

Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto

Design and construction of a subsonic open-circuit wind tunnel

Fiorella Garro-Fernández¹, Carlos Alberto Echandi-Jara², Emanuel Fallas-Hernández³, Marco Zúñiga-Pepper⁴, Gustavo Richmond-Navarro⁵

Fecha de recepción: 7 de febrero, 2024
Fecha de aprobación: 30 de mayo, 2024

Garro-Fernández, F; Echandi-Jara, C.A; Fallas-Hernández, E; Zúñiga-Pepper, M; Richmond-Navarro, G. Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 128-144.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7051>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 fgarrofiorella@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0006-4152-4742>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 echandijara@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0004-2353-8222>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 efallashdez@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-2159-0375>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 mzunigapepper10@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0008-0788-2348>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 grichmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Palabras clave

Túnel de viento subsónico; sustentación; arrastre; velocidad del viento; número de Reynolds.

Resumen

El Laboratorio de Investigación en Energía Eólica del Instituto Tecnológico de Costa Rica (LIENE) ha diseñado y construido un túnel de viento subsónico de circuito abierto que funciona por succión, con una sección de pruebas 30 x 30 cm, donde se puede caracterizar el comportamiento aerodinámico de modelos en un flujo de aire controlado. El túnel funciona con un motor de 1 caballo de fuerza y puede operar a velocidades de viento entre 7 y 15 m/s; la instrumentación instalada actualmente permite medir fuerzas de sustentación de hasta 100 N y de arrastre de hasta 50 N. En el siguiente trabajo se describe el procedimiento de la concepción, fabricación, instrumentación y caracterización del túnel, desde su base teórica hasta su diseño y operación.

Keywords

Subsonic wind tunnel; lift; drag; wind speed; Reynolds number.

Abstract

The Wind Energy Research Laboratory of the Instituto Tecnológico de Costa Rica (LIENE) has designed and built an open circuit subsonic wind tunnel operating by suction, with a 30x30 cm test section, where the aerodynamic behavior of models in a controlled air flow can be characterized. The tunnel is powered by a 1 horsepower motor and can operate at wind speeds between 7 and 15 m/s; the instrumentation installed allows the measurement of lift forces up to 100 N and drag forces up to 50 N. The following work describes the procedure for the conception, fabrication, instrumentation, and characterization of the tunnel, from its theoretical basis to its design and operation.

Introducción

En la actualidad, la energía representa uno de los mayores retos que tiene la sociedad por delante, debido no solo a la creciente demanda de energía, sino también por el impacto ambiental que esto conlleva; por lo tanto, es necesario implementar nuevas tecnologías de producción energética y especialmente dar un enfoque a las fuentes de energía renovables [1]. Una de las principales fuentes de producción renovable de energía eléctrica es la energía eólica, la cual se ve beneficiada por las investigaciones realizadas en túneles de viento. Esta labor beneficia el aumento de la producción de energía eólica en el mundo [2].

En diferentes latitudes, las universidades se han convertido en centros de investigación y desarrollo en múltiples campos, donde los túneles de viento se han vuelto una herramienta indispensable para el desarrollo [3]. Es por ello que existen centros de enseñanza que cuentan con túneles de viento de gran tamaño que no solo son usados para investigación en un campo concreto, sino que gracias a ellos se abren las puertas a múltiples campos de investigación, desde energía hasta aviación. Una de estas universidades que cuenta con túneles de grandes dimensiones es la Universidad de Kyushu en Japón, esta institución académica cuenta con un túnel de viento de circuito cerrado con dimensiones de 3,6 m de ancho, 2 m de alto y 15 m de largo en la zona de pruebas con motores que impulsan el viento en el túnel de 264 kW [2]. Así como la Universidad de Kyushu, muchas universidades poseen túneles de dimensiones

considerables para investigación y desarrollo, entre ellas se encuentra *T.U. Delft* en los países bajos, *Mie University* en Japón, *Harbin Institute of Technology* en China. Sin embargo, este tipo de equipos son sumamente costosos en su construcción y operación, además de otros requerimientos propios de estos equipos como lo es el área que ocupan y la demanda de potencia eléctrica para su operación, por lo que muchas universidades, al no contar con el presupuesto necesario optan por la construcción de sus propios túneles de viento a una pequeña escala. Un ejemplo de esto es el caso de la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) de Santiago de Chile donde se construyó un túnel de viento subsónico de circuito abierto con una sección de pruebas de 430 mm por 430 mm (alto por ancho). Con un motor de 2,2 kW, este túnel es capaz de operar hasta una velocidad de 26,2 m/s en la sección de pruebas [3]. Misma situación se dio en la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) de Cuenca, Ecuador, donde se construyó un túnel subsónico de circuito abierto con una sección de pruebas de 300 mm tanto de alto como ancho. Este posee un motor de 0,75 caballos de fuerza que permite operar hasta 23,4 m/s en la sección de pruebas [4].

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) se suma al grupo de universidades que ha construido su propio túnel de viento capaz de realizar análisis aerodinámicos. De esta forma, en este trabajo se describe el diseño, construcción y operación del túnel de viento, con el objetivo de proporcionar un entorno de investigación y desarrollo, permitiendo la evaluación y optimización de diseños en condiciones controladas y realistas.

Generalidades de los túneles de viento

Un túnel de viento es un instrumento científico que permite estudiar las características aerodinámicas que tiene el objeto de estudio cuando este se somete a un flujo de aire. Lo anterior se logra por medio de un ventilador el cual genera el flujo de aire mientras que el objeto de estudio se mantiene estático. Esto simula ambas condiciones equivalentes a que el objeto viaje en el aire o el aire viaje a través del objeto [3].

El túnel de viento permite tener un ambiente controlado, lo cual es necesario en el estudio científico para validar los resultados alcanzados. Este se logra al manipular ciertos parámetros del flujo, principalmente la velocidad del viento. El túnel de viento permite mantener un flujo laminar o, si se desea, un flujo con una intensidad de turbulencia controlada [5].

Existen distintas maneras de clasificar los túneles de viento, por ejemplo, si son de circuito cerrado o circuito abierto. Un túnel de circuito cerrado quiere decir que el flujo tiene una trayectoria en la cual no escapa y vuelve a su punto de inicio, mientras que un túnel de circuito abierto tiene extremos en donde el flujo entra y sale. Otra forma de clasificar es por la velocidad del viento: flujo subsónico, transónico, supersónico e hipersónico. De esta forma se relaciona la velocidad del viento con la velocidad del sonido, porque este es un umbral importante que define el comportamiento del flujo [3].

Partes de un túnel de viento

El túnel de viento creado y diseñado en el TEC corresponde un túnel subsónico de circuito abierto, por lo tanto, se limitará la explicación del funcionamiento a este tipo de túnel.

Los túneles de viento constan de 5 secciones principales: tobera, rectificador de flujo, sección de pruebas, difusor y ventilador (ver Figura 1), cada una de ellas cumple una función en la operación del túnel, tal y como se menciona en [3].

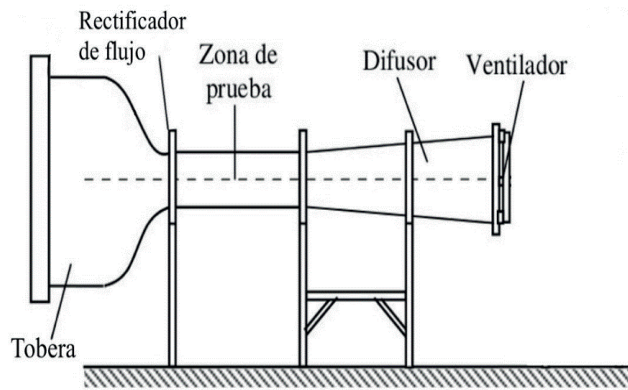


Figura 1. Partes de un túnel de viento [5].

- Tobera: se encarga del ordenamiento y aceleración del flujo de entrada al túnel.
- Rectificador de flujo: ordena el fluido de manera que este tenga un comportamiento laminar.
- Zona de prueba: es dónde se realizan las mediciones sobre el modelo que se encuentra bajo estudio, aquí se ubican todos los instrumentos de medición y los objetos de estudio.
- Difusor: posibilita la salida del fluido de una forma ordenada y uniforme.
- Ventilador: es la parte móvil del túnel que crea el flujo de aire dentro del túnel.

Tobera

Esta sección del túnel es donde ingresa el flujo. Debe tener una geometría específica para que el flujo se mantenga lo más laminar y ordenado posible. Esta geometría corresponde a la que se observa en la Figura 2, en donde los ángulos que forman las esquinas de la entrada y salida, $\alpha/2$ y $\beta/2$ no deben superar los 12 grados [3].

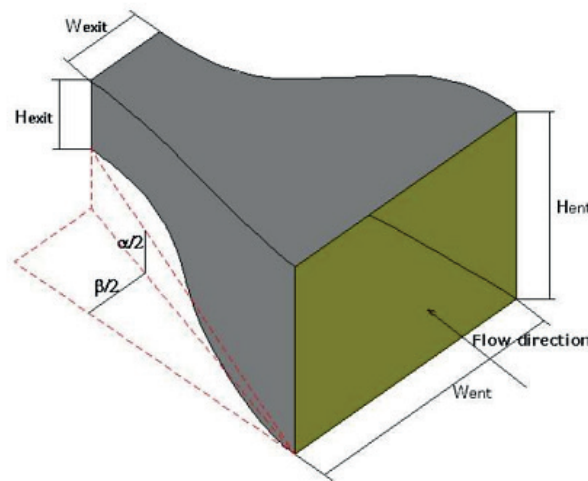


Figura 2. Parámetros para el diseño de una tobera [3].

En el túnel de viento del TEC se diseñó una tobera de 50x50cm, siguiendo las recomendaciones de P. Bradshaw y R.Metha (1979) [6] de seguir la forma de las paredes como segmentos de curvas polinomiales de tercer grado con la finalidad de evitar pérdidas de carga, turbulencia, tal y como se observa en la Figura 3.

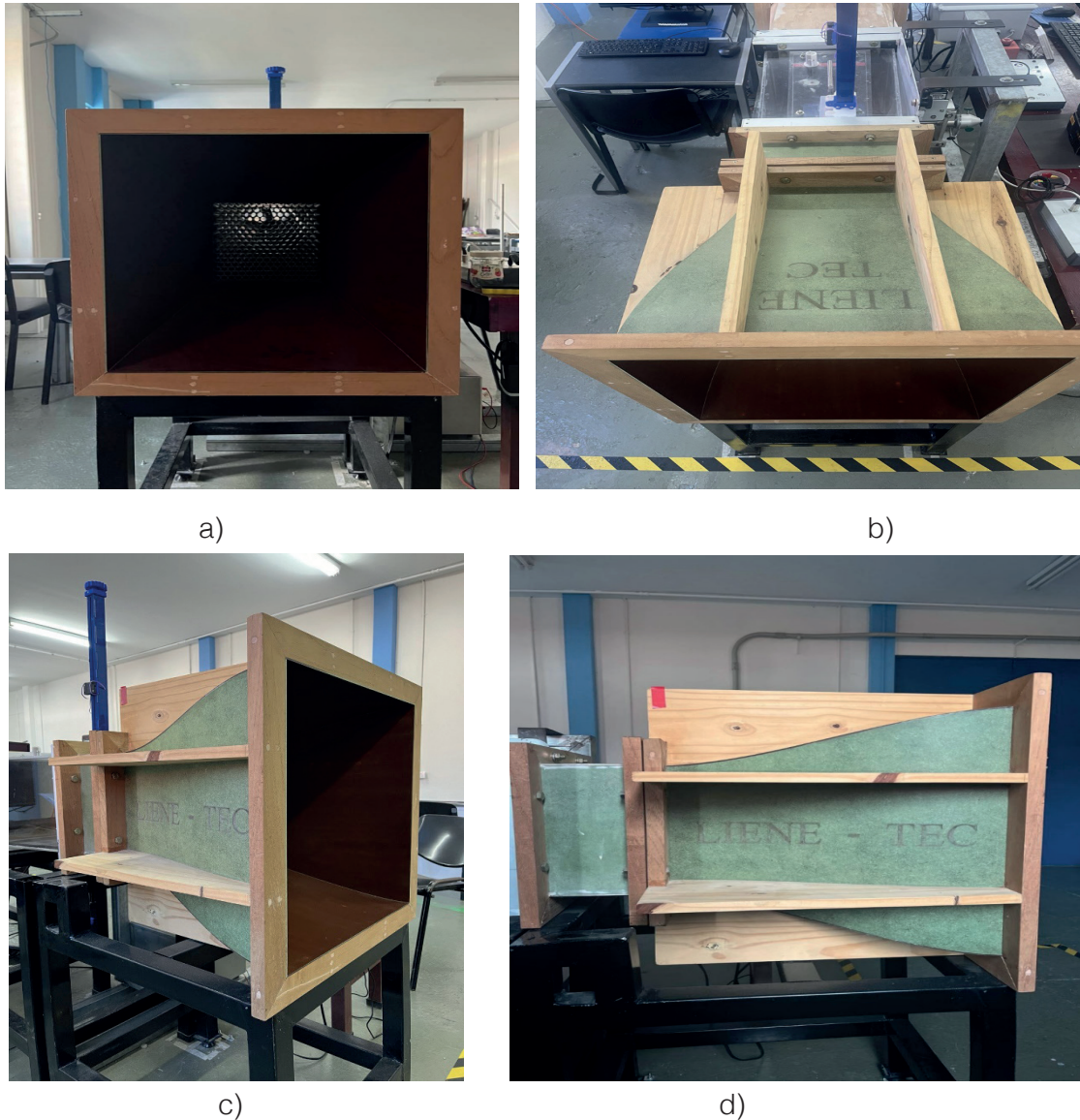


Figura 3. a) Vista frontal de la tobera b) Vista superior de la tobera c) Perspectiva isométrica de la tobera d) Vista lateral de la tobera del túnel de viento del TEC.

Rectificador de Flujo

Un rectificador de flujo es una sección que se encarga de ordenar el flujo proveniente de la tobera de manera que sea laminar y que las líneas de flujo sean lo más paralelas posibles. Usualmente el rectificador de flujo consiste en un arreglo geométrico por el cual el flujo de viento tiene que pasar. Este arreglo puede ser de sección transversal de tubo circular, una malla, o, más comúnmente utilizado, de sección hexagonal tipo panal de abeja como se observa en la Figura 4.

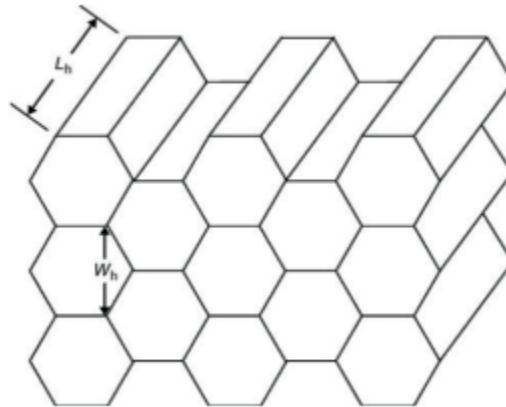


Figura 4. Rectificador tipo panal de abeja [3].

El largo del enderezador de flujo está relacionado directamente con la sección transversal, por lo que para una sección hexagonal el largo debe cumplir la relación $7D \geq L \geq 10D$, donde la D corresponde a la diagonal que forma las aristas del hexágono [7].

A pesar de que el rectificador de panal de abeja es el más utilizado, por razones de practicidad y de disponibilidad de materiales, en el diseño del túnel de viento del TEC se utilizó un rectificador de tubos de 27 x 27cm, tal y como se muestra en la Figura 5.

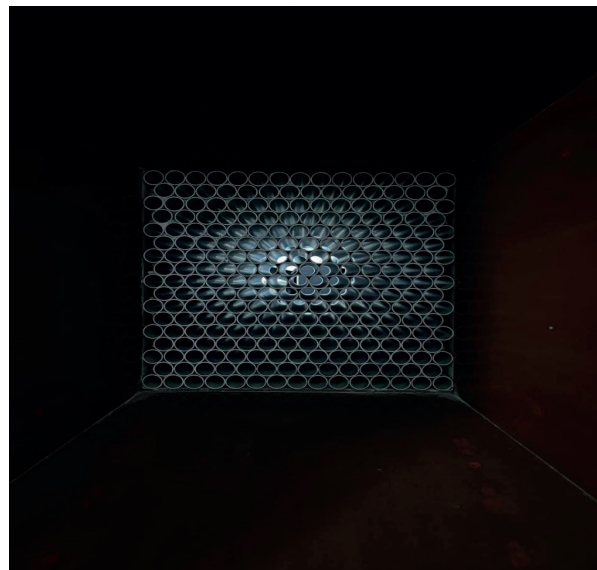


Figura 5. Rectificador de tubos del túnel de viento del TEC.

Sección de Pruebas

En esta parte del túnel es donde se introduce el objeto de estudio, este no debe superar un 10% del área de la sección transversal ya que afecta a las características del flujo [8]. Debido a lo anterior, la sección de pruebas debe tener un tamaño lo suficientemente grande que facilite realizar ensayos y que cumpla con los parámetros necesarios para que, particularmente,

permita alcanzar el rango de número de Reynolds que sea de interés en cada caso. En esta sección también se encuentran los principales dispositivos de medición, como los son la balanza y los tubos de Pitot.

La sección de pruebas del túnel de viento diseñado cuenta con una sección transversal de 275 x 275 mm en el extremo más pequeño y de 300x300 mm en el extremo más grande. La diferencia obedece a la necesidad de compensar el crecimiento de la capa límite y mantener un área con velocidad aproximadamente constante. Esta posee orificios para introducir los tubos de Pitot y la balanza, tal como se muestra en la Figura 6.

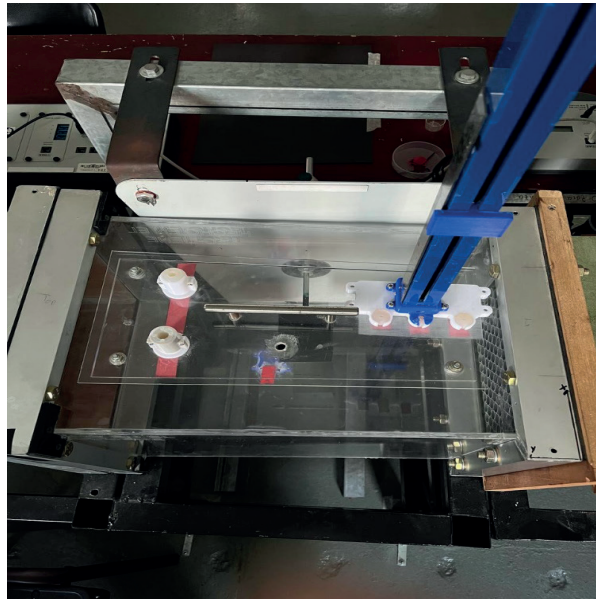


Figura 6. Vista superior de la sección de pruebas del túnel de viento del TEC.

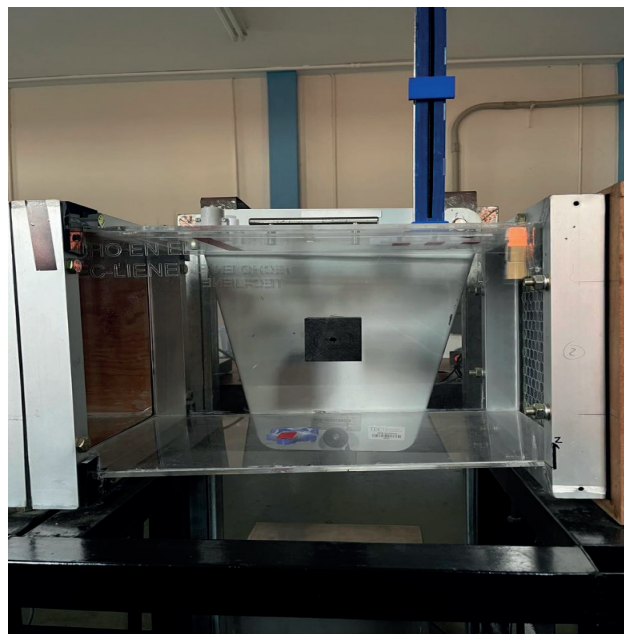


Figura 7. Vista lateral de la sección de pruebas del túnel de viento del TEC.

Difusor

El difusor en el caso del túnel subsónico de circuito abierto es la parte que conecta a la sección del ventilador con la sección de pruebas. Esta sección es sumamente importante para controlar la presión del flujo y que no surja una presión adversa que desordene el flujo laminar. Esto se logra por medio de una apertura progresiva que aumenta el área transversal, como se muestra en la Figura 8.

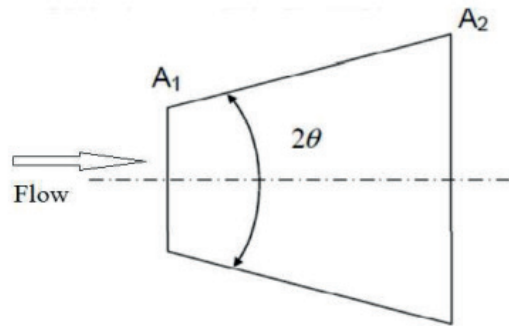


Figura 8. Difusor [3].

Para que sea lo suficientemente progresiva la expansión del área, Jara recomienda que el ángulo de apertura θ no supere los 12° [3].

El difusor del túnel de viento del TEC sigue este mismo principio para estabilizar la presión del flujo, de forma que se diseña una apertura progresiva desde la sección de pruebas hasta el ventilador. Esta se apoya en los soportes posicionados a lo largo del difusor (ver Figura 9-10).



Figura 9. Vista superior del difusor del túnel de viento del TEC.



Figura 10. Vista lateral del difusor del túnel de viento del TEC.

Ventilador

Este es el dispositivo que genera y mantiene el movimiento del aire para obtener un flujo continuo. Dependiendo del tamaño del túnel este puede necesitar de varios ventiladores, pero generalmente para un túnel subsónico se tiene un único ventilador de gran tamaño. Existen dos tipos principales de ventiladores: los centrífugos y los axiales.

Usualmente, en los túneles con ventilador axial la sección de pruebas está aguas arriba del ventilador, por lo tanto, operan por succión. Un ejemplo de esto es el túnel de viento de la Universidad de Tsinghua, donde flujo de aire se dirige desde la entrada del túnel (donde se ubica la sección de pruebas) hacia el ventilador axial [2].

En el caso de los túneles con ventilador centrífugo, la sección de pruebas está aguas abajo del ventilador, por lo que operan del lado de la descarga; como por ejemplo el túnel de viento de la Universidad de Costa Rica, empleado en la investigación de Nestor [8] y el túnel de viento de la UTEM. No obstante, esto no es una regla general, pues el del túnel de viento de la Universidad de Kyushu cuenta con ventiladores axiales y la sección de pruebas está en la descarga [2].

Centrífugo

El principio de este ventilador es hacer uso del fenómeno de la fuerza centrífuga y al rotar las aspas o álabes permite expulsar el aire del centro del rotor hacia el exterior de este. De esta manera el aire ingresa por un lado del ventilador, paralelo al eje de rotación y luego es expulsado de forma tangencial al eje de rotación. El ventilador centrífugo se puede clasificar según las aspas del rotor. Los principales tipos son alabes inclinados adelante, alabes inclinados hacia atrás y alabes radiales, como se muestran en la Figura 11.



Figura 11. Distintos tipos de rotores para ventiladores centrífugos [9].

Axial

Este acelera el viento en dirección al eje de rotación y da un impulso de forma espiral. Estos son los más comunes y se pueden clasificar por la forma de las aspas su cantidad y su inclinación. Uno de los principales usos es en la ventilación que consiste mover grandes caudales en zonas abiertas, por lo que no necesitan generar una presión estática alta. A pesar de esto, si se le hacen modificaciones, estos ventiladores pueden llegar a generar presiones estáticas altas [3].

Se diseñó el túnel de viento con un ventilador axial el cual se encarga de succionar el aire. El ventilador actual es marca Greenheck y modelo TDI (ver Figura 12). Este ventilador tiene 6 aspas de 18 pulgadas de diámetro con un el motor original de 3/4 de caballos de fuerza. Para poder regular la velocidad del motor se implementó un motor nuevo de 1 caballo de fuerza con variador de frecuencia, el cual permite controlar las rotaciones por minuto del motor. De esta forma se consigue una velocidad mínima de 880 RPM y una máxima de 1800 RPM.



Figura 12. Ventilador axial del túnel de viento del TEC.

Construcción

Al ser el túnel de viento del TEC una iniciativa universitaria, todo el proceso de la creación del túnel desde el diseño, modelado y construcción fue realizado principalmente por los estudiantes del Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE), con el apoyo de profesores y personal técnico. Específicamente la construcción se planificó de acuerdo con el presupuesto disponible para lograr un acabado de calidad a un precio económico en cuanto a materiales y mano de obra.

El modelado se realizó utilizando los softwares SolidWorks y Comsol, con los cuales se simuló preliminarmente las dimensiones del túnel junto su funcionamiento para así tener una mejor perspectiva del acabado final del proyecto.

A partir de la verificación de los parámetros de funcionamiento se construyeron las distintas secciones del túnel:

- Tobera: Fue subcontratada a Muebles Ramiro, ubicado en Cartago, Costa Rica. Para construir la tobera con láminas de Plywood, se utilizaron soportes laterales de pino, que fueron manufacturados en el Taller de la Escuela de Producción Industrial del TEC.
- Rectificador de flujo: Fue realizado en el taller de la Escuela de Diseño Industrial del TEC, por parte del técnico Danilo Solano.
- Sección de pruebas: A través del corte y grabado láser del Laboratorio Institucional de Microcomputadoras (LAIMI) del TEC se cortaron láminas de acrílico transparente para visualizar el posicionamiento del objeto dentro de la sección de pruebas.
- Difusor: Se construyó con láminas de Plywood en el Taller de Diseño de la Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial del TEC.
- Base de metal: El corte y soldadura de la estructura metálica donde se apoya la totalidad del túnel de viento se realizó en el Taller de Procesos de Manufactura de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del TEC.

El túnel terminado tiene una longitud de 2,73 m tomando en cuenta el ventilador. Para su correcta operación requiere en la succión un área libre de 1x1 m y en la descarga un espacio libre de 1 m en dirección del viento y 1 m hacia cada lado en dirección perpendicular al viento.

Este túnel se diseñó con un espacio de succión de 1,6 m y uno de descarga de 1 m lo que en total sería una huella de 5,23 m (ver Figura 13).



Figura 13. Túnel de viento del LIENE, TEC.

Instrumentación

Una vez armado el túnel, se necesita equiparlo para poder comenzar a realizar mediciones y caracterizar el flujo. La caracterización implica no solo determinar las distintas velocidades del viento según la velocidad de rotación del ventilador, sino también determinar si en la sección de pruebas se obtiene un flujo uniforme y por tanto, si se construyó de la manera correcta.

Medición de la velocidad del viento

Es necesario relacionar la velocidad del flujo generado en la sección de pruebas con la velocidad de rotación del motor. Para esto se requiere de un método para medir la velocidad del viento en la sección de pruebas. Las principales herramientas que se utilizan para medir la velocidad del viento son anemómetros de copas, de alabes, de hilo caliente y tubos de Pitot.

El anemómetro copas y el anemómetro de alabes no son comúnmente utilizados en túneles de viento de tan pequeña escala ya que presentan un área de barrido significativa con respecto al túnel y por tanto el efecto de bloqueo afecta el flujo de viento. Por otro lado, el anemómetro de hilo caliente, que funciona mediante cambios de temperatura, permite determinar la velocidad del viento con una afectación mínima del flujo. Esto debido a que, al introducir únicamente un tubo delgado con el sensor en la sección de pruebas, es menos invasivo, por lo que tiene menores efectos en el flujo en comparación a los otros tipos de anemómetros.

En cuanto al tubo de Pitot, este consiste en un tubo con orificios que permite medir la presión estática y la presión total del flujo, con lo cual es posible obtener la presión dinámica y a partir de esta, la velocidad del viento. A parte del tubo de Pitot se necesita un transductor de presión que registra la diferencia de estas presiones y calcula la velocidad del viento.

Actualmente el túnel de viento tiene varios métodos para poder medir la velocidad del viento. Mediante varias mediciones, se obtuvo para el túnel una curva de caracterización y una ecuación que permite relacionar las revoluciones del motor con la velocidad del viento en la sección de pruebas. Esta curva se muestra en la Figura 14.

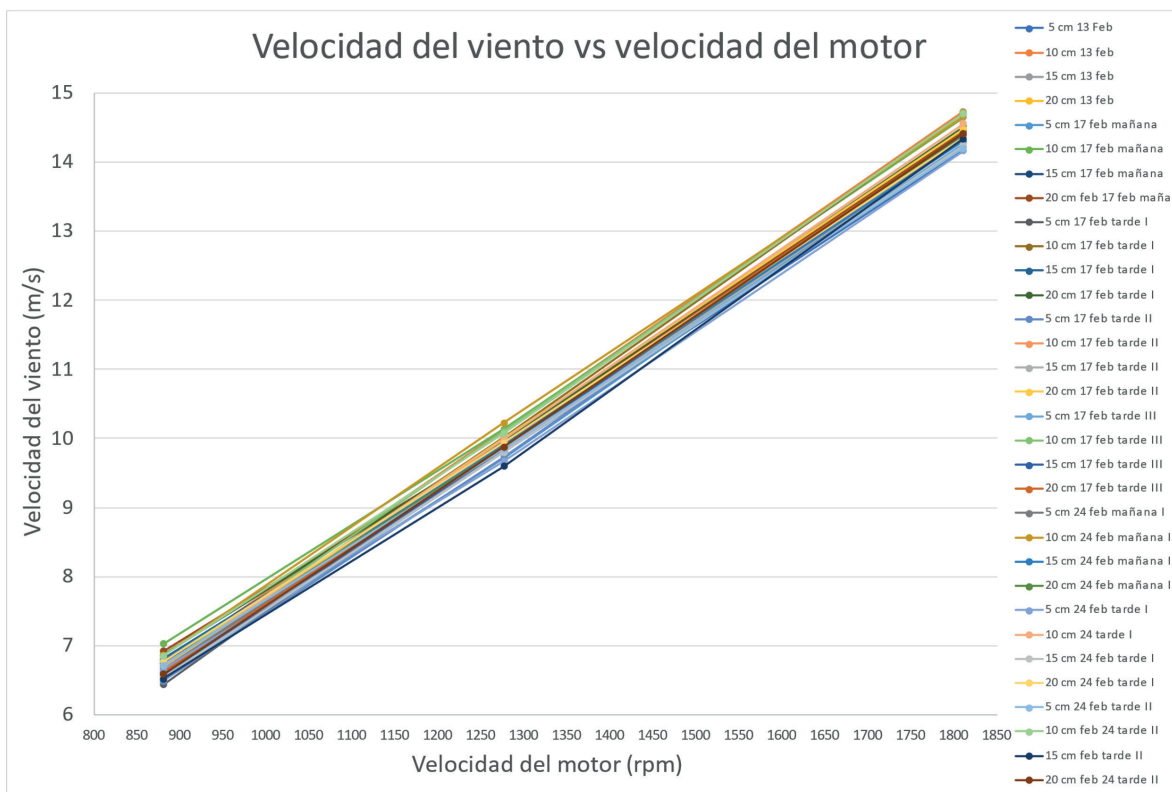


Figura 14. Curva de caracterización del túnel de viento.

Se instaló una estructura impresa en 3D que permite sostener a un tubo Pitot, marca Dwyer Instruments (ver Figura 15), en la sección de pruebas a distintas alturas, para poder tener una medición de la velocidad del viento a la cual el objeto de estudio es sometido. También se posee un anemómetro de hilo caliente Marca DIG-SENSE modelo 20250-16 el cual se puede utilizar para luego comprobar las mediciones del Pitot o utilizarse como equipo principal de medición.



Figura 15. Pitot Dwyer Instruments.

Se cuenta con un transductor de presión TecQuipment que se conecta al Pitot y a un sistema de adquisición de datos (Modelo VDAS), lo que permite registrar la velocidad del viento en una computadora con software especializado. El transductor se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Transductor de presión TecEquipment.

Control de Velocidad

Es importante tener un control de la velocidad del flujo para poder hacer análisis en distintas condiciones, teniendo así la posibilidad de operar a distintos números de Reynolds. Por lo tanto, se debe controlar la velocidad de rotación del ventilador, la cual depende del tipo de motor utilizado para el ventilador. Si el motor se trata de uno estilo sincrónico se debe implementar un variador de frecuencia para poder controlar la velocidad del motor.

En el túnel de viento del LIENE se utiliza un variador de frecuencia marca TOSHIBA, modelo VF-S15 (ver Figura 17), que se encarga de regular la velocidad del ventilador, la cual se encuentra en el rango de 7m/s a 15m/s (ver Figura 14).



Figura 17. Variador de frecuencia TOSHIBA VF-S15.

Cargas Aerodinámicas

Al interactuar el objeto de estudio con el flujo se generan múltiples cargas como la fuerza de arrastre y de sustentación. Para poder medir estas fuerzas se necesita un dispositivo o varios que midan la fuerza ejercida sobre el objeto en los distintos ejes. El dispositivo más común para estos casos es una balanza aerodinámica la cual permite la medición de estas fuerzas ya sea de forma simultánea o alterna y dependiendo de su complejidad permite la medición de los momentos.

En el túnel de viento de LIENE se puede medir sustentación y arrastre por separado, esto debido a que la balanza permite medir en una sola dirección a la vez, por lo que se debe rotar 90 grados para cambiar entre sustentación y arrastre (ver Figura 18).

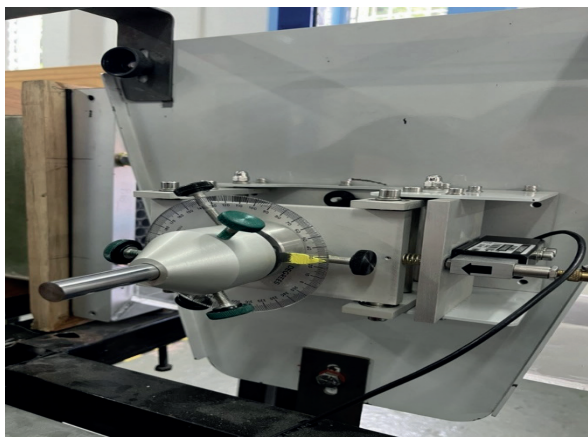


Figura 18. Balanza AF100 Tecquipment (Montaje de la balanza).

Unas barras de aluminio, que se unen por medio de un acople, se sujetan de un lado a la balanza y del otro lado ingresan a la sección de pruebas por medio de un orificio. El objeto de estudio se sujeta al extremo de la barra que se encuentra dentro de la sección de pruebas y de esta manera se somete al flujo y se puede medir la carga aerodinámica deseada.

La balanza actual marca AF100 de TecEquipment consta de dos partes (el montaje de la balanza y la unidad de visualización) y se conecta al sistema de adquisición de datos VDAS (ver Figura 19).



Figura 19. Balanza Af100 Tecequipment Unidad de visualización (izquierda) y sistema de adquisición de datos VDAS (derecha).

La balanza se encuentra montada en un pedestal y placa metálica externa a la estructura del túnel de viento para disminuir los efectos de ruido por vibraciones. El pedestal se encuentra montado al lado derecho de la sección de pruebas visto desde la tobera.

Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición es fundamental en el análisis de los datos que se toman en el túnel. En este caso se utiliza el módulo VDAS (MkII) de la compañía TecQuipment. A este módulo se le conectan las entradas de los distintos dispositivos y luego este se conecta a una computadora. Actualmente al utilizarse, se conecta el transductor de presión para medir velocidad y la balanza para medir las cargas. Para poder tomar datos se necesita del software "TecQuipment VDAS" el cual permite visualizar los datos en tiempo real y también almacenarlos, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. En la Figura 20 se muestra una imagen de la interfaz de este programa.

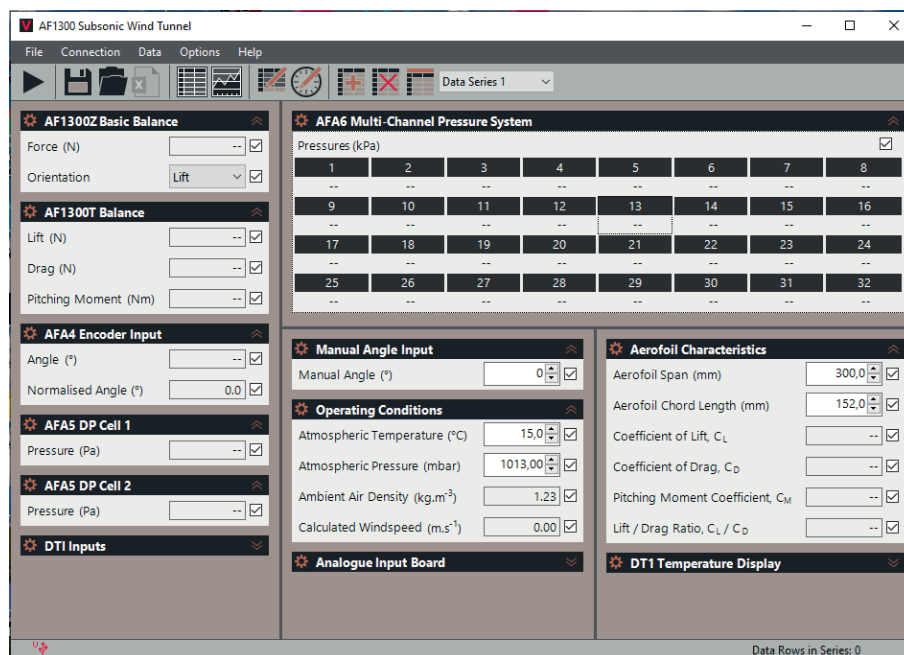


Figura 20. Interfaz gráfica del VDAS.

Conclusiones

Después de conceptualizar, construir, instrumentar y caracterizar un túnel de viento de pequeña escala, mediante la selección de equipos que obedecen a criterios técnicos y que permiten evaluar el comportamiento de modelos estructurales en condiciones controladas y realistas, es posible llegar a las siguientes conclusiones:

- Es posible construir un túnel de viento de pequeña escala, capaz de emplearse en investigación científica de modelos aerodinámicos.
- La construcción de este tipo de dispositivos permite realizar pruebas aerodinámicas en modelos de pequeña escala, en un contexto universitario.
- La construcción de un túnel de viento requiere de múltiples actores e insumos, algunas de las partes fueron fabricadas por estudiantes, otras sub contratadas (como la tobera) y otras compradas, como el variador de frecuencia, el ventilador y la instrumentación.

El diseño del túnel de viento se ha creado con la oportunidad de realizar mejoras ya sea en el equipo o en la instrumentación, así como el agregar componentes que añadan otro grado de profundidad a la investigación que se realiza, por ejemplo, la visualización del flujo alrededor de un perfil aerodinámico.

El TEC muestra un compromiso firme con la investigación, asegurando un espacio que evoluciona constantemente para abordar los desafíos cambiantes en el ámbito de la energía eólica, la aerodinámica y sus diversas aplicaciones.

Referencias

- [1] C. López, «OpenMind BBVA,» BBVA, 2008. [En línea]. Available: <https://www.bbvaopenmind.com/articulos/retos-actuales-de-la-energia/>. [Último acceso: Marzo 2022].
- [2] G. Richmond-Navarro, E. Fallas-Hernández, J.A. Padilla-Barrientos, & M. Jiménez-Ceciliano. «Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo». Revista Tecnología En Marcha 35(3), 2022. Pág. 178–194. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5711>
- [3] S. Jara-Romero y D. Millacáriz-Gonzáles, «Diseño y construcción de un túnel de viento con fines académicos para el estudio de flujos externos,» Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, 2018.
- [4] J. E. Bermeo-Vallejo, D. F. Sigüencia-Bermeo y P. I. Serpa-Medina, «Diseño y construcción de un túnel de viento para análisis aerodinámico en vehículos a escala,» Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2012.
- [5] C. A. Quispe Gonzáles, W. J. Urcuhuaranga, Esteban y J. E. Chiroque Baldera «Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades» Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2015
- [6] R.D. & B.P. Metha, «Design rules for small low-speed wind tunnels», *aero.Journal* (Royal Aeronautic Society), 1979.
- [7] C.B.J.M. Louis Cattafesa, «Fundamentals of wind-tunnel design», EEUU: John Wiley and sons Ltd, 2010.
- [8] N. Martínez-Soto, J.J. Rojas, & G. Richmond-Navarro. «Desarrollo y prueba de un sistema para sensar de manera remota la velocidad del viento». Revista Tecnología En Marcha, 35(7), 2022. Pág. 33–45. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6331>
- [9] J. Pérez Nepta. «Ventiladores tipos y características», Bogotá, Colombia, 2018.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado una herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para asistirnos en la redacción de este artículo. Esta herramienta nos ayudó a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por nosotros para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.