

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUNEL DE VIENTO SUPERSÓNICO BIDIMENSIONAL CON SISTEMA DE VISUALIZACIÓN SCHLIEREN

N. Balduzzi ^a, N. Balduzzi ^a, P. Mantelli ^a, A. Scarabino ^b

^a UIDET LACLyFA – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata
La Plata – Argentina.

^b UIDET GFC – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata
La Plata – Argentina.

Email: nehuen.balduzzi@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se abordó el diseño y construcción de un túnel de viento supersónico, que pudiera ser construido y operado con las facilidades e infraestructura disponible en el Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

Al no contar con un compresor con las características adecuadas para un túnel de funcionamiento continuo, se optó por el diseño de un túnel de circuito abierto y funcionamiento por vacío (“indraft”), utilizando como reservorio un tanque esférico de 500 litros de capacidad, disponible en el Centro Tecnológico Aeroespacial “CTA” de la UNLP, para el que se diseñó y construyó un sistema de acople con la sección de prueba del túnel. Con una bomba de vacío se logra bajar la presión absoluta en el tanque hasta 13300 Pa. El sistema se equipó con válvulas, vacuómetros analógicos y manómetros piezoeléctricos disponibles en el Laboratorio de Capa Limite y Fluidodinámica Ambiental (UIDET - LaCLyFA). Para el sistema de visualización Schlieren se adquirió un espejo cóncavo de calidad astronómica, ya que los más económicos presentaban aberraciones ópticas incompatibles con la calidad de imagen necesaria para las visualizaciones.

Palabras clave: Túnel de viento, Flujo Supersónico, Schlieren, Indraft, Ondas de Choque

INTRODUCCIÓN

El término o concepto de túnel de viento hace referencia a una herramienta que permite estudiar el comportamiento del aire cuando se coloca un objeto dentro del flujo, es decir, el movimiento relativo entre el objeto y aire o gas. Ese objeto de estudio puede ser desde una aeronave, un automóvil, un edificio o cualquier propósito de estudio. La Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia – Laboratorio de Capa Limite y Fluidodinámica Ambiental (UIDET-LaCLyFA) en el presente cuenta con cinco túneles de viento subsónicos, en los que se llevan a cabo tareas de calibraciones, investigaciones y transferencias. Sin embargo, siendo la educación uno de los objetivos más importantes de esta unidad, hasta este momento, no contaba con un túnel de viento supersónico para experiencias didácticas.

Las características de un túnel de viento supersónico difieren significativamente de las de un túnel subsónico [1]. Para empezar, el flujo deberá ser supersónico en la sección de prueba, pero será subsónico en gran parte del circuito. El diseño requiere de una tobera convergente-divergente para acelerar el flujo hasta Mach mayor a 1, y una segunda garganta que permita mantener las ondas de choque corriente debajo de la sección de prueba. Además, las irreversibilidades que sufre el flujo demandan potencias mucho mayores que en túneles subsónicos a igualdad de caudal [1].

Un antecedente notable de este desarrollo en nuestro país es el trabajo [2] de la Universidad Nacional de Córdoba. Otros trabajos consultados son las referencias [3] y [4].

Impulsa nuestro proyecto el dejar las bases de un nuevo equipo, así como las técnicas y procedimientos necesarios para su uso, con el fin de aumentar los conocimientos, generar futuros desarrollos, y, sobre todo, permitir a los y las estudiantes avanzar y fortalecer el área práctica. Es por ello que, el objetivo principal de este proyecto abarca el estudio, diseño y construcción de un túnel de viento supersónico bidimensional con implementación de sistema de visualización Schlieren. Esto

permitirá la ejecución de nuevos proyectos, análisis prácticos y visualizaciones de flujos compresibles y cambios de densidad.

ELECCIÓN DE TÚNEL A DESARROLLAR

La opción de un túnel de circuito cerrado con flujo continuo quedó descartada por la falta de una bomba de vacío con la potencia necesaria para este tipo de operación. El equipamiento disponible incluye un reservorio que puede utilizarse tanto presurizado, para un túnel intermitente de presión, como despresurizado, para un túnel intermitente de vacío.

Para definir la elección entre un túnel de viento intermitente de presión o de vacío, estimamos tiempos aproximados de operación, con la garganta bloqueada ($Ma = 1,0$). Para esto, se propusieron diámetros de garganta (A_g), y se obtuvieron los caudales máxicos. De esta forma:

$$D \text{ [m]} \rightarrow A_g \text{ [m}^2\text{]} \rightarrow \dot{m} \text{ [kg/s]}$$

Sabiendo que el CTA de la UNLP cuenta con un reservorio esférico de 500 litros de capacidad, se calcularon los tiempos de operación que cada túnel podría operar. Conociendo el volumen (Vol), la densidad de remanso (ρ_0), el caudal máxico (\dot{m}) y la ecuación compacta de la conservación de masa [5], se puede obtener dicho tiempo, tal como se expresa en la Tabla 1:

$$\rho_0 \cdot Vol / \dot{m} = t \quad (1)$$

Referenciando a la ecuación (1) se obtiene:

Tabla 1. Tiempos de operación para ambas posibilidades de túneles

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_g [m]	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05
t (<i>Indraft</i>) [s]	129,3	32,3	14,3	8,0	5,1	3,5	2,6	2,0	1,6	1,2
t (<i>Blowdown</i>) [s]	18,7	4,6	2,0	1,1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1

Se observa que, para iguales áreas críticas, los tiempos de operación a garganta bloqueada son aproximadamente 7 veces mayores para túneles intermitentes del tipo *indraft* (aspiración), por sobre los *blowdown* (soplado), quedando así descartados del análisis estos últimos. La Figura 1 muestra una esquematización del tipo de configuración elegida.

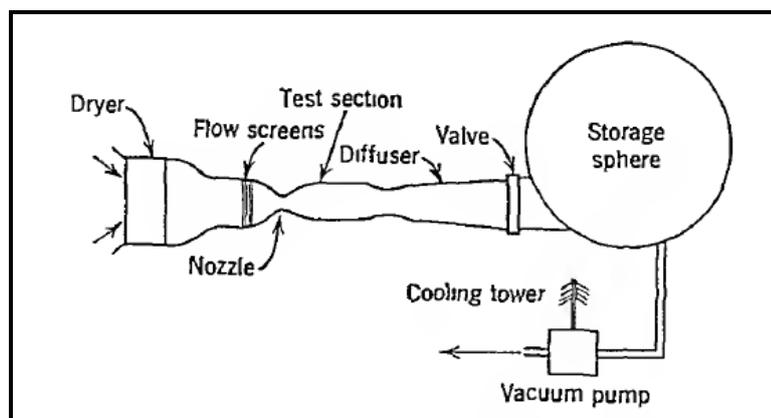


Figura 1. Esquematización de túnel de viento *indraft* [6]

DISEÑO

Se propuso como especificación de uso, que el túnel alcance una velocidad en la sección de pruebas de $Ma = 2,0$. Esto permite el cálculo del área de la sección de pruebas a partir de la relación entre la sección y el área de la garganta [5]. La Tabla 2 muestra las principales dimensiones de la sección de prueba.

Tabla 2. Dimensiones de sección de pruebas propuestas

Dimensión	Valor	Unidad
Área de primera garganta	78,5	mm ²
Área de secc. pruebas	132,5	mm ²
Largo sección de pruebas	35,0	mm
Mach propuesto en sección pruebas	2,0	-

Los túneles supersónicos, cuentan en total con dos gargantas (Figura 2). La primera que ya fue propuesta (A_g) o (A_x) como lo muestra la Figura 2, permitiendo a través de una tobera convergente-divergente que el flujo se acelere, y se genere una condición de bloqueo alcanzando Mach igual a 1 en dicha área. Si no fuera por la segunda garganta (A_y) en el proceso de funcionamiento del túnel, aparecería una onda de choque en plena zona de sección de prueba que interrumpiría todo tipo de visualización y en su mayor defecto, generaría flujo subsónico.

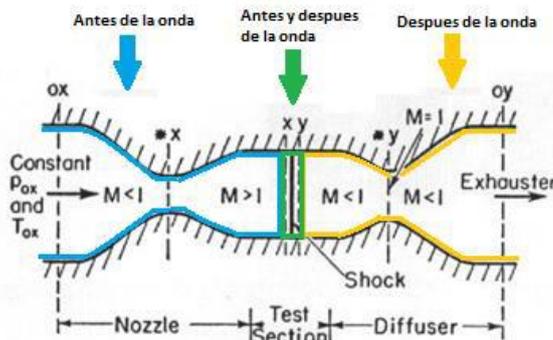


Figura 2. Condición de arranque más desfavorable [7]

Es por ello, que a través de la metodología propuesta en la referencia [1] se calcula el área de la segunda garganta contemplando la mejor y peor condición de operación (Tabla 3):

Tabla 3. Dimensiones de sección de prueba

Dimensión	Valor	Unidad
Área de segunda garganta	108,9	mm ²

Obtenidos todos los parámetros geométricos, es necesario definir una de las geometrías más importantes del túnel supersónico que es la tobera. Para esto se utilizará el método de las características descritas en la referencia [7]. Este método resuelve ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas, determinando la inclinación de las ondas para obtener un flujo horizontal en la sección de prueba (Figura 3).

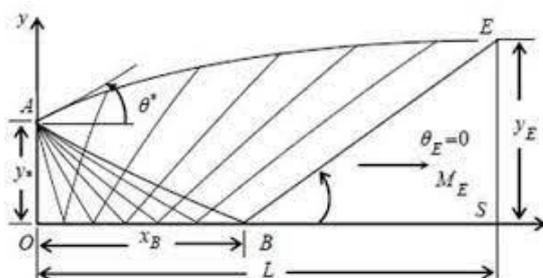


Figura 3. Método de las características

La forma de dicha tobera, que se muestra en la Figura 4, fue obtenida con la utilización de un script en Matlab [7].

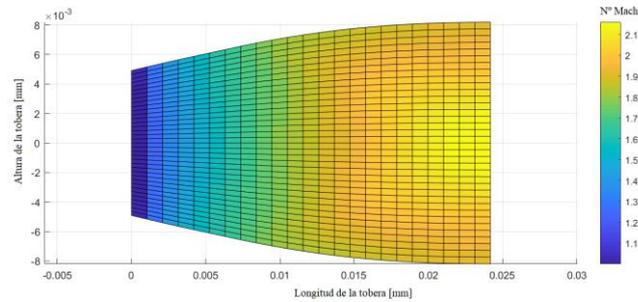


Figura 4. Gráfico de la tobera obtenida mediante método de las características

Las referencias dimensionales previas permiten generar los diseños para, a posteriori, comenzar las construcciones. Luego de varias iteraciones se logró llegar a un objetivo concreto en cuanto al diseño completo de la sección de pruebas, con la geometría mostrada en la Figura 5.

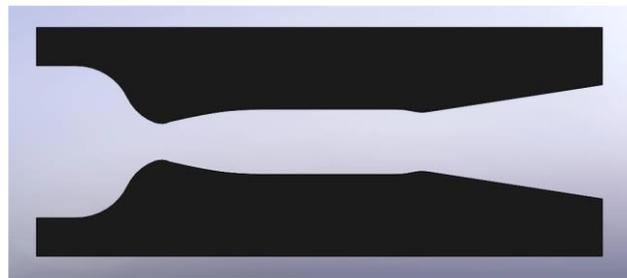


Figura 5. 4º diseño de sección de prueba.

La Figura 6 muestra el diseño del túnel, pensado con sistema de bridas frontales con tornillos para acoplar las distintas interfaces y en base a ello hacer un diseño por partes, ya que un mal cálculo o diseño de un elemento, produciría una no conformidad de todo el conjunto.

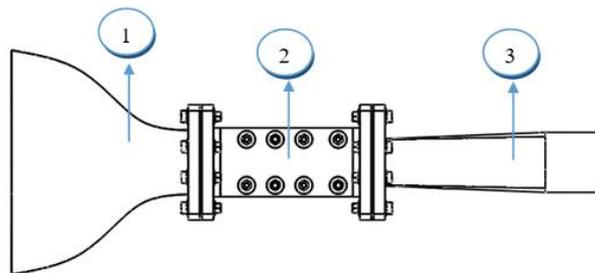


Figura 6. Diseño del túnel

El túnel se dividió en 3 partes principales. Una zona de acondicionamiento de aire (contracción subsónica (1) cuyo perfil se logró utilizando un polinomio de quinto grado, luego la zona de la sección de pruebas (2) y, por último, una zona que permite la interacción y acople de la sección de pruebas con el reservorio, denominada salida posterior (3). La Figura 7 muestra el diseño completo de los tres componentes mencionados. Detalles sobre el diseño propiamente dicho se encuentran en [7].

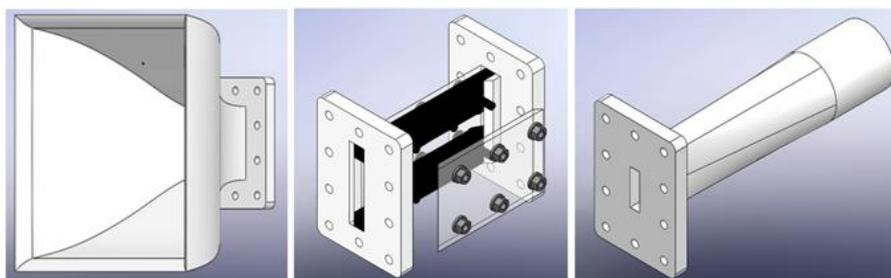


Figura 7. Diseño de componentes de túnel de viento supersónico

CONSTRUCCIÓN

Para llevar a cabo la construcción del túnel se utilizaron diferentes procesos. Los componentes (1) y (3) fueron llevados a cabo íntegramente por impresión 3D con material PLA. Para la construcción del componente (2) se utilizó nuevamente impresión 3D, que contempla las bridas (conexiones con componentes 1 y 3) y las zonas de garganta y sección de pruebas. Por otro lado, se utilizó acrílico cortado a través de laser para materializar las paredes del componente (2). El ensamble completo de todos los componentes se aprecia en las Figura 8 y Figura 9.



Figura 8. Túnel de viento con instalación al reservorio



Figura 9. Izq. túnel del viento completo – Der. Reservorio con bomba de vacío

SISTEMA DE VISUALIZACIÓN CON TÉCNICA SCHLIEREN

El sistema Schlieren se basa en el principio de que cuando un objeto con índice de refracción variable se coloca entre espejos o lentes que coliman la luz proveniente de una fuente puntual, ocurre un desplazamiento en la dirección de los rayos incidentes en el plano de observación. Esta desviación en los rayos de luz es proporcional a las variaciones del índice de refracción del objeto bajo estudio, y para el caso de un fluido, esta variación en el índice de refracción se puede relacionar con la variación de densidad del mismo.

Existen una variedad de arreglos del sistema Schlieren (Tabla 4) como, por ejemplo, los sistemas de montajes con espejos y lentes. En este trabajo se utilizó el montaje del sistema con espejos.

Tabla 4. Tipos, ventajas y desventajas de tipos de montajes con espejos

Montajes	Ventajas	Desventajas
Tipo z	<ul style="list-style-type: none"> Gran espacio de prueba Libre de coma Montaje robusto y óptima 	<ul style="list-style-type: none"> Difícil calibración y puesta a punto Con aberración de astigmatismo Utilización de dos espejos parabólicos

Montajes	Ventajas	Desventajas
	sensibilidad	
Único espejo y alineación en el eje	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema con mayor sensibilidad que montaje en Z • Facilidad de calibración y puesta a punto por elementos en serie • Libre de coma y astigmatismo 	<ul style="list-style-type: none"> • Espacio de prueba reducido • Difícil adquisición de espejos esféricos • Interferencias y oclusiones al haz de luz por parte de los objetos de las pruebas
Único espejo y alineación fuera del eje	<ul style="list-style-type: none"> • Alta sensibilidad • Utilización de un único espejo • Fácil calibración y puesta a punto 	<ul style="list-style-type: none"> • Con aberraciones de coma y astigmatismo • Espacio de prueba reducido

El sistema adoptado para este trabajo fue la técnica de Schlieren con la utilización de espejos y alineación fuera del eje como se indica en la Figura 10.

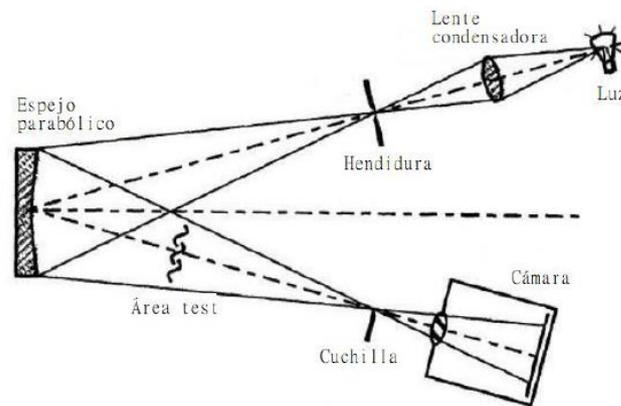


Figura 10. Montaje Schlieren con único espejo esférico y alineación fuera del eje

Las características del espejo astronómico utilizado pueden verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Característica del espejo

Datos del espejo	
<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro: 150mm • Distancia focal: 900 mm • Relación focal: f/6 • Espesor: 19 mm • Industria Argentina 	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para obtener los resultados del N° de Mach que se alcanzó, se realizó la medición de presión diferencial en diferentes tomas de presión en la sección de prueba. Para ello se utilizó un sensor “Mpx2200 Dp”, el cual obtiene la medición diferencial entre la presión atmosférica y la propia de la sección de prueba (P_d). Obtenido dicho valor se lo divide por P_0 para adimensionalizarlo y estimar el número de Mach mediante relaciones matemáticas válidas para flujo isentrópico [1].

Tabla 6. Determinación de presión diferencial de sección de prueba N°4

Sección de prueba	Parámetros	Tomas de presión			
		1	2	3	4
		Δ Presión (Kpa)	0,48	0,69	0,59
P/P_0	0,52	0,31	0,41	0,43	
Mach = 1,40	1,01	1,40	1,20	1,16	

VISUALIZACIONES CON EL SISTEMA SCHLIEREN

En las Figura 11 y Figura 12 se observan fotografías obtenida mediante dicha técnica. La Figura 11 muestra la sección de prueba en “reposo”, es decir, sin el funcionamiento del túnel, en cambio la Figura 12 se visualiza claramente todas las ondas la onda de Mach tal como se explicó en la sección “Diseño” (Método de las características).



Figura 11. Visualización de Sección de prueba mediante método Schlieren en “reposo”

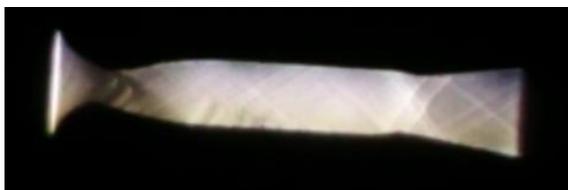


Figura 12. Visualización de Sección de prueba mediante método Schlieren en “funcionamiento”

Ajustando algunos parámetros como por ejemplo la temperatura, exposición, contraste, iluminación y sombras, se pudo apreciar una imagen más nítida sobre las ondas de Mach, como se observa en la Figura 13.

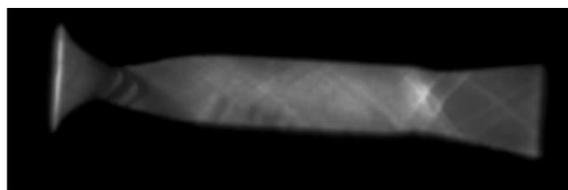


Figura 13. Visualización Met. Schlieren con contraste aumentado

Si se realiza el mismo ensayo, pero con un modelo en estudio, en este caso con un perfil cuña de 7° a 0° de ángulo de ataque, se observa lo mostrado en la Figura 14:



Figura 14. Visualización del Método Schlieren con perfil cuña de 7° con 0° de ángulo de ataque

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Al comparar el número de Mach de diseño con el obtenido a través de relaciones de presión y a partir del ángulo de Mach de las ondas en las visualizaciones, encontramos diferencias de hasta un 30% (Tabla 7). Las diferencias de presión con respecto a la teórica (que conllevan error en la estimación del Mach) pueden ser atribuibles a pérdidas no tenidas en cuenta en el diseño. El número de Mach de 1,76, calculado a partir de las visualizaciones se estima como el finalmente alcanzado en la sección de prueba.

Tabla 7. Errores en % de los diferentes N° de Mach en la sección de prueba

Método de análisis	Valor numérico de Ma en sección de prueba	Diferencia %
Ideal	2,0	0
Mediciones de presión	1,4	30
Visualizaciones	1,76	12

CONCLUSIONES

- Se alcanzó el objetivo de diseñar, construir y operar un pequeño túnel de viento supersónico para aplicaciones didácticas, con facilidades para medir presión en distintos puntos y visualizar las ondas de choque y de Mach en el flujo mediante el sistema Schlieren.
- La construcción fue realizada con materiales y herramientas disponibles en el mercado local, y equipamiento disponible en el laboratorio. Esto obligó a tomar decisiones en el diseño, como, por ejemplo, el conformado con impresión 3D que no permitió tener unas óptimas terminaciones superficiales.
- El rendimiento de la tobera fue inferior al esperado, Esto puede deberse a la geometría rectangular de la garganta (los valores clásicos de rendimiento se reportan generalmente para secciones circulares), y a la rugosidad superficial del material, interferencia en los acoples u otros factores.
- La puesta en marcha y calibración de todo el sistema de visualización resultaron laboriosas, por lo que se recomienda realizar un sistema ad hoc con todos los artefactos en posición correcta sin demasiadas modificaciones en sus posiciones.

En función de estos resultados, se plantea como trabajo futuro incorporar cámaras fotográficas de alta calidad y performance para optimizar al máximo las imágenes obtenidas en las visualizaciones, y mejorar la eficiencia de la tobera.

REFERENCIAS

1. Shapiro, A. H. 1953. The dynamics and thermodynamics of Compressible Fluid Flow, New York, United States of America: The Ronald Press Company (*Libro*)
2. García, J. O., Dagaro, M. A., Peralta, L., Ludueña Donato, G. A., Lorenzon, D., Galeasso, Ángel, Bustamente, J. (2019). Sobre el Diseño y Construcción de un Túnel de Viento Supersónico Bidimensional. Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/24380>
3. Shin, D. U., Ziegler, E. H., Hogan, G. J., Folinas, G. C., Wong, G. M., Lambert, J. A., Fitton, K. C., Ito, M. J., Fournier, N. S., Patel, N. Y., & Bugden, W. H. (2013). Design and Construction of a Supersonic Wind Tunnel with Diagnostics. Retrieved from <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/2307>
4. Bharath, B. Design and fabrication of a supersonic wind tunnel. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) ISSN: 2394-3661, Volume-2, Issue-5, May 2015
5. White, F. M. (2009). Fluid Mechanics. Connect Learn Succeed (*Libro*)
6. Pope, A. y Goin, K. L. (1965). High-Speed Wind Tunnel Testing. John Wiley & Sons
7. Balduzzi, N. y Balduzzi, N. (2022). Diseño y construcción de un túnel de viento supersónico bidimensional con sistema de visualización Schlieren. Trabajo Final de Ingeniería Aeronáutica. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/137588>