

Diseño y análisis de túnel de viento subsónico para laboratorio de aerodinámica Design and analysis of subsonic wind tunnel for aerodynamics laboratory

J. Figueroa-Vargas ^{a,*}, A. Cruz-de-Jesús ^a

^a Facultad de Ingeniería Aeroespacial, Biónica y Mecatrónica, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 72410, Puebla, Puebla, México.

Resumen

En el presente documento se presenta el proceso de diseño y simulación de un túnel de viento subsónico de circuito abierto para pruebas aerodinámicas, como parte de un proyecto para desarrollar equipos para el Laboratorio de Aerodinámica del Programa de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad Popular Autónoma de Puebla. El diseño tiene como objetivo realizar pruebas en modelos con una envergadura de 30 cm a velocidades de al menos 60 m/s en una sección de prueba con una longitud total de 6 metros, manteniendo un bajo porcentaje de turbulencia. Además, el dispositivo fue diseñado para reducir los costos de fabricación y optimizar cada elemento para cumplir con los requisitos operativos. Los resultados obtenidos indican la velocidad máxima alcanzada y la distribución uniforme del flujo de aire dentro de la cámara de prueba.

Palabras Clave: Aeronáutica, Diseño, Análisis, Ingeniería.

Abstract

In the present document, the process of design and simulation of an open circuit subsonic wind tunnel with application to aerodynamic tests is presented, as part of a project to develop equipment for the Aerodynamics Laboratory of the Aerospace Engineering Program at the Universidad Popular Autónoma de Puebla. The present design aims to perform tests on models of 30 cm wingspan with a speed of at least 60 m/s in the test section in a space limited to 6 m of total length, considering a low percentage of turbulence. Also, the device was designed to reduce manufacturing costs and to optimize each element of the device to meet the operational requirements. The results obtained indicate the maximum velocity reached, the uniform distribution of the air flow inside the test chamber.

Keywords: Aeronautics, Design, Analysis, Engineering.

1. Introducción

Las pruebas experimentales en túnel de viento se aplican a muchos vehículos y otros dispositivos que actúan mientras interactúan con el aire, permitiendo estimar el comportamiento del flujo y las fuerzas generadas (Barlow, J. B, 1999). El túnel de viento es un dispositivo fundamental para estudiar el comportamiento del fluido al interactuar con una estructura, realizando pruebas experimentales en un modelo/prototipo, permitiendo realizar mediciones de condiciones como velocidad y presión, por mencionar algunas. Dada la importancia de estos equipos en la investigación y desarrollo tecnológico, los requerimientos varían según la operación del túnel, afectando la construcción e instrumentación. Dependiendo de su aplicación, algunos túneles pueden necesitar equipos para leer velocidades supersónicas, lo que implica una gran inversión. En consecuencia, adquirir y

mantener estos dispositivos es un desafío económico significativo para las instituciones y empresas dedicadas a la investigación y desarrollo en áreas donde la aerodinámica es crucial en la optimización de diseños y rendimiento de productos. Por tal motivo, el diseño del presente túnel de viento forma parte del proyecto de equipamiento del laboratorio de aerodinámica del programa educativo de ingeniería Aeroespacial de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

1.1. Tipos de túneles

Los túneles de viento se pueden clasificar en distintas configuraciones principales, cada una de ellas es diseñada para satisfacer diferentes necesidades y aplicaciones en el estudio de la aerodinámica.

Las configuraciones básicas son las siguientes:

*Autor para la correspondencia: Javier.figueroa@upaep.edu.mx

Correo electrónico: Javier.figueroa@upaep.edu.mx (Javier Figueroa-Vargas), adrian.cruz@upaep.mx (Adrián Cruz-de-Jesús).

Tabla 1: Tabla comparativa entre túnel de viento de circuito abierto y cerrado (Barlow, J. B., 1999).

Tipo de túnel	Circuito Abierto (Eiffel)	Circuito Cerrado (Gottingen)
Descripción	En este túnel, el aire se aspira desde la campana de contracción pasando por la cámara de pruebas y luego se le expulsa hacia el difusor.	En este tipo de túnel el aire circula en un bucle cerrado recirculando continuamente por la sección de pruebas.
Ventajas	Diseño simple Menor costo de construcción No requiere un sistema de purga para eliminar gases	Flujo de aire más uniforme Nula influencia de condiciones externas Se requiere menor energía para su funcionamiento Menor ruido cuando el túnel está en funcionamiento
Desventajas	Requiere una malla a la entrada de túnel para tener un caudal de alta calidad Requiere mayor energía para su funcionamiento dado su tamaño y velocidad Altos niveles de ruido Requiere que en la sala donde se encuentre el túnel esta tenga un tratamiento para reducir la contaminación acústica	Mayor complejidad de diseño Alto costo de construcción debido a la los ductos de retorno y aletas de esquina Requiere un sistema de purga de gases Requiere un sistema de enfriamiento o filtrado de aire

Como se comentó anteriormente, para el presente trabajo se desarrolla el diseño de un túnel de viento de configuración de circuito abierto, tanto por las ventajas como por el espacio disponible.

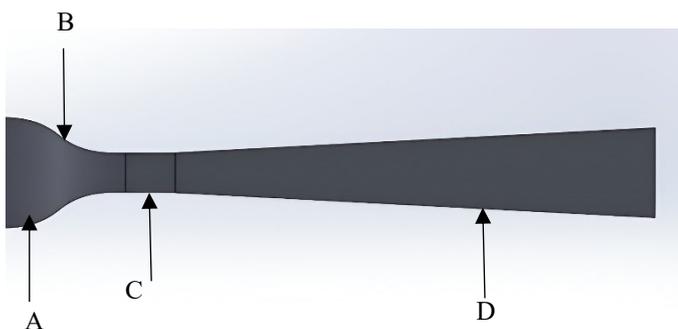


Figura 1: Configuración del túnel de viento.

1.2. Partes del Túnel de Viento

Un túnel de viento consta de 5 partes principales cada una de igual importancia ya que se complementan entre sí para poder lograr que funcione correctamente. Las partes son las siguientes:

- **Cámara de Asentamiento:** es la primera sección del túnel de viento, esta cámara reduce la turbulencia y uniforma el flujo con el uso de mallas para lograr la homogenización del flujo. La eficiencia de este componente es crucial para obtener resultados precisos en los estudios aerodinámicos.
- **Cono de contracción:** la función de esta sección es bastante simple con su comparación a su diseño y construcción su principal propósito consiste en acelerar y uniformar el flujo de aire para que se alcance la velocidad objetivo en la siguiente sección. El cono está diseñado para reducir el área de la sección transversal, lo que incrementa la velocidad del aire, provocando a su vez una reducción de las pocas irregularidades residuales de la cámara de asentamiento.
- **Sección de Pruebas:** Esta sección es el componente fundamental de todo el túnel. En este se concentra la mayoría del equipo de medición y donde se colocan los modelos, sometidos a diversas condiciones de flujo de aire para evaluar su comportamiento y rendimiento aerodinámico.
- **Difusor:** Esta sección es la última que se encuentra en todas las configuraciones posibles del túnel de viento, su función es desacelerar el aire reduciendo su velocidad y aumentando su presión. Este proceso de desaceleración es crucial para recuperar parte de la energía cinética del aire y mejorar la eficiencia del túnel. Para esta sección hay dos tipos de configuraciones rectangular, cónico y rectangular-cónico.

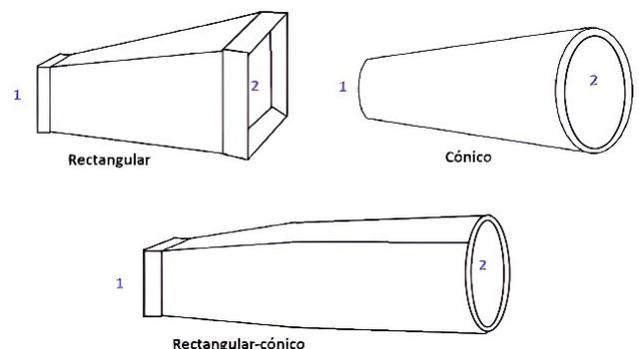


Figura 2: Configuraciones del difusor (Burgos Cuevas, 2014).

- **Extractor Axial:** el uso de este componente depende de la configuración específica del túnel ya que se opta por el uso de un ventilador para realizar una función similar. Sin embargo, el extractor axial tiene la función

es extraer el aire que pasa por cada sección, manteniendo una presión y velocidad constantes.

2. Metodología

Con el objetivo de tener una velocidad de 60 m/s en la sección de pruebas con una longitud máxima de 6m de longitud total se eligió la siguiente configuración de túnel de viento de circuito abierto con una sección transversal cuadrada en la sección de pruebas. Se utilizará un extractor para gestionar el flujo del aire. La envergadura máxima permitida de los modelos en la sección de pruebas de 30 cm

2.1. Selección del extractor axial

Debido a que el dimensionamiento de las secciones se fundamenta en el caudal, que genera el extractor. La selección del extractor se centró en encontrar un modelo con un caudal superior a 3 m³/s y un diámetro de extracción entre 0.7 m y 0.9 m. Un diámetro fuera de ese rango aumentaría la longitud del túnel, superando la limitante de 6 m, y un caudal menor reduciría la velocidad en la sección de pruebas. Finalmente, se eligieron 3 modelos que cumplían con estas restricciones:

Tabla 2: Especificaciones de Extractores.

Modelo	Radio(m)	Caudal (m ³ /s)
MXAXI-056	0.711	3.755
MXAXI-069	0.863	7.418
XWP-4-24/40°	0.762	6.044

De acuerdo a los datos mostrados en la tabla anterior, la selección del extractor se realizó considerando el que otorgara mayor caudal en el menor radio posible, siendo seleccionado el extractor XWP-4-24/40°.

2.2. Dimensionamiento de la sección de pruebas

La sección de pruebas depende de la aplicación del túnel y del tamaño del modelo. Como este túnel es de uso universitario, siendo este un túnel pequeño y subsónico, Y según (Barlow 1979) las relaciones geométricas dentro de la sección de pruebas son: la relación de aspecto y la relación del ancho con respecto al altura es el siguiente:

$$R_a = \varepsilon/b_{sp} = 0.8, \tag{1}$$

$$R_{wh} = 1.5; \tag{2}$$

donde R_a es la relación de aspecto, ε es la envergadura del modelo (m), R_{wh} es la relación ancho-alto y b_{sp} es la base de la sección de pruebas, Como se puede observar en (1) la base de la sección de pruebas se puede dimensionar a partir de despejar la base de la sección de pruebas en dicha formula, como se mencionó anteriormente al ser una sección transversal cuadrada, la base y el ancho son iguales, para obtener el alto de la sección de pruebas se le aplica la relación de (2), Ver Tabla 2.

Tabla 3: Dimensiones de la Sección de pruebas (m).

Dimensión	Valor
Base/Ancho entrada	0.3
Base/Ancho salida	0.3075
Alto	0.45

Al terminar de dimensionarlo utilizando (1) y (2) se agregó un ángulo de 0.5° en el borde de salida de la sección de pruebas para generar un efecto similar al difusor, permitiendo una expansión del flujo y aumentando a su vez la presión estática del sistema, haciendo el difusor más eficiente, lo que aumenta su dimensión efectiva, Ver Tabla 2.

2.3. Dimensionamiento del difusor

El dimensionamiento del difusor considera las conexiones con la sección de prueba y el extractor, debido a que estas dictan el tamaño que va a tener en su sección de entrada y salida. Según (Barlow 1999), también es fundamental considerar un ángulo de divergencia de 3°, con el objetivo de aumentar la presión estática del sistema, que facilita la recuperación de presión después de la sección de pruebas, que en consecuencia reduce las pérdidas y minimiza la generación de turbulencias garantizando un flujo de aire estable y controlado.

Pese a los diferentes tipos de configuración de difusor, para el presente trabajo se seleccionó la configuración rectangular, debido a la facilidad de diseño y manufactura. Las dimensiones de la sección de entrada del difusor se basan partir de las dimensiones de la sección de salida de la cámara de pruebas. Por otro lado, para las dimensiones de la sección de salida del difusor se determinan en función de las dimensiones del extractor, tal como se muestra en la Tabla 2. Para obtener el largo del difusor se consideran la ecuación (3):

$$L_D = \frac{0.5(b_e - b_s)}{\tan(\theta)}, \tag{3}$$

donde L_D es el largo del difusor, b_e es la longitud de la base en la sección de entrada de difusor, b_s es la longitud de la base en la sección de salida y θ es el ángulo de divergencia del difusor. En la Tabla 4 se presentan las dimensiones del difusor.

Tabla 4: Dimensiones del Difusor (m).

Dimensión	Valor
Base/Ancho entrada	0.3075
Base/Ancho salida	0.762
Largo	4.3332

2.4. Dimensionamiento de la cámara de contracción

Para dimensionar la cámara de contracción, se utilizó el extractor como referencia, ya que determina el tamaño de la entrada, lo cual influye directamente en la longitud total del túnel. Las dimensiones calculadas para la sección de pruebas se consideraron como la salida de la cámara de contracción. Con estos datos, se aplicaron las siguientes ecuaciones

$$0.75 \leq \frac{L_c}{2R_e} \leq 1.20, \tag{4}$$

$$x_1 = 0.5 L, \tag{5}$$

$$R(x) = \begin{cases} R_e - A_1 x^n & x \leq x_1, \\ R_0 - A_2 (L - x)^n & x \geq x_1, \end{cases} \tag{6}$$

$$CR = \frac{A_{C.A.}}{A_{Z.P.}}; \tag{7}$$

donde L_c es el largo del cono, R_e es el radio en entrada del cono de contracción, donde R_e es el radio en entrada del cono de contracción, A_1 es el área de entrada del cono de contracción, R_0 es el radio de salida, A_2 es el área de salida, L es el largo del cono de contracción, x_1 es el punto de inflexión, CR es el radio de contracción, $A_{C.A.}$ es el área transversal de la cámara de

asentamiento y $A_{z.p.}$ es el área transversal de la cámara de pruebas. Para poder utilizar (4), se utilizó el área del difusor, que determina el área de entrada de la cámara de contracción, la cual es de 1 m^2 . a partir de este valor se van sustituyendo las siguientes ecuaciones, en (6) se calcula en que parte del cono se genera el punto de inflexión donde cambia de signo la curvatura, este punto es importante porque se afecta la forma en el que el flujo se acelera y estabiliza en lo que atraviesa el cono. La función de (6) es generar un sistema de ecuaciones que al solucionarlo nos genera los puntos que conforman la geometría del cono, (6) se divide en dos a partir de la ubicación del punto de inflexión, para resolver este sistema se considera n como un exponente de grado 3, para los puntos menores al punto de inflexión, se aplica un rango de valores para x desde 0 con aumentos de 0.02 hasta generar 30 puntos de la gráfica, para los puntos mayores al punto de inflexión se considera el mismo aumento en x , en L por otro lado se considera un aumento de 0.04. Empleando (6), se obtiene la siguiente expresión:

$$R(x) = \begin{cases} 0.5 - 0.8101x^3 & x \leq 0.5 \\ 0.15 - 0.8101(1.2 - x)^3 & x \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

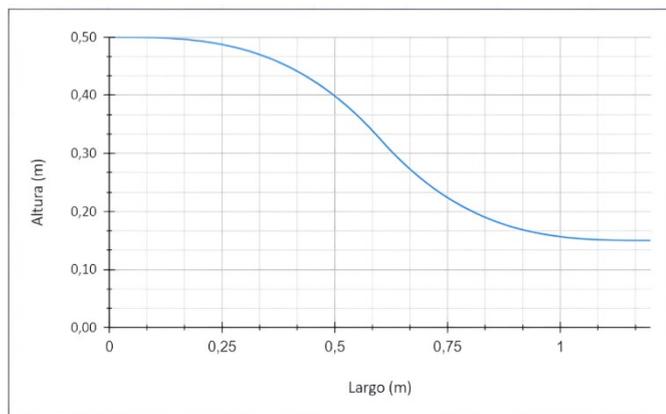


Figura 3: Curva de la cámara de contracción.

Tabla 5: Dimensiones del cono de contracción (m).

Dimensión	Valor
Largo	1.20
Punto de Inflexión	0.60
Radio de contracción	0.111

Tabla 6: Velocidades en cada sección (m/s).

Ubicación	Valor
Entrada del cono de contracción	6.044
Salida del cono de contracción	67.155
Entrada de la zona de pruebas	67.155
Salida de la zona de pruebas	63.772
Velocidad del extractor	13.253

2.5. Cálculo de velocidades en cada sección

El cálculo de velocidades en cada sección del túnel de viento se realiza para asegurar que las condiciones de prueba sean consistentes y precisas. La velocidad del flujo de aire varía a lo largo de estas secciones debido a los cambios en la sección transversal del túnel y otros factores de diseño, por

ejemplo: los ángulos de divergencia. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q_{Ext}}{A_{ST}}, \quad (9)$$

donde Q_{Ext} es el caudal del extractor y A_{ST} es el área de la sección transversal que va a ir variando, dependiendo de parte del túnel de viento se va a ir analizando. Ver Tabla 5.

2.6. Dimensionamiento de la cámara de asentamiento

En el dimensionamiento de la cámara de asentamiento se consideró una retícula de forma circular por su facilidad de construcción. La retícula, el mallado y la retícula comparten la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{A_f}{A_t}, \quad (10)$$

donde A_f es el área donde fluye el aire y A_t es el área total de la cámara de asentamiento. Según (Barlow 1999) es recomendable que la retícula sea de $\beta \geq 0.8$ debido a que de no cumplir con ese criterio las pérdidas de velocidad provocadas por este retículo serían muy grandes. Además, hay otro criterio que se toma en cuenta para el diseño de la retícula que es la relación entre el largo y el diámetro de la misma la cual es la siguiente:

$$6 \leq \frac{L}{D} \leq 8. \quad (11)$$

En el caso del mallado utilizando (10) se considera el siguiente rango:

$$0.58 \leq \beta \leq 0.8. \quad (12)$$

Utilizando (12) si el rango de la porosidad se encuentra sobre 0.8, no existe un adecuado control en la turbulencia y si se encuentra menor a 0.58 este genera una inestabilidad en el flujo.

2.7. Largo del túnel de viento

Como se mencionó al inicio del artículo la finalidad de este túnel de viento era alcanzar la máxima velocidad posible en la zona de pruebas limitados por un espacio de 6 m. Con los datos calculados en el desarrollo de cada sección del tiempo se puede obtener el largo total con los siguientes datos $L_{CC} = 1.2 \text{ m}$, $L_{SP} = 0.45 \text{ m}$, $L_D = 4.33 \text{ m}$. Por lo que el valor del largo total del túnel de viento es: 5.98 m . Cumpliendo la limitante propuesta al inicio.

3. Resultados preliminares

A partir del modelo presentado en la Figura 4, se llevó a cabo una simulación con el objetivo de determinar la intensidad de turbulencia, a fin de verificar si el diseño del túnel de viento produce un flujo laminar dentro de la sección de pruebas. En la Figura 5 se puede observar de una manera gráfica los datos obtenidos en la simulación estos se basaron en puntos de análisis, se puede observar que se remarcan los puntos 8 y 18 estos y los que se encuentran dentro de esos intervalos pertenecen a la sección de pruebas. Los resultados

de la simulación, mostrados en la Figura 6, indican que la intensidad de turbulencia dentro de la sección de pruebas varía entre aproximadamente 0.38% y 0.49% a lo largo del túnel de viento. Estas cifras revelan que, aunque la intensidad de turbulencia es baja en algunas zonas, en otras se alcanzan valores que podrían comprometer la uniformidad del flujo laminar dentro de la sección de pruebas. Por lo tanto, se observa que el túnel de viento no garantiza un flujo completamente laminar, lo que sugiere la necesidad de ajustes en el diseño para reducir la turbulencia y mejorar las condiciones aerodinámicas.

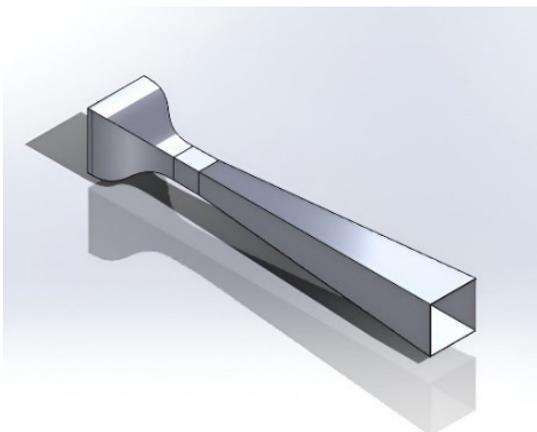


Figura 4: Modelo 3D de la configuración del proyecto.

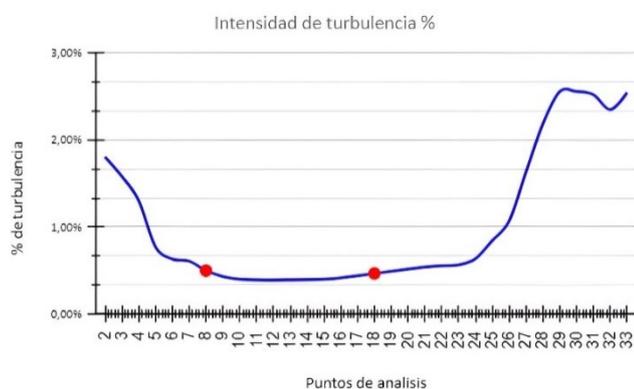


Figura 5: Gráfica de Intensidad de turbulencia.

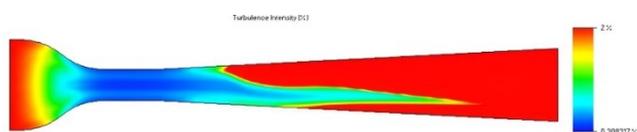


Figura 6: Simulación Intensidad de turbulencia.

4. Conclusiones

A lo largo de este artículo, se ha descrito el dimensionamiento preliminar y el diseño conceptual de un túnel de viento de circuito abierto, con una sección de pruebas

de forma cuadrada y dimensiones específicas para acomodar modelos con una envergadura máxima de 40 cm. La velocidad mínima requerida de 60 m/s en la sección de pruebas ha sido un factor clave en la determinación de las características del extractor y la configuración general del túnel.

Hasta ahora no se han realizado la construcción del túnel de viento. Estas fases constituyen trabajos futuros que están en progreso. Los resultados obtenidos de simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) fue esencial para validar y optimizar el diseño propuesto, asegurando que se alcance la distribución de flujo de aire uniforme y la velocidad deseada en la sección de pruebas. Esta simulación permitirá identificar y corregir posibles problemas antes de la construcción del túnel.

Los resultados preliminares revelan que el diseño final del túnel de viento podría verse significativamente influido por los resultados obtenidos en las simulaciones: por ejemplo, si los resultados obtenidos del CFD muestran flujo inconsistente en varias secciones del túnel que de no corregirse afectarían la velocidad, podría ser necesario reconsiderar aspectos en el diseño.

En última instancia, los resultados preliminares y las simulaciones no solo servirán para validar el diseño inicial, sino que también proporcionarán información crítica que podría llevar a la reconfiguración de elementos clave del túnel de viento antes de su construcción. Estos ajustes garantizarán que el túnel final cumpla con todos los requisitos técnicos y operacionales, ofreciendo un rendimiento óptimo y fiable para las pruebas aerodinámicas planificada

La construcción del túnel de viento también forma parte de las etapas futuras del proyecto. Una vez completada la fase de simulación y optimización del diseño, se procederá con la construcción siguiendo las especificaciones dimensionales y de diseño presentadas en este artículo. Durante la construcción, se implementarán materiales y técnicas que aseguren la durabilidad y eficiencia del túnel de viento, además de cumplir con las normativas de seguridad pertinentes.

Referencias

- Arslanian, P. J. (2012). *AC 2012-3461: Undergraduate research on conceptual design of a wind tunnel for instructional purposes*. <https://www.semanticscholar.org/paper/AC-2012-3461%3A-UNDERGRADUATE-RESEARCH-ON-CONCEPTUAL-Arslanian/c6df69557619dd01cf7dbad5158df3c4ac4ad702>
- Acevedo Vélez, F. (2006). *Diseño de un túnel de viento para prueba de ventiladores y perfiles aerodinámicos* [Proyecto de grado]. Universidad EAFIT.
- Barlow, J. B., Rae, W. H., Jr., & Pope, A. (1999). *Low-speed wind tunnel testing* (3.a ed.). John Wiley & Sons.
- Burgos Cuevas, A. (2014). *Diseño y construcción de un túnel de viento* [Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Kareem, A. A., Abbas, M. K., & Khammas, F. A. (2021). Aerodynamic study of low-speed wind tunnel contraction section: Design and manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1094(1), 012077. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1094/1/012077>
- Fox, R. W., & McDonald, A. T. (1983). *Introducción a la mecánica de fluidos* (2.a ed.). Interamericana.