

Construcción de un túnel de viento

FRANCO-MARTINEZ, David*† y RAMIREZ-SILVA, Pablo

FES Aragón, Centro Tecnológico, UNAM

Recibido 11 de Enero, 2017; Aceptado 16 de Marzo, 2017

Resumen

Las industrias del automovilismo y la aeronáutica fueron las pioneras en elaborar dispositivos capaces de medir el flujo del viento, el caudal y el impacto que infligía en sus modelos de prueba. Esto llevó a la creación de túneles de viento con velocidades subsónicas (0.75). Para este caso se optó por diseñar un Túnel de Viento subsónico partiendo con que la cámara de pruebas tenga una velocidad de 50 m/s (0.145 M) y unas dimensiones de 35x35 cm y con un largo de 50 cm. El objetivo es mostrar la aplicación conocimientos de Dinámica de Fluidos, especialmente en temas como Número de Reynolds, Ecuación de Bernoulli y la Primera Ley de la termodinámica para la construcción del túnel de viento. Cada componente se calculó por separado debido a que iban a ser fabricarse de un material distinto. El colector y el difusor serían de fibra de vidrio y la cámara de pruebas de acrílico. Luego de obtener los valores de cada componente del Túnel de Viento, se diseñaron en SolidWorks[1]. Pese a no cumplir los objetivos principales, los resultados que se alcanzaron son satisfactorios teniendo una mínima pérdida a lo largo del túnel y pudiendo hacer pruebas aerodinámicas a objetos.

Túnel de viento, mecánica de fluidos, ingeniería

Abstract

The motoring and aeronautics industries were the pioneers in developing devices capable of measuring wind flow, flow and the impact it inflicted on their test models. This led to the creation of wind tunnels with subsonic speeds (0.75). For this case it was decided to design a Subsonic Wind Tunnel starting with that the test chamber has a speed of 50 m / s (0.145 M) and dimensions of 35x35 cm and a length of 50 cm. The aim is to show the application knowledge of Fluid Dynamics, especially in subjects such as Reynolds Number, Bernoulli Equation and the First Law of thermodynamics for wind tunnel construction. Each component was calculated separately because they were to be manufactured from a different material. The manifold and diffuser would be fiberglass and acrylic testing chamber. After obtaining the values of each component of the Wind Tunnel, they were designed in SolidWorks. Despite not meeting the main objectives, the results achieved are satisfactory having a minimum loss along the tunnel and being able to do aerodynamic tests on objects.

Wind tunnel, fluid mechanics, engineering

Citación: FRANCO-MARTINEZ, David y RAMIREZ-SILVA, Pablo. Construcción de un túnel de viento. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-1:55-71

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: davd_francom@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

El diseño y construcción del túnel de viento que se realizó en el Laboratorio de Diagnostico Energético de la FES Aragón, se enfocó para realizar pruebas a prototipos de turbinas de vapor ya sea a escala o tamaño real. Con esto se podrá elegir el mejor diseño de alguna turbina y ser modificada para un mejor rendimiento.

El diseño del túnel de viento se enfocó en 5 componentes (ventilador, difusor, cámara de pruebas, colector y malla rectificadora) y para darles la geometría se hicieron cálculos en base a la ecuación de Bernoulli y al número de Reynolds. No solo eso, también se modeló en un programa de diseño llamado Solid Works [2], el cual sirvió para simular el túnel de viento y tener una vista preliminar de cómo se comportará el viento una vez que sea construido.

Con la gran variedad de materiales que hay para la construcción de túneles, este túnel se construyó lo más ligero posible por lo cual se escogió un material nuevo pero muy difícil de manejar (fibra de vidrio). No solo eso, la elección de la instrumentación fue otra dificultad que se tuvo que resolver, debido a los precios de unos y al costo de manufactura de otros de ellos, por lo cual se ha decidido posponerlo hasta obtener presupuesto para su compra. Pero al conjuntar todo y ensamblarlo es cuando se aprecia todo el trabajo que se requirió para hacer funcionar un túnel de viento, no solo eso, ver el proyecto desde la idea original de diseño, hasta el momento de poner el primer objeto y hacer una prueba para ver su funcionamiento, fue algo realmente increíble

Cada Túnel de viento es distinto, se fabrica de acuerdo a las necesidades para lo que se va a usar y para los objetos que se van a analizar. Hay dos tipos de túnel de viento, los de circuito cerrado y los de circuito abierto; el diseño de este Túnel de Viento es de circuito abierto, parecido al Tipo Eiffel; está constituido con cuatro secciones.[2]

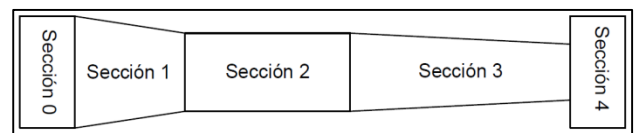


Figura 1 Numeración de las Secciones del Túnel de Viento

- Sección 0 → Sección de Estabilización (Mallas y/o Pantallas)
- Sección 1 → Colector
- Sección 2 → Cámara de Pruebas
- Sección 3 → Difusor
- Sección 4 → Ventilador y/o Extractor

Cada parte del diseño del túnel, se diseñó en el programa de CAD SolidWorks para visualizarlo antes de su manufacturación y hacer análisis de comportamiento del túnel de viento.

A continuación, se describirán el diseño de cada parte que comprende el Túnel de Viento:

Cámara de Pruebas

Como ya se había mencionado antes, en esta sección es donde se debe de empezar a diseñar el túnel de viento. Las relaciones geométricas de la cámara de pruebas son la relación de aspecto, y relación ancho alto definidas así:

$$R_a = \frac{\varepsilon}{b_f} = 0.8 R_{wh} \quad (1)$$

Dónde:

- R_a = Relación de aspecto
- R_{wh} = Relación de ancho-alto
- ε = Envergadura del modelo (m)
- b_f = Base de la cámara de pruebas (m)

Las dimensiones que se sugirieron para tener una cámara de pruebas donde se pueda observar agradablemente los objetos a analizar son las siguientes:

Velocidad V	50 m/s	180 Km/h
Altura A	0.35 m	35 cm
Ancho B	0.35 m	35 cm
Longitud L	0.50 m	50 cm
Sección Rectangular A	0.1225 m^2	1225 cm^2

Tabla 1 Dimensionas de la Cámara de Pruebas

Para tener una mayor precisión de los cálculos, fue necesario saber las propiedades térmicas de la región donde va a colocar el túnel de viento. Con los datos de las propiedades del aire de la Ciudad de México y considerando una Temperatura de 23.5°C y una humedad Relativa del 62% que es un promedio anual de la Ciudad.

Determinación del Tipo de Flujo

Con la ecuación de número de Reynolds se determinó el tipo de flujo que pasará a través de una sección cerrada. El tipo de diseño de la cámara de pruebas es un ducto de forma cuadrada, por lo que, para determinar el tipo de flujo se obtiene el Perímetro Mojado y el Área transversal, se sustituyen en la ecuación 1 del Diámetro Hidráulico generando los datos de la tabla 2.

Área Transversal A	0.1225 m^2
Longitud L	0.350 m
Perímetro Mojado PM	1.400 m

$$D_h = 0.35 \text{ m}$$

Tabla 2 Tipo de Flujo

El valor obtenido en el diámetro hidráulico es el valor final para determinar el número de Reynolds y reemplazarlo en la ecuación 1:

$$N_R = \frac{v D_h \rho}{\mu} \quad (1)$$

Así, se sustituyó en la Ecuación 1 con los datos de la tabla 3.

Velocidad N	50.00 m/s
Diámetro Hidráulico D_h	0.350 m
Densidad P	0.910 Kg/m^3
Viscosidad Dinámica μ	1.41×10^{-5} $Kg/m \cdot s$

$$N_R = 1.13 \times 10^6$$

Tabla 3 Determinación del Tipo de Flujo

El número de Reynolds que se obtuvo fue muy elevado, un resultado mayor a 4000 da un flujo turbulento, por lo que se deben de utilizar pantallas para mantener un flujo laminar.

Calculo del Caudal de Aire Necesario

El caudal es el volumen de fluido que avanza por unidad de tiempo, esto determinó el tipo de ventilador que se compró. Se calcularon las velocidades de cada sección, así como, las presiones y pérdidas. El Caudal se expresa en la ecuación 2:

$$Q = vA \quad (2)$$

Dónde:

- Q = Caudal (m^3/s)
- V = Velocidad (m/s)
- A = Área Transversal (m^2)

Así tendremos que el caudal es:

$$Q = 6.13 \frac{m^3}{s}$$

Este es el caudal necesario para alcanzar la velocidad máxima requerida para los análisis. Una vez obtenido el caudal, se procedió a calcular el flujo másico requerido en la ecuación de continuidad entre cada sección, que, junto la ecuación de Bernoulli, se utilizó para calcular las presiones y las velocidades. El flujo másico se calculó de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (3)$$

Dónde:

- \dot{m} = Flujo Másico (Kg/s)
- ρ = Densidad (Kg/m^3)
- Q = Caudal (m^3/s)

Así tenemos un flujo másico de:

$$\dot{m} = 5.57 \text{ kg/s}$$

Perdidas de la Cámara de Pruebas

Las pérdidas se calcularon con el modelo de Darcy-Weisbach el cual se puede utilizar para calcular la pérdida de energía en secciones largas y rectas de tuberías, tanto para flujo laminar, así como el turbulento.

La fórmula de Darcy-Weisbach para calcular las pérdidas en una tubería es:

$$hf = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Dónde:

- hf = Pérdidas de Energía Debido a la Fricción (m)
- f = Factor de Fricción
- L = Longitud (m)
- V = Velocidad (m/s)
- D_h = Diámetro Hidráulico (m)
- g = Gravedad de la ciudad de México m/s^2

El factor de fricción (f) se determina por el tipo de flujo.

Teniendo un flujo turbulento como el que se obtuvo, se tuvo que utilizar la ecuación de Colebrook o el diagrama de Moody para determinarlo. La ecuación de Colebrook es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/(D_h)}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Dónde:

- ε = Rugosidad Equivalente

Para cualquiera de las dos formas para obtener el factor de fricción, fue necesario determinar la rugosidad equivalente (ε) del material que se va a utilizar. La cámara de pruebas se construyó de plástico cristal (Acrílico) para poder observar las pruebas que se realicen, la rugosidad del plástico teóricamente es cero, pero para poder ejecutar los datos, se utilizó el valor del plástico en la unidad de metros de 3×10^{-7} . Para poder aplicar la ecuación de Colebrook, fue necesario combinarla con el diagrama de Moody y una vez obtenido el resultado, se realizó un proceso de iteraciones hasta llegar al punto más aproximado.

En el diagrama de Moody, se localiza el factor de fricción utilizando la tabla 4.

Rugosidad Relativa ε/D_h	8.57×10^{-7} m
Rugosidad ε	3.00×10^{-7} m
Diámetro Hidráulico D_h	0.350 m
Número de Reynolds Re	1.13×10^6

Tabla 4 Datos para el Diagrama de Moody

Se pudo apreciar en el Diagrama 1 un factor de fricción de $f = 0.0155$ aproximadamente, se tomó el punto superior del diagrama que fue 0.016 y se sustituyó en la ecuación 5 de Colebrook en f_n hasta que el valor iterado fuese menor que 0.001.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{(8.57 \times 10^{-7})}{3.7} + \frac{2.51}{1.13 \times 10^6 \sqrt{f_n}} \right)$$

Dando el nuevo valor de $f = 0.0111$ y su diferencia es:

$$f_n - f = 0.016 - 0.0111 = 0.0049 < 0.001$$

Se volvió a iterar otra vez, pero ahora con $f = 0.0049$ porque no fue menor a 0.001. Eso nos dio un valor de $f = 0.0115$

$$f_n - f = 0.0111 - 0.0115 = -0.0004 < 0.001$$

Se tomó nuevamente el nuevo factor de fricción que fue $f = 0.0115$ para calcular las pérdidas en la cámara de pruebas.

Una vez obtenidos estos resultados se utilizaron en la ecuación 4.

$$hf = f \frac{L V^2}{D_h 2g}$$

$$= 0.0115 \left(\frac{0.50 \text{ m}}{0.35 \text{ m}} \right) \left(\frac{(50 \text{ m/s})^2}{2 \left(9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \right)$$

$$hf = 2.09 \text{ m}$$

Esto significó que cada 2.09 N*m de energía se pierden por cada Newton de aire que fluya a lo largo de la longitud de 50 cm de la cámara de pruebas.

Colector

Tiene una doble función, la primera, estabilizar el flujo que entra de forma turbulento y la segunda, incrementar la velocidad del flujo de aire para que pase a la cámara de pruebas.

El colector incrementa la velocidad con respecto a su entrada, pero reduce la presión en el mismo punto, al variar la presión, también puede llegar a variar la densidad, ley que cumplen los flujos compresibles. Al variar la densidad, es necesario determinarlo para aplicar la variación en la ecuación de Bernoulli.

Se determinó el número de Mach para conocer las condiciones del tipo de flujo (compresible o incompresible) y obtubo un resultado menor de 0.3 para considerar que la densidad del aire es constante en todo el túnel de. Se sustituyeron los datos de la tabla 5 en la ecuación 6 de Número de Mach para obtener su valor.

Velocidad V	50.00 m/s
Velocidad del Sonido a	345.60 m/s

Tabla 5 Datos para Determinar el Número de Mach

$$M = \frac{v}{a} = 0.145 \quad (6)$$

$$M = 0.145 < 0.3 \text{ Flujo Incompresible}$$

Este resultado indicó que si se mantendrá la densidad constante en el interior del túnel de viento.

A continuación, se dieron las dimensiones del colector para determinar sus propiedades (tabla 6).

Velocidad V2	50.00 m/s
Área de Entrada A1	0.360 m^2
Área de Salida A2	0.1225 m^2

Tabla 6 Datos del Colector

Calculo de Velocidades en la Entrada del Colector

Se sabe que el flujo másico teóricamente será el mismo en todo el conducto, por lo tanto, se debe de cumplir la ecuación de continuidad, donde:

$$\dot{m} = \dot{m}_0 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dots = \dot{m}_n \quad (7)$$

Y en términos de velocidad:

$$\rho \cdot v \cdot A = \rho_0 \cdot v_0 \cdot A_0 = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \dots = \rho_n \cdot v_n \cdot A_n \quad (8)$$

Se sabe que la velocidad de un fluido se incrementa al reducir su área por eso la velocidad a la entrada del colector será menor por tener un área mayor.

Entonces limitando la ecuación de continuidad a los valores que se tienen en la tabla 6, se tiene:

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (9)$$

Pero, recordando el resultado que nos dio el número de Mach dando que la densidad del aire va a ser constante, reducimos la ecuación 8 de continuidad a:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (10)$$

Despejamos la velocidad de entrada y sustituimos con los datos de la tabla 6:

$$v_1 = \frac{v_2 \cdot A_2}{A_1}$$

$$v_1 = 17.01 \text{ m/s}$$

Para comprobar que se va por buen camino, se multiplicó la velocidad que obtuvo por el área transversal de la entrada (**0.36 m²**) y se encontró el mismo caudal (**6.13 m³/s**) que se calculó en la cámara de pruebas.

Calculo de Presiones en el Colector

Para calcular la presión en el colector, se recurrió a la ecuación de Bernoulli, es una de las más importantes en la mecánica de fluidos, ayuda a resolver una gran cantidad de problemas en la vida real, siempre y cuando se cumplan tres condiciones para poder aplicarla:

- El fluido debe de ser de régimen estacionario
- El fluido debe ser incomprensible
- El fluido no debe ser viscoso

En este caso, se cumplieron dos de las tres condiciones, pero como el aire tiene una viscosidad relativamente baja, se podría considerar como un fluido no viscoso. Eso hace que si se pueda usar la ecuación 3.3 de Bernoulli y poder calcular las presiones.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \gamma \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \gamma \cdot h_2$$

Como el diseño del túnel es horizontal se puede observar en la fórmula el término $\gamma \cdot h$ que se refieren a la energía potencial que se genera al cambio de alturas. Al ser que la altura 1 es igual a la altura 2, estos términos se eliminan y la ecuación se simplifica:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 \quad (11)$$

Despejando la presión 2 y sustituyendo los datos de la tabla 7.

Velocidad Salida v2	50.00 m/s
Velocidad Entrada v1	3.40 m/s
Presión Atmosférica P1	78130.0 Pa
Densidad ρ	0.910 Kg/m ³

Tabla 7 Magnitudes para Determinar la Presión

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$$

$$P_2 = 77124.43 \text{ Pa} = 77.12 \text{ kPa}$$

Ahora se saca la diferencia entre presiones:

$$P_1 - P_2 = 78130 - 77124.43 = 1005.57 \text{ Pa}$$

$$= 1.01 \text{ kPa}$$

Se observó que, al reducir el área transversal, disminuye la presión y aumenta la velocidad.

Diseño de la Geometría del Colector

Hay dos formas para diseñar la geometría del colector. La primera es haciendo cálculos matemáticos usando una fórmula. La segunda (es la forma en la que se hizo), fue utilizando el programa de Solid Works.

Primera Forma: Usando Formula

Se utilizó la fórmula de 5to orden polinómica del modelo de Brassard, asegurando la condición de que la primera y segunda derivada son cero a la entrada y a la salida. Dando la ecuación 12:

$$h = [-10(\xi)^3 + 15(\xi)^4 - 6(\xi)^5](h_i - h_o) + h_i \dots\dots\dots (12)$$

$$\xi = \frac{X}{L}$$

Dónde:

- ξ = Razón de Longitud
- X = Longitud del Colector Parcializada en Pequeños Tramos (m)
- L = Longitud del Colector (m).
- h_i = Altura del Colector en la Entrada de Aire a Partir del Eje de Simetría (m)
- h_o = Altura del Colector en la Salida de Aire a Partir del Eje de Simetría (m)

En la Figura 2 se podrá apreciar las cotas y forma del colector para poderlo sustituir en la ecuación 12.

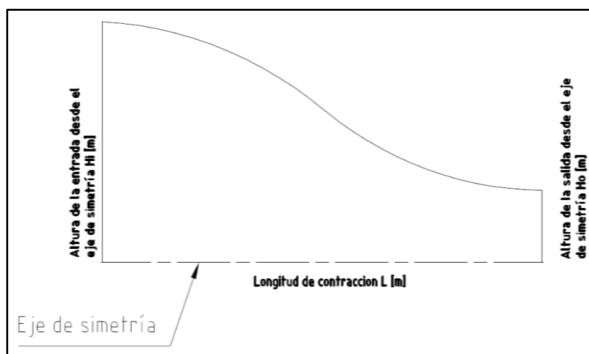


Figura 2 Geometría del Colector

Las medidas del colector están dadas por la tabla 8:

Longitud L	0.600 m
Longitud de Entrada h_i	0.300 m^2
Longitud de Salida h_o	0.175 m^2

Tabla 8 Cotas del Colector

Sustituyendo los datos en la ecuación 11, nos genera la Figura 3 que es la forma que deberá de tener el colector.

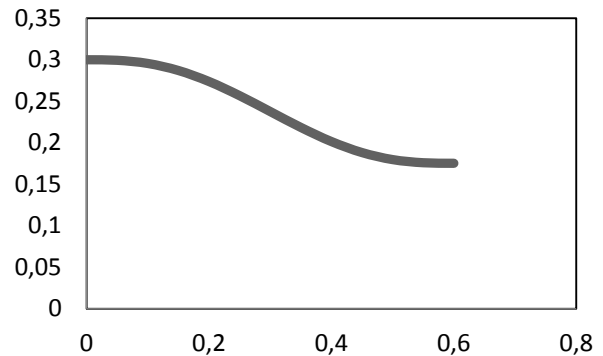


Figura 3 Forma del Colector

Segunda Forma: Usando SolidWorks

Se dimensiona el colector con los datos de la tabla 9 y se empieza a dibujar.

Longitud L	0.600 m
Área de Entrada A1	0.360 m^2
Área de Salida A2	0.1225 m^2

Tabla 9 Tamaño del Colector

Se dibujó en SolidWorks en dos partes, partiendo de la mitad de la longitud (30 cm) se hizo un cubo con el área de salida y otro cubo después con la otra mitad de entrada y su área respectiva (Figura 4).

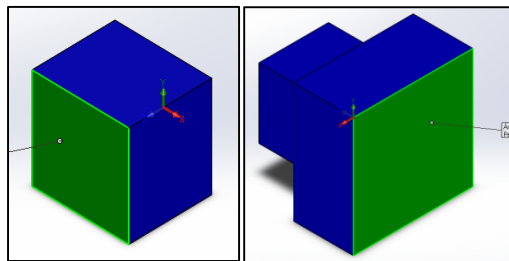


Figura 4 Primera y Segunda Mitad del Colector

Después se usó la función de redondeo hasta el máximo (Figura 4) que permitiera el programa en el área de salida (por que tiene la menor área del colector), una pasando cierto límite, el programa no permite realizar la operación (Figura 5).

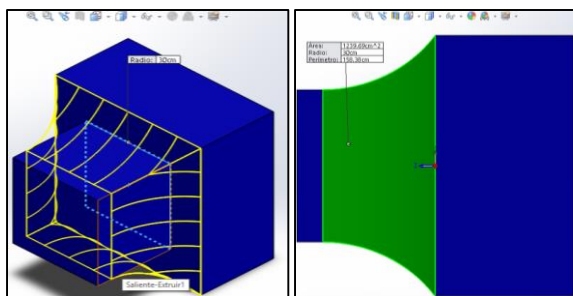


Figura 5 Redondeo del Área de Salida

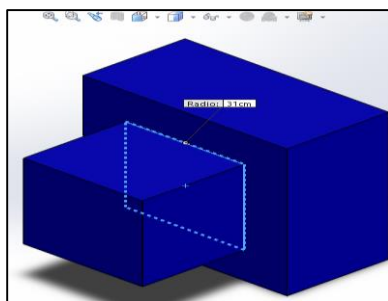


Figura 6 Pasando el Límite del Redondeo

Se vuelve a usar la función de redondeo, pero ahora para el área de entrada, con la diferencia de que en este no se va a usar el máximo radio de redondeo, sino va a ser igual al radio de redondeo de salida (Figura 7) para generar una curva igual para que sea tangente a la primera curva.

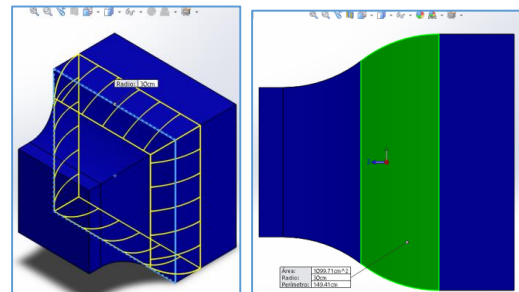


Figura 7 Redondeo del Área de Entrada

Se puede apreciar más de cerca las curvas del colector en la Figura 8, que son parecidas a las que se obtuvieron con el método matemático.

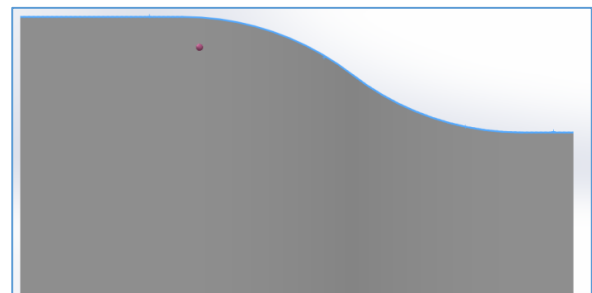


Figura 8 Curvas del Colector

Calculo de Perdidas en el Colector

La pérdida de energía es directamente proporcional a la velocidad del fluido al fluir alrededor de una contracción como el colector. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en coeficientes de resistencia (*k*), de la siguiente manera:

$$hf = k_c \frac{v^2}{2g} \tag{12}$$

Dónde:

- *hf* = Coeficiente de Perdida menor
- *k* = Coeficiente de Resistencia

Para saber el valor *k*, depende de la proporción de los tamaños de los conductos como también la magnitud de la velocidad de flujo. En la Figura 9 se muestran las cuatro configuraciones de los conductos y el valor sugerido de *k* para cada una.

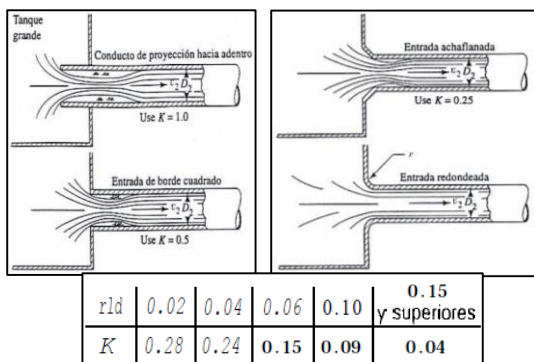


Figura 9 Coeficiente de Resistencia a la Entrada. Conducto de Proyección hacia adentro

(a), Entrada Achaflanada (b), Entrada de Borde de Cuadrado (c) y Entrada Redondeada (d).

Se uso la “Entrada Redondeada” para saber el valor de *k* donde se conoce el radio del colector con lo que se hizo el conducto y también se sabe el diámetro de la salida. Por lo tanto, se tiene:

$$\frac{r}{d_s} = \frac{30}{35} = 0.86$$

Con el resultado de 0.86 y viendo la tabla de la Figura 9 (d), que dice que diferencias mayores de 0.15, el valor del coeficiente de perdida es *k*= **0.04**, ese es el valor que sustituiremos en la ecuación 12 de pérdidas y, utilizando los datos de la tabla 10 se obtendrá su valor.

Coeficiente Resistencia <i>k</i>	de	0.04
Velocidad <i>v</i>		50.00 m/s
Gravedad <i>g</i>		9.78 m/s ²

Tabla 10 Datos para la Ecuación de Perdidas del Colector

$$hf = 5.11 m$$

Mallas de Rectificado del Flujo

Se ubica al inicio de todo el túnel de viento y sirve para rectificar el flujo de aire que ingresara. Está compuesto por mallas que deben de estar montadas firmemente, de lo contrario pueden pandearse notablemente, perturbando la capa limite. Existen distintos tipos de perfiles de mallas como son el hexagonal (panel), circular y cuadrada (como se pueden ver en la Figura 10). Una malla también refracta el flujo incidente hacia la normal local y reduce la intensidad de turbulencia en todo el campo de flujo.

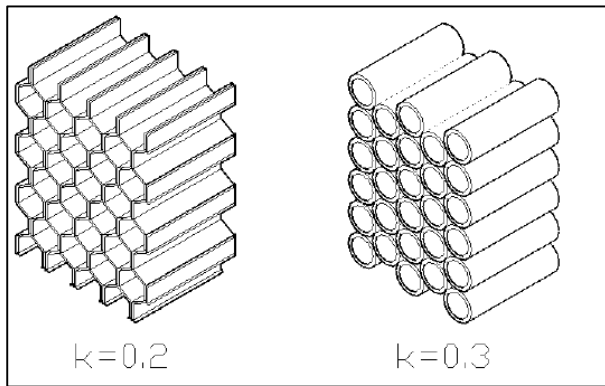


Figura 10 Coeficiente de Pérdidas

Calculo de Perdidas en las Mallas

El modo de encontrar el coeficiente de resistencia *k* va a depender del tipo de malla que se elija. De los tres tipos (Figura 9) el que menos resistencia se opone es el de forma hexagonal (Panal), pero su fabricación es un poco complicada, por lo que se optó por la forma circular.

Se volverá a utilizar la ecuación 4.13 de pérdidas menores que se utilizó en el colector, pero ahora, la velocidad no será la de 10 m/s, sino, se utilizara la velocidad de entrada que se calculó con anterioridad, teniendo entonces:

$$hf = k_L \frac{V^2}{2g}$$

Dónde:

- k_{df} = Coeficiente de Perdidas de la Malla.

Usando los datos de la tabla 11 y sustituyendo los en la fórmula de perdidas, se tiene:

Coeficiente de Resistencia K	0.30
Velocidad de Entrada v	17.01 m/s
Gravedad g	9.78 m/s ²

$$hf = 4.44 \text{ m}$$

Tabla 11 Datos para la Ecuación de Perdidas del Mallado

Difusor

El difusor disminuye la velocidad de flujo de aire lentamente para evitar la separación de la capa límite que se va a llegar a formar en la cámara de pruebas. La forma más conveniente es una expansión gradual para reducir las pérdidas y evitar la turbulencia manteniendo así un flujo uniforme en el túnel.

Para hacer los cálculos y la dimensionar el colector con una expansión gradual que se encuentran definidas por la cámara de pruebas y el tamaño del ventilador axial. La longitud del difusor queda limitada a tener un ángulo (Figura 11) no mayor a 2.5° definido por la relación de áreas.

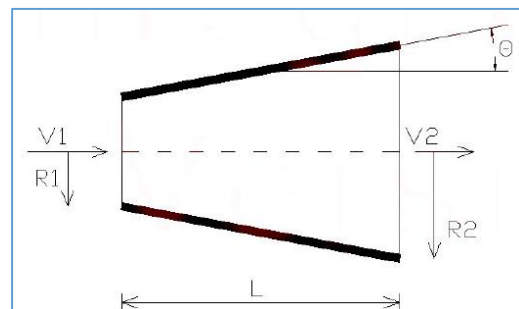


Figura 11 Difusor

Como la sección de entrada es rectangular y la salida es circular, viendo la Figura 13 se utiliza **R1** como la mitad del diámetro hidráulico a la entrada del difusor, **R2** como la mitad de la circunferencia a la salida del difusor y **L** como la longitud que los separa. De esta forma, se obtiene la siguiente ecuación para calcular el ángulo:

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R - 1}}{\frac{L}{D_1}}\right) \quad (13)$$

Dónde:

- R_2 = Radio hidráulico de la sección final (m).
- R_1 = Radio hidráulico de la sección inicial (m).
- L = Longitud de la sección (m).
- D_1 = Diámetro hidráulico
- A_R = Relación de áreas A_2/A_1

Se tienen los valores del área circular como del área rectangular y se pueden ver en la tabla 12.

Área de Entrada (Circular) R2	0.130 m ²
Área de Salida (Rectangular) R1	0.1225 m ²

Tabla 12 Relación de Áreas del Difusor

Dichos valores se sustituyen para obtener la relación de área:

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} = \frac{0.13}{0.1225} = 1.03$$

El difusor tendrá una longitud de **80 cm**, con esto, se tienen todos los valores llenar la tabla 13 y poder sustituirlos en la ecuación 13.

Relación de Áreas A_R	1.03
Longitud L	0.80 m
Diámetro Hidráulico D_h	0.35 m

$$\theta = 2.01^\circ$$

Tabla 13 Ángulo del Difusor

Este ángulo es bastante aceptable por no superar los 2.5° que se había planteado.

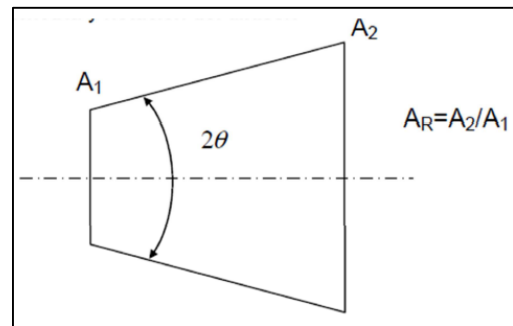


Figura 12 Difusor

Viendo la Figura 12, se multiplica dos veces el ángulo (**2θ**) para tener el ángulo interno y buscar en la figura 13 el valor del coeficiente de pérdidas **k**.

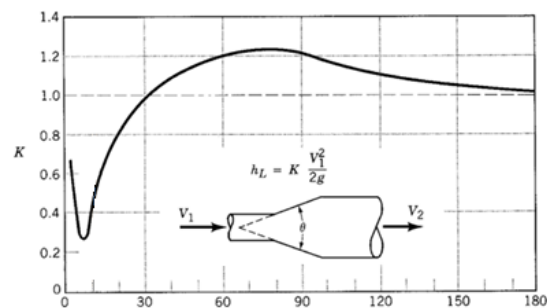


Figura 13 Coeficiente de Pérdidas en una Expansión Gradual

Dado el que el ángulo es $\theta = 4.02^\circ$, entonces se localiza el coeficiente de pérdidas en la Figura 13 obteniendo un valor aproximado de $k = 0.34$.

El cálculo de pérdidas se da por la ecuación 14:

$$hf = k_{dif} \frac{v_3^2}{2g} \quad (14)$$

Dónde:

- k_{dif} = Coeficiente de Pérdidas
- V^2 = La Velocidad de Salida del Difusor

La velocidad de salida del difusor es una incógnita nueva, pero se puede calcular con la ecuación de continuidad o con los caudales que deben ser los mismos a lo largo de todo el túnel:

$$V_{Dif} = V_{Cám Pru} * \frac{A_1}{A_2} \quad (15)$$

Dónde:

- V_{Dif} = Velocidad del Difusor
- $V_{Cám Pru}$ = Velocidad de la Cámara de Pruebas
- A_1 = Área de Entrada del Difusor
- A_2 = Área de Salida del Difusor

Sustituyendo los datos:

$$V_{Dif} = 50 \left(\frac{m}{s} \right) * \frac{0.1225 m^2}{0.13 m^2}$$

$$V_{Dif} = 48.74 m/s$$

Sustituimos todos los datos de la tabla 14 en la ecuación 15 para obtener las pérdidas.

Coeficiente de Resistencia k	0.340
Velocidad de Salida v	48.74 m/s
Gravedad g	9.78 m/s ²

$$hf = 41.30 m$$

Tabla 14 Pérdidas en el Difusor

Finalmente, se calcula la presión a la salida del difusor conociendo la presión a la entrada, que es la misma a la salida en la cámara de pruebas. Teniendo en cuenta otra vez la ecuación de Bernoulli:

$$P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \gamma \cdot z_2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_3^2 + \gamma \cdot z_3 \quad (16)$$

Simplificando la ecuación porque tanto el peso específico y la altura ($\gamma \cdot z$) no varían y tampoco la densidad del aire, queda la ecuación como:

$$P_2 + \frac{1}{2} v_2^2 = P_3 + \frac{1}{2} v_3^2 \quad (17)$$

Despejando la P_3 (presión en el difusor) nos quedamos con:

$$P_3 = P_2 + \frac{1}{2} v_2^2 - \frac{1}{2} v_3^2 \quad (18)$$

Dónde:

- P_2 = Presión de Entrada
- v_3^2 = Velocidad de Salida del Difusor
- v_2^2 = Velocidad de Entrada del Difusor

Sustituyendo los datos de la tabla 15 en la ecuación 18, sabremos la presión a la salida.

Presión Entrada P2	78130.00 Pa
Velocidad de Salida V3	9.75 m/s
Velocidad de Entrada V2	50.00 m/s

$$P_3 = 78192.15 \text{ Pa} = 78.19 \text{ Kpa}$$

Tabla 15 Datos para Calcular la Presión en el Difusor
Con esto, vemos que la presión de salida va a aumentar ligeramente a la presión de entrada

El reajuste de los cálculos para una mejor eficiencia en el Túnel de Viento. Por eso fue que se compró un ventilador/extractor axial industrial de 1/4 HP, que da la potencia necesaria para alcanzar tanto la velocidad como el caudal.

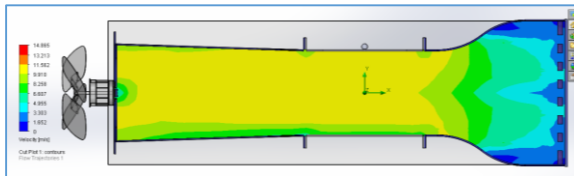


Figura 14 Análisis del desempeño del túnel de viento

En la figura 15 se puede observar el túnel de viento ensamblado.



Figura 15 Túnel de viento armado

Instrumentación y Control

A continuación, se mencionaron los equipos que se adquirieron:

Máquina de humo

Se compró una máquina de humo marca “STEELPRO” de 500 Watts de potencia (Figura 16). Esta máquina es muy útil debido a su gran potencia y al rápido calentamiento del líquido se pueden hacer descargas continuas de humo sin tener que esperar bastante tiempo a que recargue.



Figura 16 Máquina de Humo

Variador de Frecuencia (Dimmer)

Los variadores de frecuencia para un motor monofásico son muy difíciles de conseguir y tienen un costo muy elevado. Para esto se buscó fabricar un dimmer que soportara el amperaje que genera el motor al arranque. Así que se calculó la corriente que necesita el motor tomando en cuenta que es de ¼ de HP.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{186.50}{127} = 1.47 \rightarrow \text{redondeando} \rightarrow 1.50 \text{ A} \quad (19)$$

La corriente que necesita el ventilador para el arranque es de **1.50A**, pero algunos de los motores al momento del arranque generan un consumo tres veces la corriente con la que funciona normalmente, teniendo así un consumo de **4.50A** (aunque este motor cuenta con un capacitor, toma en cuenta los 4.50A).

Con estos cálculos se dibujó y fabricó un dimmer que soportara la capacidad de corriente del motor, pero aun con todo y los cálculos, no soportó el arranque del motor y quemó el circuito a la segunda prueba.

Pruebas de funcionamiento.

Primero se probó la funcionabilidad del túnel de viento midiendo la velocidad del viento con un anemómetro en cada sección del túnel y después esa velocidad se comparó con las que se obtuvieron en la simulación de SolidWorks y en la memoria de cálculo. Se verá a continuación en la tabla 16:

Parte del Túnel	Velocidad Real (m/s)	Velocidad Simulación (m/s)	Velocidad Memoria de cálculo (m/s)
Colector	3.40	3.30 – 4.95	3.40
Cámara de Pruebas	7.00	9.91 – 11.56	10.00
Difusor	9.80	9.91 – 11.56	9.75
Ventilador	12.00	S/N	S/N

Tabla 16 Velocidades en el Túnel de Viento

Después se colocaron objetos en la cámara de pruebas para observar mejor su aerodinámica y ver el efecto del viento que ejercía sobre ellos a distintas velocidades. Se probaron turbinas de gas, agua y vapor, pero como la línea de viento es irregular en la cámara de pruebas, se tuvo que buscar donde el viento chocaba con ellas para aprovechar su máximo desempeño.

Turbina de Agua

La primera turbina en probar fue la turbina de agua. En esta turbina se puede observar como el viento impacta sobre la turbina y esta a su vez rota, pero también tiene cierta aerodinámica, pero a penas y se percibe.



Figura 17 Modelo de turbina de agua

Turbina de Vapor

La segunda turbina en probarse fue la de vapor. Esta turbina fue la que mejor desempeño tuvo, solo encontró la corriente de viento y rotaba con bastante facilidad y se observó con el humo que la turbina aprovecho al máximo el viento.



Figura 18 Modelo de turbina de vapor

Turbina de Gas

La última turbina en hacerle pruebas fue la de gas. En esta no se pudo encontrar el flujo de viento capaz de hacer que girara. Esto sucedió a que el tipo de alabes que tienen estas turbinas necesitan una corriente de flujo tangencial para hacerlas rotar. Lo único que se pudo ver en esta prueba fue como aerodinámicamente la turbina cortaba el humo.



Figura 19 Modelo de turbina de gas

Agradecimiento

Se agradece el apoyo de:

- Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, al área del PAPIIT
- Técnico Rosendo Méndez Gallo
- Diseñador Industrial Felipe Cornejo Cárdenas

Conclusiones

Pese a no cumplir los objetivos principales, los resultados que se alcanzaron son satisfactorios teniendo una mínima pérdida a lo largo del túnel y pudiendo hacer pruebas aerodinámicas a objetos. A continuación, se mencionarán las conclusiones a las que se llegaron:

- La memoria de cálculo es súper importante, esta da una apreciación mejor de qué tipo de ventilador se va a necesitar para alcanzar una determinada velocidad, también da la optimización de un diseño geométrico para tener el mínimo en pérdidas y aprovechar al máximo el túnel de viento
- El diseñar y hacer simulaciones del túnel de viento en SolidWorks, ayuda a visualizar el resultado que se quiere llegar. No solo eso, se puede comprobar en parte los cálculos que se realizaron antes y ver qué tan lejos o cerca se estuvo al momento de realizarlos.

- La velocidad en la cámara de pruebas fue un objetivo no alcanzado. esto sucedió a que el rendimiento no sea el adecuado sobre la superficie del colector y el difusor no fuese lisa por la mala aplicación de la fibra de vidrio al no tener conocimientos de métodos para hacer los moldes del difusor y el colector (como usar espuma de poliuretano) y tener un mejor acabado; también si no se hubiera usado resanador ni espuma (cosas que hicieron que aumentara su masa) vieran sido ligeras las partes (otro objetivo que no se alcanzó).

Otros factores que pueden influir es la potencia de 1/4 de HP del ventilador y que, aunque se le hizo una cubierta, esta no tiene un sellado total, haciendo que tenga fugas y no se aproveche su máxima potencia.

- No se puede apreciar la aerodinámica de objetos porque el humo le hace falta densidad, pero en objetos grandes se aprecia con bastante nitidez.

Recomendaciones

Se va a cambiar de ventilador por uno más potente y con mayor velocidad, es necesario volver a rediseñar y construir el difusor y colector del túnel para evitar mayores pérdidas. Si se vuelven a construir, será con una mejor técnica hacer los moldes y colocar la fibra de vidrio u otro material que vaya a ser empleado para así mejorar considerablemente el túnel.

- Construir una mesa para tener el túnel de viento en una superficie nivelada (los planos se agregarán en el anexo).
- Modificar la máquina de humo de tal modo que funcione como el túnel de Marey para apreciar mejor la aerodinámica o hacer un hilo de humo que enfoque mejor sobre la superficie de los objetos a observar.

- Buscar la manera más práctica de calcular la velocidad del viento. No solo eso, también, hacer la balanza aerodinámica en la impresora 3D y utilizar galgas extensiométricas o sensores que calculen la presión del viento sobre un objeto y la fuerza que se genera sobre de él. Los resultados deberán ser por sección del artículo.

Referencias

- Dassault Systèmes, S.A. (2016) Manual SolidWorks Corp.
- Acevedo Vélez, F. (2006). Diseño de un Túnel de Viento para Prueba de Ventiladores y Perfiles Aerodinámicos. Medellín, Colombia.
- Brassard, G. (2000). Fundamentos de Algoritmia. Montreal, Canada Prentice Hall.
- Chicago Blower Argentina S.A. (2006). Clasificación de los Ventiladores. Recuperado el 4 de Diciembre de 2015, de http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria_de_los_ventiladores.htm#definiciones
- Chicas Molina, F. E. (2012). Diseño y Construcción de un Túnel de Viento. Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- Club AERODYNE IUT CACHAN. (4 de Abril de 2013). Association d'Etudes & Réalisations en Optimisation Dynamique & Energétique. Recuperado el 12 de Octubre de 2015, de Vernissage de L'exposition : Les Souffleries 100 Ans Après Eiffel: <http://aerodyne-cachan.blogspot.mx/2013/04/vernissage-de-lexposition-les.html>
- Coët, M.-C., Chanetz, B., & Peter, M. (29 de 01 de 2013). Gustave Eiffel, pionnier de l'aérodynamique. 3AF.
- Cruz Fierro, C. F. (6 de Enero de 2006). Instituto Tecnológico de Durango. Recuperado el 10 de Enero de 2016, de Formularios: <http://tecno.cruzfierro.com/formularios/estimacion/viscosidad-rev6>
- Damljanović, D. (2012). Gustave Eiffel and the Wind: A Pioneer in Experimental Aerodynamics. Scientific Technical Review, 62(3-4), 3-13.
- Eiffel, G. (1914). Nouvelles recherches sur la résistance de l'air et l'aviation faites au laboratoire d'Auteuil. Paris: H. Dunot et E. Pinat.
- Mannoni, L. (2004). Mouvements De L'air, Etienne-Jules Marey, Photographe Des Fluides. (Gallimard, Ed.) Art et Artistes.
- Potter, M. C., & Wiggert, D. C. (2007). Mecánica de Fluidos (Tercera ed.). Distrito Federal, México: Thomson.
- Resnick, R., & Halliday, D. (1971). Física (Parte 1). Distrito Federal, México: CESCOSA.
- Smithsonian Institution. (1913). Curtiss & Eiffel Awarded Langley Medal. Washington DC, United State: Chronology of Smithsonian History.
- Tippens, P. E. (1997). Física: Conceptos y Aplicaciones (Quinta ed.). D. F., México: McGraw-Hill.