

# Estudio numérico de túnel de viento didáctico del TecNM/ITLaguna

M. Rivero-Corona<sup>1</sup>, F.S. Sellschopp-Sánchez<sup>2,\*</sup>, E. Arroyo-Chavarría<sup>3</sup>, J. Barajas-Hernández<sup>3</sup>, E. Ramos<sup>4</sup>

**Resumen**— En este trabajo se evalúa numéricamente el comportamiento aerodinámico de distintas configuraciones de las secciones de entrada y salida de un túnel de viento didáctico que se construirá en el Instituto Tecnológico de La Laguna. El túnel de viento tendrá una geometría cilíndrica con un diámetro de la sección de prueba de 1.1 m y una longitud de 2.44 m. El análisis se realizó utilizando el modelo de turbulencia SST en el software COMSOL Multiphysics. Se realizó un análisis paramétrico en el que se consideran que el diámetro de la sección de entrada varía entre 1.3 m y 2.3 m, el diámetro de salida varía entre 1.2 m y 1.6 m, y la velocidad oscila entre 1 y 7 m/s. Estos valores se determinaron de acuerdo a las restricciones de espacio donde será instalado el túnel, así como los requerimientos de velocidad para el aerogenerador.

**Palabras claves**— Modelo de turbulencia SST, CFD, Túnel de viento

**Abstract**— In this work an aerodynamic numerical evaluation of a didactic wind tunnel with different configurations of ingress and egress sections is performed. The didactic wind tunnel will be built at the Instituto Tecnológico de La Laguna. The device includes a cylindrical geometry with a test section diameter of 1.1 m and a length of 2.44 m. The analysis is performed using the SST turbulence model in the COMSOL Multiphysics software. A parametric analysis is performed in which the diameter of the inlet section is considered to vary between 1.3 m and 2.3 m, the outlet diameter varies between 1.2 m and 1.6 m, and the wind velocity is between 1 and 7 m/s. Tunnel dimensions were determined according to the space limits where it will be installed, as well as the speed requirements for the wind turbine.

**Keywords**— CFD, SST turbulence model, Wind tunnel.

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la dinámica de fluidos está llena de conceptos abstractos, métodos matemáticos, y resultados experimentales que dificultan su comprensión por parte de estudiantes de pre- y posgrado. Una opción viable que ha demostrado ser una gran ayuda en el entendimiento de la

mecánica de fluidos es mediante experimentos de laboratorio que inculcan en el estudiante la teoría y práctica de la experimentación. Sin embargo, la didáctica experimental en laboratorio debe asegurar que las condiciones del fluido sean lo más ideales posibles a fin de que la comprensión de los estudios aerodinámicos coincidan en la teoría y en la práctica.

Si se considera el auge de la energía eólica y la necesidad en formación de recursos humanos con una comprensión profunda de los fenómenos físicos presentes en el diseño y análisis de turbinas eólicas, se tiene la necesidad de desarrollar herramientas que les faciliten esto. En el ámbito de la energía eólica, el túnel de viento es un instrumento que se usa para estudiar el efecto del flujo de aire sobre obstáculos sólidos, como los álabes. El túnel de viento es un espacio especialmente diseñado y protegido en el cual se hace fluir aire para obtener condiciones de flujo determinadas. Estas condiciones incluyen una velocidad definida y una distribución de la velocidad predeterminada, así como también distintos parámetros de turbulencia [1]–[3]. La visualización del flujo se realiza a través de paredes transparentes ubicadas en la sección de prueba, que corresponde a la sección del túnel en donde se realizarán los experimentos. Las técnicas de caracterización del flujo dependen de las condiciones de operación del túnel y de las características del túnel mismo. Entre las técnicas que se pueden emplear se enlistan la velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés), anemometría láser Doppler (LDA por sus siglas en inglés), anemometría de hilo caliente (CTA por sus siglas en inglés), cámaras de humos, entre otras [4].

Los túneles de viento se han utilizado de manera extensiva en aplicaciones industriales y de investigación durante las últimas seis décadas. La forma y tamaño de los túneles varía dependiendo la aplicación. El túnel de viento más grande del mundo se encuentra localizado en el Centro de Investigación Ames de la NASA (en inglés National Aeronautics and Space Administration) y tiene una sección de prueba de 24.38 m de alto por 36.57 m de ancho [5]. Sin embargo, existen túneles mucho más pequeños que se utilizan para la calibración de sensores pequeños.

En este artículo se presenta el análisis de comportamiento quasi-estático de un túnel de viento didáctico con la finalidad de obtener un diseño del túnel

<sup>1</sup> CONACYT – TecNM / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación

<sup>2</sup> TecNM / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación

<sup>3</sup> TecNM / Instituto Tecnológico de La Laguna, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Av. Cuauhtémoc y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna S/N 27000, Torreón, Coahuila, México

<sup>4</sup> Instituto de Energías Renovables, UNAM, Temixco, Morelos

\* sellschopp@hotmail.com

que proporcione un perfil de velocidad de viento adecuado a las necesidades. El estudio numérico presentado permitirá analizar el perfil de velocidad ante las diversas posibles configuraciones de la sección de entrada y salida del túnel y seleccionar el que mejor se adapte a las condiciones deseadas.

## II. PARÁMETROS ADIMENSIONALES

En muchas ocasiones para analizar experimentalmente algún sistema es necesario realizar modelos a escala de dicho sistema. Para que los resultados obtenidos de experimentos a escala sean aplicables a los sistemas reales es necesario que los modelos a escala cumplan con ciertos criterios de similitud. Estos criterios están dados por los números o parámetros adimensionales que resultan de comparar dos o más fenómenos presentes en el problema a analizar. Para el caso del estudio de dinámica de fluidos presentado en este trabajo, existen dos parámetros principales: el número de Reynolds ( $Re$ ) y el número de Mach ( $Ma$ ). Aunque existe una mayor cantidad de números adimensionales, estos están fuera de los objetivos del presente trabajo.

El número de Reynolds relaciona los efectos viscosos y los efectos inerciales en el flujo de un fluido, por lo que para un flujo dado el número de Reynolds indica si el flujo es laminar o turbulento. El número de Reynolds está definido como:

$$Re = \frac{U_0 L \rho}{\mu} \quad (1)$$

Donde  $U_0$  y  $L$  son la velocidad y longitud características del problema, y  $\rho$  y  $\mu$  la densidad y viscosidad dinámica del fluido.

Por otro lado, el número de Mach está definido como la razón entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en el fluido  $c$ ,

$$Ma = \frac{U_0}{c} \quad (2)$$

El número de Mach está relacionado con los efectos de compresibilidad del fluido, y para  $Ma < 0.3$  el fluido se puede considerar como incompresible.

## III. TÚNELES DE VIENTO

El túnel de viento es un instrumento creado y diseñado para producir de manera controlada una corriente de viento que puede ser mayormente uniforme de baja turbulencia con la finalidad de estudiar el efecto aerodinámico del flujo de aire sobre elementos de interés [6]. La forma de generar la corriente de viento se puede hacer mediante impulsores de aire (air-drives) como los compresores de aire presurizado, ventiladores axiales, ventiladores centrífugos o sopladores. En el caso de los compresores se consideran de mayor costo debido a que es

necesario contar con mayor equipamiento como tanques de almacenamiento presurizado así como las líneas de conducción que soporten la presión, entre otros. En los casos restantes, se trata de equipos más comunes con una diversidad que van desde ventiladores o sopladores que son movidos por poleas a través de bandas o movidos por transmisión directa a la flecha, y que pueden ser instalados para empujar o aspirar el aire que pasará a través de la cámara de pruebas del túnel de viento [7].

Debido a que existe una gran cantidad de aplicaciones en donde los estudios aerodinámicos son requeridos, los túneles de viento permiten experimentar con modelos escalados de tales aplicaciones, y por ello se tienen diferentes geometrías de túneles de viento, así como una clasificación de túneles por régimen de velocidades. Referente a las geometrías de túneles de viento, existen básicamente dos tipos: de circuito abierto y de circuito cerrado. El túnel de circuito abierto toma el aire por uno de los lados directamente del medio ambiente y se fuerza a pasar a través del túnel mediante los impulsores de aire, como se observa en la Figura 1. Este tipo de túnel presenta menor costo de fabricación y puede ocupar poco espacio, debe evitarse tener obstáculos a la entrada y salida del túnel y finalmente se presenta un mayor consumo de energía por el proceso de forzar al aire del medioambiente a pasar a través del túnel. En cambio, el túnel de circuito cerrado (ver Figura 2) presenta mayor costo de fabricación y requiere mayor espacio, y dado que el túnel se diseña para que el aire recorra un circuito cerrado, no se presentan los problemas del túnel de circuito abierto, presentando además un menor consumo de energía [7].

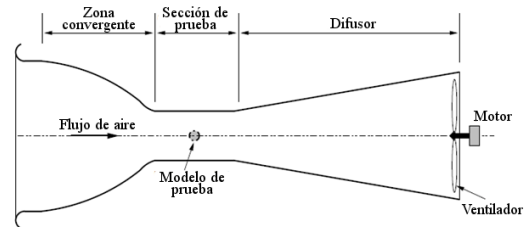


Figura 1. Túnel de viento de circuito abierto.

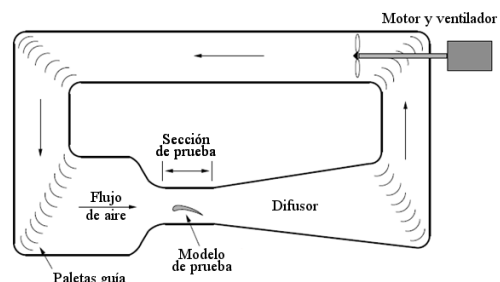


Figura 2. Túnel de viento de circuito cerrado.

Los túneles de viento se diseñan bajo especificaciones de los estudios de interés que se busca experimentar, por ello se clasifican por rango de velocidad tomada en la sección de prueba, la cual se dimensiona en valores de velocidad del sonido o del número de Mach [8]. De esta manera se presentan tres clasificaciones por rango de velocidad [7]: subsónico ( $Ma < 1$ ), transónico ( $Ma \sim 1$ ) y supersónico ( $Ma > 1$ ).

Los túneles subsónicos generalmente presentan la cámara de pruebas después de la zona convergente o zona de contracción, en donde la velocidad del viento aumenta por la mayor relación de área de entrada de aire versus el área de la cámara de pruebas, obteniendo así una reducción en la presión y la densidad del aire permanece constante. Esta característica del túnel permite realizar experimentación en aerodinámica de sustentación por baja velocidad de viento, vehículos y turbinas de viento.

Los túneles transónicos y supersónicos, a diferencia de los túneles subsónicos, se presenta una modificación en la densidad de aire debido a la compresibilidad que se presenta, por lo que la densidad cambia más rápidamente que la velocidad por un factor cuadrático del número de Mach [8]. De esta forma al aumentar la presión de entrada y hacer pasar la masa de aire a través de un orificio de estrangulamiento, la velocidad del aire alcanza velocidades muy elevadas. En este tipo de túneles, la sección de prueba se tiene al final del túnel, después del difusor, por lo que se considera de gran importancia buscar una adecuada relación entre la zona de contracción y la de difusión, para evitar oscilaciones en la corriente de viento [7], [8].

Es importante mencionar que los túneles con la sección de prueba abierta tienen una clara ventaja en cuanto al acceso y caracterización del flujo, respecto a los de sección cerrada. Sin embargo, al estar expuesta la sección, ésta interactúa con el ambiente por lo que se presentan problemas severos de fluctuaciones en el flujo, por lo que requieren una análisis extensivo posterior a su fabricación. Por esta razón, los túneles más comunes son los de sección de prueba cerrada. Es importante puntualizar un aspecto en el diseño de las secciones transversales, en las cuales una sección rectangular ofrece la ventaja en cuanto a la facilidad en la instalación de los modelos a probar (ya que es sobre una superficie plana), comparados con secciones circulares, aunque éstas presentan una mejor distribución de los esfuerzos mecánicos.

Los túneles de viento también se pueden clasificar de acuerdo al tipo de estudio para el cual fueron desarrollados. Existen túneles para el estudio de problemas relacionados con la capa límite terrestre, por ejemplo en aplicaciones en las que se requiere analizar cargas de viento sobre estructuras, patrones de dispersión, erosión,

flujos en y sobre zonas urbanas y/o zonas con distinto tipo de vegetación, entre otros. Existen túneles para estudios de aerodinámica sobre distintos objetos, como personas o animales, buscando desarrollar mecanismos o sistemas que permitan el uso más eficiente de la energía (por ejemplo el análisis de corredores de carreras en bicicleta). Por otro lado se han desarrollado túneles de viento aeroacústicos para el análisis aerodinámico y acústico de distintos sistemas que generan mucho ruido, como vehículos motores o aeronaves. También se han desarrollado túneles de viento exclusivamente para estudiar problemas relacionados con automóviles, en los cuales se buscan obtener los parámetros aerodinámicos que afectan el rendimiento de los automóviles, manejabilidad, enfriamiento de los sistemas, entre otros problemas. Por otro lado, existen túneles diseñados principalmente para la visualización del flujo: túneles de humo. En estos los métodos experimentales usados incluyen análisis de imágenes y video. En cualquiera de los escenarios anteriores, los estudios incluyen flujos en estado estacionario y estudios de flujos en estado transitorio.

Como se ha visto, existe una gran cantidad de diseños de túneles de viento que fueron desarrollados para propósitos muy específicos. Por esta razón no se puede concluir que algún diseño es mejor que otro.

#### IV. MÉTODO NUMÉRICO

El constante incremento en la capacidad de cómputo en las últimas décadas ha contribuido de manera significativa, y en distintos aspectos, en el desarrollo y análisis de túneles de viento. En este sentido, el análisis numérico ha acortado el tiempo requerido para el diseño y análisis de experimentos, y disminuido el costo económico asociado a estos. Además, el análisis numérico permite tener acceso a una mayor cantidad de información que la disponible con diversas técnicas experimentales en las cuales muchas veces se cuenta con información incompleta en un punto, una línea o un plano dependiendo de la técnica de caracterización empleada. En este sentido es importante mencionar que la simulación numérica es complementaria a las mediciones experimentales.

La simulación numérica se llevó a cabo con el software COMSOL Multiphysics 5.2, basado en el método de elemento finito. COMSOL, a través del módulo de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics*) ofrece distintas formulaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes [9] para resolver problemas con flujos turbulentos, por ejemplo: k-epsilon, k-omega y SST (por sus siglas en inglés *Shear Stress Transport*), entre otras [10]. En este trabajo se utilizó el modelo SST [11], también conocido como SST

k-omega. Este modelo se usa comúnmente en problemas que presentan gradientes de presión adversos considerables y separación de la capa límite. Estos fenómenos son de suma importancia en aplicaciones prácticas, por ejemplo en la aerodinámica de los álabes de aerogeneradores en los cuales es relevante la separación de la capa límite que se puede utilizar para controlar la operación de los aerogeneradores y en el análisis y diseño de túneles de viento en donde se deben obtener perfiles de velocidad definidos.

#### V. PROPUESTA PARA EL TÚNEL DE VIENTO DIDÁCTICO

El túnel de viento didáctico que se propone construir tiene como objetivo principal realizar estudios de generación utilizando una turbina eólica de baja potencia, así como promover la investigación interdisciplinaria en diversos temas del recurso eólico. Para esto el TecNM/ITL contará con un aerogenerador marca iSTA Breeze i-200 [12] con una potencia nominal de 100 Watts y una tensión de salida de 12 volts. La turbina tiene 5 aspas y el diámetro del rotor es de 0.8 m. Las características de operación de dicho aerogenerador son: velocidad de inicio de carga de 1.5 m/s, una velocidad máxima de 35 m/s y una velocidad nominal de 20 m/s.

El túnel analizado será subsónico de circuito abierto y con la sección de prueba abierta localizada en la parte posterior del túnel, ya que el aerogenerador estará ubicado en la parte posterior de túnel. El túnel inicialmente será accionado por un ventilador que empuje que ofrece una velocidad máxima del viento de 7 m/s, aunque en etapas futuras del proyecto se buscará incrementar este límite.

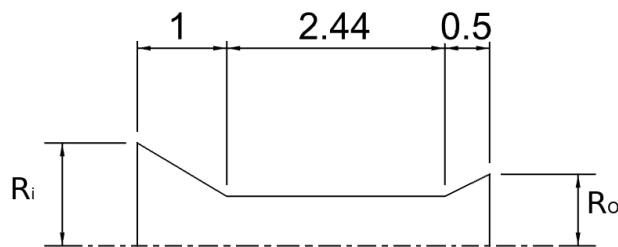


Figura 3. Geometría del túnel de viento para simulación en COMSOL. Unidades en metros. Radio de la sección de prueba 0.553 m.

En este trabajo se analiza un túnel con tres secciones: sección convergente, sección de prueba y el difusor, como se muestra en la Figura 3.

Para la construcción del túnel se cuenta con un tubo circular de 1.106 m de diámetro y 2.44 m de longitud. Este tubo constituye la sección central del túnel mostrado en la Figura 3. Debido a las limitaciones de espacio disponible para instalar el túnel de viento, la longitud total del túnel debe ser inferior a 4 m. Tomando en cuenta esta

restricción y la longitud del tubo disponible, en este trabajo se consideraron las longitudes de las secciones convergente y el difusor con una longitud constante de 1 m y 0.5 m, respectivamente. Por lo tanto el túnel analizado tiene un longitud total de 3.94 m.

#### VI. CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio para evaluar los perfiles de viento en el túnel consideran que la sección de la zona convergente tiene una longitud constante de 1.0 m, y el análisis de esta sección se enfoca en tres diferentes diámetros de entrada: 1.3 m, 1.8 m y 2.3 m. Así mismo, en la zona de salida del difusor se considera una longitud constante de 0.5 m y se analizan tres diámetros de salida: 1.2 m, 1.4 m y 1.6 m. Finalmente, de acuerdo a la capacidad del ventilador, se estudian 4 velocidades de corriente libre del viento: 1, 3, 5 y 7 m/s. La velocidad de corriente libre se refiere a la velocidad del fluido a una distancia tal que los efectos del túnel, y en general de cualquier sólido, sobre el fluido sean despreciables. En este caso la velocidad de corriente libre tiene una componente y es en la dirección axial.

En este trabajo se realizó un estudio paramétrico considerando los tres diámetros de la zona convergente, los tres diámetros del difusor y cuatro velocidades de viento, dando como resultado un total de 36 simulaciones.

A partir de los resultados obtenidos se analizarán los diversos perfiles de velocidad y presión de viento en las diferentes regiones dentro, así como fuera del túnel.

#### VII. RESULTADOS

Dada la geometría seleccionada para el túnel, el análisis numérico se hizo considerando un flujo axisimétrico. Esto simplifica considerablemente el costo computacional, ya que se pasa de un problema tridimensional a un problema bidimensional. Es decir, únicamente se analiza el plano  $r - z$ . Los resultados obtenidos permiten analizar distintas regiones del flujo, tanto dentro como fuera del túnel. Este trabajo se enfoca en dos variables: la velocidad (ambas componentes) y la presión.

En la Figura 4 se presenta la gráfica de contornos de la magnitud de las componentes radial (izquierda) y axial (derecha) para el túnel de viento con radio de entrada  $R_i = 1.15 \text{ m}$ , radio de salida  $R_o = 0.80 \text{ m}$  y una velocidad de viento de 7 m/s. Es importante notar que para  $r = 0 \text{ m}$  corresponde al eje del túnel. Se puede observar de la componente radial que en la sección de medio el flujo es básicamente axial, ya que la componente radial es aproximadamente cero. Esto se puede verificar en la gráfica de la componente axial, en donde se observa que la velocidad se mantiene constante en esta sección. En las regiones de entrada y salida del túnel se presentan flujos

bidimensionales, ya que ambas componentes son distintas de cero.

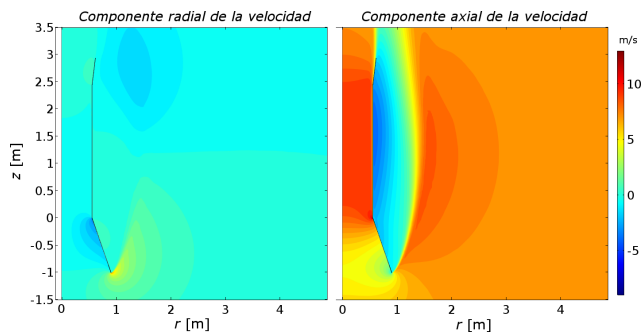


Figura 4. Componentes radial y axial de la velocidad para  $U_0 = 7 \text{ m/s}$ ,  $R_i = 1.15 \text{ m}$  y  $R_o = 0.80 \text{ m}$ .

Además en la parte externa del túnel se presenta una zona de recirculación (se tienen velocidades negativas) que se extiende por su longitud. Esto se puede observar en la Figura 5, en donde se presentan las líneas de corriente y en color la presión. Las líneas de corriente corresponden a líneas que siguen la dirección del flujo en cada punto. De las Figuras 4 y 5, se puede observar claramente que dentro del túnel una caída en la presión implica un incremento en la energía cinética del fluido. Para el flujo externo (fuera del túnel), el mínimo de la presión se presenta en el centro de la recirculación. Otro aspecto importante es que los gradientes de presión máximos se presentan en los vértices internos del túnel, por lo que sería deseable que la geometría tuviera un perfil suave, ya que los gradientes de presión están relacionados con el desprendimiento de la capa límite. Sin embargo, cumplir con este requisito implica un incremento en el costo de fabricación del túnel.

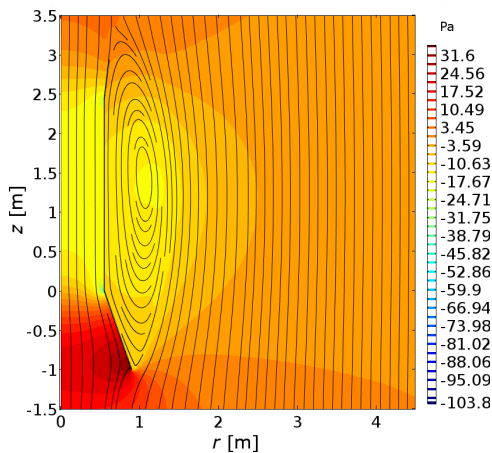


Figura 5. Distribución de la presión en la zona del túnel de viento y líneas de corriente para el flujo a  $U_0 = 7 \text{ m/s}$ ,  $R_i = 1.15 \text{ m}$  y  $R_o = 0.80 \text{ m}$ .

Con la finalidad de analizar los resultados de todas las simulaciones y comparar los comportamientos de velocidad y presión a lo largo del interior del túnel, se elaboraron gráficas de las variables en el eje del túnel para visualizar las diferencias existentes. En las Figuras 6 y 7 se muestra la velocidad y presión normalizadas, respectivamente, en el eje del túnel de viento para distintas configuraciones de la sección de entrada y salida del túnel. La gráfica de velocidad se normalizó con respecto a la velocidad de corriente libre, mientras la gráfica de presión se tomó como referencia la presión máxima que se localiza antes de la entrada al túnel.

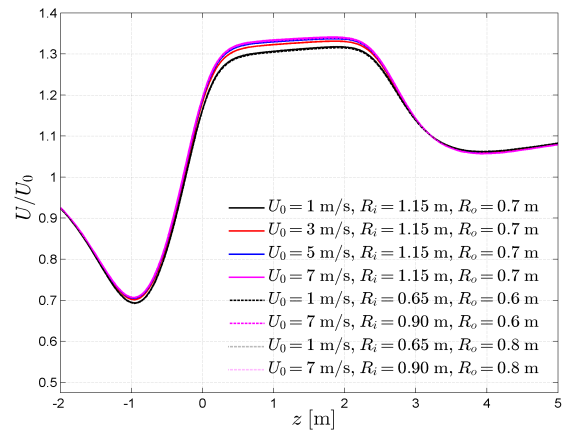


Figura 6. Velocidad normalizada con la velocidad de corriente libre en el eje del túnel como función de  $z$  para distintas configuraciones.

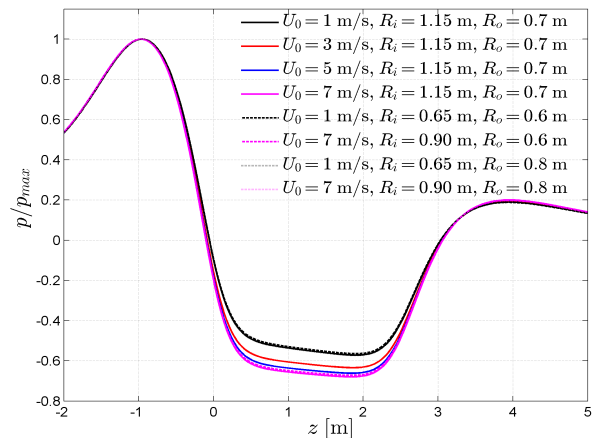


Figura 7. Presión normalizada en el eje del túnel como función de  $z$  para distintas configuraciones.

En la Figuras 6 y 7 se puede observar que las distintas dimensiones consideradas para la sección de entrada y salida no tienen un impacto considerable en los perfiles de la velocidad axial y presión en el eje del túnel. Además se puede ver que existe una relación inversa entre la presión y la velocidad que puede ser explicada por la ecuación de



Bernoulli [9], que indica que un incremento en la presión implica una caída en la velocidad, para una línea de corriente localizada en el eje del túnel. En la Figura 6 se puede observar que a velocidades de corriente libre mayores, se tienen un ligero incremento respecto a velocidades menores, o una menor caída en la presión (ver Figura 7).

En la Figura 6 se muestra que la máxima velocidad es entre un 32 y 34% superior a la velocidad de corriente libre, y el máximo se presenta justo al final de la zona de prueba, en donde la sección transversal se ensancha. Este mismo punto corresponde al mínimo de la presión.

La ecuación que describe esta relación es lineal y está dada por  $U_{max} = 1.343U_0 - 0.0296$  con  $R^2 = 99.99$ .

### VIII. CONCLUSIONES

Se analizó el comportamiento del flujo de aire dentro de un túnel de viento considerando diferentes diámetros de entrada en la zona convergente y del difusor. Los resultados muestran que no existe una diferencia significativa en los perfiles de la velocidad axial y la presión en las distintas configuraciones, aunque a velocidades de corriente libre mayores se observa un ligero incremento en la velocidad (caída en la presión) respecto a velocidades de corriente libre menores. Se obtuvo que el incremento de velocidad fue de aproximadamente 34% en la sección de prueba y se determinó la expresión que relaciona la velocidad máxima y la velocidad de corriente libre que es válida únicamente dentro del rango de diámetros analizados. Además se observó que en los vértices se presentan los mayores gradientes de presión y estos se incrementan cuanto mayor es el ángulo por lo que es deseable tener una transición más suave entre las distintas secciones del túnel. Por tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos la mejor opción es el menor diámetro de abertura en la zona convergente y eliminar la zona del difusor.

### IX. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al TecNM por los recursos para el desarrollo de este proyecto. M. Rivero agradece a Cátedras CONACYT.

### X. REFERENCIAS

- [1] S. Okamoto, *Wind Tunnels*. InTech, 2011.
- [2] J. B. Barlow, W. H. Rae, and A. Pope, *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. 1999.
- [3] J. C. Lerner and U. Boldes, *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*. 2011.
- [4] C. Tropea, A. Yarin, and J. F. Foss, Eds., *Springer handbook of experimental fluid mechanics*, no. 1. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] WIRED, "Climbing inside the world's largest wind tunnel." [Online]. Available: [www.wired.com/2017/02/climb-inside-worlds-largest-wind-tunnel](http://www.wired.com/2017/02/climb-inside-worlds-largest-wind-tunnel). [Accessed: 01-May-2017].

- [6] N. A. Ahmed, Ed., *Wind Tunnel Designs and their Diverse Engineering Application*. InTech, 2013.
- [7] L. Cattafesta, C. Bahr, and J. Mathew, "Fundamentals of Wind-Tunnel Design," *Enycl. Aerosp. Eng.*, no. December, 2010.
- [8] NASA, "Wind tunnel design." [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tunnoz.html>. [Accessed: 01-May-2017].
- [9] D. J. Acheson, *Elementary Fluid Dynamics*. Oxford University Press, 1990.
- [10] J. Bredberg, "On Two-equation Eddy-Viscosity Models," Goteborg, Sweden., 2001.
- [11] F. R. Menter, "2-Equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *Aiaa J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [12] "iSTA Breeze," 2017. [Online]. Available: [www.istabreeze.com/online](http://www.istabreeze.com/online). [Accessed: 01-May-2017].

### XI. BIOGRAFÍA



**Erika Janeth Arroyo Chavarría.** Egresada de la carrera de Ingeniería Eléctrica, reconocida por mejor promedio de generación 2005 en el TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna, en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. A partir de ese momento y hasta el año 2011 colaboró en el departamento de proyectos en empresa líder en el ramo de instalaciones eléctricas en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Ella actualmente forma parte de la planta académica de la carrera Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son generación de energía eólica.



**Eduardo Ramos.** Doctor en Física por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigador Titular C del Instituto de Energías Renovables - UNAM ubicado en Temixco, Morelos, México. Las líneas de investigación del Dr. Ramos incluyen el análisis del fenómeno de convección natural con y sin rotación, flujos en gotas y burbujas, flujos magnetohidrodinámicos, así como fenómenos de transferencia de calor en estos y otros sistemas.



**Michel Rivero Corona.** Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigador adscrito al CONACYT - Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Laguna. Las líneas de interés del Dr. Rivero es la dinámica de fluidos, implementación de modelos para la estimación y predicción del potencial eólico y solar, flujos magnetohidrodinámicos, Procesamiento Electromagnético de Materiales.



**Francisco Sergio Sellschopp Sánchez.** Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de La Laguna en 2003 en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Él actualmente forma parte de la planta académica del posgrado de Ingeniería Eléctrica del TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son máquinas y redes eléctricas, calidad de la energía e incorporación de fuentes renovables a redes eléctricas.



**José Arturo Barajas Hernández.** Egresado de la carrera Ingeniería Industrial Electricista del Instituto Tecnológico de la Laguna en Octubre de 1983 en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Obtuvo el grado de M. C. en Ingeniería Eléctrica en julio del 2003 en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Actualmente forma parte de la planta académica de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas de investigación están en el control de velocidad de máquinas eléctricas.