

VISUALIZACIÓN DE FLUJO EN TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO ABIERTO

FLOW VISUALIZATION IN AN OPEN SUBSONIC WIND TUNNEL

PONZONI, Lucio¹

MONTENEGRO, Sara²

GANIELE, María Julieta³

ATTORRESI, Luciano⁴

CACCIA, Matías⁵

Ponzoni, L., Montenegro, S., Ganiele, M. J., Attorresi, L. y Caccia, M.(2024). Visualización de flujo en túnel de viento subsónico abierto. *Revista INNOVA, Revista argentina de Ciencia y Tecnología*, 14.

RESUMEN

El túnel de viento es comúnmente utilizado para investigar la aerodinámica de modelos montados en un eje, pero también sirve como herramienta para demostrar principios claves de la mecánica de fluidos aplicados al diseño de ingeniería. La visualización de líneas de corriente mediante humo es una técnica crucial para comprender campos de flujo complejos en este entorno, revelando detalles como la separación de la capa límite, la formación de vórtices y la extensión de la estela.

Este trabajo presenta la experiencia de los autores en el desarrollo, montaje y puesta a punto de un sistema de visualización de líneas de corriente, aportando a la instrumentación de un túnel de viento subsónico-abierto ubicado en el Centro Atómico Constituyentes.

Para este proyecto, se configuró un sistema de visualización a partir de un pulmón, con el objetivo de obtener líneas continuas a partir de la inyección de humo. La salida del sistema dentro del túnel se realizó en forma de rastrillo y se colocó una luz estroboscópica desarrollada por el grupo para complementar el sistema y mejorar la

¹ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina; Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina; Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Argentina. / investigacionaeromat@gmail.com

² Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina; Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Argentina / saramontenegro@cnea.gob.ar

³ Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina / mariajulietaganiele@cnea.gob.ar

⁴ Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina; Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Argentina / lucianoattorresi@cnea.gob.ar

⁵ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina / mcaccia@untref.edu.ar

visualización. El sistema se probó con distintos modelos de aerogeneradores Savonius y perfiles alares de aerogeneradores de eje horizontal impresos en 3D con distintos materiales.

PALABRAS CLAVE

Aerogeneradores / Túnel de viento / visualización de líneas de corriente

ABSTRACT

The wind tunnel is a frequently used tool for studying the aerodynamics of shaft-mounted models. It also illustrates fundamental principles of fluid mechanics applied to engineering design. An important technique for understanding complex flow fields in this environment is the visualization of streamlines. It reveals details such as the flow separation - boundary layer separation, the formation of vortices and the wake pattern.

This paper describes the experience of the authors in the design and testing of a smoke rake system for the instrumentation of an open subsonic wind tunnel at the Centro Atómico Constituyentes.

The visualization system was configured to obtain continuous lines from smoke injection. A stroboscopic light was developed by the group to improve visibility, and the exit of the system inside the tunnel was designed as a rake. The system was tested with different models of Savonius wind turbines and 3D-printed horizontal-axis turbine wing profiles in different materials.

KEY WORDS

Wind turbines / wind tunnel / smoke rake system

Contexto

Desde la Gerencia de Materiales de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), se ha conformado el grupo de investigación AeroMat. Este grupo trabaja en la investigación y desarrollo de aerogeneradores de baja potencia, impresión 3D y nuevos materiales. En este contexto, hemos instalado un túnel de viento subsónico abierto para el estudio de aerogeneradores de baja potencia.

Introducción

La energía eólica es una de las tecnologías con mayor desarrollo y avances de las fuentes de energías renovables a pequeña y gran escala, y representa el 67% de la potencia instalada de fuentes renovables en Argentina (Secretaría de Energía de la Nación, 2022).

La energía eólica de pequeña y mediana escala ofrece una alternativa frente a los aerogeneradores de gran potencia, y su utilización está aumentando en el mercado debido a que son adecuados para producir energía no solo a nivel doméstico, sino también en pequeñas comunidades aisladas que no tienen acceso a la red de distribución de energía eléctrica (conexión off-grid). Asimismo, los aerogeneradores de baja potencia son más sencillos de instalar, requieren poco mantenimiento y sus componentes están fabricados para que presenten una gran durabilidad. Sin embargo no dejan de ser dispositivos complejos por lo que deben de tener una ingeniería de diseño para proporcionar la máxima captación de energía del viento junto con una resistencia adecuada del material a las diferentes cargas y esfuerzos que pueda estar sometida (Ramón y Giovanni, 2016).

La simulación de elementos aerodinámicos mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) y los túneles de viento abaratan y acortan los tiempos requeridos para diseñar aerogeneradores (Ramón y Giovanni, 2016). La simulación CFD permite visualizar, calcular y determinar a priori, cuál será el comportamiento aerodinámico del perfil, mediante el análisis de la dinámica del fluido.

Asimismo, las tecnologías de impresión 3D, complementan todos estos procesos permitiendo pasar de un modelo asistido por computadora (CAD) a uno físico, y realizar así las pruebas mediante el uso de túneles de viento. El uso del túnel del viento no sólo permite realizar la validación de las simulaciones de los perfiles, mediante la verificación de los efectos de la corriente del aire que se generan, sino también demostrar la eficiencia y especificación aerodinámica de los modelos a escala.

La visualización de líneas de corriente mediante humo es una técnica útil para comprender cualitativamente campos de flujo complejos, particularmente en un entorno de túnel de viento (Ramírez, s.f.). Para llevar a cabo esta técnica existen diversos métodos y opciones disponibles. Uno de ellos es la técnica de alambre pretensado, que utiliza un calentamiento resistivo para generar vapor de agua mediante un evaporador piezoeléctrico. Otra opción es utilizar un rastrillo de humo,

que consiste en una hilera de tubos por los que se fuerza la salida de humo (Trinder & Jabbal, 2013)(Beck, Anderson & Hosni, 2008).

Por lo que, este trabajo presenta la experiencia de los autores en el desarrollo, montaje y puesta a punto de un sistema de visualización de líneas de corriente, aportando a la instrumentación de un túnel de viento subsónico-abierto ubicado en el Centro Atómico Constituyentes. Este túnel fue instalado como parte del trabajo del grupo AeroMat perteneciente al Laboratorio Perfil Alar de la Gerencia de Materiales de CNEA, que trabaja en la investigación y desarrollo de aerogeneradores de baja potencia, impresión 3D y nuevos materiales.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo fue el diseño y desarrollo de un sistema de visualización de líneas de corriente del tipo rastrillo de humo para un túnel de viento abierto y subsónico, con la finalidad de poder analizar los efectos del desprendimiento de la capa límite, ancho de estela, y turbulencias generadas en aerogeneradores de baja potencia.

Metodología

El túnel de viento subsónico-abierto empleado para la visualización de humo fue construido por el grupo de investigación AeroMat. El mismo posee un rango de velocidad de 1 a 15 m/s y una sección de prueba desmontable circular de 180 mm de diámetro \times 420 mm de largo. La Figura 1 presenta imágenes del dispositivo construido.

Figura 1

Túnel construido



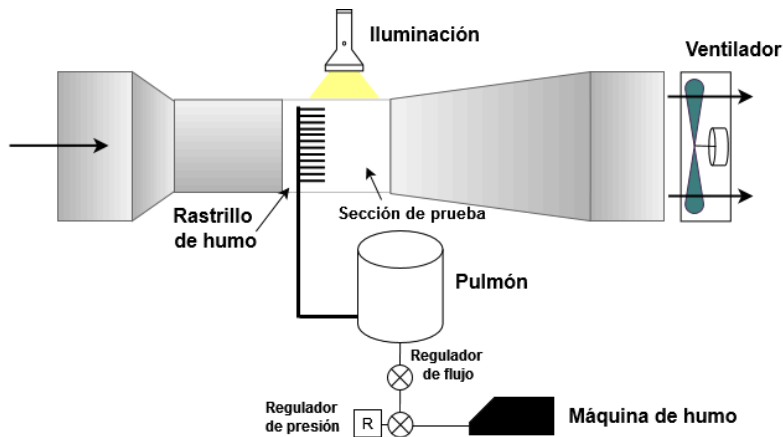
Fuente: elaboración propia.

Para la visualización de humo, se decidió utilizar una máquina de vapor de agua y glicerol en conjunto con un rastrillo para la canalización hacia la entrada de la sección de prueba. Para ello, fue necesario la introducción de un pulmón para la salida de humo de forma constante, combinado con un forzado de aire axial de 10 cm, logrando un flujo constante de humo por el rastrillo en la cámara de prueba. Se colocó un fondo negro en la sección de prueba para una mejor observación de las

líneas de corriente. En la Figura 2, se muestran los componentes principales del sistema.

Figura 2

Componentes principales del sistema de visualización tipo rastrillo



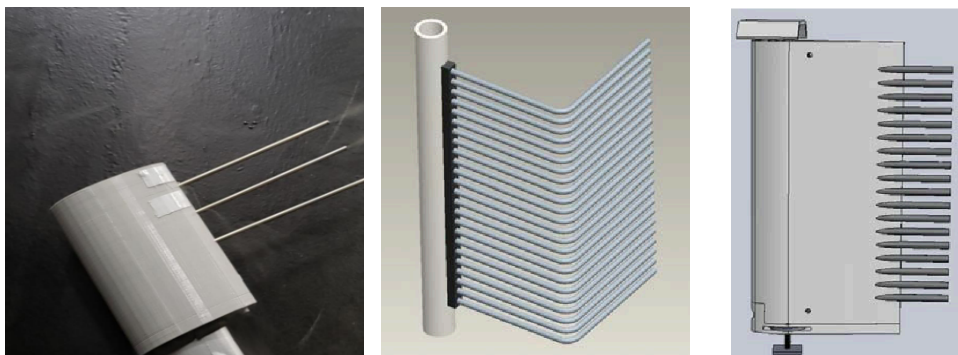
Fuente: elaboración propia.

Para la visualización clara de las líneas de corriente es necesario un sistema de iluminación, ya que de ello dependen las imágenes que se podrán obtener. En este punto, distintos autores proponen el uso de luces láser (Beck, Anderson & Hosni, 2008), estroboscópicas (Willmott, Ellington & Thomas, 1997) o LED (Trinder & Jabbal, 2013), entre otras.

Respecto al diseño del rastrillo, diversos autores proponen distintos modelos según muestra la Figura 3.

Figura 3

Modelos de rastrillos realizados por diversos autores



Fuente: Ramirez, s.f.; Beck, Anderson & Hosni, 2008; Trinder & Jabbal, 2013.

Para el diseño e implementación de un sistema de visualización de flujo tipo rastrillo, existe una serie de criterios y características principales a considerar (Beck, Anderson & Hosni, 2008):

- Número de líneas de visualización y diámetro de los tubos.
- Longitud de los tubos y radio de curvatura para alinearlos con el flujo.
- Diseño del conjunto del colector y montaje de los tubos.
- Equilibrio del flujo de humo inyectado con la corriente de flujo exterior.
- Nivel de turbulencia en el túnel de viento.
- Desarrollo del flujo en el interior de los tubos de humo.

Número de chorros y diámetro de los tubos

Estos parámetros influyen en la conservación de la masa (Ec. 1), ya que el número de chorros (N) afecta el área de salida (As) en forma proporcional, y el diámetro de los tubos (Dt) de forma exponencial, haciendo que el aumento o disminución de una variable o ambas, incremente o reduzca caudal (Q) respectivamente.

$Q_e = Q_s$	1
$Q_e = V_s * A_s$	1.1
$Q_e = V_s * N(\frac{n * D_t^2}{4})$	1.2

Al mismo tiempo, el diámetro de los tubos interviene en el número adimensional de Reynolds (Ec. 2), el cual puede considerarse laminar ($Re \leq 2000$), de transición ($2000 \leq Re \leq 4000$) o turbulento ($Re \geq 4000$) (Smart Blade, 2023). Para la correcta visualización de las líneas es necesario que el flujo sea laminar. En este caso el diámetro afecta de forma directamente proporcional al valor de Reynolds.

$$Re = \frac{D_t * v * \rho}{\mu} \quad 2$$

Donde:

Dt: Diámetro de los tubos

v: Velocidad del fluido

ρ : Densidad del fluido

μ : Viscosidad dinámica del fluido

Por otra parte, al considerar la conservación de la energía, las pérdidas generadas dentro del sistema disminuyen la energía de salida, como se puede ver en la expresión de Bernoulli (Ec. 3):

$$E_e = E_s \quad 3$$

$$\frac{P_e}{\rho g} + \frac{V_e^2}{2g} + Z_e - H_{r_0} - H_{r_N} = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s \quad 3.1$$

El término H_{r_0} representa la pérdida de carga aguas arriba respecto de los tubos de salida, mientras que el término H_{r_N} representa las pérdidas de carga propia del total de los tubos de salida. Esta última se calcula con la expresión de Darcy-Weissbach (Ec. 4):

$$H_{r_N} = H_r * N = N * 0,0827 * f * L * \frac{Q^2}{Dt^5} \quad 4$$

Donde:

f : es el factor de fricción

L : es la longitud de la tubería

Q : caudal

Dt : diámetro de los tubos

En la Ec. 4 se puede ver que el diámetro de los tubos (Dt) influye en las pérdidas de forma inversa y exponencialmente con orden quinto.

Longitud de los tubos y radio de curvatura para alinearse con el flujo

Siguiendo el análisis de la Ec. 4, la longitud interviene de forma directa en las pérdidas de carga. Y el factor de fricción se calcula en base a varios parámetros, entre ellos el radio y ángulo de curvatura. Como se puede ver en la Figura 4, para dos curvas de 90° de giro, la longitud equivalente aproximada para las pérdidas de carga de este accesorio, aumenta cuando a mismo diámetro el radio de curvatura es el triple del diámetro y el doble.

Figura 4

Tabla de valores de longitud equivalente para curvas de 90°

DIAMETRO INTERNO (m.m.)	CURVA 90° R-3D	CURVA 90° R-2D
	LONGITUD EQUIVALENT	
25	0.52	0.70
32	0.73	0.91
40	0.85	1.10
50	1.07	1.40
65	1.28	1.65
80	1.55	2.07
90	1.83	2.44
100	2.13	2.77
115	2.41	3.05
125	2.71	3.66
150	3.35	4.27
200	4.27	5.49
250	5.18	6.71

Fuente: Beck, Anderson & Hosni, 2008.

Diseño de montaje de colectores y montaje de tubos

El montaje de colectores y tubos interviene en el sistema de visualización ya que se encuentra aguas arriba de la salida del humo, generando turbulencias dentro del túnel que según su intensidad pueden afectar el humo en su salida, haciendo que turbulencias externas reduzcan la definición de las líneas de corriente.

Equilibrio del flujo de humo inyectado con la corriente de flujo exterior

Este equilibrio se consigue cuando la velocidad de salida del humo es igual a la velocidad del aire dentro del túnel de viento. Si ambas no coinciden se generan turbulencias en las corrientes de humo. Por lo que debe existir una relación isocinética ($I \approx 1$) entre la velocidad del flujo del túnel de viento y el flujo del sistema de visualización.

Nivel de turbulencia en túnel de viento

Es necesario que no existan turbulencias dentro del túnel de viento, es decir que el flujo sea de régimen laminar. No es el fin del trabajo entrar en las cuestiones de diseño del túnel, pero sabe que fue construido de forma tal que su flujo presente un régimen sea laminar.

Desarrollo de flujo dentro de los tubos de rastrillo de humo

El desarrollo del flujo dentro de los tubos está influenciado por el tipo de material. Este determina un coeficiente de rugosidad, cuando este valor es menor, la fricción y por ende las pérdidas de carga ocasionadas serán menores.

Por otra parte, la curvatura de los tubos es la última alteración que sufre el flujo, antes de ingresar al túnel de viento. Es aguas abajo de la curvatura en donde se va a desarrollar el perfil de flujo hasta alcanzar un régimen de tipo laminar ($Re < 2000$). Por ello es necesario considerar la distancia posterior a la curvatura.

1. Sistema de visualización: Modelo 1

A partir de lo mencionado con anterioridad, podemos dividir el sistema de visualización en los siguientes subsistemas.

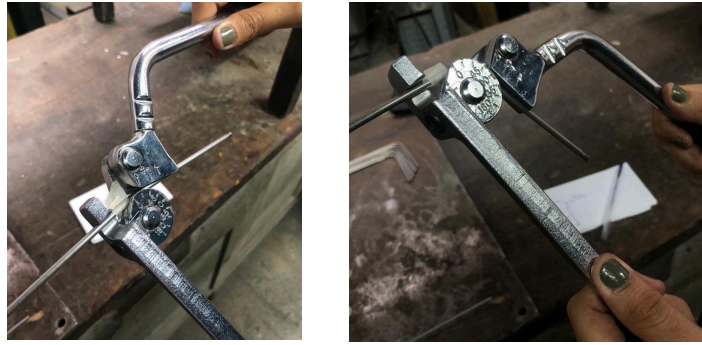
1.1. Rastrillo de humo

Se realizaron dos diseños de rastrillo de humo, variando el espaciado y la cantidad de tubos presentes en cada uno, con el objeto de analizar la influencia de estas variables en la visualización de las líneas de corriente.

Los tubos utilizados son de acero inoxidable con un diámetro externo de 4 mm. Dichos tubos se plegaron con una dobladora a 90° para que la dirección de las líneas de humo sea paralela al flujo dentro del túnel, tal como se observa en la Figura 5.

Figura 5

Plegado de tubos



Fuente: elaboración propia.

Esta disposición a 90° genera una menor interferencia en el flujo dentro del túnel de viento ya que el tubo de PVC por el cual circula el humo, queda por fuera de la sección útil.

Para acoplar los tubos al caño de PVC y alinearlos entre ellos, se diseñaron e imprimieron en 3D dos piezas. El primer diseño contó con un espaciado de 10 mm, colocando un total de 12 tubos en el rastrillo, y en el segundo los tubos fueron dispuestos cada 20 mm colocando así un total de 6 tubos en el rastrillo. Todos los diseños se imprimieron en 3D con filamento PLA.

Los caños PVC, alineadores y acoples impresos en 3D fueron vinculados mediante adhesivos. El subsistema del rastrillo completo con 12 y 6 tubos se observa en la Figura 6.

Figura 6

Tubos de corriente anexados al tubo de PVC. Izquierda: 12 tubos. Derecha: 6 tubos



Fuente: elaboración propia.

1.2. Pulmón/Regulador presión

Para la cámara pulmón se utilizó un bidón PEAD (Polietileno de Alta Densidad) de 50 litros. Las medidas aproximadas del mismo son: Ø Boca 80 mm; Ø Base 390 mm; Alto 600 mm.

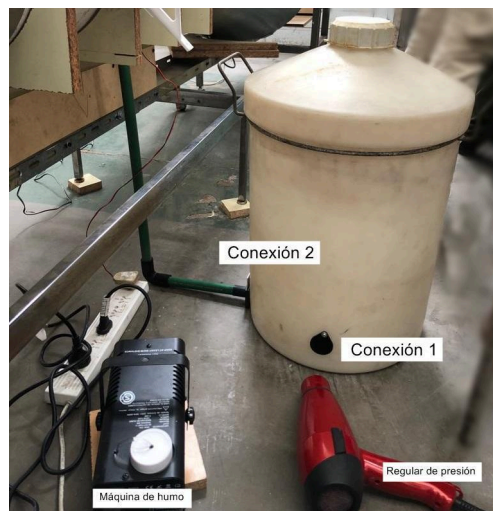
Para unirlo al sistema se realizaron dos conexiones cercanas a la base del pulmón, buscando una circulación del flujo de vapor de agua y glicerol que no genere turbulencia.

La Figura 7 muestra las conexiones del pulmón. La conexión 1 presenta una salida directa al exterior, donde se conecta una máquina de humo comercial (Modelo Venetian 400 W) para llenar el pulmón. Para aumentar la presión de la cámara, se utiliza un secador de pelo en modo frío. Mediante un cerrojo curvo diseñado e impreso en 3D se evitan pérdidas de esta conexión.

La conexión 2 vincula el pulmón con la sección de prueba del túnel mediante caños de PVC de 1/2" mediante una válvula, diseñada e impresa en 3D con PLA, que permite regular la apertura de esta conexión; permaneciendo cerrada al momento de carga del pulmón, y abierta al momento de inyectar el humo a la sección de prueba.

Figura 7

Pulmón y regulador de presión modelo 1



Fuente: elaboración propia.

1.3. Iluminación

La iluminación de la sección de prueba consistió en una tira LED 5730 18.2 W/m IP20 cálida, alimentada con una fuente conmutada de 12v y 600 mA. Luego de varias pruebas de posición, se colocó este sistema en la parte superior de la sección de prueba.

2. Sistema de visualización: Modelo 2

Al analizar los resultados obtenidos en el sistema de visualización propuesto en el Modelo 1, se consideró necesario realizar modificaciones que mejoren el rendimiento. A continuación, se describirán estas modificaciones en detalle.

2.1. Rastrillo de humo

Para este modelo se optó por modificar el diámetro de los tubos con el objetivo de mejorar la visualización de las líneas de corriente. Para ello, se modificaron los diámetros de los tubos de 4 mm a 6 mm. Asimismo, el espaciado entre tubos se colocó en 1,5 cm.

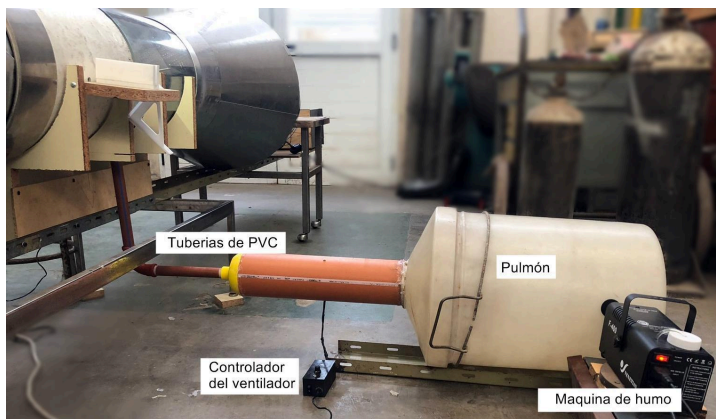
2.2. Pulmón/Regulador de presión

En este modelo la conexión 1 solo se destinó al ingreso del humo para llenar el pulmón. Mientras que la salida de la conexión 2 se amplió, haciendo uso de un caño de PVC 110 cm de diámetro. Esta conexión, utiliza un forzador axial a la salida del pulmón, que genera una depresión en la salida de este, favoreciendo una descarga continua de humo por el rastrillo ubicado en la sección de prueba del túnel de viento.

El rastrillo de humo, se encuentra acoplado por medio de una cañería de polipropileno de ½" al troncal de PVC que tiene el forzador de aire, a partir de una pieza impresa en PETG, conectando así el pulmón con la sección de prueba, tal como se observa en la Figura 8.

Figura 8

Pulmón y regulador de presión modelo 2



Fuente: elaboración propia.

2.2.1. Controlador del ventilador

Con el fin de controlar el flujo de vapor de agua y glicerol, se desarrolló un sistema de control de velocidad para un ventilador basado en un motor de corriente continua de 4 cables. Este dispositivo se compone de tres partes: una fuente de

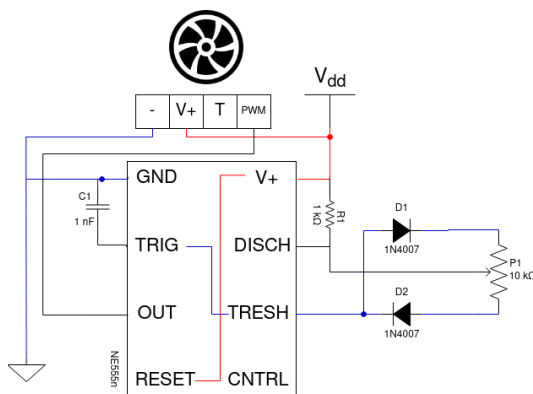
alimentación de 12V, circuito de control y un ventilador. Este sistema se utiliza en el pulmón para forzar la salida del humo.

El ventilador empleado proviene del sistema de refrigeración de un procesador de CPU y posee conectores de alimentación, masa, tacómetro y modulación por ancho de pulso (o PWM), con el cual se puede controlar la velocidad de giro del ventilador.

El circuito controlador se basa en el integrado NE555n, empleado en numerosas aplicaciones electrónicas. El integrado es configurado mediante resistencias y capacitores para que genere una señal cuadrada de 25 kHz. La conexión es diseñada para que al girar un potenciómetro el ancho de pulso de la señal generada varía, modificando así el porcentaje de ciclo de trabajo de 0 a 100%. La Figura 9 (izquierda) muestra el esquemático del circuito diseñado, contemplando los componentes con valores seleccionados. Asimismo, en la figura 9 (derecha) se observa el dispositivo final montado en un gabinete diseñado para albergar dichos componentes. Este gabinete se imprimió con PLA, y contempla una entrada para la alimentación del dispositivo mediante una fuente de corriente continua de 12V.

Figura 9

Diagrama esquemático del circuito de control (izquierda) y dispositivo final montado (derecha)



Fuente: elaboración propia.

2.3. Iluminación

Para poder visualizar la velocidad y la dirección del flujo de aire se emplea una luz estroboscópica de frecuencia variable. El efecto generado permite observar con mayor claridad las líneas de flujo, vórtices y turbulencias para estudiar la aerodinámica de diferentes objetos.

El sistema diseñado está basado en un microcontrolador Arduino MEGA configurado en modo de comparación de tiempo y captura (CTC) con el que se genera una señal cuadrada de frecuencia variable para el encendido y apagado de un diodo LED de alta potencia montado a un disipador de calor.

El modo CTC permite generar una señal con estas características a partir de un temporizador de hardware. De esta manera, el sistema cuenta de manera interna

hasta un valor preestablecido, que se almacena en un registro llamado OCR (Output Compare Register). Al alcanzar dicho valor, se genera una interrupción y se reinicia el contador. De esta manera, la frecuencia de la señal generada se determina con el reloj del microcontrolador, el valor almacenado en el registro OCR y un pre-escalador del temporizador.

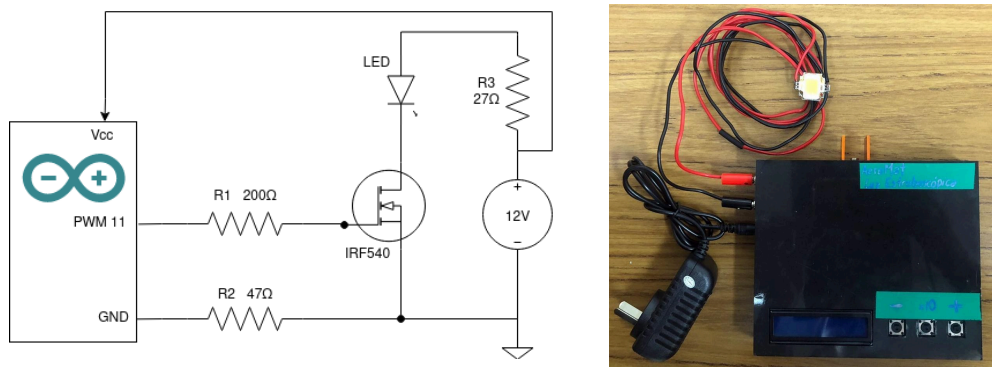
El dispositivo posee tres pulsadores para variar el largo del registro OCR y por lo tanto, la frecuencia de la señal de salida: aumento, disminución y cambio de la variación en potencias de 10. Mediante una pantalla LCD 1602 se visualiza la frecuencia actual junto con el salto establecido para su modificación. La alimentación eléctrica del sistema es mediante una fuente de tensión continua de 12V.

La precisión de la frecuencia de la señal cuadrada depende del valor del registro OCR medido en "tics". Para calcular este valor, se utiliza la frecuencia proporcionada por el cristal piezoeléctrico del microcontrolador (16 MHz), un pre-escalador y la frecuencia de salida ingresada por el usuario. El pre-escalador determina la cantidad de ciclos de reloj necesarios para que el temporizador aumente, mientras que el OCR determina la cantidad de tics del temporizador necesarios para que se reinicie y active una interrupción. Quien limita el valor obtenido es el registro ya que debe ser un número entero que evita poder obtener valores de frecuencia específicos.

Debido a las limitaciones de corriente y tensión del Arduino MEGA en configuración CTC, la señal de salida debe ser amplificada para poder alimentar correctamente al LED. Se emplea un circuito tipo "buffer" con un transistor MOSFET IRF540 polarizado según indica su hoja de datos. De esta manera se evita afectar y comprometer la integridad del microcontrolador. La Figura 10 (izquierda) muestra el circuito completo del sistema de luz estroboscópica. Una vez finalizado el ensamble del circuito, se diseñó y construyó un gabinete empleando una impresora 3D con filamento PLA, como se observa en la Figura 10 (derecha).

Figura 10

Circuito completo del sistema de luz estroboscópica (izquierda) y circuito montado (derecha)



Fuente: elaboración propia.

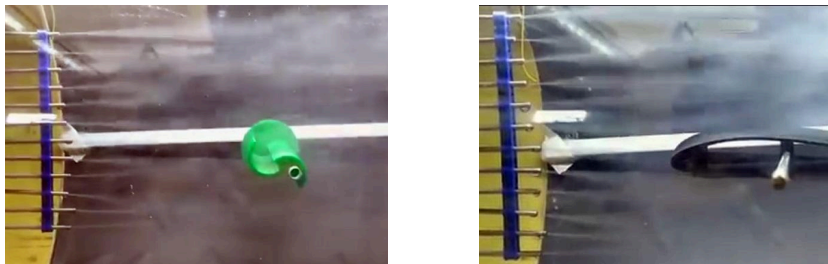
Resultados y discusiones

Analizando los resultados obtenidos, se observó que el espaciado entre los tubos afecta la forma en que las líneas de corriente interactúan entre sí y con el modelo. El espaciado de 1 cm provocó que las líneas de humo se mezclaran y no se distinguan sobre el modelo, mientras que el espaciado de 2 cm proporcionó una visión más clara e individual de las líneas de corriente, pero nos obligó a reducir la cantidad de tubos de 12 a 6, debido a limitaciones dimensionales de la sección de prueba. Debido a ello, en el modelo 2 se utilizó un espaciado de 1,5 cm (8 tubos), que nos permitió observar las líneas de corriente sin entrecruzamientos.

En cuanto al diámetro de salida de los tubos observamos que este afecta la velocidad de salida, la intensidad del humo y la presión requerida en el pulmón. En el primer modelo se utilizaron tubos de 4 mm, donde se observó que las líneas de corriente eran delgadas y difíciles de visualizar, como se observa en la Figura 11, donde también se puede apreciar la condensación a la salida de los tubos. Asimismo se notó que era necesaria una presión más alta para expulsar el humo. Por lo que, en el segundo modelo, los tubos de salida se cambiaron por tubos de 6 mm para permitir que el humo fluya más fácilmente y produzca líneas de corriente más definidas.

Figura 11

Salida de humo del modelo 1, con tubos de 4 mm de diámetro



Fuente: elaboración propia.

Los acoples y alineadores impresos en 3D en el rastrillo, nos permitieron vincular los componentes de forma precisa y acortan los tiempos de mecanización de las piezas ya que se pueden obtener buenas terminaciones superficiales a partir de la impresión 3D. Este punto fue fundamental porque es necesario que el espaciado se mantenga constante entre tubos para que las líneas de corriente no se entrecrucen.

Respecto a las conexiones del pulmón no se observaron pérdidas considerables. Sin embargo, en el modelo 1 se observó una gran condensación del humo en el interior de las conexiones de PVC. Por lo que, en el modelo 2 se decidió aumentar el área transversal de estas conexiones para evitar este fenómeno. Asimismo, la válvula impresa en 3D a partir de PLA (modelo 1) presentó cambios dimensionales debido a las altas temperaturas. Por ello, las conexiones en el modelo 2 se imprimieron en PETG ya que es un material con mayor resistencia a altas temperaturas.

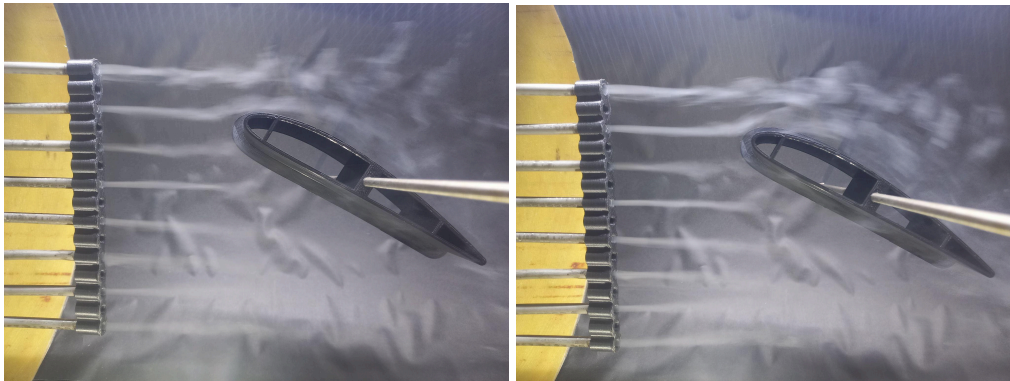
El aumento de presión en el pulmón, en el modelo 1 se realizó con un secador de pelo, lo cual no generó buenos resultados ya que produjo turbulencias en el fluido. Por ello, se decidió cambiar el secador de pelo como elemento presurizador, y se

implementó un ventilador axial con regulador de la velocidad en el conducto principal para forzar la salida del humo generado.

Todas las modificaciones propuestas para el desarrollo del modelo 2 mejoraron ampliamente la performance del sistema de visualización, disminuyendo la condensación del fluido y las turbulencias. A su vez la iluminación óptima se logró combinando la luz LED con la luz estroboscópica. Los resultados finales se observan en la Figura 12.

Figura 12

Visualización final



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En esta instancia podemos afirmar que el modelo 2 nos permitió obtener mejores resultados de visualización de las líneas de corriente que el modelo 1 para el estudio del flujo sobre un perfil en el interior del túnel de viento. Lo cual era de esperar, ya que a partir de los inconvenientes que fueron surgiendo durante el desarrollo del primer modelo se optimizó el segundo diseño. Como conclusiones generales podemos establecer:

- El espaciado entre los tubos del rastrillo de humo afecta la forma en que las líneas de corriente interactúan entre sí y con el modelo.
- El diámetro de salida de los tubos afecta la velocidad de salida, la intensidad del humo y la presión requerida en el pulmón.
- Los acoples y alineadores impresos en 3D en el rastrillo, permitieron vincular los componentes de forma precisa y acortan los tiempos de mecanización de las piezas.
- No se presentaron pérdidas considerables en las conexiones del pulmón.
- Los acoples realizados mediante impresión 3D con PETG presentan una mayor estabilidad dimensional y resistencia térmica que los impresos con PLA.

- El aumento del diámetro de las conexiones de PVC, disminuye la condensación de humo.
- La combinación de la luz LED con la luz estroboscópica permite una mejor visualización de las líneas de corriente.
- El uso de un forzador axial a la salida del pulmón favorece la descarga continua de humo en la sección de prueba del túnel de viento.

Trabajos futuros

Se deben realizar ajustes en cuanto al aumento del diámetro de los tubos del rastrillo y también de las conexiones de PVC. Por un lado, un mayor diámetro en los tubos del rastrillo disminuirá las pérdidas y aumentará el caudal generando líneas de corriente más definidas. En cuanto a los tubos de PVC el aumento del diámetro evitará la condensación del humo.

Finalmente, se debe modificar el forzador axial para disminuir la generación de turbulencias, es decir, cambiar el uso del secador de pelo por un ventilador por ejemplo tipo *cooler*. Esto implicaría un rediseño del pulmón en cuanto a su disposición y también a la cantidad y tamaño de las aperturas del mismo.

Bibliografía

Beck, T.B., Anderson, B., & Hosni, M. (2008). A Simple Educational Wind Tunnel Setup for Visualization of Duct Flow Streamlines and Nozzle/Diffuser Boundary Layer Separation. American Society for Engineering Education.

Beck, T.B., Whitson, B., Payne, G., & Heitman, T. (2009). An Investigation Of Wing Morphing Phenomena In The Educational Wind Tunnel.

Moraga Ramón, D. Giovanni. (2016). Estudio técnico-económico de diseño y desarrollo de una pala de mini aerogenerador fabricada con material compuesto. Universidad Politécnica de Valencia.

Ramirez, J. (s.f.). Design and Testing of a Smoke Rake System for the New ERAU Wind Tunnel. Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, Florida.

Secretaría de Energía de la Nación. Informe Trimestral de Coyuntura Energética: Cuarto Trimestre de 2022. Dirección de Información Energética, Subsecretaría de Planeamiento Energético.

Smart Blade GmbH. (2023). Educational Wind Tunnels. Recuperado de <https://www.smart-blade.com/windtunnel-desi>

Trinder, M., & Jabbal, M. (2013). Development of a Smoke Visualisation System for Wind Tunnel Laboratory Experiments. International Journal of Mechanical Engineering Education, 41(1).

Willmott, A.P., Ellington, C.P., & Thomas, A.L.R. (1997). Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, *Manduca sexta*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 352, 303–316.

Fecha de recepción: 20/2/2024

Fecha de aceptación: 25/6/2024