición de un fluido incompresible, según el número de Mach, cuya variación se muestra en la fig. 17, es completamente válida.

Figura N°16: Variación de la presión

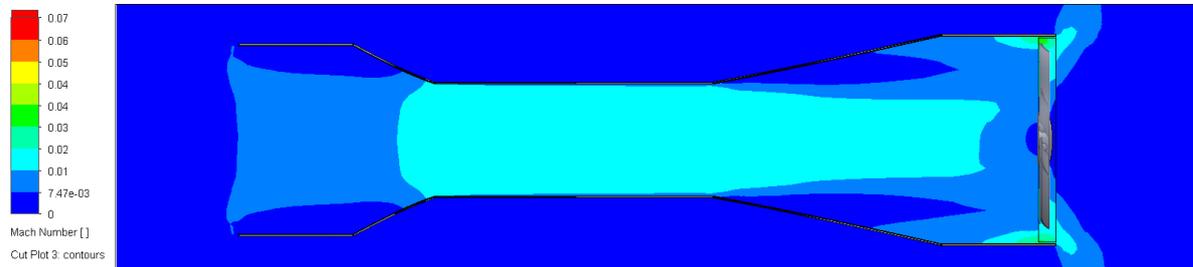


Fuente: Elaboración propia.

En resumen, mediante la simulación podemos observar cómo el aire es forzado a ingresar por la primera sección del túnel gracias al ventilador que se encuentra al final del mismo. Luego, en la contracción, el flujo se acelera al encontrarse con un área más estrecha para mantener el volumen de flujo constante (principio de continuidad), provocando, a su vez, una disminución de la presión estática en la sección de ingreso a la zona de prueba (Principio de Bernoulli). Por último, el difusor

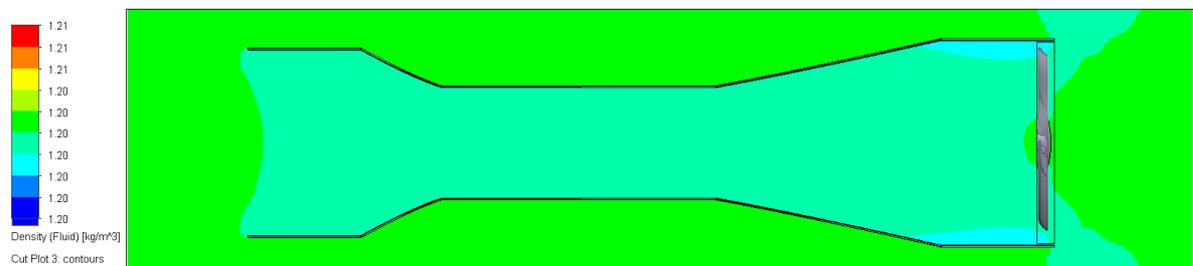
convierte esa energía cinética en energía de presión nuevamente, siguiendo con la ley de conservación de la energía.

Figura N°17: Número de Mach a lo largo del túnel de viento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°18: Densidad a lo largo del túnel de viento.



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se logró caracterizar el funcionamiento de un túnel de viento de baja velocidad, a partir de un programa de simulación de elementos finitos.

Se obtuvo información importante para su construcción, como la existencia de una longitud de estabilización del flujo entre la contracción y la sección de prueba. Además de la configuración del ventilador y la importancia de la geometría de su envolvente.

Se comprobó un valor de número de Mach de 0.02, casi constante a lo largo del túnel. Esto nos indica que se tiene un régimen subsónico ($Ma < 0,8$), de forma que el flujo puede considerarse incompresible, es decir, que la densidad será constante a lo largo de la sección del túnel. De esa forma, se podrá utilizar la teoría de Reynolds, Darcy y Bernoulli para simplificar los cálculos durante los ensayos.

La alta calidad del flujo y la estabilidad de sus parámetros en el tiempo, es esencial para la investigación. Estas condiciones permitirán fijar una base para realizar una comparación en el rendimiento de los distintos modelos de aerogeneradores ensayados, para evaluar cuál será el diseño óptimo que responda mejor a las necesidades y condiciones del lugar en el que se desee instalar.

Se determinaron los parámetros básicos de la sección de prueba como son la velocidad de 7.106 m/s, la presión 101294.43 Pa y la viscosidad dinámica 1.8145e-05 Pa.s, este último es un parámetro necesario para calcular el número de Reynolds. Al igual que se determinó la sección útil de la misma, con un diámetro de 180 mm desde el centro.

La turbulencia característica de los túneles de viento provoca que las características del flujo sean similares a las de un flujo en aire libre con un mayor número de Reynolds [7]. Por lo que, en el caso de querer extrapolar los resultados a las condiciones reales, debe tenerse en cuenta la corrección del número de Reynolds.

Este trabajo permitirá avanzar en el desarrollo de un tunel de viento para la prueba de aerogeneradores de baja potencia instalado en el Laboratorio de Perfil Alar de la CNEA-UNTREF.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (s.f.). Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. Recuperado en línea 20/4/2020 de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>
- [2] Secretaría de Planeamiento Energético Estratégico. (2016). Escenarios Energéticos 2025. Buenos Aires: Ministerio de Energía y Minería.
- [3] Prensa INTI. (24 de Enero de 2020). Ya rige la primera certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia. Recuperado en línea el 14/3/2020 de <https://www.inti.gob.ar/noticias/21-asistencia-regional/1587-ya-rige-la-primera-certificacion-de-instaladores-de-aerogeneradores-de-baja-potencia>
- [4] Asociación Argentina de Energía Eólica. (7 de mayo de 2014). INTI Neuquén prueba aerogeneradores en Cutral-Có. Recuperado en línea el 14/3/20 de <https://argentinaeolica.org.ar/novedades/inti-neuquen-prueba-aerogeneradores-en-cutral-co-1>

- [5] Nancy Hall. (5 de mayo de 2015). Types of Wind Tunnels. NASA. Recuperado en línea el 18/3/2020 de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>
- [6] Daniel Enrique Martínez Coza. (2016) Diseño y construcción de un túnel de viento para ensayos en régimen subsónico y transónico. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- [7] J.B. Barrow., H. Rae., and A. Pope (1999). Low-Speed Wind Tunnel Testing. Nueva York: John Wiley & Sons.