

La construcción de un túnel de viento con materiales de fácil acceso para la observación de fenómenos de mecánica de fluidos

The construction of a wind tunnel with easily accessible materials for the observation of phenomena in fluid mechanics

Horacio Daniel Salomone ^{1*} y Ernesto Enrique Cyrulies ²

¹ Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento, (1613) Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina.

² Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento, (1613) Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina.

*E-mail: hsalomon@campus.ungs.edu.ar

Recibido el 22 de julio de 2024 | Aceptado el 27 de septiembre de 2024

Resumen

Para el estudio de la mecánica de fluidos en instituciones educativas, contar con un túnel de viento proporciona una gran herramienta para la comprensión de flujos complejos. Los túneles comerciales destinados principalmente para su uso en laboratorios de investigación presentan un costo muy elevado, haciendo muy difícil su acceso para su uso en el ámbito educativo. En este trabajo se presenta un prototipo de túnel de viento subsónico, de tipo abierto, de succión junto con una propuesta de actividad de visualización del efecto Magnus. El diseño del túnel, su posterior construcción utilizando materiales de fácil acceso y bajo costo, y su caracterización y utilización en distintas experiencias como la propuesta, reviste propósitos didácticos.

Palabras clave: Túnel de viento; Enseñanza de mecánica de fluidos; Materiales de fácil acceso; Efecto Magnus.

Abstract

For the study of fluid mechanics in educational institutions, having a wind tunnel provides a great tool for understanding complex flows. Commercial tunnels intended mainly for use in research laboratories are very expensive, making their access for use in the educational field very difficult. In this work, we present a prototype of a subsonic, open-type, suction wind tunnel, along with a proposal for a visualization activity of the Magnus effect. The design of the tunnel, its subsequent construction using easily accessible and low-cost materials, and its characterization and use in various experiments such as the one proposed, has educational purposes.

Keywords: Wind tunnel; Teaching fluid mechanics; Easily accessible materials; Magnus effect.

I. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, la dinámica de los fluidos y en particular los estudios de los fenómenos turbulentos han resultado muy intrigantes para la comunidad científica. Prueba de ello son los dibujos de Leonardo Da Vinci, quien ya alrededor del año 1500 observaba la descomposición de los remolinos que se formaban en los pilares de un puente sobre un río. En la figura 1 se muestra un dibujo de Leonardo Da Vinci donde se aprecia la turbulencia generada en una pileta por un chorro de agua que cae desde un vertedero de forma cuadrada (Maiorino, 1992).

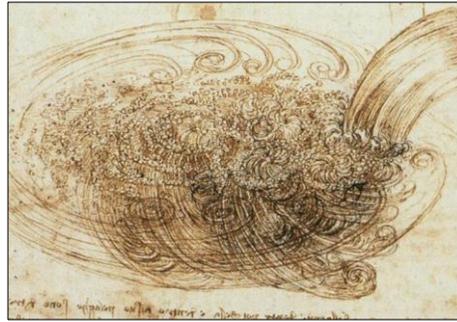


FIGURA 1. Flujo turbulento representado por Leonardo Da Vinci. (Bonheure *et al.*, 2019)

La invención de los túneles de viento ha aportado a los investigadores una gran herramienta a la hora de comprender la dinámica de los fluidos ya que su estudio requiere trabajar con ecuaciones que en muchos casos solo presentan soluciones numéricas en las que se deben realizar diversas aproximaciones. Cuando se trabaja con un túnel de viento en el que se emplean modelos a escala es necesario utilizar la teoría de la similaridad (Barlow, 1999). Dicha teoría indica que los criterios para establecer la similaridad de un modelo a escala con el modelo real son: que se observe semejanza geométrica, que se observe semejanza dinámica y que el número de Reynolds y el número de Mach sean los mismos en el modelo a escala y el real. Al lograr igualdad tanto para el número de Reynolds como para el de Mach entre el modelo a escala y el real, se consigue observar semejanza dinámica entre los fenómenos aerodinámicos. Tanto el número de Mach como el de Reynolds son parámetros adimensionales que sirven para caracterizar el movimiento de un fluido. Para el caso del número de Reynolds, este nos indica si se trata de un flujo laminar o turbulento, y en el caso del número de Mach nos indica el cociente entre la velocidad del objeto o modelo y la velocidad del sonido en el fluido que se mueve dicho objeto o modelo.

En el año 1871, Francis Herbert Wenham y Jhon Browning diseñaron y construyeron el primer túnel de viento del que se tiene registro. Los experimentos realizados en dicho túnel han cobrado un rol fundamental en el desarrollo aerodinámico de las primeras máquinas voladoras. En el año 1901, los hermanos Wright desarrollaron su propio túnel de viento para realizar pruebas de superficies de sustentación con el cual rápidamente obtuvieron resultados experimentales que les permitieron perfeccionar las superficies alares para su máquina voladora. El túnel de viento de los hermanos Wright consistía en un conducto de madera de poco menos de 2 metros de largo, con una sección transversal cuadrada de unos 400 cm². En uno de sus extremos tenía un ventilador que tomaba aire a través del conducto, el cual fluía sobre los perfiles aerodinámicos que colocaban en el túnel. Además, el túnel de viento contenía aspas y un alambre de malla para alinear el flujo de aire, ver figura 2. Luego, basándose en los datos de rendimiento aerodinámico obtenidos en el túnel de viento, los hermanos Wright lograron construir en 1902 un prototipo funcional de planeador.



FIGURA 2. Reproducción del túnel de viento de los hermanos Wright. Museo de la Fuerza Aérea de Estados Unidos de América. Foto: U.S. Air Force Museum, Wright Patterson Air Force Base, Ohio.

De esta forma, a lo largo de los años, el túnel de viento se ha convertido en una herramienta fundamental para la experimentación en aerodinámica. El mismo resulta ser un dispositivo que permite controlar el flujo de aire a través de los objetos y modelos aerodinámicos que son puestos a prueba, algunos ejemplos de ello son el desarrollo de aeronaves, cohetes, automóviles, construcciones civiles como puentes y edificios, etc. El propósito de un túnel de viento es entonces mantener estacionario el objeto a prueba mientras que se impulsa el paso de aire en torno a él. Son además muy utilizados para validar soluciones numéricas a las ecuaciones de dinámica de fluidos.

Los túneles de viento más avanzados, exclusivos para investigación, resultan ser extremadamente costosos. Sin embargo, es común que en los planes de estudio de distintas carreras relacionadas con física los estudiantes deban cursar alguna materia con contenidos de mecánica de fluidos, tanto en enseñanza media como en superior (no universitaria y universitaria).

Por ejemplo, para la provincia de Buenos Aires, el diseño curricular de sexto año de Educación Secundaria (DGCyE, 2021) en su orientación Ciencias Naturales contempla temas relacionados con movimiento de fluidos en los contenidos de la asignatura Física clásica y moderna. De igual forma, contenidos de dinámica de fluidos tales como: caudal, líneas de corriente, tipos de régimen, ecuación de continuidad, ecuación de Bernoulli, etc., son abordados en Fundamentos y Modelos de la Mecánica Clásica, una materia común a los Profesorados de Educación Secundaria en Física y Química de los Institutos Superiores de Formación Docente de la provincia (DGCyE, 2022). En particular, en este último caso se pone especial énfasis en el tratamiento de la asignatura mediante la implementación y análisis de actividades experimentales. Asimismo, en el ámbito universitario también resulta fundamental que las carreras del área de las ciencias exactas y naturales cuenten con alguna materia donde sean tratados temas de dinámica de fluidos, tanto de forma teórica como experimental, para fortalecer la formación académica.

En el presente trabajo se presenta la construcción de un túnel de viento utilizando materiales reutilizados y de fácil acceso, para que pueda ser reproducido y utilizado en instituciones educativas, de modo que facilite a los estudiantes la realización de distintas experiencias para visualizar fenómenos relacionados con la dinámica de fluidos. Asimismo, se propone una experiencia concreta para realizar con el túnel de viento en el ámbito educativo, la visualización y discusión del efecto Magnus.

II. MARCO TEÓRICO

Cuando un fluido se encuentra en movimiento, su flujo puede ser caracterizado de tres formas distintas de acuerdo al tipo de régimen del mismo, teniéndose flujos laminares, de transición y turbulentos. De esta manera, se define que un flujo es laminar si toda partícula que pasa por un punto específico del fluido se desplaza exactamente a lo largo de una trayectoria uniforme seguida por las partículas que pasaron antes por ese punto. La mencionada trayectoria recibe el nombre de línea de corriente o línea de flujo. Las distintas líneas de corriente no pueden cruzarse unas con otras en esta condición de flujo estable, y el vector velocidad del fluido en ese punto es tangente a la línea de corriente en ese mismo lugar. Por otra parte, el número de Reynolds establece la relación entre las fuerzas inerciales del fluido con las fuerzas viscosas presentes en él, y en muchos casos un valor bajo del mismo se relaciona a un flujo laminar y un valor alto con un flujo turbulento. En particular en la zona de capa límite (que es la zona de flujo cercana al objeto y que reviste gran importancia en aeronáutica) se puede considerar que hay laminaridad en el flujo cuando tenemos un número de Reynolds por debajo de 1×10^5 . El espesor de la capa límite puede variar para números de Reynolds ultra bajos, del orden de 1×10^4 o 1×10^3 (Antonelli *et al.*, 2013), dependiendo esto en gran medida de las dimensiones del objeto, rugosidad de la superficie, de la turbulencia del aire libre y la distribución de las presiones. El flujo turbulento se caracteriza por movimientos irregulares del fluido, llamados corrientes de vórtices.

En el año 1738 el físico suizo Daniel Bernoulli dedujo una expresión fundamental que correlaciona la presión con la rapidez del fluido de viscosidad despreciable y su elevación. Esta expresión, no es otra cosa que la aplicación del principio de conservación de la energía para una línea de flujo en un fluido. De esta manera, se propone que la suma de la energía cinética, energía potencial y energía interna permanezca constante (Batchelor, 2000). A continuación, se muestra la ecuación (1), que se conoce como ecuación de Bernoulli.

$$\frac{v^2 \rho}{2} + P + \rho g z = cte \quad (1)$$

Donde:

- V = velocidad del fluido
- ρ = densidad del fluido
- P = presión de la línea de corriente en el punto
- g = aceleración gravitatoria
- z = altura desde una cota de referencia

La ecuación (1) se deduce a partir de algunos supuestos, que para que sea aplicable a un sistema los mismos deben cumplirse, a saber; la viscosidad debe ser nula, el caudal debe ser constante, el fluido debe ser incompresible (lo que implica densidad constante) y el flujo debe ser laminar. Sin embargo, estas condiciones no son las que imperan en un túnel de viento abierto, por lo cual se deben realizar ajustes en la ecuación.

Por otra parte, debido a que en un túnel de viento la masa de aire circulante se pone en movimiento a través de un motor que succiona en el extremo del túnel, también resulta posible utilizar el principio de conservación de la masa, ya que la masa de aire ingresante por el cono de contracción y el encauzador es igual a la que sale expulsada a través del motor (ver figura 3). De este modo, resulta posible escribir la ecuación (2), que no es más que la ecuación de continuidad para fluidos compresibles:

$$\rho VA = \rho_0 V_0 A_0 \quad (2)$$

Donde, A = Área del túnel en el punto de interés

Por otro lado, el llamado efecto Magnus se manifiesta cuando tenemos un sólido de revolución en rotación dentro de un flujo estacionario. Para comprender este efecto es necesario conocer varios fenómenos, como el principio de Bernoulli y el concepto de capa límite en un fluido. El efecto puede observarse cuando la rotación es lo suficientemente rápida para que el flujo en la capa límite del objeto se vuelva turbulento de un lado y permanezca laminar en el otro. Esta diferencia en los flujos provoca que la presión en ambos lados del objeto sea distinta, generando una fuerza perpendicular a la dirección del flujo de aire y al eje de giro.

Este fenómeno es muy conocido en el ámbito de deportes, tales como el fútbol, béisbol, golf, tenis, etc., debido a que genera una “comba” en la trayectoria de las pelotas. En la figura 3 puede verse una representación del efecto Magnus.

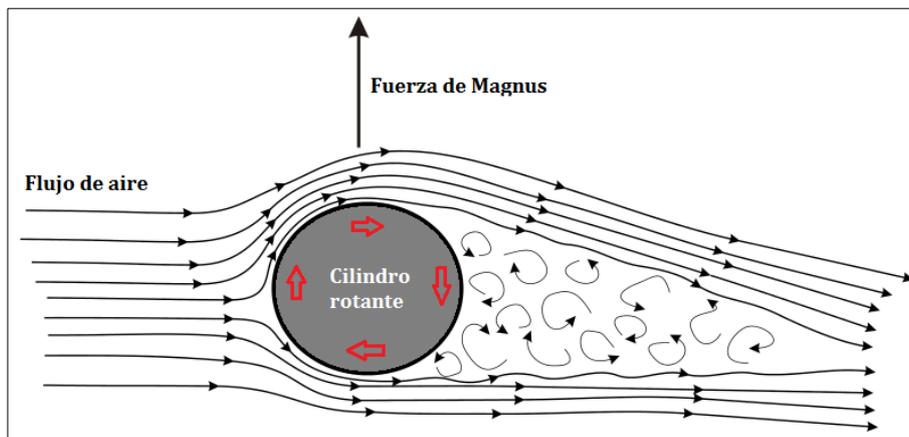


FIGURA 3. Efecto Magnus. Cilindro en rotación dentro de un flujo estacionario. Fuente propia.

El efecto Magnus también ha sido utilizado para diversas aplicaciones tecnológicas como aeronaves y navíos, generando propulsión eólica, un claro ejemplo de esto puede observarse en la figura 4, donde se observa una embarcación que posee dos turbovelas instaladas en su cubierta. Estos enormes cilindros rotativos consiguen impulsar el navío utilizando el mencionado efecto. Cabe destacar que este sistema no reemplaza el sistema de propulsión principal de la embarcación pero sí ayuda a una reducción significativa del consumo de combustible.

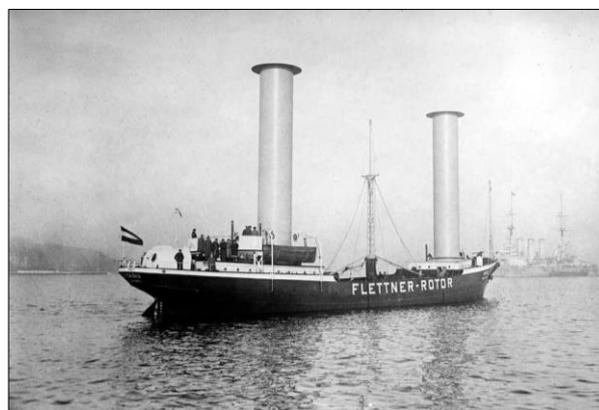


FIGURA 4. Aplicación del efecto Magnus en un buque. Los rotores verticales generan propulsión para el navío. Foto: <https://agendarweb.com.ar/2018/12/06/vuelve-una-tecnologia-maritima-que-se-invento-en-la-decada-de-1920/>

III. CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL

Existen distintos diseños de túnel de viento para diferentes aplicaciones. Por ejemplo, los túneles de viento se pueden clasificar (según la velocidad del flujo de aire en la sección de prueba) en subsónicos, transónicos, supersónicos e hipersónicos. De acuerdo a su diseño, también es posible clasificarlos en abiertos y cerrados. En este trabajo presentamos un prototipo de túnel de viento subsónico, de tipo abierto, de succión. El diseño del mismo, su posterior construcción utilizando materiales de fácil acceso y bajo costo, y su posterior caracterización y utilización, revisten meramente propósitos didácticos.

A continuación, en la figura 5, se muestra un esquema del túnel elegido. Este tipo de diseño ha sido discutido y simulado computacionalmente por otros autores como Yong y Dol (2015) resultando adecuado para el propósito buscado. Luego, en la figura 6 puede apreciarse el túnel de viento construido con las indicaciones de sus partes principales.

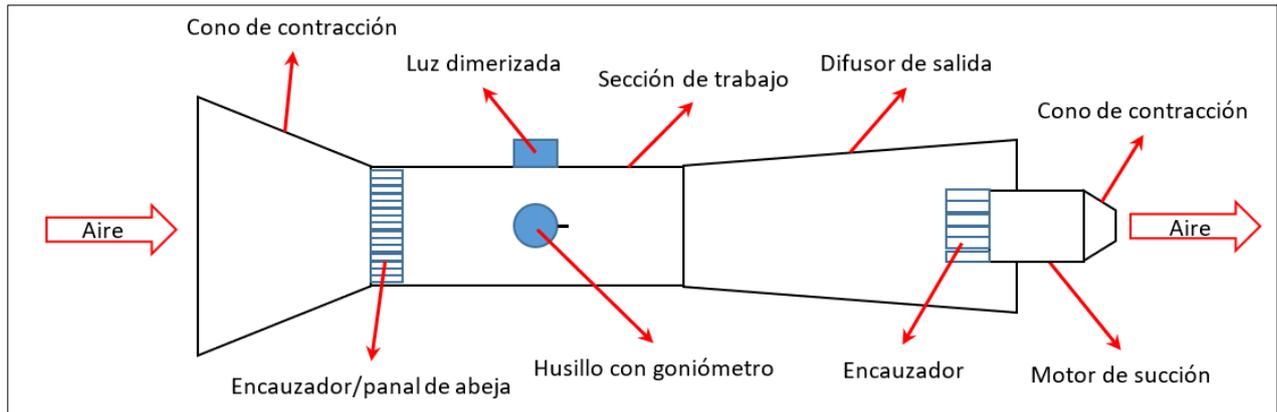


FIGURA 5. Diseño esquemático del túnel de viento construido.

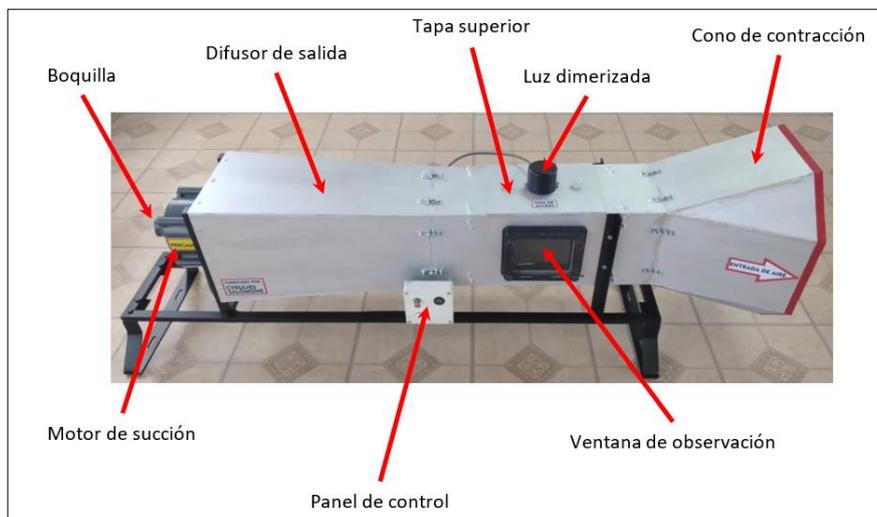


FIGURA 6. Detalle del túnel de viento construido.

La tabla I muestra los valores de las dimensiones que se utilizaron para las partes principales del túnel de viento.

Tabla I. Dimensiones del túnel.

	Ancho [m]	Alto [m]	Largo [m]	Área [m ²]	Relación de áreas
Cono de contracción	0,4	0,4	0,3	0,18	4,5
Sección de trabajo	0,2	0,2	0,5	0,04	1
Difusor	0,25	0,25	0,5	0,0625	1,56

La estructura principal del túnel se encuentra construida en fibrofácil de 3 mm de espesor, cuyas placas son muy poco costosas y se consiguen fácilmente en cualquier comercio de artística u hobbies. La elección del material para la estructura principal del túnel debe ser tal que este no presente excesiva rugosidad, ya que esto generará mayor turbulencia, así como también lo harán cambios demasiado bruscos en la sección del túnel. Para disminuir aún más la rugosidad del fibrofácil, el mismo ha sido pintado con esmalte sintético. El túnel se monta sobre un marco de caño estructural de 14 x 25 mm construido para tal fin, dicha estructura también puede construirse de madera y solo cumple la función de sostén.

En la salida del difusor del túnel se ha colocado un motor universal de aspiradora doméstica, de 220 Volt, con una rejilla plástica que funciona como encauzador de aire. La función del motor es la de succionar aire a través del túnel y su velocidad puede regularse mediante un transformador variable (variaco), consiguiendo un gran rango de rpm y por ende de flujo de aire. En el otro extremo del túnel se encuentra el cono de contracción, el cual cuenta con un encauzador de aire a modo de panel de abeja que cumple la función de ayudar a conseguir un flujo de aire que resulte lo más laminar posible en la zona de trabajo. En la figura 7 pueden apreciarse dos imágenes de los respectivos encauzadores. El encauzador de aire tipo panel de abeja del cono de contracción fue construido utilizando sorbetes plásticos con un diámetro de unos 5 mm y una longitud de 10 cm.

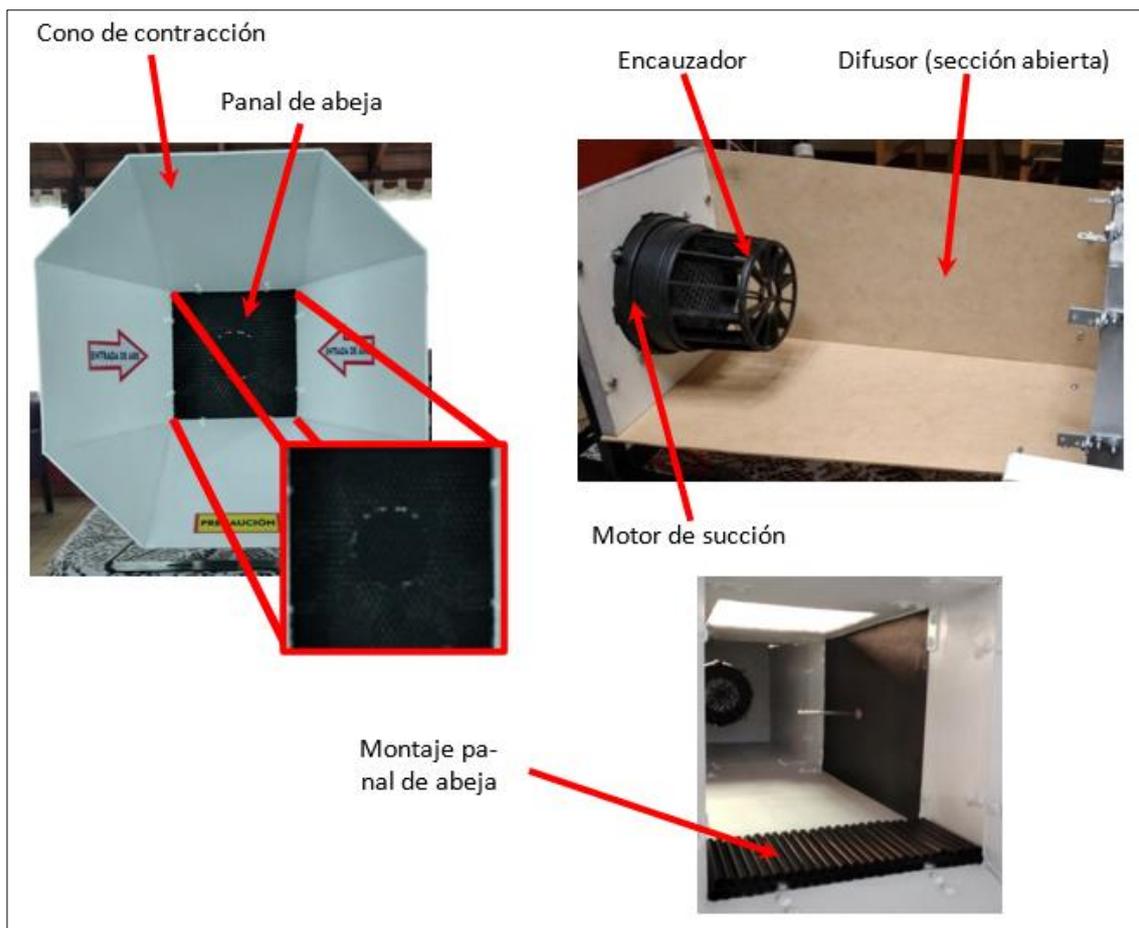


FIGURA 7. Izquierda, se observa el cono de contracción con el encauzador tipo panel de abejas. Derecha, puede verse el parte del difusor junto al motor de succión con su respectivo encauzador y el montaje del panel.

Además, en la sección de trabajo, el túnel cuenta con un husillo colocado en uno de sus laterales que permite posicionar el modelo a ser probado en el centro de la sección y brinda la posibilidad de rotarlo para cambiar el ángulo de ataque con respecto al flujo de aire. El ángulo de ataque del modelo puede medirse con un goniómetro de construcción propia colocado para dicho propósito. Asimismo, el husillo puede ser intercambiado con un motor de corriente continua de velocidad variable, al cual en su eje de rotación en este caso particular le colocamos un cilindro de 20 mm de diámetro y 100 mm de largo, pudiendo ser intercambiado por otros sólidos de revolución. El cilindro montado puede utilizarse para hacer pruebas de rotación en flujos estacionarios y visualizar el efecto Magnus. En la zona superior de esta sección, se cuenta con una tapa de acceso que permite la manipulación de los modelos a probar y sobre la misma tapa se coloca una lámpara *dimerizada* para ayudar a la visualización de las líneas de flujo sobre los

modelos de prueba. Recomendamos la utilización de una lámpara con un regulador de intensidad (*dimmer*) para iluminar el modelo ya que esto permite variar la intensidad de la iluminación sobre el mismo y en particular sobre las líneas de flujo. Colocando un fondo negro en las paredes de la zona de trabajo del túnel y contando con la luz *dimerizable*, resulta posible hallar el mejor contraste de luz para visualizar de la mejor manera posible las líneas de flujo sobre el modelo. La figura 8 muestra la sección de trabajo del túnel y presenta el detalle del husillo con el goniómetro, el motor de corriente continua donde se coloca el cilindro rotante (intercambiable con el husillo), la tapa superior con la luz y la ventana lateral de observación.

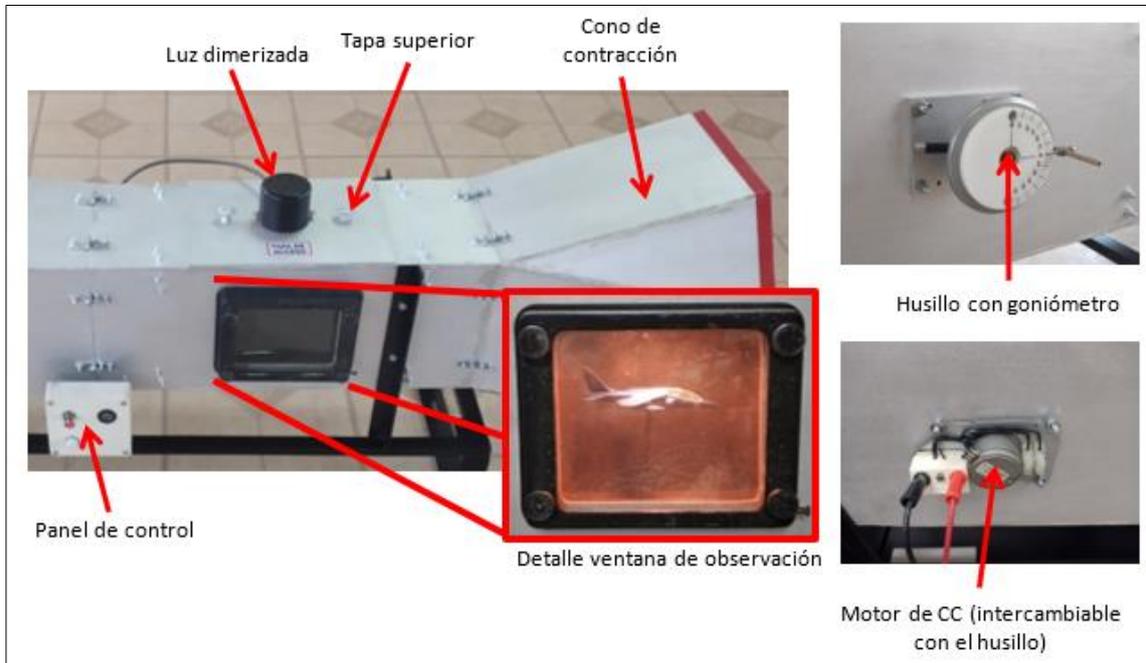


FIGURA 8. Detalle sección de trabajo del túnel. Izquierda, ventana de observación con tapa superior. Derecha, husillo con goniómetro para modificar el ángulo de ataque del modelo a testear, motor de velocidad variable para rotación de sólidos de revolución (efecto Magnus). Nota: El motor y el husillo son piezas intercambiables.

IV. CARACTERIZACIÓN DEL TÚNEL

Con la finalidad de llevar a cabo una primera caracterización del túnel de viento construido, una de las pruebas realizadas consistió en hacerlo funcionar a su máxima potencia y, mediante la utilización de un termoanemómetro de rotación DT-90, medir la velocidad de circulación del flujo de aire en distintas secciones del túnel. En la figura 9 se muestra un esquema indicando las posiciones donde fueron tomadas las mediciones.

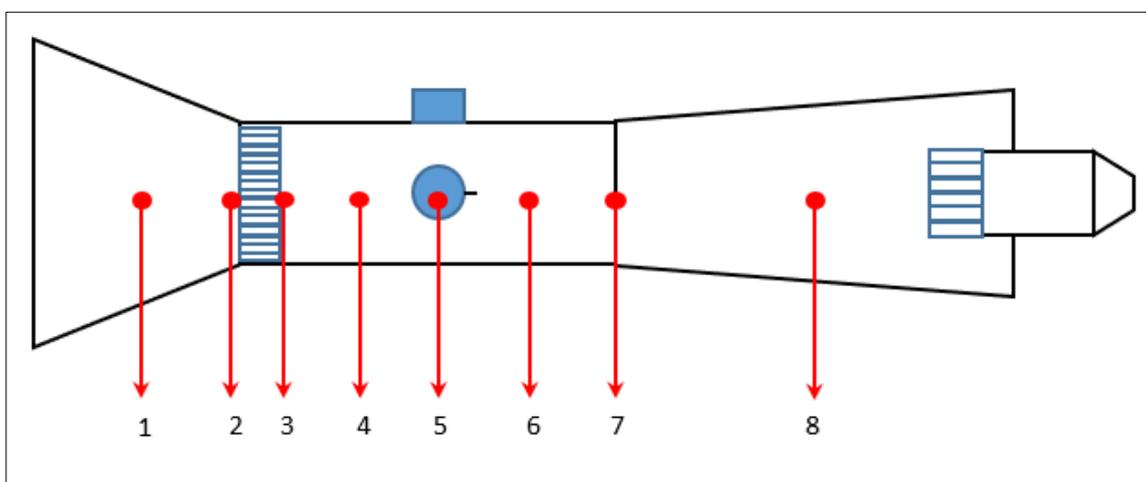


FIGURA 9. Indicación de posiciones para toma de mediciones de velocidad.

A continuación, en la tabla II se muestran las velocidades obtenidas. La toma de estas velocidades permite hacer una estimación del flujo másico de aire en cada zona y hacer una primera verificación de la ecuación de continuidad (2). Se consideró una densidad del aire a una temperatura de 25 °C, una presión de 1013,2 hPa y una humedad relativa de 60 %, proporcionando entonces una densidad de $\rho = 1,17 \frac{kg}{m^3}$.

Tabla II. Dimensiones del túnel

Posición	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Flujo másico calculado [m ³ /s]
1	0,0676 ±0,0001	0,55 ±0,01	0,04 ±0,02
2	0,0400 ±0,0001	1,00 ±0,01	0,05 ±0,01
3	0,0400 ±0,0001	1,76 ±0,01	0,08 ±0,01
4	0,0400 ±0,0001	1,43 ±0,01	0,07 ±0,01
5	0,0400 ±0,0001	1,30 ±0,01	0,06 ±0,01
6	0,0400 ±0,0001	1,28 ±0,01	0,06 ±0,01
7	0,0400 ±0,0001	1,17 ±0,01	0,05 ±0,01
8	0,0529 ±0,0001	0,98 ±0,01	0,06 ±0,01

V. OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

A. Pruebas de humo

A la hora de realizar observaciones experimentales uno de los principales problemas a resolver es la generación de humo para poder visualizar las líneas de flujo que se forman dentro del túnel de viento. Para ello, se probaron y analizaron distintas opciones, todas con buenos resultados observacionales, al menos desde el punto de vista cualitativo. Una cuestión a tener en cuenta al momento de optar por un método de generación de humo, es la variación de temperatura del aire, modificando esto su densidad al ingreso del túnel. Si se desean hacer mediciones rigurosas, es un aspecto a tener en cuenta a la hora de modelar la situación con las ecuaciones.

Fueron probados tres medios de generación de humo, que pueden ser catalogados dentro de dos categorías, a saber, utilizando bajas temperaturas y utilizando pirotécnicos. El método de generación pirotécnico fue el primero en probarse debido a la facilidad de acceso de los materiales a utilizar ya que requirió por un lado el uso de “sahumerios” y también se probó el uso de “bombas de humo”. Tanto los “sahumerios” como las “bombas de humo” pueden conseguirse comercialmente. A continuación, la figura 10 muestra distintos resultados obtenidos utilizando el método pirotécnico para la generación de humo.

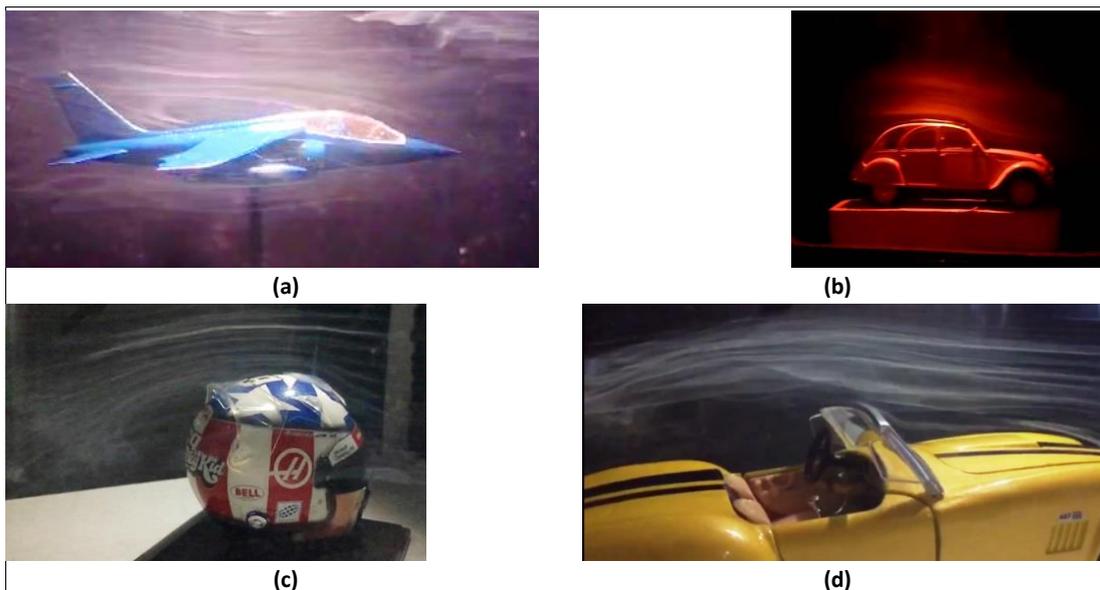


FIGURA 10. Observación de líneas de flujo: (a) sobre un modelo a escala 1/100 de un Alpha Jet colocado en el husillo del túnel de viento, el humo fue generado mediante una “bomba de humo” comercial; (b) en un Citroën 3 CV escala 1/43, humo generado con “bomba de humo” comercial; (c) sobre un casco de Fórmula 1 a escala 1/5, el humo fue generado utilizando sahumeros; (d) sobre un Cobra Shelby a escala 1/18, humo generado mediante sahumeros.

En la figura 11 se muestra, a modo comparativo, una observación de líneas de flujo utilizando el método de generación de humo mediante bajas temperaturas. En este caso se utilizó nitrógeno líquido colocado en un recipiente abierto justo delante del cono de contracción de entrada de aire del túnel de viento. La ebullición del nitrógeno líquido a temperatura ambiente hace posible la generación del humo. La niebla observada es producto del gas nitrógeno a muy baja temperatura en contacto con el aire, lo que provoca la condensación de vapor de agua.



FIGURA 11. Observación de líneas de flujo sobre el modelo utilizado anteriormente pero en este caso con humo generado mediante la utilización de nitrógeno líquido.

Como puede observarse al comparar la figura 10 (a) con la figura 11, los resultados obtenidos son similares. Sin embargo, luego de la utilización del túnel de viento por un tiempo prolongado, el uso de humo pirotécnico provocó la acumulación de algunos depósitos sólidos en el rotor del motor y el cono de contracción de salida de aire del túnel, no afectando el funcionamiento del mismo.

B. Efecto Magnus

Se realizaron experiencias para la visualización del efecto Magnus utilizando el túnel de viento. Se procedió a reconfigurar el túnel intercambiando el eje con husillo lateral por el motor de CC con control de velocidad. El dispositivo implementado puede apreciarse en la figura 8. Para la prueba se utilizó la generación de humo mediante el método pirotécnico mediante la incineración de una bomba de humo comercial. Si bien la experiencia revistió carácter cualitativo, los resultados observados fueron óptimos, con una visualización muy contundente del fenómeno. En todos los casos se utilizó flujo laminar estacionario con una velocidad aproximada de 0,7 m/s en la posición "5" del túnel, es decir en su zona de trabajo (ver figura 9).

Primeramente se realizó una prueba con el cilindro sin rotar y luego se procedió a hacer funcionar el motor lateral de CC para provocar la rotación uniforme del cilindro. Los resultados pueden verse a continuación en la figura 12.

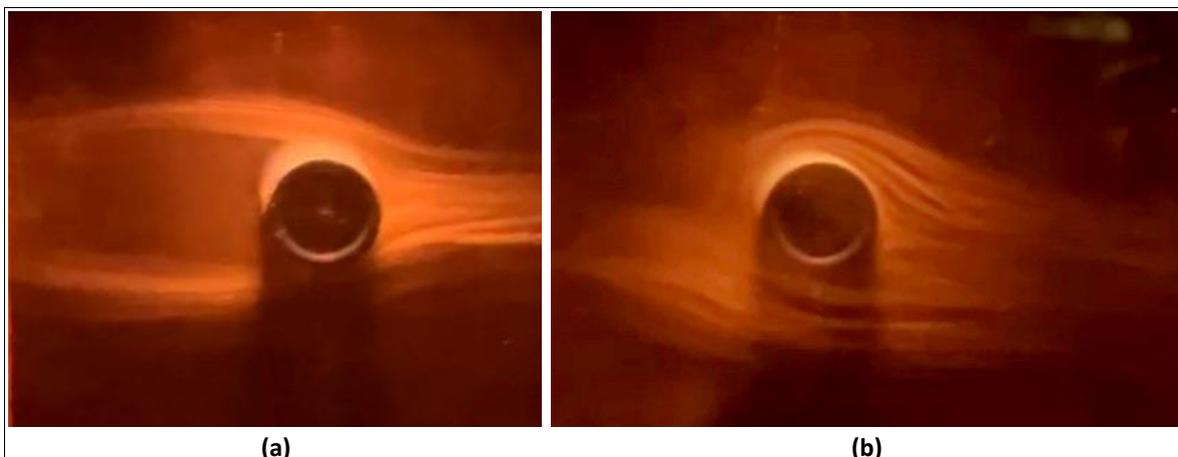


FIGURA 12. (a) Observación de líneas de flujo sobre un cilindro estático. (b) Visualización de líneas de flujo en un cilindro en rotación uniforme.

C. Experiencia realizada con estudiantes

Se realizaron experiencias de laboratorio en la materia Mecánica de Fluidos, correspondiente a las carreras de Ingeniería Electromecánica e Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de General Sarmiento (figura 13). La clase previa a llevar el túnel de viento, el profesor a cargo de la materia trabajó con los estudiantes el tema de flujo externo. Durante la clase, antes de las experiencias, se trabajaron un par de preguntas conceptuales que sirvieron de disparador, relacionadas con colocar un cilindro en un flujo uniforme al infinito:

¿Cómo espera que sean las líneas de flujo si el cilindro está en reposo?

¿Qué esperaría que ocurra si el cilindro comienza a girar sobre su eje?



FIGURA 13. Túnel de viento siendo utilizado en situación de clase. Materia Mecánica de Fluidos, UNGS.

VI. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

La utilización del túnel de viento en el ámbito del aula o laboratorio ha sido una experiencia muy enriquecedora. Tanto los estudiantes como los profesores a cargo de la materia se mostraron con gran entusiasmo al momento de la utilización del túnel de viento ya que la universidad no cuenta con equipamiento de estas características que permita la visualización en vivo de este tipo de fenómenos físicos.

Nuestra experiencia de construcción y las pruebas realizadas nos permiten arribar a algunas conclusiones y recomendaciones a partir de ellas. Claramente es posible la construcción de un túnel de viento para su uso en la enseñanza que sea de bajo costo. No obstante, deben tenerse en consideración algunos aspectos constructivos y funcionales. Básicamente lo que se espera lograr es un flujo laminar (idealmente) y de velocidad controlable.

Para que el flujo tenga la primera característica mencionada exige una canalización libre de obstáculos; esto implica paredes de baja rugosidad y, en la medida de lo posible, minimizar salientes como lámparas, sensores de gran tamaño, etc.. Además, resulta necesario conformar la circulación laminar ya desde la entrada a través de alguna guía de estructura estilo multitubular (como el panal de nuestro encauzador), con esto se logra la ruptura de los vórtices que naturalmente se forman en el aire en movimiento.

El forzador de aire es central en el túnel. Nosotros usamos una turbina de flujo radial con motor extraída de una aspiradora. La mencionada característica de la turbina es recomendable frente al flujo axial de un ventilador común, dado que en este último caso el aire tiende a arremolinarse en torno al eje longitudinal. Para evitarlo requeriría un diseño esmerado en lo que debería actuar de guía con tabiques o tubos frente al ventilador.

Con respecto a la velocidad controlable, resulta muy importante contar con un buen margen de variación en virtud de la necesidad que impone el experimento a llevar a cabo. Esto debe ser contemplado a la hora de elegir el motor. En nuestro caso, al tratarse de un motor denominado “universal” permite variar su velocidad con un simple cambio de tensión. Si se escoge un motor de corriente continua en general se tendrá la misma posibilidad, pero si se elige un motor de inducción (que equipa a muchos dispositivos industriales y hogareños de CA) debe tenerse en cuenta que sólo se varía las RPM por cambio en la frecuencia del suministro eléctrico. Naturalmente, también es posible modificar la velocidad por medios mecánicos, pero suma complejidad a la construcción.

Un detalle para considerar, particularmente para su uso en la enseñanza, es la conveniencia de que el túnel sea una estructura posible de dividir de tal modo que permita su transporte en un vehículo familiar.

Finalmente, consideramos que el túnel de viento de estas características abre mayores posibilidades en la enseñanza en varios campos de conocimiento que requieren el estudio de la mecánica de fluidos. Es bien claro en materias de física específicas donde se estudia los fenómenos, en nivel medio y superior; pero puede resultar particularmente útil en aquellos campos que requieren poner a prueba un modelo como son la aeronáutica, la ingeniería civil o la arquitectura.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. Claudio El Hasi, Profesor de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) por brindarnos espacio en su materia "Mecánica de Fluidos", perteneciente a las carreras de Ingeniería Electromecánica e Ingeniería Industrial, para la realización de prácticas de laboratorio utilizando el túnel de viento del presente trabajo. Del mismo modo, agradecemos a Gastón Ezequiel Benítez por facilitarnos algunos de los modelos a escala utilizados para las diferentes pruebas del túnel de viento y a Patricia Noelia Maidana por colaborar con materiales para su construcción. También agradecemos al Dr. Nicolás Grandi por brindarnos sugerencias en cuanto al diseño del túnel y los posibles métodos de generación de humo.

REFERENCIAS

- Antonelli, D. P., Sacco, C. G., Tamagno, J. P., (2013). Aerodinámica del vuelo a números de Reynolds ultra bajos ($Re > 10000$), *Mecánica Computacional* Vol. XXXII (1047-1070). Mendoza, Argentina.
- Barlow, J. B., Rae, W. H. Jr., Pope, A., (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. John Wiley & Sons, Inc.
- Batchelor, G. K., (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Bonheure, D., Gazzola, F., Sperone, G., (2019). *Eight(y) mathematical questions on fluids and structures*. Département de Mathématique, Université Libre de Bruxelles, Belgium.
- CEM Instruments, (2022). Manual de usuario del termoanemómetro Bluetooth CEM Instruments DT-90. Recuperado de https://manuals.plus/es/cem-instruments/dt-90-bluetooth-thermo-anemometer-manual#google_vignette
- Clancy, L. J., (1975). *Aerodynamics*. Wiley.
- DGCyE, (2021). *Diseño curricular para E.S. 6, Física Clásica y Moderna*. Recuperado de https://abc.gob.ar/secretarias/sites/default/files/2021-11/03-06-20.%20SECUNDARIA.DC28.ABC_.pdf
- DGCyE, (2022). *Diseño curricular para Profesorado de Educación Secundaria en Física*. Recuperado de https://abc.gob.ar/secretarias/sites/default/files/2023-04/Dise%C3%B1o%20Curricular%20del%20Profesorado%20de%20Educaci%C3%B3n%20Secundaria%20en%20F%C3%ADsica_0.pdf
- Maiorino, G., (1992). *Leonardo da Vinci: the Daedalian mythmaker*. Penn State Press
- Yong, T. H., & Dol, S. S. (2015). Design and Development of Low-Cost Wind Tunnel for Educational Purpose. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 78(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/78/1/012039>