

Caracterización del túnel de viento subsónico de ECITEC-UABC

Oscar Adrián Morales Contreras, Antonio Gómez Roa, Juan Antonio Paz González, José Navarro Torres, Juan Gabriel Barbosa Saldaña

ECITEC-Valle de las Palmas de la Universidad Autónoma de Baja California
ESIME-Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional
efrain.alcortagr@uanl.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se realiza la caracterización de la zona de pruebas del túnel de viento subsónico de ECITEC. Para determinar la cantidad de puntos utilizados en la obtención de la velocidad promedio en la zona de pruebas se utiliza la guía dada por Wang, además se determinan los perfiles de velocidad para los ejes “y” y “z”. Los resultados indican que se tiene flujo en un rango de Reynolds entre 230000 y 44000, y los perfiles comprueban el comportamiento turbulento del flujo, con una intensidad de turbulencia del 5%.

PALABRAS CLAVE

Túnel de viento, Tubo pitot, Velocidad promedio, Perfil de velocidad, Incertidumbre.

ABSTRACT

In this work the characterization of the test area of the subsonic wind tunnel of ECITEC is carried out. To determine the number of points used to obtain the average velocity in the test zone, the guide given by Wang is used, and the speed profiles for the “y” and “z” axes are determined. The results indicate that there is flow in a Reynolds range between 230000 and 44000, and the profiles verify the turbulent behavior of the flow, with a turbulence intensity of 5%.

KEYWORDS

Wind tunnel, Pitot tube, Average speed, Speed profile, Uncertainty.

INTRODUCCIÓN

En 1742, Benjamin Robins determinó el arrastre de las esferas de un mosquete midiendo las velocidades de las mismas disparadas sobre diferentes rangos con una carga fija de pólvora. Cuatro años más tarde, en 1746, reportó sus experimentos con el aparato armado giratorio mostrado en la figura 1, en el que un peso giraba un tambor que llevaba el objeto de prueba sobre un brazo largo. El arrastre fue determinado por el peso, mientras que la velocidad del objeto de prueba, se midió sincronizando un número de revoluciones del brazo. Esto le dio datos de arrastre más precisos, para una gama de formas, pero sólo en flujo de baja velocidad.¹ El concepto de brazo giratorio fue retomado por Sir George

Cayley, quien en 1804 lo utilizó para medir la fuerza de elevación sobre una placa cuadrada en ángulos de incidencia entre 3° y 18° , como se muestra en la figura 2. Utilizando estos datos, diseñó, construyó y voló con éxito un modelo de planeador (mostrado en la figura 3) que se cree, ha sido el primer vehículo de vuelo en la historia.²

En el siglo XIX varios otros investigadores utilizaron el brazo giratorio, uno de los más notables fue Otto Lilienthal, quien entre 1866 y 1889 construyó varios de ellos de diferentes tamaños y midió las características de la sustentación y el arrastre, de una gran variedad de modelos aerodinámicos, Lilienthal utilizó estos modelos en el diseño de los planeadores, en los cuales realizó más de 2500 vuelos entre 1891, y su vuelo final fatal, en 1896. En 1895 publicó las tablas derivadas de sus mediciones y éstas fueron republicadas en los E.U.A. en 1897.³

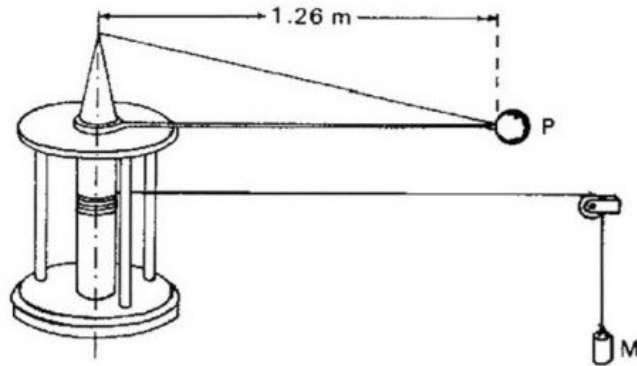


Fig. 1. Instrumento de medición de Benjamin Robins.

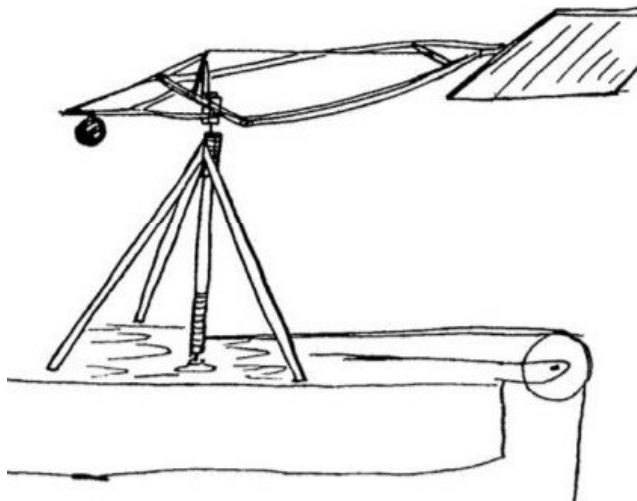


Fig. 2. Instrumento de medición de Sir George Cayley.



Fig. 3. Planeador de Sir George Cayley.

Los hermanos Wright habían diseñado su primer planeador usando las tablas de Lilienthal de fuerza normal y axial. Cuando lo llevaron a Carolina del Norte en septiembre de 1900, tuvieron un éxito limitado, pero encontraron que la sustentación era más baja de lo que se esperaba, por lo que en el otoño de 1901 construyeron un túnel de viento similar al de Wenham, con una sección de prueba de 16 x 16 pulgadas de sección transversal y un ventilador de dos paletas accionado por un motor de gasolina, mostrado en la siguiente figura.

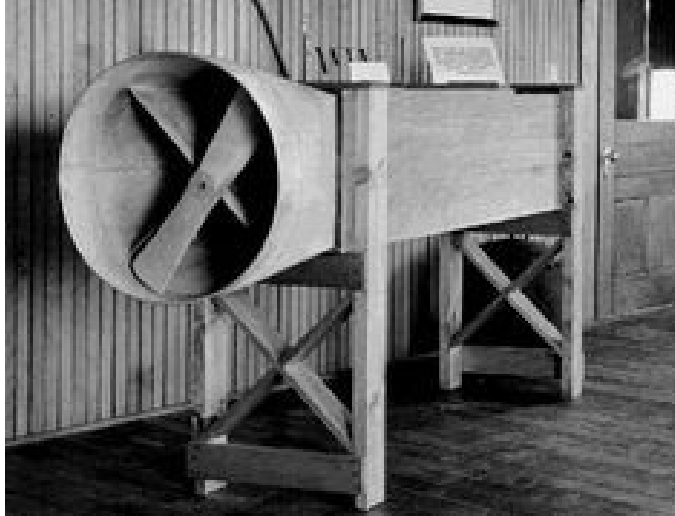


Fig. 4. Túnel de viento de los hermanos Wright.

Los hermanos Wright midieron el levantamiento y arrastre de 200 modelos diferentes de perfiles alares, utilizando una balanza simple de su propio diseño, que dio resultados precisos y repetibles. Su planeador de 1902, diseñado sobre la base de sus resultados del túnel de viento, tenía casi dos veces la envergadura que el diseñado anterior y tenía controles de vuelo. Habían establecido una base sólida para los primeros vuelos controlados, logro que no hubiera sido posible sin las pruebas realizadas en su túnel de viento.³

A comienzos del siglo XX, Gustav Eiffel inició una investigación midiendo las fuerzas aerodinámicas de los objetos que caían desde la segunda plataforma de la Torre Eiffel, a 377 pies sobre el nivel del suelo. Posteriormente en 1909 inicio la construcción de un túnel de viento a la sombra de la Torre Eiffel. Su sección de prueba tenía 1.5 m de diámetro, y su ventilador fue accionado por un motor eléctrico que también alimentaba a la torre. En 1912 construyó un túnel de viento más grande que se muestra en la figura 5, de el cual diseñó y patentó la entrada acampanada y el difusor, lo que permitió que la presión en la sección de prueba fuera inferior a la presión en el hangar. Los experimentos de Eiffel llevaron a una serie de avances significativos, pues fue pionero en realizar pruebas con modelos de aviones completos, y demostró por primera vez, la fuerte caída en el coeficiente de arrastre de una esfera con número de Reynolds, por encima de 300000.³

En 1907 Ludwig Prandtl solicitó a la Sociedad Alemana para el Estudio del Dirigible que financiara la construcción de un túnel de viento, con un costo de 20000 marcos. El diseño consistía de un circuito cerrado de forma rectangular, el cual contaba con enderezadores de flujo y un panel aguas abajo del ventilador,

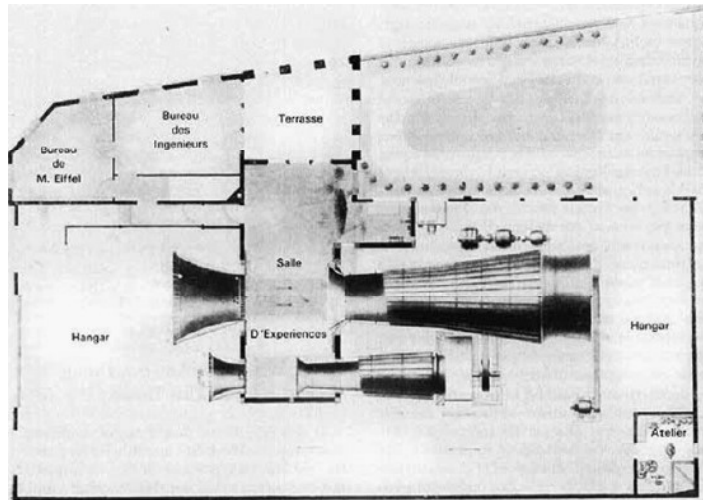


Fig. 5. Túnel de viento diseñado por Eiffel.

además de cascadas de alabes giratorios en cada esquina. Sin embargo, debido a que casi todo el circuito tenía la misma sección transversal, la velocidad de flujo era la misma y por lo tanto, la calidad del flujo no era buena. El túnel fue construido en 1908, y en 1909 comenzó el trabajo práctico en la aerodinámica de los dirigibles. El túnel de viento encarnó por primera vez muchas características que se han convertido en estándar, en la mayoría de los túneles construidos desde entonces, de hecho, en los años que siguieron, estos tendieron a clasificarse como el diseño de Eiffel o de Götting.⁴

Después de revisar los inicios y motivaciones de la construcción de los primeros túneles de viento, a continuación se muestra una lista realizada por Googrich⁵ donde se mencionan los que se desarrollaron durante el siglo XX en el mundo, destacando que entre los Estados Unidos de Norte América y Rusia concentran cerca del 40% del total, contando con 12 y 21 túneles hipersónicos, respectivamente.

Tabla I. Túneles de viento en el mundo.

País	Cantidad
Australia	20
China	39
Indonesia	1
Japón	14
Malasia	1
Singapur	1
Corea del Sur	21
Bélgica	8
Francia	14
Alemania	14
Italia	4
Holanda	10
Rumania	3
Rusia	58

País	Cantidad
Suecia	2
Ucrania	1
Reino Unido	21
India	20
Irán	7
Israel	7
Pakistán	3
Sudáfrica	9
Turquía	1
Argentina	1
Brasil	7
Canadá	8
U.S.A.	89
Total	381

De esta lista sobresalen 3 que son los más sofisticados en la actualidad, el primero a mencionar fue construido en 1995 y es el túnel de viento europeo transónico,⁶ ubicado en la ciudad Alemana de Colonia, que puede alcanzar un Mach de 1.35 y soportar presiones de hasta 400000Pa, cuenta con una zona de pruebas de 2m de altura, 2.4m de ancho y 9m de largo y se presenta en la figura 6. El segundo, es el túnel nacional transónico (NTF por sus siglas en inglés),⁷ construido por la NASA a finales de la segunda guerra mundial en Virginia, Estados Unidos de Norte América, sin embargo, no fue sino hasta 1983 cuando tuvo la capacidad de realizar estudios con flujo a Mach de 1.2 y soportar presiones de hasta 900000Pa, cuenta con una sección de pruebas cuadrada de 2.5m por lado y 7.6m de largo, tal como se muestra en la figura 7. Finalmente, el túnel de viento transónico T-128 es uno de los 10 localizados en el Instituto Central de Aero hidrodinámica (TSAGI),⁸ ubicado en la ciudad rusa de Moscú. En el túnel pueden realizarse análisis con flujo a Mach de 1.7 y soportar presiones de 400000Pa, la zona de pruebas tiene una sección transversal de 2.5m x 2.5m y una longitud total de 12m, como se observa en la figura 8.

Debe notarse que en la tabla I no se enumeran túneles de viento desarrollados en México, esto se debe a que sólo hasta años recientes se construyeron túneles para fines de investigación y desarrollo tecnológico. Los más importantes son diseñados y construidos por las instituciones educativas de mayor reconocimiento del país y se mencionan a continuación:

Túnel de viento subsónico del IPN: En el año 2010 la ESIME lo puso en operación, está ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP), el cual es de circuito abierto y tiene 5 m de largo y una sección transversal de 0.8m x 0.6m, como se muestra en la figura 9. El ventilador centrífugo de 74.6kW permite tener una velocidad máxima de 270km/h, y gracias a los dispositivos que lo componen, en la zona de pruebas se tiene una intensidad de turbulencia menor al 4%, lo que lo ubica a los niveles de los más importantes del mundo. Este túnel tiene por objetivo principal servir como un patrón nacional secundario de calibración, en instrumentos de medición de velocidad, tales como tubos de Pitot tipo L y S, anemómetros tipo turbina, ultrasónicos, térmicos, de copas y de propela, así como instrumentos de gran aplicación en los procesos industriales de combustión, ventilación y aire acondicionado, energía eólica, fuentes fijas en generación eléctrica, e industria del vidrio, entre otros.⁹

Túnel de viento de la UNAM: El 3 de febrero de 2015 entró en operaciones, esta ubicado dentro del Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología (LemAT), el cual es de circuito cerrado, tiene 37.75m de largo y cuenta con dos secciones de pruebas: La primera incluye dos áreas de 3 m de ancho por 2 m de alto cada una —separadas por una distancia de 14 m— y la segunda es de 4.3 m de ancho por 4 m de altura y 5 m de longitud, como se muestra en la figura 10. El ventilador puede generar una velocidad máxima de 100 km/h, suficiente para simular los efectos turbulentos del viento bajo diferentes condiciones de flujo. Durante una simulación o estudio se pueden analizar, en modelos a escala, los efectos de vientos equivalentes a un huracán de categoría 4, lo que indica la línea de investigación de este dispositivo y el desarrollo de la infraestructura en México, como son: puentes, edificios, túneles, vivienda, plantas industriales, presas, vialidades, carreteras y estructuras marinas, entre otras.¹⁰



Fig. 6. Modelo a escala en túnel de viento Transónico Europeo.



Fig. 7. Modelo a escala en túnel de viento Transónico de la NASA.



Fig. 8. Modelo a escala en túnel de viento Transónico de la TSAGI.



Fig. 9. Túnel de viento de LABINTHAP del IPN.



Fig. 10. Túnel de viento de LemAT de la UNAM.

Después de esta breve aportación histórica del surgimiento del instrumento de medición aeronáutico por excelencia, y de las capacidades mundiales en función a cantidad y calidad de los túneles de viento existentes, se resalta la urgente necesidad de estos equipos en la industria aeronáutica-aeroespacial de nuestro país, valorando la construcción y consiguiente caracterización de los mismos, destinados para la investigación y formación profesional, como la de ingenieros Aeroespaciales, que es el caso especial de los egresados de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (ECITEC) de la Universidad Autónoma de Baja California.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El túnel de viento de ECITEC mostrado en la figura 11 está constituido por los siguientes elementos: a) entrada acampanada, b) cámara estabilizadora, c) sección de contracción, d) zona de pruebas, e) sección de transición y f) ventilador.¹¹



Fig. 11. Túnel de viento subsónico de ECITEC-UABC.

Para calcular la velocidad promedio en la zona de pruebas se determina la presión dinámica en diferentes sitios, distribuidos en la sección transversal (0.3m x 0.3m), la cantidad de puntos de medición se determinan basados en lo indicado por Wang.¹² En este trabajo se utilizan 5 puntos por cada eje, completando un total de 25, distribuidos a lo largo de la sección transversal, tal como se indica en la figura 12 y tabla II.

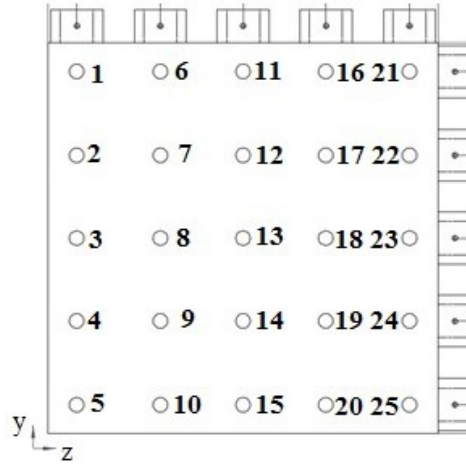


Fig. 12. Distribución de puntos de medición en la sección transversal.

Tabla II. Distribución de puntos de medición para obtener U_{med} .

Punto	Coordenadas (z, y)	Punto	Coordenadas (z, y)	Punto	Coordenadas (z, y)
1	(0.024,0.276)	9	(0.086,0.086)	17	(0.214,0.214)
2	(0.024,0.214)	10	(0.086,0.024)	18	(0.214,0.150)
3	(0.024,0.150)	11	(0.150,0.276)	19	(0.214,0.086)
4	(0.024,0.086)	12	(0.150,0.214)	20	(0.214,0.024)
5	(0.024,0.024)	13	(0.150,0.150)	21	(0.276,0.276)
6	(0.086,0.276)	14	(0.150,0.086)	22	(0.276,0.214)
7	(0.086,0.214)	15	(0.150,0.024)	23	(0.276,0.150)
8	(0.086,0.150)	16	(0.214,0.276)	24	(0.276,0.086)
Unidades en metros.				25	(0.276,0.024)

La velocidad en cada punto (u_i) se determinará utilizando la ecuación siguiente:

$$u_i = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \tag{1}$$

Donde: u_i = velocidad puntual (m/s), ΔP = presión dinámica (Pa) y ρ = densidad del aire (kg/m^3).

La velocidad promedio se obtiene utilizando la ecuación recomendada por Figliola:¹³

$$u_{media} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \tag{2}$$

Donde: u_{media} = velocidad promedio (m/s) y N = cantidad total de la muestra.

La velocidad media se usa para calcular la desviación estándar (S_x) de la muestra:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - u_{media})^2} \quad (3)$$

El valor verdadero u^* representa el valor más probable de la velocidad y se expresa como:

$$u^* = u_{media} \pm S_x (P\%) \quad (4)$$

La probabilidad asignada (P%) es del 95.45% como lo indica Figliola.

El cálculo de la densidad del aire (ρ) en el interior del túnel de viento se realiza utilizando la ecuación de gas ideal, como lo señalan Becerra y Guardado,¹⁴ la cual es:

$$\rho = \frac{PMa}{ZRT} \left[1 - X_v \left(1 - \frac{Mv}{Ma} \right) \right] \quad (5)$$

Donde: Ma = masa molar de aire húmedo (kg/mol), Mv = masa molar de agua (kg/mol), P = presión absoluta (Pa), R = constante de gas (8.314510 J / K * mol), T = temperatura absoluta (K), Xv = fracción molar de vapor de agua y Z = factor de compresibilidad.

La incertidumbre en la medición de la densidad se determina utilizando la metodología de Becerra y Guardado. Por otro lado, para analizar la intensidad de la turbulencia en el túnel de viento se retoma lo indicado por White,¹⁵ quien menciona que un flujo turbulento se caracteriza por las fluctuaciones de las tres componentes de la velocidad, así como en la presión y temperatura; por lo tanto, para el análisis de un flujo turbulento se separan las fluctuaciones de la propiedad de su valor promedio en el tiempo. Por lo tanto, la turbulencia (TU) en la componente a lo largo de la dirección del flujo se define como:

$$TU = \frac{u_{rms}}{u_{media}} \quad (6)$$

Donde la velocidad promedio temporal se define con la ecuación:

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [u_i - u_{media}]^2} \quad (7)$$

Finalmente para obtener los números adimensionales que caracterizan el flujo se tiene:

Para el número de Mach se utiliza la ecuación indica por White:¹⁵

$$Ma = \frac{u_{media}}{C} \quad (8)$$

La velocidad del sonido (C) en el aire a la temperatura a la cual se realiza el experimento se determina por la ecuación:

$$C = \sqrt{kRT} \quad (9)$$

Donde: k = relación de calores específicos (1.4).

El régimen de flujo se determina utilizando la ecuación de Reynolds, indicada por White,¹⁵ la cual es:

$$Re = \frac{\rho 4R u_{media}}{\mu} \quad (10)$$

4R = radio hidráulico (m).

μ = viscosidad dinámica del aire (Pa-s).

Los perfiles de velocidad en la zona de pruebas, se obtienen aprovechando los puntos empleados en la medición de la velocidad promedio, por lo que se tienen 5 perfiles en el eje “z” y 5 en el eje “y”, tal como se indica en la figura 13. En cada uno de los ejes se realizan mediciones de velocidad en 22 puntos, distribuidos como se indica en la tabla III.

Las condiciones atmosféricas son monitoreadas con la estación meteorológica Vantage pro2 instalada en ECITEC, donde la presión atmosférica tiene una resolución de 0.1mb y precisión nominal de 1 mb; la temperatura una resolución de 0.1°C y precisión nominal de 0.5°C, y una resolución de 1% y precisión nominal de 5% la humedad.¹⁶ Para medir la velocidad (u_x) en el interior del túnel de viento, se utiliza un tubo pitot colocado en los puntos indicados a continuación para los ejes “y” y “z”, en la parte central de la zona de pruebas, a lo largo del eje axial ($x=0.5m$). Las mediciones se obtienen con un anemómetro digital de la marca Extech, con una resolución de 1Pa, y una precisión de $\pm 0.3\%$ de la escala total.¹⁷

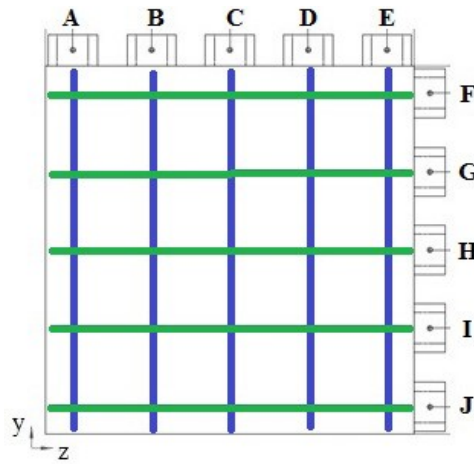


Fig. 13. Distribución de perfiles de velocidad en la sección transversal.

Tabla III. Distribución de puntos de medición para ejes A-J.

1Punto	Distancia		Punto	Distancia	
0	0	m	12	0.157	m
1	0.017	m	13	0.170	m
2	0.030	m	14	0.183	m
3	0.043	m	15	0.195	m
4	0.056	m	16	0.208	m
5	0.068	m	17	0.221	m
6	0.081	m	18	0.233	m
7	0.094	m	19	0.246	m
8	0.106	m	20	0.259	m
9	0.119	m	21	0.271	m
10	0.132	m	22	0.284	m
11	0.144	m	23	0.300	m

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor de velocidad se calculó para tres diferentes rangos de frecuencia del ventilador, 32, 45 y 64 Hz, lo que representa el 50, 75 y 100% de potencia del mismo, en la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos:

Tabla III. Caracterización del túnel de viento de ECITEC.

Potencia de ventilador (%)	Velocidad					Reynolds	Ma
50	11.98	m/s	±	0.93	m/s	234053	0.03
75	17.61	m/s	±	1.12	m/s	344204	0.05
100	22.67	m/s	±	1.74	m/s	442981	0.07

El valor determinado para la densidad del aire, utilizando la metodología mencionada es: $1.1790266 \text{ kg/m}^3 \pm 0.0074348 \text{ kg/m}^3$.

Con las mediciones de velocidad realizadas se encuentra que en la zona de pruebas se tiene flujo turbulento e incompresible, debido a que el $Re > 4000$ y el $Ma < 0.3$. Las velocidades determinadas van desde los 43 hasta los 80km/h, valores que permiten realizar experimentos en el área de la ingeniería aeronáutica y aeroespacial al utilizar las leyes de escalamiento.

En el túnel de viento subsónico de ECITEC se pueden realizar experimentos para determinar el coeficiente de arrastre y sustentación de modelos aerodinámicos como perfiles alares, aviones, cohetes, satélites, etc. Además, se pueden desarrollar estudios de visualización de flujo con técnicas como la de humo, aceite e hilo en modelos de perfiles NACA. Finalmente, también es posible analizar la transferencia de calor para sistemas de enfriamiento clásicos, como aletas y tubos de calor. Estos estudios son realizados por estudiantes de licenciatura de la carrera de Aeroespacial.

Los perfiles de velocidad obtenidos a lo largo del eje “y” se presentan en las figuras 14 a la 16, y los obtenidos en el eje “z” se muestran en las figuras 17 a la 19. Los resultados se ordenan de acuerdo al incremento de velocidad analizado.

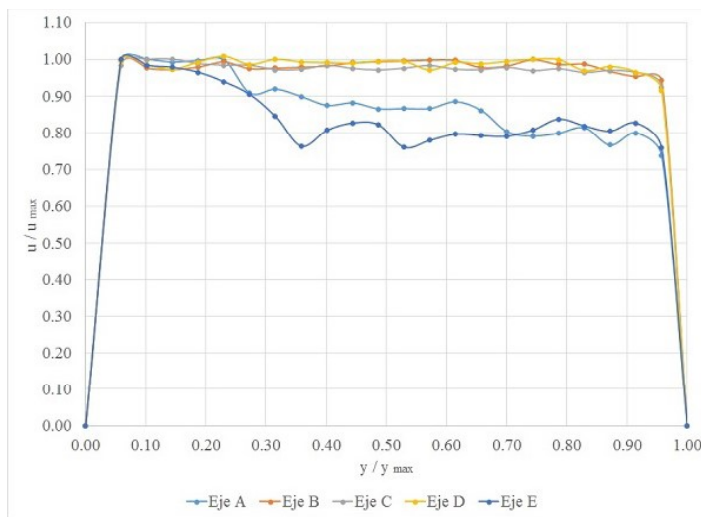


Fig. 14. Perfiles de velocidad a lo largo del eje “y”, con velocidad de 11.98 m/s.

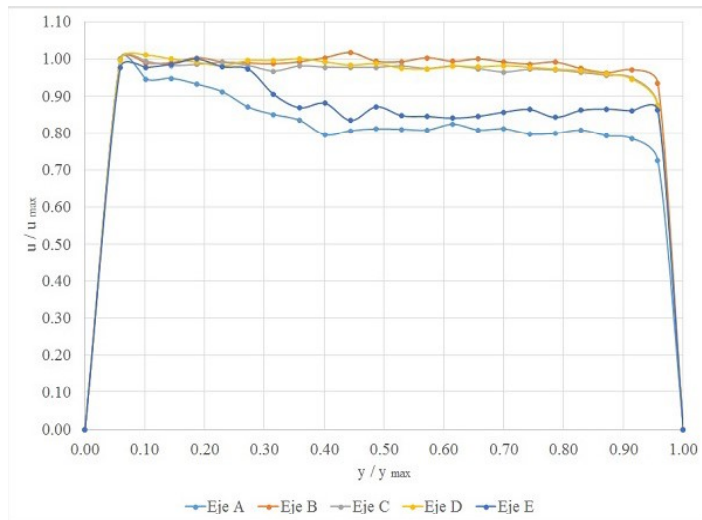


Fig. 15. Perfiles de velocidad a lo largo del eje “y” con velocidad de 17.61 m/s.

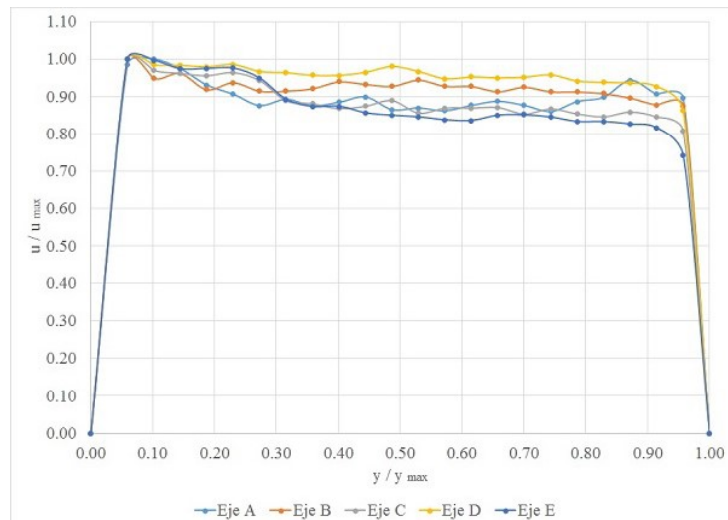


Fig. 16. Perfiles de velocidad a lo largo del eje “y” con velocidad de 22.67 m/s.

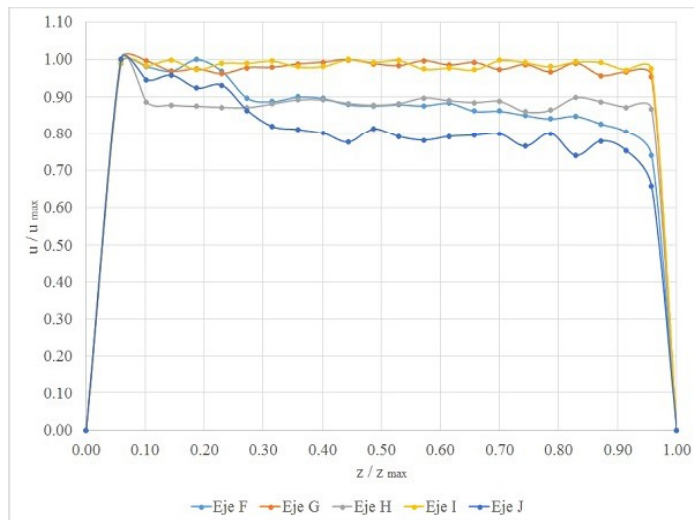


Fig. 17. Perfiles de velocidad a lo largo del eje “z”, con velocidad de 11.98 m/s.

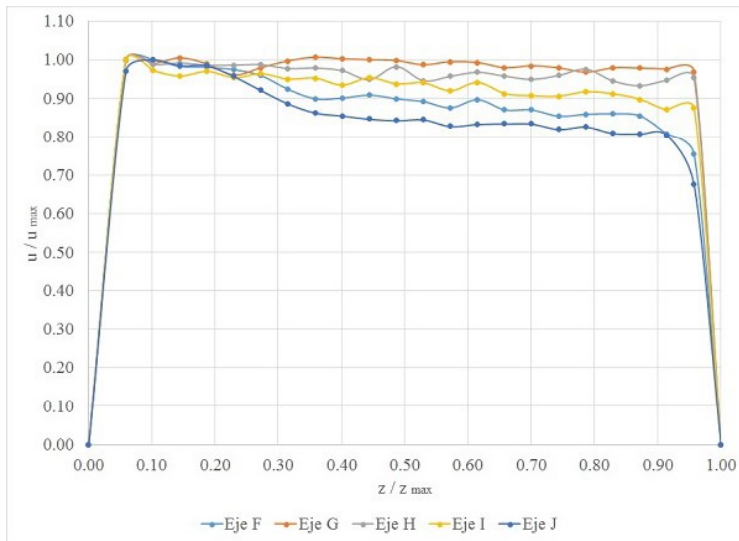


Fig. 18. Perfiles de velocidad a lo largo del eje “z” con velocidad de 17.61 m/s.

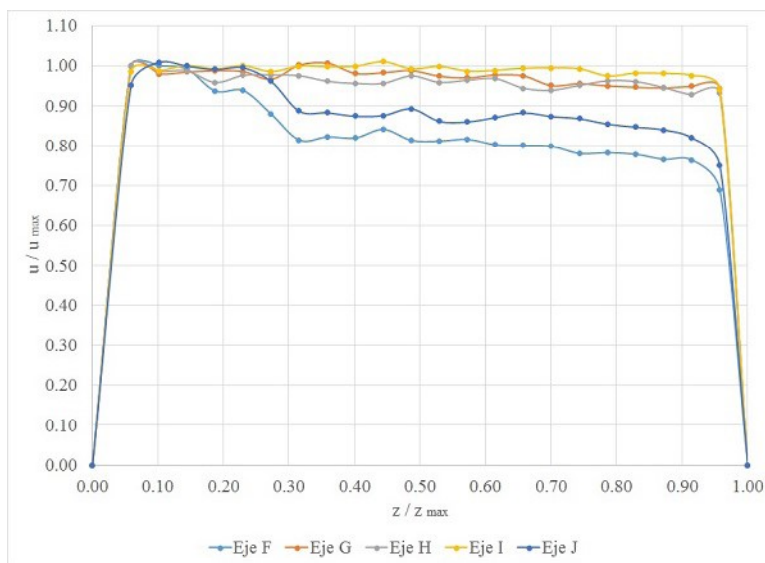


Fig. 19. Perfiles de velocidad a lo largo del eje “z” con velocidad de 22.67 m/s.

Los perfiles de velocidad presentan una forma correspondiente a un perfil turbulento para todos los casos, tal como se indicó anteriormente, sin embargo, los perfiles no son simétricos, y se observa que en la parte superior derecha en todos los casos existe una variación de velocidad de hasta un 20%. Esto se observa principalmente en los perfiles medidos en los ejes A, E, F y J, los cuales se localizan muy cerca de las paredes donde se tiene el crecimiento de la capa límite, la cual se ve afectada por las mallas colocadas en la cámara estabilizadora, ya que éstas se fijaron por la parte interior del túnel generando una obstrucción en lugar de una estabilización del flujo; además que en esta sección en específico, ya se tiene un deterioro en las mismas, lo que sugiere que deberán sustituirse inmediatamente, fijándolas ahora por la parte exterior del túnel de viento. Sin embargo, aun con estas condiciones cercanas a la pared, los perfiles en la zona

central presentan un comportamiento uniforme en la mayoría de los casos lo que permite realizar experimentos con modelos aerodinámicos, pues el perfil es casi simétrico y las diferencias de velocidad máximas, son de apenas el 6% para los casos de los ejes C y H. Por otro lado, el incremento de la velocidad provoca que los perfiles en la parte central del túnel sean más estables.

En la figura siguiente se muestran los perfiles de velocidad obtenidos con un tubo de pitot por Rosas,⁹ los cuales fueron medidos en la parte central del túnel de viento para flujo turbulento e incompresible, y se observa que son simétricos y estables, esto se debe a la inserción de un panel estabilizador en la sección de entrada del mismo.

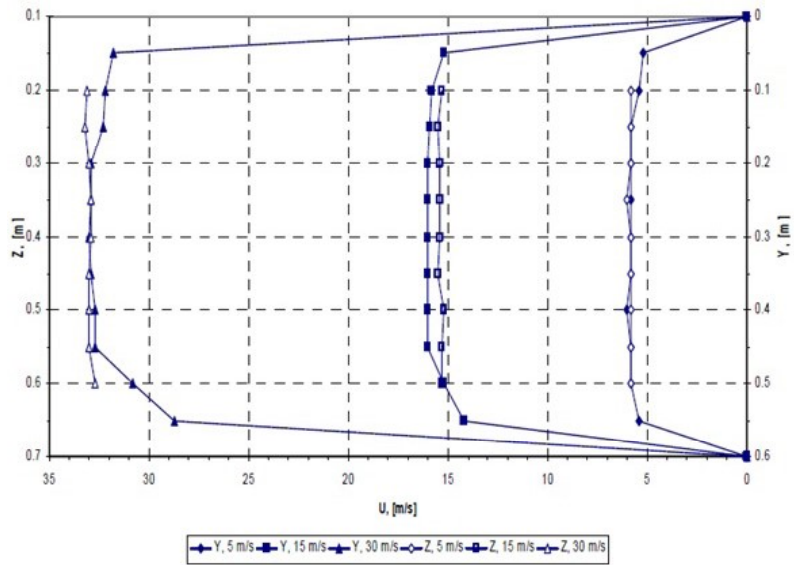


Fig. 20. Perfiles de velocidad a lo largo de los ejes “y” y “z” de túnel de IPN.⁹

Finalmente, la intensidad de turbulencia calculada para el túnel de viento de ECITEC es del 4.76%, para los perfiles de velocidad en el centro de la zona de pruebas, y deberá disminuir a partir de la modificación propuesta en la cámara estabilizadora, además de la necesaria inserción de un panel hexagonal en la sección de la entrada del túnel, el cual será diseñado y fabricado en el taller de máquinas-herramientas de ECITEC. Con las mejoras a realizar en el túnel se podrá realizar investigación en la línea de Aeroespacial – Aeronáutica de nuestro país, enfocándose principalmente a la visualización de flujo en modelos aerodinámicos y determinación de la velocidad con niveles bajos de incertidumbre en las mediciones.

CONCLUSIONES

Se presenta la metodología completa para la caracterización de la zona de pruebas de un túnel de viento subsónico.

Se encontró que el flujo en la zona de pruebas es turbulento con $23000 < Re < 440000$.

Se tiene flujo incompresible debido a que el Mach calculado tiene un valor máximo de 0.07.

La intensidad de la turbulencia es cercana al 5% en la sección central de la zona de pruebas.

Los perfiles de velocidad presentan comportamiento de flujo turbulento, sin embargo, los perfiles cercanos a las paredes no son simétricos.

REFERENCIAS

1. B. Robins, *New Principles of Gunnery*, F. Wingrave, London, 1805, pp.312-318.
2. J. Ackroyd, Sir George Cayley: The Invention of the Aeroplane near Scarborough at the Time of Trafalgar, *Journal of Aeronautical History*, London, 2011, pp.146-148.
3. J. Anderson, *A History of Aerodynamics*, Cambridge University Press, London, 1997, pp. 267-291.
4. L. Prandtl, Göttingen Wind Tunnel for Testing Aircraft Models, NACA Technical note 66, 1920, pp. 1-17.
5. M. Goodrich, Wind Tunnel of the Eastern – Western Hemisphere, The Library of Congress, Washington D.C. 2008, pp. 7.
6. <https://www.etw.de>
7. <https://www.nasa.gov>
8. <http://www.tsagi.ru/en/institute>
9. P. Rosas, M. Toledo, G. Tolentino, R. Tolentino, F. Sánchez y J. Abugaber, Wind Tunnel at LABINTHAP (Updated), *J. Energy and Power Engineering*, 2011, pp. 565-573.
10. <http://www.alianzaafidem.org/noticia31.html>
11. O. Morales, A. Gómez, M. Paz, J. Paz y L. Ortega, Diseño y construcción de túnel de viento subsónico para laboratorio de Aeroespacial de ECITEC-UABC, *Memorias del XXI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Coatzacoalcos, Veracruz, México, 2015, pp. 930-937.
12. S. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, 2ª edición, Ed. McGraw-Hill, Nueva York, 2001, pp. 17-77.
13. S. Figliola y D. Beasley, *Mediciones Mecánicas Teoría y Diseño*, 3ª Edición, Ed. Alfaomega, México, 2003, pp. 131-146.
14. S. Becerra y G. Guardado, Estimación de la Incertidumbre en la Determinación de la Densidad del Aire, Centro Nacional de Metrología, Querétaro, 2003, pp. 1-23.
15. F. White, *Viscous Fluid Flow*, 2ª Edición, Ed. McGraw Hill, U.S.A., 1991, pp. 397-400.
16. www.davisnet.com
17. www.extech.com