

Instrumentación empleada en túneles de viento subsónicos para evaluar perfiles aerodinámicos.



Instrumentation used in subsonic wind tunnels to evaluate aerodynamic profiles.

Ing. MSc. Cristian Paúl Topa Chuquitarco.¹, Ing. MSc. Paco Jovanni Vásquez Carrera.², Ing. MSc. William Armando Hidalgo Osorio.³, Ing. MSc. Nelson Jhonatan Villarroel Herrera.⁴

Recibido: 9-04-2019 / Revisado: 18-05-2019 / Aceptado: 19-06-2019/ Publicado: 05-07-2019

Abstrac.

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.615>

Wind tunnels are indispensable equipment in the development of aerodynamic experiments where controlled edge conditions are required to guarantee repeatability in each test. The data obtained in the tests carried out in wind tunnels must be extracted in an effective way so that they can be interpreted by the analyst, for this reason there is a variety of specialized instruments with which a high sensitivity in the measurements is obtained and allow to extract indispensable information already be it for the development of new products and equipment or improve the understanding of natural phenomena. The objective is aimed at identifying the different types of instrumentation used for data collection in subsonic wind tunnels. The method applied for the elaboration of this article was the bibliographic review of several authors, the same one that is composed of several stages such as: definition of the objectives, selection of bibliography, analysis of the literature and writing. After the literature review, it was identified that there are a variety of measurement instruments. Among which the most commonly used are: Static Pressure Taps, Pressure Rates, Hot Wire Velocity Probes and

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi, Ecuador, cristian.topa1307@utc.edu.ec

² Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi, Ecuador, paco.vasquez@utc.edu.ec

³ Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi, Ecuador, william.hidalgo7885@utc.edu.ec

⁴ Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi, Ecuador, nelson.villarroel3254@utc.edu.ec

Five Hole Probe. For this reason, this article will have the purpose of establishing references to know the different types of instrumentation and their primary applications in the process of extracting data when analyzing elements in a wind tunnel.

Keywords: Wind tunnel, Instrumentation, balance, scanner, anemometer.

Resumen

Los túneles de viento son equipos indispensables en el desarrollo de experimentos aerodinámicos donde se requieren obtener condiciones de borde controladas para garantizar la repetitividad en cada ensayo. Los datos obtenidos en las pruebas realizadas en túneles de viento deben ser extraídos de manera efectiva para que sean interpretados por el analista, por tal motivo existen variedad de instrumentos especializados con los cuales se logra una alta sensibilidad en las mediciones y permiten extraer información indispensable ya sea para el desarrollo de nuevos productos y equipos o mejorar el entendimiento de fenómenos naturales. El objetivo se direccionó a identificar los diferentes tipos de instrumentación empleados para la recolección de datos en túneles de viento subsónicos. El método aplicado para la elaboración de este artículo fue la revisión bibliográfica de varios autores, el mismo que se compone de varias etapas como: definición de los objetivos, selección de bibliografía, análisis de la literatura y redacción. Posterior a la revisión bibliográfica se identificó que existen variedad de instrumentos de medición. Entre los cuales los más comúnmente empleados son: transductores de fuerza para determinar fuerzas de sustentación, arrastre y momento, sensores para la toma de presión estática, tomas de presión total, sondas de velocidad de hilo caliente y sondas de cinco agujeros. Por tal motivo, este artículo tendrá como propósito establecer referencias para conocer los diferentes tipos de instrumentación y sus aplicaciones primordiales en el proceso de extracción de datos al analizar elementos en un túnel de viento.

Palabras Claves: Túnel de viento, Instrumentación, balanza, escáner, anemómetro.

Introducción.

Un túnel de viento es una herramienta científico-tecnológica para la experimentación de proyectos de gran desarrollo que brinda una forma de comprobación rigurosa, transparente de teorías científicas, elementos computacionales, y otras nuevas tecnologías.

La limitada instrumentación que existe en el Ecuador para túneles de viento subsónico de ciclo abierto es una problemática, pues cuando se requieren este tipo de implementos por lo general se requiere importarlos y los costos que representan son muy altos. Según estudios realizados el Ecuador no cuenta con el conocimiento necesario para la generación de este tipo de instrumentación y peor aún la tecnología necesaria para ello (Topa & Valencia, 2018).

Al realizar la búsqueda de la información se detectó que los principales trabajos relacionados a túneles de viento se encuentran en los países de E.E.U.U., Japón, Irán y China con varias publicaciones de un impacto significativo para el desarrollo de actividades en la sociedad.

A continuación, se detallan algunos de los casos de estudio en mención:

La predicción de las fuerzas aerodinámicas alrededor de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) es una importante para aplicaciones de aerogeneradores y están asociadas a diferentes experimentos en túneles de viento. En condiciones adecuadas y con la correcta instrumentación se ha evidenciado numerosas variables sobre el flujo de un fluido; así tenemos la velocidad, temperatura y presión, para caracterizar aerodinámicamente los objetos, mejorar los diseños y el consumo energético de los dispositivos aerodinámicos (Pouryoussefi, Mirzaei, Nazemi, Fouladi, & Doostmahmoudi, 2016).

El estudio conto de dos a cinco hojas y la forma de la sección transversal del perfil aerodinámico probado fue una NACA0021. En primer lugar, el coeficiente de potencia se midió con un medidor de torque y una balanza de seis componentes. En segundo lugar, las presiones que actúan sobre la superficie de las palas del rotor se midieron durante la rotación por dispositivos de presión multipuerto. Luego, las evoluciones del coeficiente normal, el coeficiente tangencial y la relación de elevación arrastre CL / CD , que se obtuvieron de las distribuciones de presión, fueron discutidos. Finalmente, los coeficientes de potencia fueron graficados. Además, fueron simuladas las distribuciones de presión para ser comparados con los datos del experimento del medidor de torque y la balanza de seis componentes. Los resultados mostraron que la diferencia de presión disminuyó sustancialmente con el aumento de la solidez. Además, los valores de la balanza de seis componentes y el medidor de par mostraron valores más pequeños que los simulados por distribuciones de presión. En otras palabras, estos resultados proporcionaron datos teóricos (Takao y Yusunari, 2016).

Al estudiar un perfil aerodinámico en un túnel de viento se observó que la acumulación de hielo en las cuchillas provoca la formación de burbujas de flujo en el lado de presión, aguas abajo del borde de ataque. Al aumentar el ángulo de ataque de 20° a 35° , el coeficiente de presión aumenta dentro de la región de la burbuja, constantemente. Además, para las cuchillas con hielo los puntos de difusión en el lado de succión se acercan al borde posterior. Además, se encuentra que al variar el ángulo de ataque hasta 35° , la acumulación de hielo no tiene un efecto significativo en el coeficiente de elevación, pero hay incremento del coeficiente de resistencia en comparación con las cuchillas limpias. Más a 40° y 45° , aumentando el flujo, efectos de interferencia entre las cuchillas, las cuchillas heladas experimentan mayor elevación y menor resistencia en comparación con las limpias. Para el caso mencionado la instrumentación utilizada fue transductores de presión en la marca (Honeywell-DC005NDC4), tarjeta que adquirió datos en la marca National Instruments (NI) PCI-6224, placa de A / D de 16 bits con 32 canales de entrada analógicos (Ramezanizadeh, 2013).

La prueba en un túnel de viento es fundamental para entender respuestas aerodinámicas y el rendimiento de vehículos espaciales / viales durante el proceso de diseño, la instrumentación es importante para la medición y control de las variables que opera el túnel de viento. Las pruebas suelen incluir la medición y control de la velocidad del viento, medición de fuerza estática y dinámica, presión, medición del perfil; y control de posición y movimiento para orientación del modelo respecto a la dirección del viento. Estas aplicaciones son repetitivas y consumen mucho tiempo, por lo tanto, necesita ser automatizado.

El sistema implementado permite mediciones aerodinámicas para mejorar la eficiencia sin la intervención. Lo más importante, alivia al operador de la responsabilidad habitual de controlar manualmente la posición y orientación del modelo, así como la necesidad de establecer manualmente la velocidad del viento deseada para la prueba. El sistema ha sido implementado en un túnel de viento nacional, que se instaló utilizando instrumentación virtual y arquitectura PXI que mejora la productividad y reduce el costo a través de una fácil integración basada en Software LabVIEW y PXI Hardware modular. Sin embargo, el sistema presentado en este documento ha sido configurado para una prueba automatizada en el túnel de viento, pero también se puede configurar fácilmente para realizar varias funciones de prueba y medición automáticamente para aplicaciones aeroespacial / militar, biomédica, control de procesos, y robótica (Chaturi, 2008).

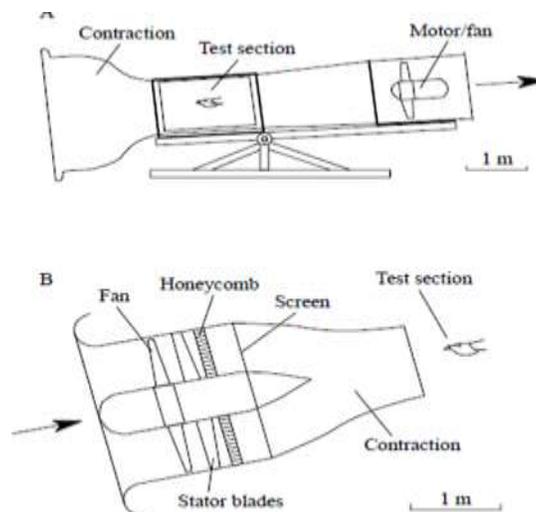
Túnel de viento

El túnel de viento es una instalación de prueba aerodinámica utilizada para estudiar el viento, los patrones de flujo alrededor de los cuerpos y medir las fuerzas aerodinámicas entre ellos. Un túnel de viento típico como se muestra en la Fig. 1, consiste en una sección de prueba (TS) en la que el modelo es montado, un cono de contracción, antes de la sección de prueba, y un difusor a la salida del túnel de viento. Un ventilador después del Difusor crea el viento (Chaturi, 2008).

Clasificación de túnel de viento

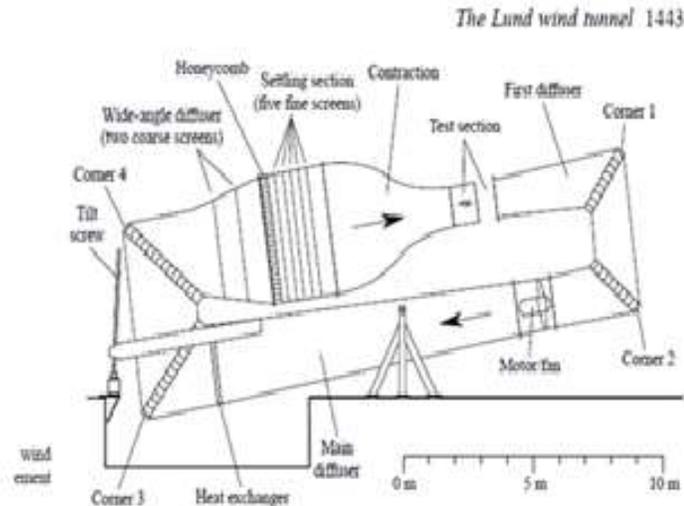
La mayoría de los túneles de viento pequeños y de baja velocidad son de circuito abierto diseño, en el que el aire se aspira en un extremo de la máquina y soplado hacia fuera en el otro. Hay dos tipos de circuito abierto: Los túneles de viento, el tipo de succión y el tipo de soplador. El principio de funcionamiento del tipo de succión se ilustra en la Figura 1. La relación de contracción de este túnel de viento es de aproximadamente 4 (relación de diámetro 2), que significa que la velocidad del viento aumenta en un factor de 4 a medida que el aire pasa desde la entrada de la contracción hasta la entrada de la sección de prueba. Esta aceleración es producida por una presión, gradiente en la dirección del flujo. Como el aire está a temperatura ambiente. La presión en la entrada a la contracción, debe estar por debajo del ambiente en la sección de prueba, de ahí el término "succión".

Figura 1. Tipos de túneles de viento de circuito abierto.



Fuente: (Pennycuick, Alerstam, & Hedenstrom, 1997)

Figura 2. Túnel de viento de circuito cerrado



Fuente: (Pennycuick, Alerstam, & Hedenstrom, 1997)

El otro tipo de túnel de viento es de diseño de circuito cerrado hacia arriba que se muestra esquemáticamente en la Fig. 2. El diseño fue adaptado a un túnel de viento de baja turbulencia existente en el Departamento de Ingeniería aeroespacial en la Universidad de Bristol (Pennycuick, Alerstam, y Hedenstrom, 1997)

Principales partes del túnel de viento

Un túnel de viento subsónico de ciclo abierto está constituido de:

Cono de contracción

La contracción une las zonas de velocidad baja (cámara estabilizadora) y velocidad alta (sección de pruebas) en un túnel de viento. La finalidad de la contracción es incrementar la velocidad y reducir las fluctuaciones de velocidad.

Mallas

Es un panel con mallas que se instala en la entrada del cono de contracción para uniformizar el flujo.

La característica principal de las mallas es el coeficiente de caída de presión (K) que depende de la porosidad β y el número de Reynolds (Re) (Tolentino, Toledo, Tolentino, y Sánchez, 2004).

Fan

Un ventilador de chorro, como un generador de viento que puede crear velocidades del viento en el rango de 0,5 – 22 m/s. (Sirjani, Sameni, Moosavi, Mahmoodabadi, y Laurent, 2018)

Instrumentación

La instrumentación son sistemas de medición de monitoreo múltiples para recopilar datos. Entre los sistemas de medición más empleados en túneles de viento subsónicos se encontró:

Balanza TecQuipment's AFA3.

Una balanza instalada en el interior de una sección de pruebas que determino las fuerzas que actúan en un modelo; está constituida de células de carga que miden la tensión y la compresión encontrando así la sustentación y la resistencia aerodinámica (Celis y Ubbens, 2016).

La balanza mostrada en la figura 3, puede girar 90°; permitiendo medir la fuerza de arrastre y elevación en la misma práctica.

Figura 3. Balanza TecQuipment's AFA3.

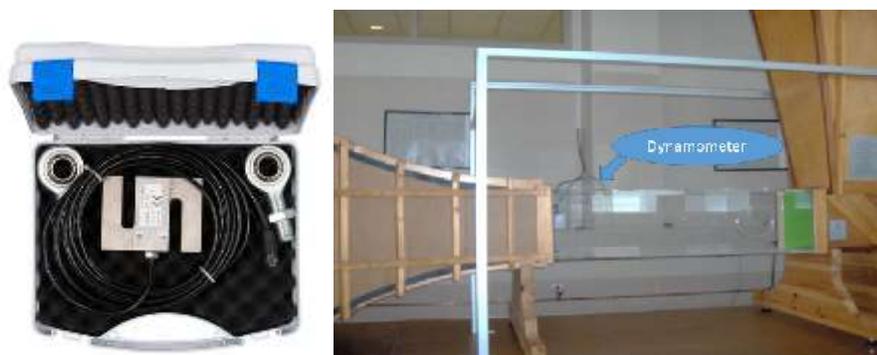


Fuente: (TECQUIPMENT ACADEMIA, s.f.)

Dinamómetro PCE – FB50.

La medición directa del par en el eje del rotor se realizó con un dinamómetro PCE – FB50. El PCE-FB 50 presentado en la figura 4, tiene un rango de medición entre 0 y 50 N con una resolución de 0,01 N y una precisión de +/- 0,01N. (Mercado, Rubio, y Guerrero, 2018)

Figura 4. Dinamómetro PCE – FB50



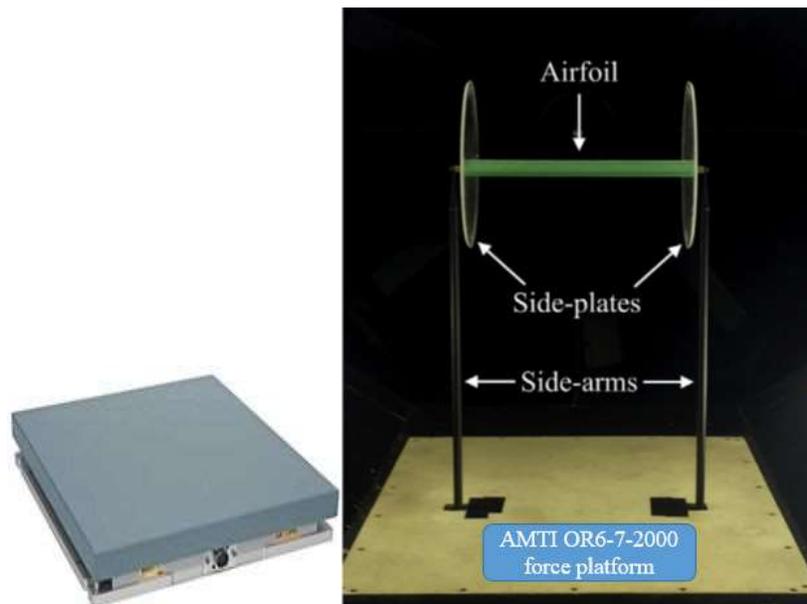
Fuente: (Mercado, Rubio, & Guerrero, 2018):

AMTI OR6-7-2000 force platform

Para medir la fuerza aerodinámica de elevación y resistencia, se utilizó una plataforma de fuerzas AMTI OR6-7-2000 de Advanced Mechanical Technology Inc., montado en la base de la sección de pruebas. Los datos fueron recolectados en un túnel de viento con una variación de velocidad de 10 a 60 m/s, por un período de 30 s con una Frecuencia de muestreo de 37 Hz obtenida de una minuciosa incertidumbre. (Jawahar, Ai, & Azarpeyvand, 2018)

En la figura 5 se puede apreciar en equipo instalado en la base de la sección de pruebas.

Figura 5. AMTI OR6-7-2000

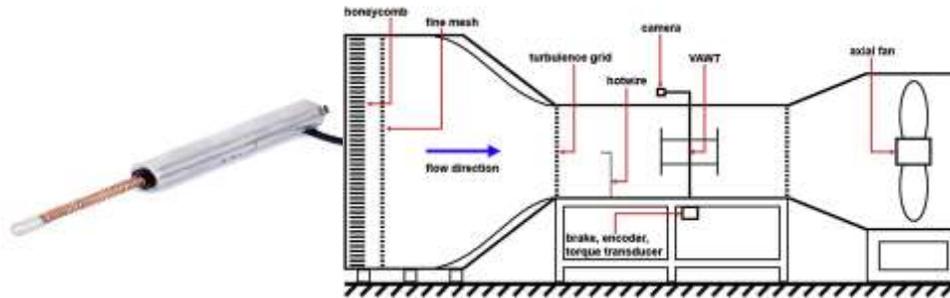


Fuente: (Jawahar, Ai, & Azarpeyvand, 2018)

Sangamo DC miniature displacement transducer (model: DFG/2.5)

El transductor de desplazamiento en miniatura (modelo DFG / 2.5), figura 6; midió el desplazamiento lineal del núcleo del transductor unido a un punto en la balanza con longitud de brazo de palanca conocida. El voltaje del transductor se calibra cargando el sistema con pesos estándar estáticos (Eboibi, Danao, y Howell, 2016)

Figura 6. Miniature displacement transducer

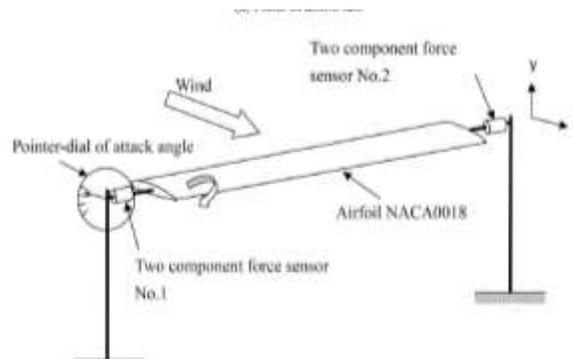


Fuente: (Eboibi, Danao, & Howell, 2016)

Two-component force sensor

Los sensores de fuerza de dos componentes, determinaron las fuerzas en dos direcciones por medidores de tensión, un ejemplo del uso de estos sensores se muestra en la figura 7. Un extremo del sensor de fuerza con cables eléctricos fue colocado dentro del brazo de soporte y conectados al sistema de adquisición de datos (Peng, Xu, Zhan, y Shum, 2018)

Figura 7. Ubicación de los sensores de fuerza



Fuente: (Peng, Xu, Zhan, & Shum, 2018)

MicroDAQ pressure scanner

El escáner de la figura 8, tuvo una precisión de 0,05% con 32 tomas de presión. Óptimo para frecuencias de muestreo de 500 Hz (Jawahar, Ai, y Azarpeyvand, 2018).

Figura 8. Escáner de presión inteligente MicroDAQ

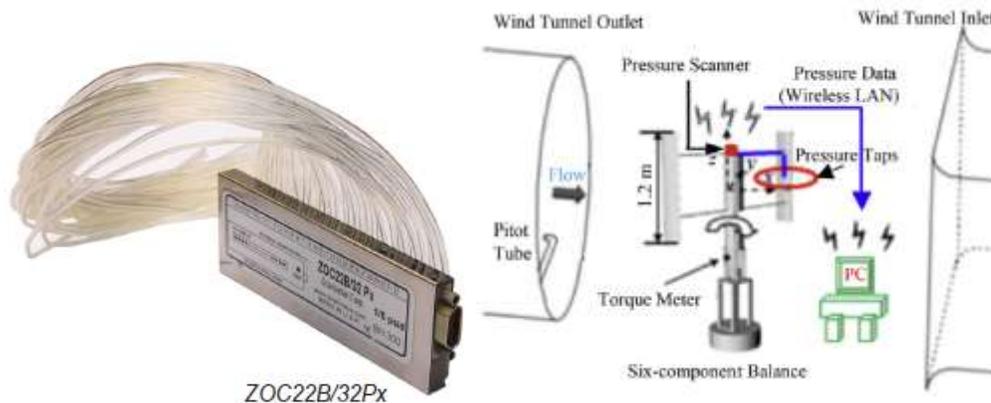


Fuente: (Jawahar, Ai, & Azarpeyvand, 2018)

Escáner de presión

Sirvió para la medición de la presión estática o dinámica dependiendo de la aplicación. En la figura 9., se tiene un escáner de presión ZOC22B en la marca Scanivalve, conectado en un perfil aerodinámico.

Figura 9. Escáner de presión ZOC 22B/32PX



Fuente: (Takao & Yusunari, 2016)

El módulo de escaneo de presión electrónico Modelo ZOC22B es un escáner de presión múltiple extremadamente compacto que acepta hasta 64 entradas neumáticas y las convierte en señales electrónicas compatibles con la computadora. Cada módulo ZOC22B incorpora 32 sensores de presión de silicio individuales, válvulas de calibración, un multiplexor de alta velocidad (20 kHz) y un amplificador de instrumentación (Takao y Yusunari, 2016).

DC005NDC4 pressure transducers

Es un sensor piezoresistivo, fue incorporado a través de mangueras en un perfil aerodinámico el que se puede observar en la figura 10., determino la presión diferencial, manométrica, a un rango de 0 a 5 inH₂O, con un tiempo de repuesta 1 ms, frecuencia 1000 Hz, sensibilidad 0,8 V/inH₂O, la tensión de alimentación 5 VDC, tensión de salida vario de 1 a 6 VDC con una resolución de 0.03% (Pouryoussefi S. , Mirzaei, Nazemi, Fouladi, y Doostmahmoudi, 2016)

Figura 10. Transducción de presión DC005NDC4.

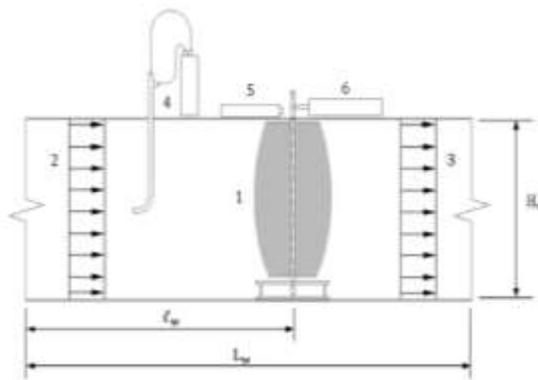


Fuente: (Pouryoussefi S. , Mirzaei, Nazemi, Fouladi, & Doostmahmoudi, 2016)

Manómetro Testo 512

Para determinar la velocidad del viento se empleó un manómetro Testo 512, que fue conectado mediante un tubo pitot en la sección de pruebas (Mercado, Rubio, y Guerrero, 2018).

Figura 11. Conexión tubo pitot y manómetro número 4.



Fuente: (Mercado, Rubio, & Guerrero, 2018)

Furness Controls FCO510 Micro-manometer

Furness mostrado en la figura 12, es un instrumento de medición de precisión basado en microprocesador para presiones diferenciales de rango ultra bajo. Una instalación de registro de datos permite el almacenamiento de mediciones en la memoria.

Los resultados se pueden descargar a una computadora o impresora, utilizando la salida RS232C. Incluye un estuche de aluminio, un tubo de silicona de doble núcleo y un tubo estático pitot de 8 pulgadas de largo.

Figura 12. Micro manómetro FCO510



Fuente: (Eboibi, Danao, & Howell, 2016)

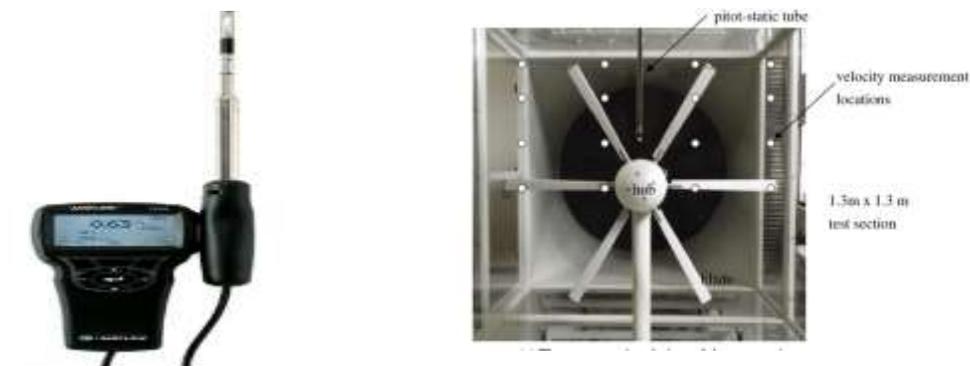
El equipo empleado para este proyecto tuvo una precisión del 0,25% entre el 10% (20 Pa) y 100% (200 Pa) de la escala de lectura. Para poder realizar una toma de presión se conectó una sonda pito estática. (Eboibi, Danao, y Howell, 2016)

Anemómetro TSI TA 440

Dispositivo para determinar la velocidad del aire en la corriente de flujo.

Dentro de los anemómetros utilizados en experimentos de túneles de viento tenemos el anemómetro de hilo caliente TSI TA 440.

Figura 13. Termo anemómetro TSI Airflow TA 440



Fuente: (Jeong, Lee, & Kwon, 2018)

El Termo anemómetro mostrado en la figura 13. Permite determinar aparte de la variable de velocidad otras variables como temperatura, presión, caudal, humedad relativa, punto de rocío (Jeong, Lee, y Kwon, 2018).

Digital Photo Tachometer model RM-1501

Para poder evaluar una turbina es necesario medir la velocidad de la turbina, por lo tanto, se utilizó un modelo de fotómetro digital RM 1501 visualizado en la figura 14, el cual posee una resolución de +/-1% (Mercado, Rubio, y Guerrero, 2018)

Figura 14. Digital Photo Tachometer model RM-1501.



Fuente: (Mercado, Rubio, & Guerrero, 2018)

Vane anemometer

El anemómetro de paleta es un instrumento, que se utiliza para medir la velocidad del viento, también puede medir la dirección del viento. El anemómetro mostrado en la figura 15 presenta una precisión de $\pm 1,5\%$ (El-Samanoudy, Ghorab, y Youssef, 2010).

Figura 15. Anemómetro de paletas.



Fuente: (El-Samanoudy, Ghorab, & Youssef, 2010)

The Dantec 55P16 single hotwire

Es una sonda para medir la velocidad de flujo constante. Las sondas de alambre caliente se calibraron usando un Dantec 54H10. La figura 16; presenta el Calibrador de hilo caliente en modo de dos puntos. Los datos fueron recolectados para un período de tiempo de 20 s con una frecuencia de muestreo de 40 kHz (Jawahar, Ai, y Azarpeyvand, 2018).

Figura 16. Calibrador de hilos calientes



Fuente: (Jawahar, Ai, & Azarpeyvand, 2018)

Hotwire anemometer

El anemómetro Hotwire de temperatura (modelo de sonda: Dantec Tipo 55 P16), figura 17; se colocó en un túnel de viento a 0,6 m del fondo de la pared, 0,5 m desde la pared derecha y 0,4 m corriente abajo de la prueba sección de entrada. Se calibró utilizando un Furness Controls FCO510 (Eboibi, Danao, y Howell, 2016).

Figura 17. Anemómetro Hotwire

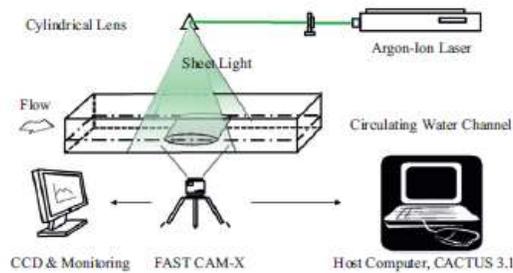


Fuente: (Eboibi, Danao, & Howell, 2016)

PIV system equipment

Es un método óptico como se observa en la figura 18, de gran utilidad, utilizado para medir velocidades y propiedades relacionadas en flujos de fluidos.

Figura 18. Disposición esquemática de un sistema PIV.



Fuente: (Gim & Lee, 2013)

El sistema PIV consta de un optical láser LED y una cámara digital de alta velocidad FASTCAM-X 1280PCI. La cámara digital de la figura 19; provee una resolución de 1280 x1024 pixeles y velocidad de 500 fps (imágenes por segundo) (Gim & Lee, 2013).

Figura 19. Cámara de alta velocidad



Fuente: (Gim & Lee, 2013)

Metodología

Se empleó la revisión bibliográfica (documental) que se compone de las siguientes fases: definir los objetivos que se trata de establecer parámetros de alcanza para el desarrollo de la investigación, se seleccionó la literatura acorde al tema de investigación de bases de datos como: Scielo, Dialnet, Scopux y Elsevier, para ello se empleó mapas mentales para encaminar lógica en el desarrollo. Delimitado la literatura de los 7 años anteriores que arrojo lo siguiente: artículos publicados en el año 2013(2), 2016(6), y 2018(6), los mismos que perteneces a estudios a nivel mundial.

Posterior se analizó la literatura identificando los antecedentes investigativos y la problemática para valorar la información y contrastar ello, se hizo mediante evaluación de los contenidos de los artículos científicos considerando la importancia y trascendencia, con lo cual se descartó información que no era relevante y que no cumplía con las características deseables del estudio. Luego se procedió a la elaboración y escritura del artículo de revisión respetando la estructura propuesta por la revista científica.

Resultados y Discusión

Existe una variedad de instrumentos empleados en túneles de viento subsónicos ya sean de ciclo abierto o cerrado, los cuales fueron resumidos en la tabla 1; en función de las variables de fuerza, velocidad y presión, porque a través de estas podemos determinar parámetros y realizar el análisis del rendimiento aerodinámico de perfiles.

Tabla 1. Instrumentación para túnel de viento.

VARIABLE	EQUIPO	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS	PRECIO [USD]
Fuerza	Balanza TecEquipment's AFA3	Mide el momento de elevación rozamiento y lanzamiento	Capacidad: Sustentación 100N, arrastre 50N momento de lanzamiento 2,5N	10599,46
	Dinamómetro PCE – FB50	Mediciones de tracción y compresión	Rango de 0 a 50N resolución de 0,01N, precisión +/- 0,01 N	1850
	AMTI OR6-7-2000 force platform	Sensor de precisión de fuerza y momento	De 4,45 kN a 8,889 KN, precisión de medición +/- 0,25% de la carga aplicada	1000
Velocidad	Hilo caliente TSI TA 440	Velocidad, temperatura y humedad	Rango de 0 a 30 m/s resolución 0,01 m/s, precisión 0,015 m/s	1595,57
	The Dantec 55P16 single hotwire	Velocidad en flujos con turbulencia moderada	Rango: 0,05 a 500 m/s	357,9
	Van anemometer	Velocidad en flujos con turbulencia moderada	Rango de 0,3 a 20 m/s resolución 0,01 m/s	
	Digital Anemometer AM-4201	Multifunciones para el flujo de aire, medición: m / s, km / h, pies / min, nudos	Rango: 0.4-30.0 m/s 0.1 m/s ± (2 % + 1 d). 1.4-108.0 km/h 0.1 km/h ± (2 % + 3 d).	8 400,67

Presión	MicroDAQ pressure scanner	El MicroDAQ es una solución de caja única que proporciona una unidad de escaneo de presión multipunto en miniatura que emite datos de la unidad de ingeniería a través de Ethernet y CAN.	Compatible con todos los escáneres de presión PSI de 32 y 64 canales. Hasta un 0,05% de salida de precisión FS. Completo con la marca de tiempo IEEE 1588 PTPV2. Hasta 2Khz por frecuencia de medición de canal.	
	ZOC22B	Módulo de presión electrónica compacto	Tiene 64 entradas neumáticas. 10 a 20 inH2O, exactitud de +/-15% F.S. y resolución infinita	14 141,25
	DC005NDC4 pressure transducers	Es un sensor piezoresistivo, mide la presión diferencial, manométrica o absoluta	Rango de 0 a 5 inH2O, tiempo de repuesta 1 ms, frecuencia 1000 Hz, sensibilidad 0,8 V/inH2O, tensión de alimentación 3,3 o 5 VDC, tensión de salida de 1 a 6 VDC. Resolución 0.03%	1400

En la vida real todo se basa según los principios de la termodinámica; uno de ellos menciona que la energía no se crea ni se destruye solamente se transforma por ende del viento se puede obtener la energía cinética que está en función de la masa y la velocidad.

La energía relaciona la fuerza y la presión por ende se realizó una selección de la instrumentación de túneles de viento subsónicos de ciclo abierto o cerrado. Obteniendo así varios instrumentos de medición, pero clasificados según estas variables.

En la variable de fuerza se han seleccionado tres sistemas de instrumentación desde lo más complejo hasta lo más simple; el primero por su avance tecnológico permite la medición de tres tipos de fuerzas: sustentación, resistencia y momento, el segundo sistema determina dos fuerzas: tracción y compresión y el tercero una fuerza ya sea de sustentación o compresión por ende existe una gran diferencia de precios entre el primero y el tercero.

La variable de velocidad también ha sido analizada comparando tres instrumentos llamados anemómetros. Entre el primero y el tercero existe el mismo rango de medición de la velocidad

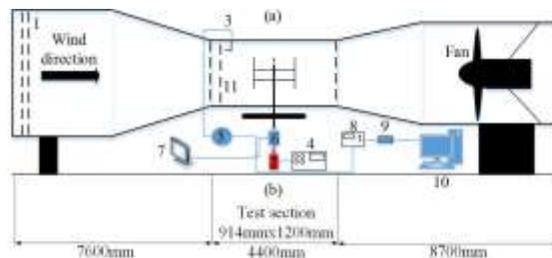
en el sistema internacional 0 a 30 m/s. Pero el tercero es 7 veces más costoso puesto a que el Digital Anemometer AM-4201 permite también la medición en otros sistemas de medición como el Sistema Ingles.

La tercera variable y la más importante puesto que esta permite la medición real de la presión estática, dinámica y con ello se puede obtener coeficiente de presiones en las superficies de los cuerpos en estudio. Entre el primero y el segundo existe solo una diferencia de alrededor de 1000 USD y esto es porque los dos presentan la facilidad de tomar hasta 64 puntos de medición.

En cambio, el primero si se utilizan con 64 sensores el costo será de 3200 USD, pero a diferencia de los otro dos este no posee un sistema de conversión de la señal física a eléctrica.

Se sintetizan las tres variables descritas en la figura 20.

Figura 20. Instrumentación túnel de viento subsónico de ciclo abierto.



Conclusiones

- Se determinó óptimos sistemas de instrumentación para túneles de viento; los cuales se seleccionan de acuerdo a los parámetros velocidad, presión libre del flujo, dimensiones de la sección de prueba del túnel de viento y costos. Además, se ha encontrado que según los parámetros y el costo es viable la implementación de uno de estos sistemas de instrumentación presentados, el mismo que puede ser adaptado para el análisis de otros túneles de viento.
- Puesto que los sistemas de instrumentación determinan las variables de velocidad, presión, temperatura y humedad ya sea de la corriente de aire o del objeto en estudio, se resumen en sensores para la toma de presión estática (Static Pressure Taps), tasas de presión total (Total Pressure Rates), sondas de velocidad de hilo caliente (Hot Wire Velocity Probes) y sondas de cinco agujeros (Five Hole Probe).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Celis, B., & Ubbens, H. (2016). Design and construction of an open-circuit wind tunnel with specific measurement equipment for cycling. *ScienceDirect*, 98-103.
- Chaturi, S. (2008). Implementation of a LabVIEW-Based Automated Wind Tunnel Instrumentation System. *Indian Institute of Technology Kanpur*, 1-6.
- Eboibi, O., Danao, L., & Howell, R. (2016). Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low Reynolds numbers. *Renewable Energy*, 474-483.
- El-Samanoudy, M., Ghorab, A., & Youssef, S. (2010). Effect of some design parameters on the performance of a Giromill vertical axis wind turbine. *Ain Shams Engineering Journal*, 85-95.
- Gim, O.-S., & Lee, G.-W. (2013). Flow characteristics and tip vortex formation around a NACA0018 foil with an endplate. *Ocean Engineering*, 28-38.
- Jawahar, H., Ai, Q., & Azarpeyvand, M. (2018). Experimental and numerical investigation of aerodynamic performance for airfoils with morphed trailing edges. *Renewable Energy*, 355-367.
- Jeong, H., Lee, S., & Kwon, S.-D. (2018). Blockage corrections for wind tunnel tests conducted on a Darrieus wind turbine. *ScienceDirect*, 229-239.
- Mercado, J., Rubio, M., & Guerrero, F. (2018). A numerical and experimental study of a new Savonius wind rotor adaptation based on product design requirements. *Energy Conversion and Management*, 210 - 234.
- Peng, Y.-X., Xu, Y.-L., Zhan, S., & Shum, K.-M. (2018). High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Aerodynamic force measurements. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 34-48.
- Pennycuik, C., Alerstam, T., & Hedenstrom, A. (1997). A new low-turbulence wind tunnel for bird flight experiments at lund University, sweden. *The Journal of Experimental Biology*, 1441-1449.
- Pouryoussefi, S., Mirzaei, M., Nazemi, M., Fouladi, M., & Doostmahmoudi, A. (2016). Experimental study of ice accretion effects on aerodynamic performance of an NACA 23012 airfoil. *Chinese Journal of Aeronautics*, 585-595.
- Pouryoussefi, S., Mirzaei, M., Nazemi, M., Mojtaba, F., & Alireza, D. (2016). Experimental study of the effects of ice accumulation on the aerodynamic performance of a NACA 23012. *Revista China de Aeronáutica*, 587.
- Pouryoussefi, S., Mirzaei, M., Nazemi, M.-M., Fouladi, M., & Doostmahmoudi, A. (2016). Experimental study of ice accretion effects on aerodynamic performance of an NACA 23012 airfoil. *Chinese Society of Aeronautics and Astronautics & Beihang University*, 585-595.
- Ramezanizadeh, P. (2013). Experimental Investigation on the Ice Accretion Effects of Airplane Compressor Cascade of Stator Blades on the Aerodynamic Coefficients. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, VI(2), 167-175.
- Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A., Mahmoodabadi, M., & Laurent, B. (2018). Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Goederma*, 69-80.

- Takao, Q., & Yusunari, J. (2016). Effect of solidity on aerodynamic forces around straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel experiments (depending on number of blades). *Renewable Energy*, 928-939.
- Tolentino, R., Toledo, M., Tolentino, G., & Sánchez, F. (2004). Modificaciones al túnel de viento del LABINTHAP para mediciones de velocidad de aire desde 5 m/s hasta 30 m/s. 1-6.
- Topa, C., & Valencia, E. (2018). Implementation of a Low-Cost Instrumentation for an Open Cycle Wind Tunnel to Evaluate Pressure Coefficient. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*.
- Rahmatalla, S. F., y Swan, C. C. (2004). A q4/q4 continuum structural topology optimization implementation. *Structural and multidisciplinary optimization*, 27(1), 130-135.
- Ruiz, V., Forero, J., y Bohorquez, C. (2014). Optimización topológica de un semirremolque tipo plataforma. *Revista científica: ciencia, ingeniería y educación científica*, 57-60.
- Uarac, P., Cendoya, P., & Sanchueza, J. (2015). Optimización topológica bidireccional con esquema de penalización de material y restricciones de desplazamiento. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 79-80.
- Wang, S., Sturler, E., y Paulino, G. (2010). Dynamic adaptive mesh refinement for topology optimization. Arxiv preprint arxiv: 1009.4975.

PARA CITAR EL ARTÍCULO INDEXADO.

Topa Chuquitarco, C., Vásquez Carrera, P., Hidalgo Osorio, W., & Villarroel Herrera, N. (2019). Instrumentación empleada en túneles de viento subsónicos para evaluar perfiles aerodinámicos. *Ciencia Digital*, 3(3), 98-118. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.615>



El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.

El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.

