



DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO  
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

## **Análisis y Diseño de Prácticas a Desarrollarse en un Túnel de Viento Enfocadas a Arquitectura Bioclimática**

Juan Carlos Pedraza Vidal

Tesis para optar por el grado de Maestría en Diseño  
Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática

**Dr. José Roberto García Chávez**  
*Director de la tesis*

Miembros del Jurado:

Mtro. Hugo Solis Correa  
Dr. Juan José Ambriz García  
Dr. Hernando Romero Paredes Rubio  
Dr. Ricardo Aguayo González

Invitado Especialista en la Materia  
Ing. Fausto Rodríguez Ibarra

México D.F.  
Noviembre de 2012

## ÍNDICE GENERAL

---

1. Resumen .....	12
2. Abstract.....	14
<b>3. Capítulo 1.....</b>	<b>16</b>
Sinopsis.....	17
3.1 Presentación.....	17
3.2 Antecedentes.....	18
3.3 Objetivo e Hipótesis General.....	26
3.4 Justificación.....	27
3.5 Alcances.....	27
3.6 Síntesis de la investigación.....	28
<b>4. Capítulo 2.....</b>	<b>31</b>
4.1 Túnel de viento.....	32
4.2 Mecánica de fluidos.....	36
4.3 Flujo laminar y turbulencia .....	37
4.4 Tipología de túneles .....	39
4.5 Aplicaciones .....	49
<b>5. Capítulo 3.....</b>	<b>51</b>
Túnel de viento y Arquitectura Bioclimática .....	52
5.1 Transmisión de calor .....	52
5.2 Corrientes de convección .....	53
5.3 Pendiente de terreno .....	54
5.4 Relación de forma de la vivienda con el viento.....	55
5.5 Ventilación natural y artificial .....	55
5.6 Perfil de velocidades del viento.....	59

5.7 Cortinas rompevientos.....	59
5.8 Efecto “STACK” .....	60
<b>6. Capítulo 4.</b> .....	<b>61</b>
Visualización de flujo.....	62
6.1 Técnicas de visualización de flujo.....	67
6.2 Por inyección de humo.....	68
6.3 Por hilos colocados en la superficie.....	68
6.4 Por polvos de madera balsa.....	73
<b>7. Capítulo 5.</b> .....	<b>76</b>
Acondicionamiento de la calidad de flujo en la sección de prueba.....	77
7.1 Regulación de la velocidad de viento.....	87
7.2 Simulación de la capa límite terrestre.....	91
7.3 Medición de presión.....	94
7.4 Instrumentación.....	97
7.5 Diagramas de distribución.....	102
7.6 Medición de velocidad.....	109
<b>8. Capítulo 6.</b> .....	<b>112</b>
Análisis y diseño de las diferentes pruebas a realizar en el túnel de viento.....	113
8.1 Práctica 1. Determinación de condiciones ambientales.....	121
8.2 Práctica 2. Utilización del tubo Pitot.....	126
8.3 Práctica 3. Calibración del túnel de succión.....	132
8.4 Práctica 4. Técnicas de visualización de flujo .....	134
8.5 Práctica 5. Simulación de la capa límite terrestre.....	139
8.6 Práctica 6. Distribución de presión en el exterior de una edificación....	145

8.7	Práctica 7. Distribución de presión en el interior de unaedificación.....	151
8.8	Práctica 8. Estudio de la influencia de los accidentes geográficos en las características del viento.....	155
8.9	Práctica 9. Estudio de la influencia de la vegetación exterior en la cinemática.....	163
8.10	Práctica 10. Estudio aerocinemático de las envolventes de lasedificaciones.....	169
8.11	Práctica 11. Optimización de ventilación de una viviendaunifamiliar..	176
9.	<b>Capítulo 7</b> .....	179
	Elaboración de un Manual de Calibración y Operación del Túnel de Viento	180
9.1	ConclusionesManual de Calibración y Operación del Túnel de Viento...	191
9.2	Conclusiones por Capitulo.....	192
9.3	Glosario.....	196
9.4	Bibliografía.....	197
9.5	Anexos.....	199

### Capítulo 1

**Figura 1.** Potencial Eólico en México

**Figura 2.** Patrón de los vientos

**Figura 3.** Dirección de los vientos

**Figura 4.** Frecuencia, turbulencia, ráfaga y capa límite

### Capítulo 2

**Figura 5.** Características del Túnel de Viento

**Figura 6.** Flujo Turbulento

**Figura 7.** Flujo Laminar

**Figura 8.** Esquema del túnel de viento y sus partes

**Figura 9.** Abanico de flujo axial

**Figura 10.** Abanico de flujo radial

**Figura 11.** Túnel de viento de circuito cerrado<sup>2</sup>

**Figura 12.** Túnel de succión

**Figura 13.** Túnel de presión de impacto

### Capítulo 3

**Figura 14.** Las ventanas y la dirección del viento

**Figura 15.** Corrientes de convección (túnel apagado)

**Figura 16.** Corrientes de convección (túnel funcionando)

**Figura 17.** Influencia de las características topográficas en el comportamiento del viento

**Figura 18.** Comportamiento aerodinámico de la vivienda en función de su forma

**Figura 19.** Identificación de corrientes generadas por la ventilación natural

**Figura 20.** Estudio del funcionamiento de “malgafs”

**Figura 21.** Sistema básico de acondicionamiento de aire

**Figura 22.**Lugar correcto para la colocación de extractores según vientos dominantes

**Figura 23.**Perfil de velocidades en un medio suburbano

**Figura 24.**Colocación de una cortina rompevientos

**Figura 25.**Mal funcionamiento de una chimenea debido al efecto “stack”

#### **Capítulo 4**

**Figura 26.** Líneas de corriente

**Figura 27.**Tubo de corriente

**Figura 28.**Visualización de flujo por medio de hilos

**Figura 29.**Dispositivo de inyección de humo

**Figura 30.**Inyector de humo, corriente arriba

**Figura 31.**Densidad Linear

**Figura 32.**Inyección de humo en la superficie del modelo

**Figura 33.**Punto específico de inyección de humo

**Figura 34.** Polvo de madera balsa a través de malla de alambre

**Figura 35.** Iluminación a 90°, respecto del eje visual

#### **Capítulo 5**

**Figura 36.** Campana abierta

**Figura 37.**Vista lateral de la campana abierta

**Figura 38.**Campana cerrada

**Figura 39.**Vista lateral de la campana cerrada

**Figura 40.**Campana combinada

**Figura 41.**Vista lateral de la campana combinada

**Figura 42.**Detalle de la transformación de una sección cuadrada en cuatro subsecciones octagonales

**Figura 43.**Diagrama de la generación de capa límite sobre una placa plana

**Figura 44.** Crecimiento de la capa límite en las cuatro paredes de la sección de prueba deltúnel

**Figura 45.** Forma de colocar chaflanes a la sección de prueba para compensar el crecimiento de la capa límite y mantener una velocidad constante

**Figura 46.** Regulación de la velocidad de flujo mediante el uso de persianas

**Figura 47.** Regulación de la velocidad de flujo mediante el uso de compuertas deslizables

**Figura 48.** Regulación de la velocidad de flujo mediante el uso de compuertas

**Figura 49.** Elementos simuladores de turbulencia/capa límite terrestre

**Figura 50.** Cubo

**Figura 51.** Arreglo de los elementos generadores de turbulencias/capa límite en la sección de prueba del túnel de viento

**Figura 52.** Flujo de aire en un ducto de sección variable

**Figura 53.** Diagrama de un manómetro de tubo de Bourdon

**Figura 54.** Manómetro de columnas líquidas

**Figura 55.** Manómetro diferencial

**Figura 56.** Forma de conectar el manómetro diferencial al túnel

**Figura 57.** Manómetro en "U"

**Figura 58.** Vista del arreglo de tres tomas de presión en una maqueta

**Figura 59.** Detalle de la construcción de la toma de presión

**Figura 60.** Forma de colocar en el túnel de viento a una maqueta con tomas de presión

**Figura 61.** Selección de planos para la elaboración del diagrama de distribución de presión

**Figura 62.** Plano A

**Figura 63.** Plano B

**Figura 64.** Distribución de presión en el plano A

**Figura 65.** Distribución de presión en el plano B

**Figura 66.** Colocación de tomas

## **Capítulo 6**

**Figura 67.** Tubo Pitot Estático

**Figura 68.** Luz encendida para fotografía con exposición prolongada

**Figura 69.** Fotografía con iluminación artificial con exposición en tiempo elevado

**Figura 70.** Modelo con hilos para visualizar flujo de aire

**Figura 71.** Modelo con polvo de madera balsa para visualizar flujo de aire

**Figura 72.** Perfil de velocidades

**Figura 73.** Elementos modificadores del perfil de velocidades

**Figura 74.** Tubo Pitot y generadores de turbulencia

**Figura 75.** Mayor cantidad de generadores de turbulencia

**Figura 76.** Vectores

**Figura 77.** Modelo conectado a manómetro para medir presión exterior del mismo

**Figura 78.** Disposición de tomas de presión

**Figura 79.** Modelo conectado a manómetro para medir la presión interior del mismo.

**Figura 80.** Disposición de tomas de presión

**Figura 81.** Efecto de una depresión en el viento

**Figura 82.** Elevación del terreno que provoca

**Figura 83.** Vista lateral del montaje desprendimiento

**Figura 84.** Vista en perspectiva

**Figura 85.** Vista lateral del montaje

**Figura 86.** Vista en perspectiva

**Figura 87.** Modelo afectado por una arboleda

**Figura 88.** Distribución de presión interior en edificación afectada por una arboleda

**Figura 89.** Indicación de tomas de presión

**Figura 90.** Medición de presión en modelo con envolvente

**Figura 91.** Modelo anterior sin tejado

**Figura 92.** Modelo anterior sin tejado

**Figura 93.** Visualización de flujo al interior de una vivienda

## **Capítulo 7**

**Figura 94.** Anemómetro de tubo pitot-estático

**Figura 95.** Guiñómetro

**Figura 96.** Plano transversal de la sección de prueba

**Figura 97.** Disminución de velocidad del viento

**Figura 98.** Túneles de viento simuladores de capa límite atmosférica.

**Figura 99.** Túnel de viento simulador de capa límite



- Figura 100.** Túnel de viento de circuito cerrado
- Figura 101.** Estación
- Figura 102.** Higrómetro / Termómetro
- Figura 103.** Termómetro Digital
- Figura 104.** Manómetro de Columna
- Figura 105.** Anemómetro Digital
- Figura 106.** Anemómetro Digital
- Figura 107.** Tubo Pitot
- Figura 108.** Anemómetro
- Figura 109.** Guiñómetro
- Figura 110.** Complemento de Guiñómetro
- Figura 111.** Túnel de Viento en ubicación anterior
- Figura 112.** Túnel de Viento en ubicación anterior
- Figura 113.** Túnel de Viento en nueva ubicación
- Figura 114.** Adecuaciones en salida de Túnel de Viento
- Figura 115.** Colocación de chaflanes en interior de Túnel de Viento
- Figura 116.** Anemómetro Digital
- Figura 117.** Sistema de Inyección de Humo
- Figura 118.** Sistema de Inyección de Humo
- Figura 119.** Inyección de Humo
- Figura 120.** Sistema de Inyección de Humo

**Capítulo 2**

Ecuación 1	$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$
Ecuación 2	$Cp = \frac{P_L - P_E}{P_T - P_E}$
Ecuación 3	$Cp = 1 - \left(\frac{V_L}{V}\right)^2$
Ecuación 4	$\delta = \frac{5.2X}{\sqrt{Re_x}} \quad (Re_x \leq 5 \times 10^4)$

**Capítulo 5**

Ecuación 5	$P_T = P_E + \frac{1}{2} \rho V^2$
Ecuación 6	$A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3 = A_n V_n$
Ecuación 7	$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$
Ecuación 8	$A_1 V_1 = A_2 V_2$
Ecuación 9	$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \frac{A_1^2}{A_2^2} V_1^2$
Ecuación 10	$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right)}}$

Ecuación 11

$$P_T = P_L + \frac{1}{2} \rho V_L^2$$

Ecuación 12

$$C_p = \frac{P_T - \frac{1}{2} \rho V_L^2 - (P_T - \frac{1}{2} \rho V^2)}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Ecuación 13

$$C_p = 1 - \left( \frac{V_L}{V} \right)^2$$

Ecuación 14

$$V_L = V \sqrt{1 - C_p}$$

## Capítulo 6

Ecuación 15

$$V = \sqrt{\frac{2q}{\rho}}$$

## Capítulo 7

Ecuación 16

$$P = \Delta h \times \gamma \times \text{sen} \beta$$

Ecuación 17

$$V = \sqrt{\frac{2(P_T - P_E)}{\rho}}$$

## Resumen

El fin fundamental de este trabajo es proporcionar el tipo de pruebas, cuyas características y condiciones principales estén definidas a fin de que éstas mismas, puedan ser utilizadas como un instrumento para la investigación, que proporcione el grado de exactitud aceptable en proyectos y desarrollos tecnológicos en arquitectura bioclimática.

Es necesario aclarar que dentro del contexto de este trabajo, no se tratarán aspectos como el diseño del túnel de viento o equipo de medición a utilizar; sin embargo, se efectuará un estudio de semejanza y análisis para poder determinar al final del presente trabajo un manual de operación y calibración del equipo a utilizar. Las siguientes consideraciones se tomaron para el desarrollo de las diferentes pruebas:

En el módulo básico se tiene el propósito de introducir al alumno a las mediciones de las propiedades del aire atmosférico, presión, temperatura y humedad, utilizando los instrumentos de medición: barómetro, termómetro e higrómetro.

En la segunda práctica se propone el conocimiento de los instrumentos que miden la presión como manómetros de columna de agua y manómetros de tubo de Bourdon así mismo se hace uso de anemómetros como el tubo pitot.

Finalmente se incluye la calibración del túnel de succión para que el alumno conozca las propiedades del flujo que este genera.

En el módulo intermedio se tiene el primer contacto con las técnicas de aerodinámica experimental en su rama de estudios cualitativos, se aprenden las técnicas de visualización aplicables a la arquitectura bioclimática en el túnel de viento.

También se aprende a aprovechar al túnel como un simulador de las condiciones del viento atmosférico, en especial en la reproducción de las características de la capa límite terrestre. Finalmente el módulo concluye con un análisis aerodinámico cuantitativo al medir la distribución de la presión del viento tanto en el interior como en el exterior de una maqueta de una edificación.

En el módulo avanzado se tienen aplicaciones específicas de la aerodinámica experimental en la arquitectura bioclimática, se aprende como influyen los accidentes geográficos y la vegetación circundante en las características del viento que bañan a la edificación. Se conoce como se puede modelar el comportamiento del viento mediante los elementos que integran a la envolvente de la edificación como cornisas, remates, doseles, tejados etc. Y finalmente se experimenta con un modelo tipo estudio de casos para optimizar su ventilación.

## **Abstract**

### **Analysis and Proving Design to Develop in a Wind Tunnel focused on Bioclimatic Architecture.**

The fundamental goal of this work is to provide the type of tests, which characteristics and main conditions are defined to be, at the end, used as an investigation instrument that provides the exact level on projects and technological develops on bioclimatic architecture.

It is necessary to clarify that in the context of this work there are no aspects of the wind tunnel design or the measuring equipment, but the similarity and analysis study to be able to determine, at the end of this work, an operating manual and calibration of the required equipment.

The next considerations were taken for the development of different testing:

The purpose of the basic module is to introduce the student to the measurement of the atmospheric air, pressure, temperature and humidity properties; using the measurement instruments: thermometer, barometer and hygrometer.

- The purpose of the second module is to acquire the knowledge of measurement instruments, such as water-column manometer and Bourdon-tube manometer, also the use of anemometers like the Pitot tube.

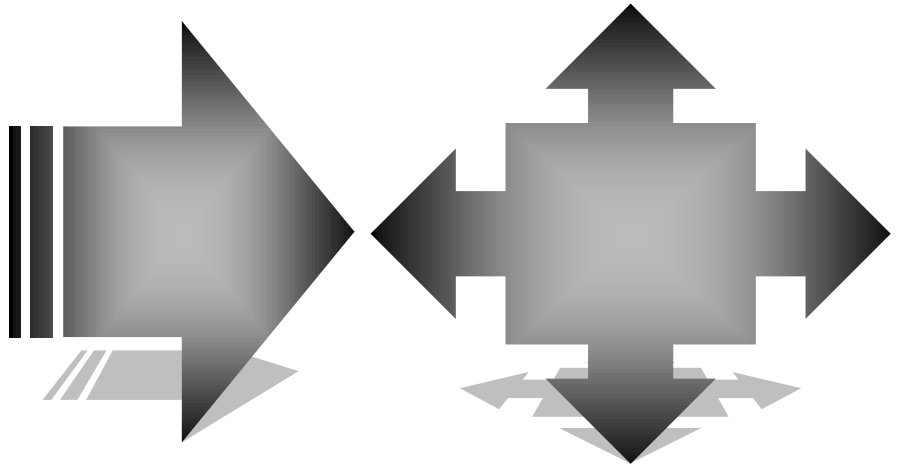
-

Finally the calibration of the suction tunnel is included for the student to know the flux properties that these generate.

- The intermediate module has the first contact with the aerodynamic experimental techniques in qualitative study area; the applicable techniques to the bioclimatic architecture in the wind tunnel are learned.

There's also the knowledge of learning to use the tunnel as an atmospheric wind condition simulator, especially on the reproduction of the characteristics of the terrestrial boundary layer.

- The final module concludes with an aerodynamic quantitative analysis by measuring the pressure distribution of the wind both inside and outside of a model.
- On the advanced module there are specific applications of the experimental aerodynamic on the bioclimatic architecture, it is learned how geographic accidents and vegetation influence on the wind characteristics that surround the building. It is also learned how can the wind behavior be modeled by the elements integrating the edification such as cornices, roofs, canopies and tops. And finally there's experimentation with a model-type case study for the optimization of ventilation.



# Capítulo 1.

## Sinopsis



## **Capítulo 1**

### **Sinopsis**

En los orígenes del hombre, éste ha hecho frente a la naturaleza como una serie de sistemas a los cuales debe adaptarse y en muchos casos sobrevivir a ella, esto hasta que plantea la iniciativa de no continuar adaptándose sino más bien usándola para sus fines, y comienza a sobreexplotar los recursos naturales con los que cuenta; planteándose una evolución con base en condiciones energéticas industrializadas.

El fenómeno socio-cultural que se da en Inglaterra conocido como “La Revolución Industrial” en donde el hombre pasa de la producción manual de productos a otra mecanizada desencadena una serie de situaciones como: uso indiscriminado del carbón como fuente energética inmediata, dando paso posteriormente al gas y finalmente a la explotación de petróleo y con ello la gran producción de hidrocarburos como fuentes energéticas básicas para el desarrollo de los países.

De esta etapa industrial que introduce al hombre en la “Era Moderna” se da un rompimiento en su relación con la naturaleza y los distintos sistemas naturales de energía que en ella se contienen (Sol, Viento, Agua y Tierra).

La habitación, la industria, el comercio, el entretenimiento y el transporte contienen cada vez más elementos que los hacen dependientes de energías no renovables (a base de electricidad, gas y petróleo) y de sistemas que satisfacen su condición ambiental ideal de forma artificial (calefacción, enfriamiento y ventilación mecanizados).

Con todo esto se generan condiciones atmosféricas adversas, entre las que encontramos sequía o inundación de áreas urbanas, deforestación y degradación del suelo por sobreexplotación de recursos naturales, sobrecalentamiento en la superficie de la tierra y de los océanos y altos índices de contaminación del agua, aire y tierra en las ciudades.

Históricamente hablando el hombre en la antigüedad comulgaba con el aprovechamiento del sol, el viento, el agua y la tierra, en la llamada “Arquitectura Vernácula” que enfocaba en sus objetivos lograr la subsistencia y satisfacción de las necesidades de habitación conforme al óptimo acondicionamiento de acuerdo a su medio natural.

Actualmente y ante la grave situación mundial energética, el viento vuelve a figurar como una solución relevante, el mundo se está dando cuenta paulatinamente de su fuerza y características aprovechables en la industria y la vivienda.

En México se cuentan con zonas de gran producción de energía eólica de las cuales no se tienen suficientes datos de estudio por lo que en un principio se llevaban a cabo mediciones a bajas alturas esto es, entre 10 y 15 m sobre el nivel del suelo circundante, alturas que no delatan el potencial energético de los vientos reinantes.

Ahora sabemos que la mayor fuerza eólica aprovechable prácticamente se halla a alturas superiores a los 50 m y que contamos en el país con cinco regiones donde los vientos constantes son aplicables a la generación de energía eléctrica.

Las zonas son:

1. El Istmo de Tehuantepec llamado “La Ventosa”
2. La región central del país en Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Aguascalientes
3. La región al norte de Tamaulipas
4. La región al norte de Baja California
5. La región norte de Yucatán



**Figura 1.** Potencial Eólico en México. [www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)

Como un elemento del clima el viento juega un papel de suma importancia ya que éste es el medio por el cual hay transmisión de energía a la atmósfera (en forma de calor) desplazando grandes masas de aire, humedad y así mismo de partículas suspendidas. Al desplazarse en forma horizontal la masa atmosférica podemos decir que estamos en presencia de viento, al haber un desplazamiento vertical diremos que hay ascensión o descenso.

*El viento, una forma de energía solar, es de gran importancia para el hombre. Todos los seres vivos necesitamos de aire para subsistir. La naturaleza lo ha proporcionado limpio, rico en oxígeno para respirar, es la necesidad ambiental más urgente para la vida humana.<sup>1</sup>*

El viento es una fuerza viva de acción sobre la materia, una herramienta natural útil, generadora de energía y condicionante de la vivienda humana.

<sup>1</sup>Fuentes Freixanet (2004). Clima y Arquitectura

El viento es aire en movimiento que se genera por las diferencias entre la temperatura y la presión atmosférica causadas por un calentamiento no uniforme de la superficie terrestre, ya que mientras en un lado de la Tierra hay calentamiento de aire, agua y tierra por radiación solar, en el otro lado hay enfriamiento por la radiación nocturna disipada hacia el espacio y ese movimiento es vital para la supervivencia del hombre, para generarle condiciones de salud y bienestar.

La desigualdad en el calentamiento de la atmósfera da origen a movimientos compensatorios que tienden a equilibrar el sistema reduciendo la diferencia horizontal de temperatura y por tanto las diferencias de densidad y presión.

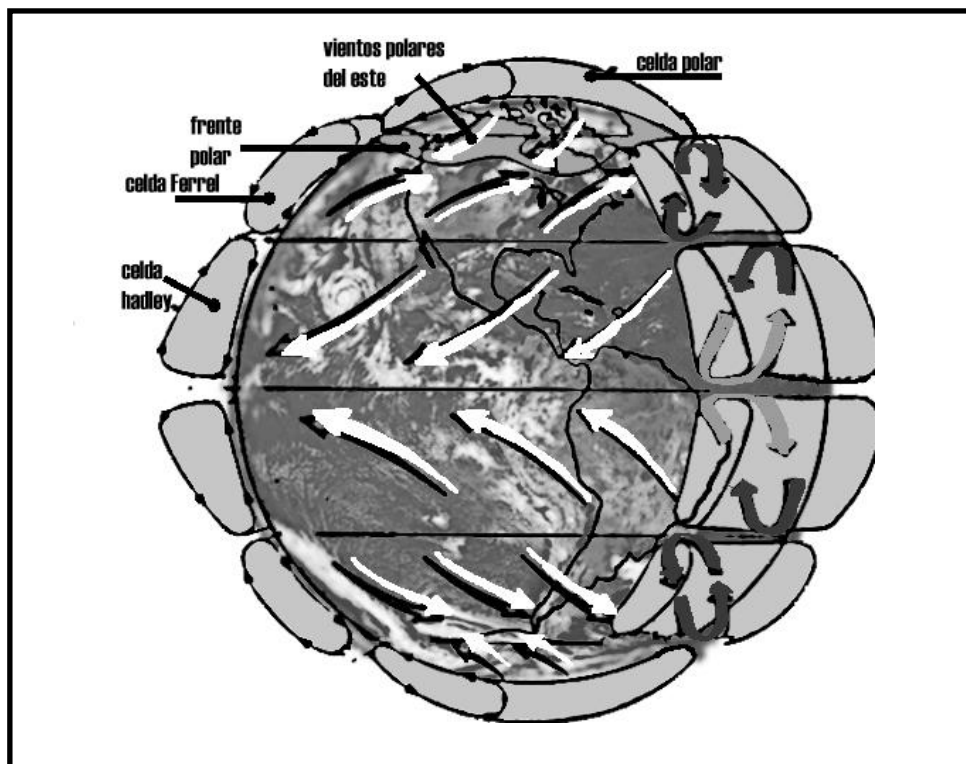
Los patrones de circulación del aire son resultado de el calentamiento desigual de la superficie terrestre combinados con el movimiento de rotación terrestre. En el movimiento del aire, en su velocidad y dirección participan cuatro fuerzas básicas.

1. Fuerza gradiente de presión: Determina que el aire siempre se desplaza de una presión alta a una presión baja.
2. Fuerza Coriolis: La dirección del viento sufre una deflexión o desviación debido a la rotación terrestre (Ley de Farrel). Cualquier fluido que se mueve horizontalmente y en libertad en el Hemisferio Norte tiende a ser desviado a la derecha de su patrón de movimiento, mientras que en el Hemisferio Sur, la desviación se da al lado contrario (izquierda), se carece de este efecto en el Ecuador y se incrementa en los Polos.
3. Fuerza centrífuga: El aire tiende a un movimiento curvilíneo. En el Hemisferio Norte éste será en el mismo sentido de las manecillas del reloj en zonas de alta presión (anticiclónicas) y en sentido opuesto en las zonas de baja presión (ciclónicas).

4. Fuerza y fricción: La velocidad y dirección del viento sufren alteraciones en su cercanía con la superficie terrestre, dependiendo del grado de rugosidad de la superficie.

Por acción de estas fuerzas el Patrón del Viento a escala Global se describe en las siguientes zonas:

- Calmas Ecuatoriales
- Vientos alisios
- Calmas tropicales
- Predominantes del Oeste
- Zonas de frente Polar
- Predominantes de Este Polar
- Calmas Polares



**Figura 2.**Patrón de los vientos

La medición del viento considera sus principales características para ser cuantificadas, éstas son:

- Velocidad
- Dirección
- Frecuencia
- Turbulencia y ráfaga

De éstas, las tres primeras pueden ser expresadas en valores numéricos, mientras que la turbulencia y ráfaga obedecerán a una apreciación cualitativa principalmente.

Describiendo brevemente las cualidades del viento podemos expresar que:

La velocidad

Su valor se verá representado en unidades de m/s metros por segundo, aunque si ésta es muy alta se medirá en km/hr, el aparato usado para medir la velocidad del viento se conoce como anemómetro.

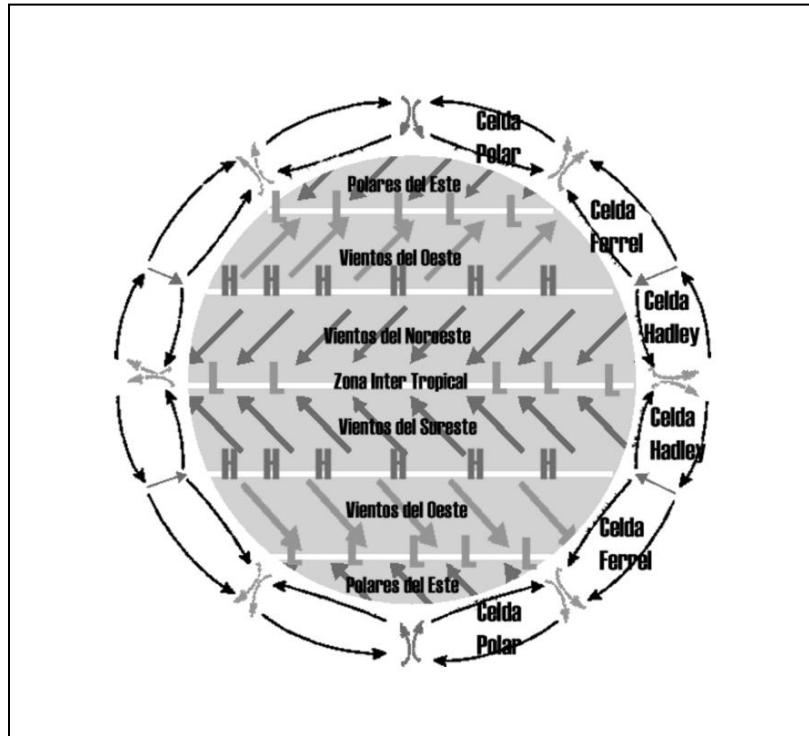
La dirección

Define la procedencia del viento y no hacia dónde se dirige, y se registra con veletas o anemoscopios, referidas a los puntos cardinales y a sus subdivisiones, de acuerdo con ello, la dirección del viento puede ser:

Código de vientos:

Norte (N), Nornoreste (NNE) Noreste (NE), Estenoreste (ENE) Este (E), Estesureste (ESE), Sureste (SE), Sursureste (SSE), Sur (S), Sursuroeste (SSO), Suroeste (SO), Oestesuroeste (OSO), Oeste (O), Oestenoroeste (ONO), Noroeste

(NO),Nortenoeste(NNO), también puede ser variable (V) o con ausencia del mismo, es decir en calma (C).



**Figura 3.** Dirección de los vientos

La frecuencia

Nos define la dirección dominante del viento, es decir aquella que se ha presentado en mayor número de ocasiones, este dato es indispensable para la graficación del viento de forma mensual o anual en la llamada “Rosa de los vientos”.

La gráfica se realiza sobre los ejes cardinales con una serie de círculos concéntricos equidistantes en donde cada uno representa iguales intervalos de frecuencia, en la rosa también se registrará la presencia de calmas, así como la velocidad promedio para cada orientación.

## La turbulencia

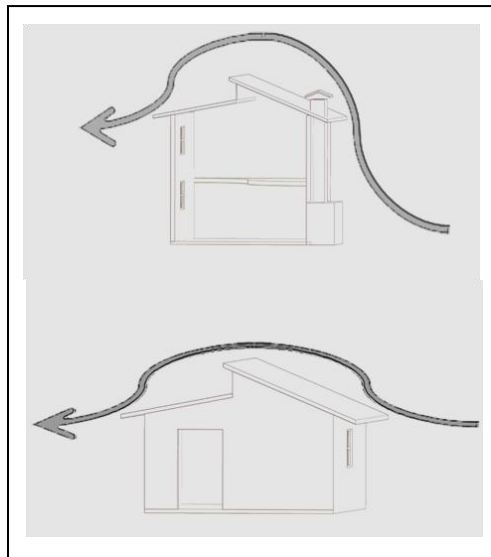
Para analizar vientos que se presenten en una localidad en específico (locales) es necesario definir la rugosidad de la superficie en que se desplaza el viento, ya que la turbulencia además de reducir la velocidad también puede influir en la dirección que tome el flujo canalizándolo o desviándolo.

## Las ráfagas

Son cambios bruscos de velocidad en periodos cortos de tiempo que se generan por diferencias de velocidades producidas entre las capas inferiores con respecto a las superiores; si la distribución de velocidades verticales no es estable el aire superior que viaja en las capas más altas irrumpe en las inferiores y se produce el fenómeno.

Tanto la turbulencia como las ráfagas no pueden ser estimadas cuantitativamente, sólo cualitativamente por medio de los túneles de viento que puedan simular la capa límite.

En todo caso son elementos muy importantes a considerar en el estudio de modelos arquitectónicos.



**Figura 4.** Frecuencia, turbulencia, ráfaga y capa límite



El viento correctamente aprovechado en los espacios habitables genera una serie de beneficios tanto energéticos como en el metabolismo y la fisiología humana, como pueden ser:

1. Limpieza del aire convirtiéndole en fresco y puro
2. Bienestar ambiental, descenso de altas temperaturas.
3. Movimiento de vehículos de navegación
4. Compresión eólica
5. Bombeo de agua por aerogeneradores
6. Energía mecánica, fuerza motriz
7. Generadores eólicos de electricidad

El viento como un elemento condicionante del clima es un factor de diseño en cualquier forma y género de Arquitectura, por ello la necesidad de llevar a un estudio más avanzado, tanto al interior como en el exterior de las edificaciones o emplazamientos urbanos, para lograr una mejor solución climática para los usuarios y para el medio ambiente.

La ventilación adecuada de los espacios mantendrá una calidad del aire fundamental para la salud humana y condiciones ambientales confortables para el manejo de los diferentes climas, poder determinar las secciones de ventanas, la masa de aire a desalojar o a introducir en un espacio, generar superficies enfriadas por la acción del viento, calefacción del aire por procesos termoconvectivos, humidificación o deshumidificación del aire por procesos de condensación o evaporación son logros a los que se debe llegar en base a una metodología ordenada, con pruebas de laboratorio y operacionales que lleven como fin que el arquitecto proyecte en base a una herramienta confiable de análisis y operación.

*La importancia y prioridad de cada una de las funciones de la ventilación dependen de las condiciones diurnas y estacionales de las diferentes regiones climáticas; cada una involucra flujos de aire de diversos ordenes y magnitudes. Para lograr el confort ambiental natural es necesario desarrollar un diseño bioclimático coherente y versátil, a través de sistemas pasivos que infieran en resultados óptimos de diseño para satisfacer los verdaderos requerimientos del hombre en su habitat.*

### **Objetivo e hipótesis General**

El objetivo de este trabajo es elaborar un documento de consulta sobre el manejo del túnel de viento que profundice en el estudio del viento y sus efectos sobre las edificaciones en la Arquitectura Bioclimática, como un instrumento de apoyo en la elaboración de pruebas de laboratorio, conclusiones y toma de decisiones de diseño en los diferentes climas.

Actualmente los estudios de viento se realizan principalmente para la aerodinámica, sometiendo a flujos controlados dentro de los llamados túneles de viento, maquetas de alas de avión, modelos de naves aéreas o modelos de autos deportivos, todo con la finalidad de apreciar la presión ejercida por el viento en cada una de sus partes y observar su comportamiento.

El dispositivo fundamental para los estudios propuestos es “El túnel de Viento” que es una instalación de tipo experimental para el estudio, monitoreo y efecto del viento sobre los cuerpos.

Esta instalación nos permite incidir sobre los objetos de diferentes formas y en diferentes ámbitos.

## **Justificación y Alcances**

Estos estudios nos permitirán entender, estudiar y predeterminar fuerzas actuantes en elementos de estudio como edificaciones o espacios urbanos, y así lograr las condiciones óptimas de aprovechamiento del viento en beneficio de las mismas o su protección y control ante inclemencias extremas climatológicas.

El objeto del túnel es proporcionar una corriente reproduciendo características deseadas de intensidad, dirección y frecuencia sobre un objeto, el túnel se constituye de la siguiente estructura:

1. Cámara de ensayos
2. Moto-propulsor
3. Cono de reducción
4. Área de pruebas
5. Difusores

Los elementos fundamentales de un túnel aerodinámico son: la cámara de ensayos, en la que se genera una corriente de aire de velocidad controlada, y el grupo moto propulsor, formado por un ventilador y el equipo regulador, encargado de hacer circular el aire. Consta asimismo de difusores cuya función es uniformizar la corriente de aire, para con ello minimizar la pérdida de carga y por tanto la potencia requerida.

La contracción disminuye la sección de forma suave hasta la cámara de ensayos, acelerando la corriente hasta la velocidad que ha de tener en ella, y cumpliendo funciones importantes desde el punto de vista de la calidad de la corriente, como son el disminuir el nivel de turbulencia y el mejorar la uniformidad del perfil de velocidades y la dirección de la corriente.

Por otra parte existe una instrumentación básica necesaria para la realización de los ensayos, que se utilizará para la adquisición de datos y control de la velocidad, medida de presiones en maquetas y de la velocidad del túnel y medida de fuerzas.

En México son pocas las instituciones de educación superior que cuentan con una infraestructura adecuada para el estudio de el comportamiento del viento debido a que sus costos son elevados y su propuesta de aplicación en la construcción no ha sido definida realmente, aunque a últimas fechas con el manejo de términos como “sustentabilidad y medio ambiente” parece abrirse un campo de estudio para la aplicación de éstos dispositivos con miras a la Arquitectura Bioclimática.

Para tales fines se trabajará con el túnel de viento contenido en las instalaciones del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

## **Síntesis de la Investigación**

### **Capítulo 1**

En el primer capítulo se cita un panorama general de estudio sobre el viento citando antecedentes, objetivos, justificación y alcances del tema de investigación, situándonos principalmente en la comprensión de conceptos generales que se aplican el conocimiento del viento, sus componentes y su comportamiento.

### **Capítulo 2**

En este capítulo se contempla el conocimiento de simuladores físicos para el análisis del viento, las diferentes partes que los integran, tipología, usos principales, disciplinas que les utilizan en su campo de trabajo y empresas que ofrecen su servicio a nivel internacional.

### **Capítulo 3**

Identificar los diversos usos u omisiones del túnel de viento dentro del campo de estudio de la Arquitectura Bioclimática. Condiciones en el entorno y/o en las edificaciones que se ven afectadas por el comportamiento y los fenómenos del viento sobre ellos.

### **Capítulo 4**

Se citan en este capítulo las técnicas empleadas en los experimentos que se pueden desarrollar en el túnel de viento con relación a la Arquitectura Bioclimática, mediante las cuales se llegan a determinar puntos estratégicos para la toma de presión, zonas de calmas y turbulencias, estancamiento de aire, visualización de la capa límite y una serie de reproducción de situaciones de análisis útiles para la interpretación, control y regulación del viento.

### **Capítulo 5**

Este capítulo presenta una serie de consideraciones para la calibración del túnel de viento en su estructura, de tal forma que los modelos contenidos en su área de prueba reproduzcan conforme a las condiciones ideales un flujo cuya lectura sea clara y precisa, de la más alta calidad para su correcta interpretación.

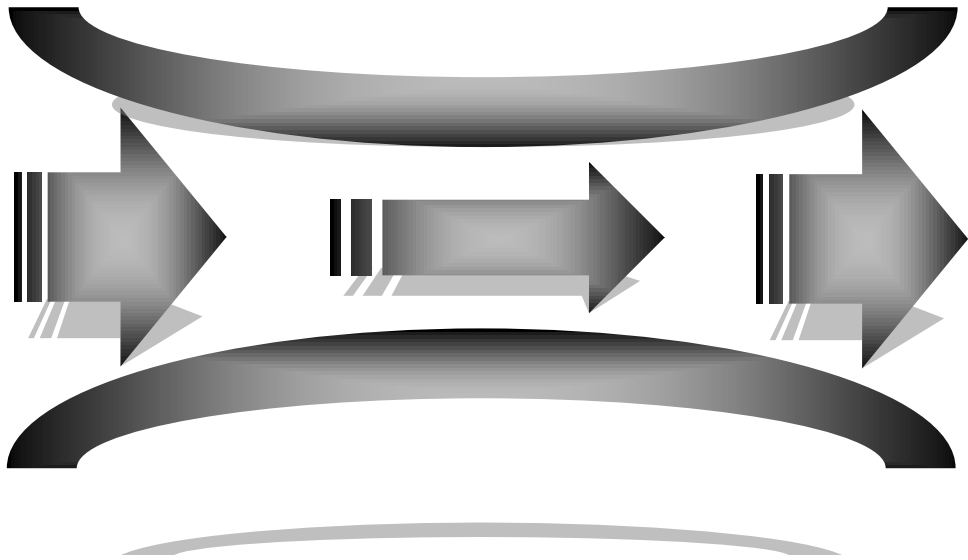
### **Capítulo 6**

Diseño de una serie de pruebas desarrolladas de acuerdo con su grado de complejidad que sirvan como una herramienta de enseñanza no sólo teórica sino también como medio experimental verificador en algunos casos e innovador en otros, para que bajo

el control de las condiciones de análisis arroje una aplicación real para el campo de la Arquitectura Bioclimática.

## **Capítulo 7**

En el Manual de Calibración y Operación del túnel de viento se tomarán en cuenta condiciones ambientales, como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, densidad del aire con instrumentación como anemómetro, higrómetro, psicrómetro y demás, todo encaminado al registro eficaz de valores para asegurar la calidad de los experimentos desarrollados en él.



## Capítulo 2.

### Túnel de viento

## Capítulo 2

### Túnel de Viento

El desarrollo de simuladores físicos para el análisis de viento se han enfocado principalmente a sistemas aerodinámicos para la industria automotriz y aeronáutica. Los que se han diseñado expresamente para el análisis del viento y las construcciones, tienen diferentes enfoques, como son el monitoreo del comportamiento de contaminantes en una zona específica; el efecto de la topografía sobre el aprovechamiento de la energía eólica; visualización del flujo y distribución de presiones alrededor de un objeto o sobre una superficie, la relación volumen arquitectónico - viento enfocados para la determinación de las cargas aerodinámicas la cual se requiere para el diseño de una estructura que resista una determinada velocidad del viento y la del comportamiento del aire dentro y en el entorno a las edificaciones para el análisis de la seguridad y confort de los usuarios, sin embargo, las escalas de los prototipos de estudio se han visto limitadas al tamaño, monitoreo y función del simulador.

Por esto, el fin fundamental de este trabajo es proporcionar el tipo de pruebas, cuyas características y condiciones principales estén definidas a fin de que estas mismas puedan ser utilizadas como un instrumento para la investigación, que proporcione el grado de exactitud aceptable en proyectos y desarrollos tecnológicos en Arquitectura Bioclimática.

Es necesario aclarar que dentro del contexto de este trabajo, no se tratarán aspectos como el diseño del túnel de viento o equipo de medición a utilizar; sin embargo, se efectuará un estudio de semejanza y análisis para poder determinar al final un manual de operación y calibración del equipo a emplear.

Para conocer las fuerzas y momentos que actúan sobre un objeto que se localiza dentro de una corriente o fluido, es necesario que se conozcan las distribuciones de



velocidad y presión ya que con base en esto se pueden calcular el comportamiento del viento que actúa sobre un edificio.

Los patrones de flujo a menudo son muy complejos, por lo cual deben hacerse investigaciones experimentales así como análisis teóricos para obtener conocimiento suficiente del flujo resultante.

Los matemáticos y los fisicomatemáticos han intentado obtener soluciones de muchos de los problemas relativos al movimiento de los fluidos, cuyas soluciones no se basen en los resultados experimentales, sin embargo la mayoría de estos intentos solo han sido posibles mediante la introducción de suposiciones simplificadoras.

No siempre es fácil decidir sobre si una suposición simplificativa particular es justificable o no, y al final, siempre se requerirá una comprobación experimental de los resultados teóricos. es entonces cuando cobra una gran importancia poseer los medios a través de los cuales se puedan realizar dichas comprobaciones.

Uno de estos medios lo constituye sin duda alguna el túnel de viento, el cual ha sido y es, la herramienta más importante y más ampliamente usada para el trabajo experimental en los laboratorios de mecánica de fluidos y aerodinámica.

Todos los túneles de viento en forma general podemos dividirlos principalmente en tres tipos, según la velocidad del fluido:

- 1.- Túneles de viento de baja velocidad.
- 2.- Túneles de viento de alta velocidad.
- 3.- Túneles de viento de propósitos especiales.

## **1. Túneles de viento de baja velocidad:**

En este tipo de túneles, los factores predominantes son los de inercia y viscosidad. La influencia de la compresibilidad dentro de los mismos no es significativa.

La potencia requerida en estos túneles es baja dada la velocidad máxima que se maneja y el tamaño de prueba que poseen.

El arreglo generalmente empleado de sus componentes consiste en un ventilador, cono de contracción, cámara de prueba y un difusor.

Los túneles de viento de baja velocidad pueden clasificarse de la siguiente manera de acuerdo con la forma en la que el viento circula a través de este:

- a) Túneles de viento de baja velocidad de circuito abierto
- b) Túneles de viento de baja velocidad de circuito cerrado.

### **a) Túneles de viento de baja velocidad de circuito abierto:**

La característica principal de este tipo de túneles es que la corriente de aire utilizada para realizar las pruebas se descarga completamente a la atmósfera por lo que las características del aire no son controladas.

Los túneles de viento de baja velocidad de circuito abierto pueden subdividirse dependiendo del tipo de cámara de prueba que posean, así tenemos:

Túneles de viento de baja velocidad de circuito abierto de impacto:

Son aquellos que poseen cámara de prueba abierta, pudiendo realizar en los mismos, trabajos experimentales en condiciones atmosféricas; dado que el valor de la

presión estática en la cámara es igual al valor de la presión atmosférica, en este caso la sección de prueba se encuentra a la descarga del aire lo que genera un flujo con características de régimen turbulento. (Alonso Ordoñez, 1979)

Según el tipo de evaluación a realizar los túneles de viento cuentan con diferentes tipos de sistemas de monitoreo o transductores como son:

- 1) Balanzas aerodinámicas; para determinar las cargas y momentos aerodinámicos.
- 2) Anemómetros de hilo caliente o de película caliente; para medir fluctuaciones de velocidad
- 3) Anemómetros de veleta; para medir la velocidad.
- 4) Strain gauge o sistema de puente de medidores de deformación; para medir desplazamientos, presión, fuerza y deformaciones.

Es indispensable el conocimiento de los diferentes túneles de viento, ya que éstos condicionan las diferentes pruebas a realizarse dentro de ellos.

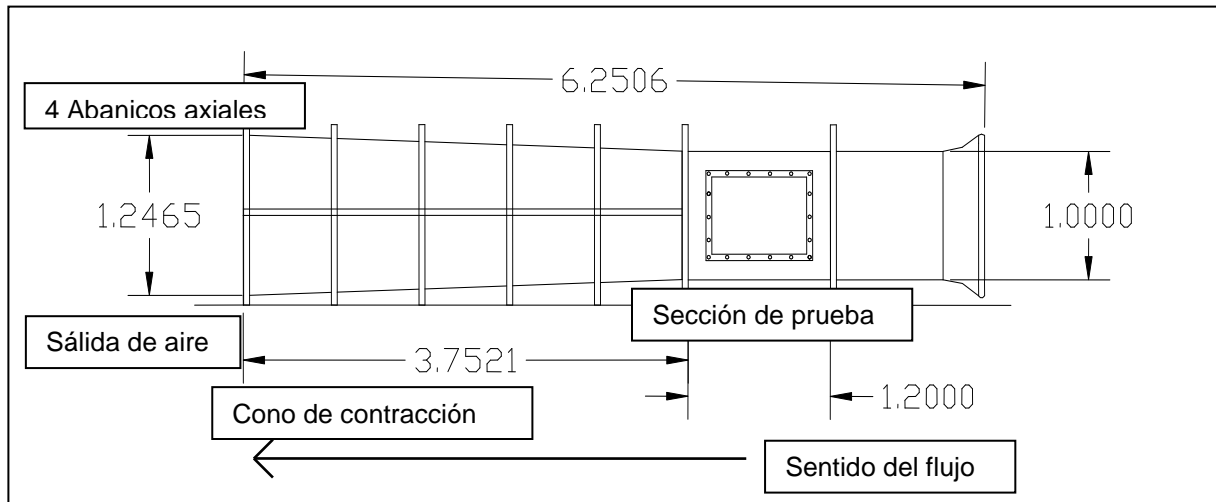
La arquitectura bioclimática en sus diferentes análisis requiere de determinar el comportamiento del viento dentro y entorno a las construcciones para determinar ya sea balance térmico, renovación de aire, zonas de confort, humidificación, etc, por lo que el análisis del viento es un factor importante para el desarrollo de ésta.

El túnel el laboratorio de arquitectura bioclimática es del tipo de túnel abierto de succión por presentar menor turbulencia en la cámara de prueba, y generar un flujo laminar más estable.

Se realizaron diferentes cálculos a partir de ventiladores existentes en el mercado para determinar la velocidad del flujo y las dimensiones de la cámara de prueba.

Se concluyó en la utilización de cuatro hélices axiales con un diámetro de 2 ft ( 0.61m ) montadas en cuatro motores de 5 hp a 3 600 rpm para poder alcanzar velocidades de

hasta 25 m/s ( 90 km/h ) en una sección de prueba de 1.00 m X 1.00 m determinando una longitud de 6.10 m, sin el área para la entrada y salida del aire.



**Figura 5.** Características del Túnel de Viento

## Mecánica de Fluidos.

Para poder definir las diferentes pruebas a realizar en el túnel de viento, es necesario revisar algunos conceptos de mecánica de fluidos para así poder determinar y acotar variables que se involucran en estas.

### Conceptos Básicos del Movimiento de los Fluidos:

Cuando se considera un fluido en movimiento, el problema de un análisis global se hace mucho más difícil. No solo han de ser tenidas en cuenta la magnitud y dirección de la velocidad de las partículas, sino que también existe la compleja influencia de la viscosidad, que produce tensiones rasantes o de rozamiento entre las partículas del fluido en movimiento y las del contorno material que lo encierra.

El movimiento relativo que puede existir entre diferentes elementos del cuerpo fluido hace que la presión y las tensiones rasantes puedan variar considerablemente de un punto a otro de acuerdo con las condiciones del fluido.

Debido a las complejidades asociadas al fenómeno del flujo, el análisis matemático preciso es posible sólo en muy pocos casos. Por tanto, es necesario resolver los problemas del flujo más bien mediante la experimentación en el túnel de viento, o mediante la adopción de ciertas hipótesis simplificadas, suficientes para facilitar una solución teórica. Los dos caminos no se excluyen mutuamente, ya que las leyes fundamentales de la mecánica son siempre válidas y facilitan parcialmente la adopción de métodos teóricos en varios casos importantes. Por otra parte, es importante determinar experimentalmente la cantidad de la desviación respecto a las condiciones reales, consecuente a un análisis simplificado.

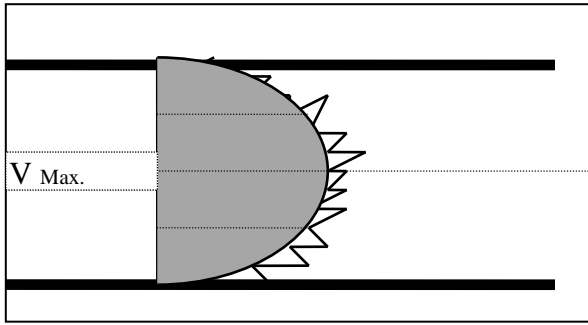
Tipos de Flujo:

Los diversos tipos de movimiento de los fluidos pueden clasificarse como sigue:

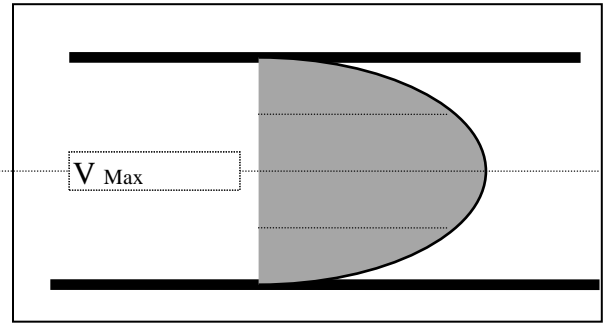
- a) Turbulento y laminar
- b) Rotacional e irrotacional
- c) Constante y variable
- d) Uniforme y no uniforme

a) Flujo laminar y turbulento:

Estos términos describen la naturaleza física del flujo.



**Figura 6.** Flujo Turbulento



**Figura 7.** Flujo Laminar

En el flujo turbulento, el avance de las partículas del fluido es irregular y hay intercambio de posiciones, aparentemente casual. Las partículas individuales están sujetas a velocidades transversales fluctuantes, con lo que el movimiento resulta más bien revuelto y sinuoso que rectilíneo.

Es evidente que el flujo turbulento se caracteriza por una velocidad variable y fluctuante, superpuesta a una velocidad media instantánea.

En el flujo laminar, las partículas fluidas discurren según filetes paralelos, no existiendo componentes transversales de la velocidad. El avance ordenado es tal que cada partícula sigue exactamente el camino de la partícula precedente sin ninguna desviación.

El gradiente transversal de velocidad es mayor en el flujo laminar que en el turbulento. De hecho, para una tubería, el cociente entre la velocidad media y la velocidad máxima es 0.5 y 0.85 en los respectivos casos.

El flujo laminar está asociado con bajas velocidades y fluidos con movimientos de viscosa lentitud.

Las leyes del flujo laminar son perfectamente conocidas y la distribución de velocidades puede ser analizada matemáticamente para los medios de conducción más utilizados.

Debido a su carácter pulsatorio irregular, el flujo turbulento ha desafiado el tratamiento matemático riguroso, siendo necesario apoyarse en gran medida en fórmulas empíricas o semiempíricas para la resolución de los problemas prácticos.

## **Revisión de los antecedentes y utilización de los túneles de viento**

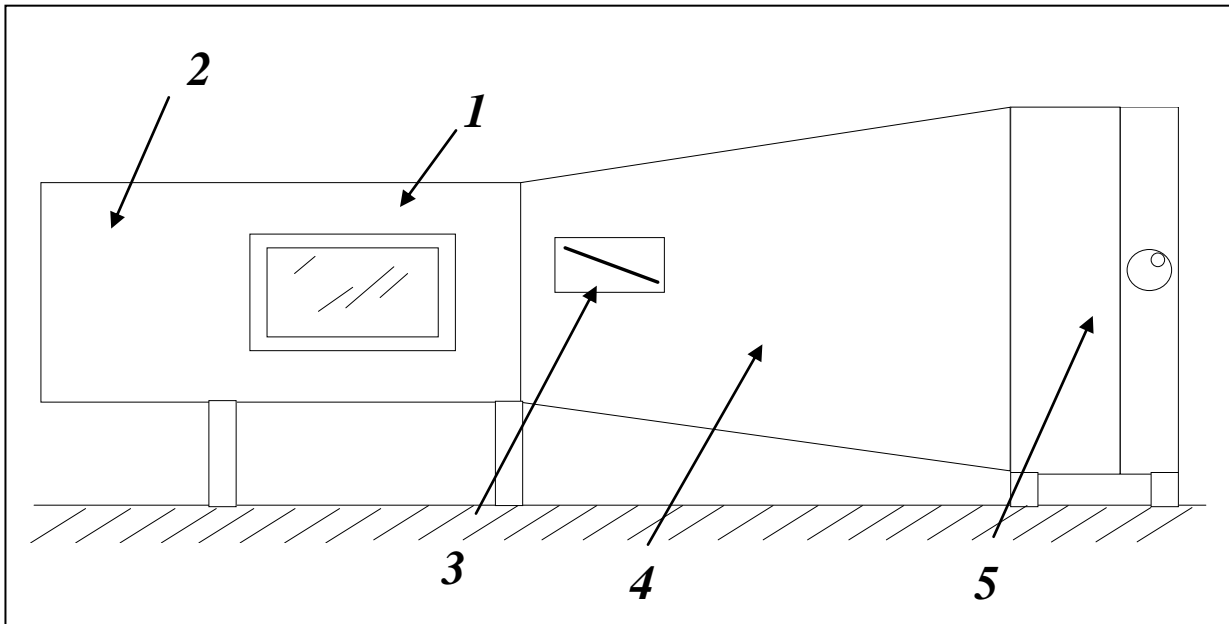
### **El túnel de viento**

Un túnel de viento es un dispositivo que permite generar una corriente de aire con características conocidas y controladas, esto permite poder efectuar experimentos que reproduzcan las condiciones reales de la acción del viento sobre de un objeto.

### **Partes de un túnel de viento**

Generalmente podemos identificar las siguientes partes:

- 1.- Sección de prueba.
- 2.- Sección de motores / abanicos.
- 3.- Instrumentos de medición (anemómetros, manómetros, termómetros, etc.)
- 4.- Difusor.
- 5.- Mecanismo regulador de la velocidad del viento.



**Figura 8.** Esquema del túnel de viento y sus partes. 1. Cámara de prueba, 2. Entrada de flujo, 3. Manómetro, 4. Cono de aceleración, 5. Motores/ hélices de succión.

### Sección de prueba

En esta parte se realizan los experimentos, es la zona en donde se conocen las características del viento como velocidad, temperatura, presión, dirección, etc.

La sección de prueba puede usarse en todo su volumen o solo una fracción de éste, dependiendo de las características del experimento.

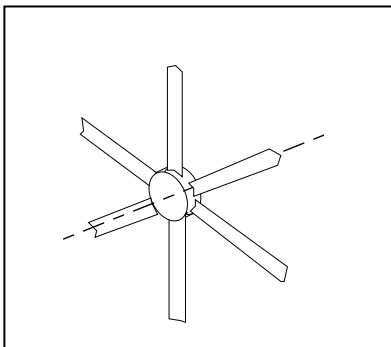
Como regla general se puede expresar que la máxima área transversal que puede ser ocupada por el modelo es del 70 al 75% del área transversal de la sección de prueba, esto debido a que si se superan estos límites existe una fuerte obstrucción del viento y por lo tanto una gran pérdida de velocidad.



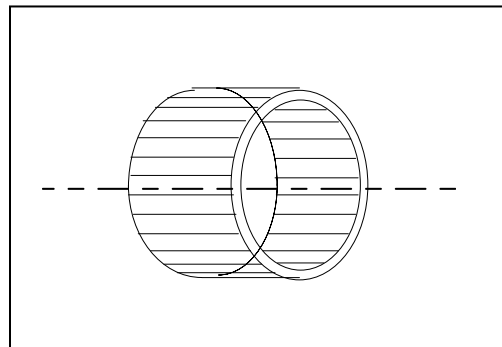
## Sección de motores / abanicos

Para poder funcionar el túnel necesita un “generador de viento”, este consiste en un sistema motor / abanico, normalmente los motores son eléctricos, aunque podemos encontrar uso de motores de combustión interna especialmente para túneles no fijos.

Los abanicos pueden ser de flujo axial o de flujo radial<sup>2</sup>, la elección de uno u otro tipo depende de la configuración y del espacio destinado a la instalación del túnel.



**Figura 9.** Abanico de flujo axial



**Figura 10.** Abanico de flujo radial

## Instrumentos de medición (anemómetros, manómetros, termómetros, etc.)

Se dice que un túnel de viento es tan eficiente como eficientes son sus instrumentos de medición. Para poder efectuar estudios cuantitativos es necesario contar con una serie de instrumentos de medición que proporcionan las características del viento en la sección de prueba y que permiten la realización de la *calibración* del túnel como se explicará más adelante.

## Difusor

Esta parte cumple dos funciones, la primera es de índole cinemática, proporciona un cambio en la velocidad del viento debido al cambio en el valor del área de la sección

---

<sup>2</sup> También conocidos como ventiladores “centrífugos”.

transversal. La segunda es por razones geométricas, constituye el enlace entre la sección de motores /abanicos y la sección de prueba, éstas pueden ser de diferente forma, por ejemplo, la sección de prueba puede ser cilíndrica mientras que la sección de motores / abanicos sea cuadrada, toca pues al difusor el ser el elemento que gradualmente una a estas secciones.

### **Mecanismo regulador de la velocidad del viento**

La magnitud de la velocidad en un túnel debe de poder controlarse, de preferencia en un intervalo amplio, para esto se tienen dos opciones:

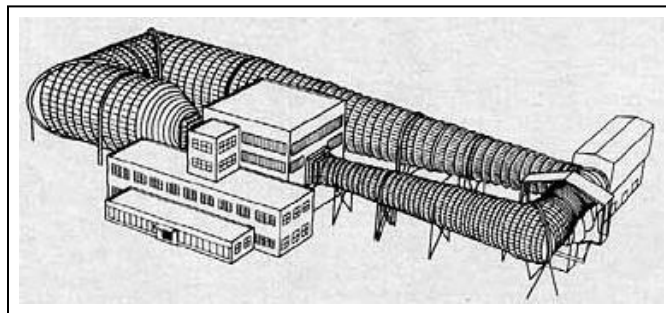
- Regulación de la velocidad por medio de control de las revoluciones por minuto del motor. Esta opción es la más eficiente, aunque resulta la más costosa. El motor y su control de las revoluciones por minuto representan un porcentaje elevado en el costo total del túnel, especialmente con motores de alta potencia.
- Regulación de la velocidad por medio de estrangulamiento del flujo. Esta opción es la más económica, consiste simplemente en controlar la cantidad de aire que entra o sale del túnel mediante un mecanismo que abra o cierre unas compuertas. El inconveniente de esta opción radica en que posiblemente se perturben las propiedades del flujo en la sección de prueba además de que el control es difícil por falta de precisión.

### Clasificación de los túneles de viento

Fundamentalmente los túneles de viento se clasifican en dos tipos:

- 1.- Túneles de viento de circuito cerrado.
- 2.- Túneles de viento de circuito abierto.

En el primer tipo el viento circula de manera continua describiendo un circuito, esto significa que siempre se trabaja con la misma cantidad de aire al no existir interacción entre el aire en el interior del túnel y el aire atmosférico. La ventaja de esta configuración es que se pueden controlar las características termodinámicas del aire en el interior del túnel tales como temperatura, presión y densidad. La desventaja es que se requiere de un gran espacio para su instalación, además de elementos de control de las características del aire como humidificadores, calefactores, compresores etc.



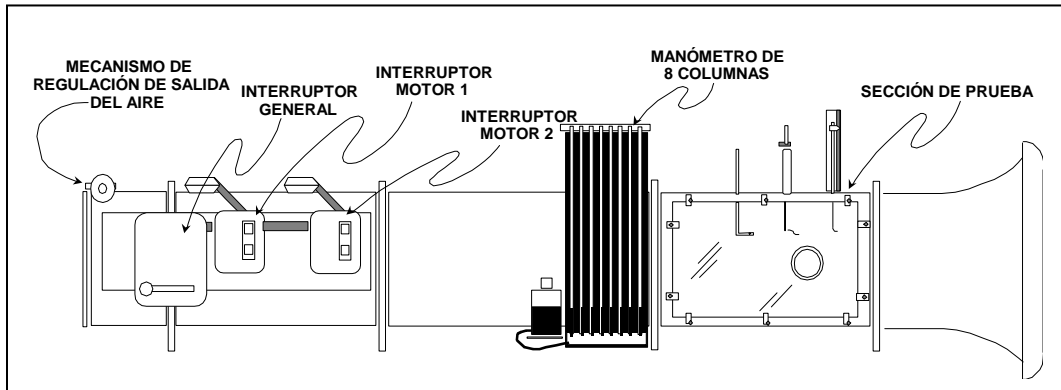
**Figura 11.** Túnel de viento de circuito cerrado. Imagen reproducida de la publicación "Wind Tunnels of Nasa" Donald D. Baals and William R. Corlis

En el segundo tipo el túnel toma el aire de la atmósfera, se mueve a través de él y es devuelto a ésta. Por lo anterior las propiedades termodinámicas del aire no son controlables mas allá de lo que se disponga en el laboratorio en sí con un sistema de aire acondicionado. La ventaja radica en que las dimensiones de este tipo de túnel son menores y en general su costo de construcción es menor.

Los túneles de circuito abierto se clasifican en dos categorías:

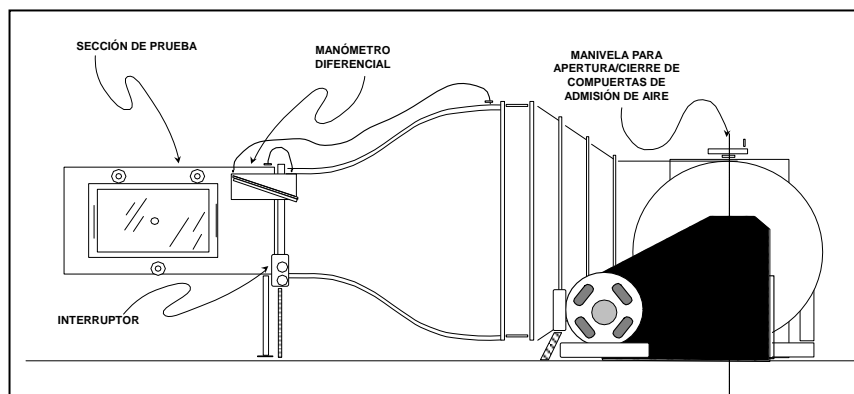
- a) Túnel de viento de succión
- b) Túnel de viento de presión de impacto

Se dice que un túnel de viento es de succión cuando la sección de prueba se encuentra a la entrada del aire, esto tiene como consecuencia que se genere un flujo *laminar*, el cual puede ser modificado para poder volverlo *turbulento* a un grado conveniente para simular a la turbulencia real del viento atmosférico



**Figura 12.** Túnel de succión

En el caso del túnel de viento de presión de impacto la sección de prueba se encuentra a la descarga del aire lo que genera que el flujo tenga características de régimen turbulento, el grado de turbulencia del flujo sólo puede ser aumentado, por lo general, es difícil reducirlo, por lo que para aplicaciones en arquitectura y en especial en bioclimática es favorable el uso de un túnel de succión.



**Figura 13.** Túnel de presión de impacto

## Semejanza y validez de pruebas

El efecto que genera la corriente del viento sobre del modelo colocado en la sección de prueba tiene que ser el mismo que el observado en el modelo de escala real. Para poder asegurar lo anterior es necesario cumplir con dos requisitos:

### 1.- Semejanza geométrica.

La semejanza geométrica se logra cuando las medidas lineales del modelo divididas entre las medidas lineales del prototipo dan como resultado un número constante, en pocas palabras a este número se le llama factor de escala. En ocasiones es necesario incluso cumplir el factor de escala en detalles tales como la rugosidad<sup>3</sup> de una superficie para asegurar la semejanza geométrica.

### 2.- Semejanza dinámica

Un parámetro adimensional muy útil para el cumplimiento de la semejanza dinámica es el número de Reynolds, al que podemos definir como:

$$\text{Re} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1)$$

En donde

$\rho$  = densidad del aire

$V$  = velocidad del viento

$L$  = medida de referencia del objeto<sup>4</sup>

$\mu$  = viscosidad absoluta del aire

---

<sup>3</sup> Especialmente cuando se realizan estudios de distribución de velocidades y presiones cercanas a una superficie

<sup>4</sup> Por lo general se elige a la medida de referencia como la medida lineal mayor del objeto que es paralela al flujo

El número de Reynolds es un cociente que resulta de comparar las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas, y para lograr la semejanza dinámica se debe asegurar que el número de Reynolds en el prototipo sea igual al número de Reynolds en el modelo.

Existe otro número adimensional que permite comparar cinemáticamente al flujo que baña al prototipo con el flujo que baña al modelo, este parámetro es el coeficiente de presión:

$$C_p = \frac{P_L - P_E}{P_T - P_E} \quad (2)$$

En donde:

$P_L$  = presión local, medida en un punto sobre la superficie del modelo o del prototipo.

$P_E$  = presión estática, medida con un tubo pitot-estático en la corriente que baña al modelo o al prototipo.

$P_T$  = Presión total, medida con un tubo pitot-estático en la corriente que baña al modelo o al prototipo.

Al coeficiente de presión también se le puede representar en función de la velocidad local y de la velocidad de la corriente libre:

$$C_p = 1 - \left( \frac{V_L}{V} \right)^2 \quad (3)$$

En donde:

$V_L$  = velocidad en un punto sobre la superficie del modelo o del prototipo.

$V$  = velocidad de la corriente libre.

El coeficiente de presión es útil para identificar el comportamiento cinemático del flujo sobre del modelo o prototipo, se pueden presentar los siguientes casos:

1.-  $C_p = 0$ , esto significa que la velocidad local iguala a la velocidad de la corriente libre, cuando esto sucede se dice que existe un *desprendimiento* del flujo sobre el modelo.

2.-  $C_p = 1$ , esto significa que la velocidad local es nula, o bien que la presión total es igual a la presión local, cuando esto sucede se dice que existe un *punto de estancamiento*.

3.-  $C_p > 0$ , los coeficientes de presión positivos indican que el flujo impacta a la superficie del objeto.

4.-  $C_p < 0$ , los coeficientes de presión negativos indican que el flujo abandona a la superficie del objeto, es decir el flujo provoca una depresión.

## Validez de las pruebas

Las pruebas que se realizan en un túnel de viento pueden ser de dos tipos:

- a) Prueba cualitativa.
- b) Prueba cuantitativa.

En el primer tipo no es estrictamente necesario que se cumpla la igualdad de los parámetros adimensionales anteriormente descritos. El objetivo principal de este tipo de prueba como su nombre lo indica, es el de conocer las cualidades del flujo que está bañando al modelo, identifica visualmente a la trayectoria que siguen las partículas fluidas utilizando algún método como inyección de humo o adición de partículas sólidas dispersas en la corriente, registrando esto mediante algún dispositivo fotográfico.

En las pruebas cuantitativas se realizan mediciones, y para poder extrapolar los resultados de estas mediciones a la escala real es necesario cumplir con los parámetros adimensionales anteriormente descritos, aunque existen excepciones.

Estas excepciones se presentan cuando se trabaja con modelos que tienen superficies planas y aristas agudas, en este tipo de objetos es común que el desprendimiento del flujo ocurra tempranamente y su comportamiento sea independiente del número de Reynolds<sup>5</sup>. Para poder verificar lo anterior es necesario que se efectúe primero un análisis cualitativo mediante el uso de una técnica de visualización como la inyección de humo, con esto se detecta el punto de desprendimiento del flujo y se varía la velocidad del túnel, comprobando así que este punto no cambie o que su localización varía en forma insignificante.

---

<sup>5</sup> Cuando se tienen números de Reynolds grandes, se trata de flujo turbulento, por el contrario con números de Reynolds bajos predominarán las fuerzas viscosas y el flujo será laminar, aplicando esto a un objeto con superficies planas y aristas agudas, por su geometría, este generará prácticamente la misma turbulencia independientemente del valor del número de Reynolds, resultando despreciable su uso.



## **Aplicaciones de los túneles de viento**

La utilización de los túneles de viento es muy amplia, se pueden encontrar aplicaciones que van desde la aeronáutica hasta los deportes, a continuación se expondrán algunos de estos usos:

### *Industria aeronáutica*

Se utiliza al túnel como un instrumento para simular el vuelo de las aeronaves, y realizar estudios de sustentación de alas, resistencia al avance, estabilidad estática y dinámica.

### *Industria automovilística*

En la industria automovilística se emplean como un medio para experimentar nuevas geometrías en carrocerías, optimizar sistemas de enfriamiento y aire acondicionado y estudios de la distribución de la presión del viento sobre la superficie del automóvil para el diseño de la suspensión.

### *Educación y enseñanza*

Un túnel de viento es una herramienta muy útil para poder representar experimentos con fines didácticos de fenómenos físicos cuya comprensión en clase teórica resulta incompleta.

### *Deportes*

Mediante pruebas en túnel de viento se pueden perfeccionar diseños de bicicletas, trineos, automóviles de carreras etc., para poder generar la menor resistencia al avance posible.

### *Medioambiente*

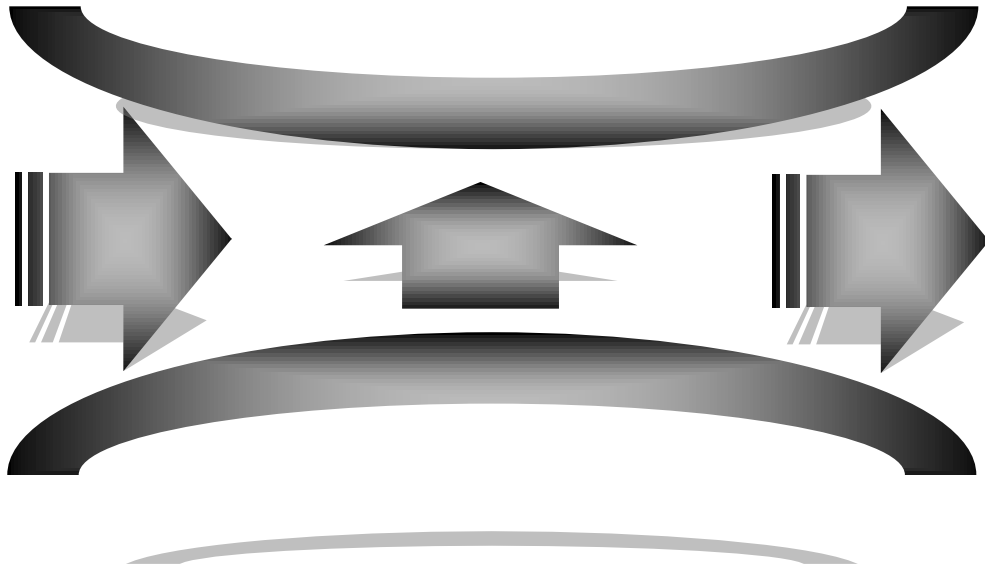
La eficiente dispersión de contaminantes mediante el uso de chimeneas es un punto importante a verificar en pruebas en túnel de viento.

### *Generación de energía eléctrica*

En un túnel de viento se pueden realizar ensayos del comportamiento de diversos tipos de aerogeneradores, conociendo la potencia que producen en función de la velocidad del viento.

### *Ingeniería civil y Arquitectura*

Se pueden efectuar pruebas para cuantificar la carga dinámica y estática del viento sobre las edificaciones. Además en particular en la arquitectura Bioclimática se pueden efectuar estudios de diversa índole, desde la medición de corrientes de convección natural o forzada hasta identificación de la orientación óptima según los vientos predominantes. En el siguiente capítulo se hablará a detalle de las aplicaciones en esta área.



## Capítulo 3.

Túnel de viento y Arquitectura  
Bioclimática

## **Capítulo 3**

### **La Arquitectura Bioclimática y el Uso del Túnel de Viento**

En lo que respecta a la arquitectura bioclimática el túnel de viento representa un papel importante para mediante la simulación conocer como es que una edificación o vivienda se relaciona con su entorno, es posible experimentar con un modelo al modificar sus elementos arquitectónicos para obtener la combinación ideal para finalmente llevar a cabo el proyecto de construcción.

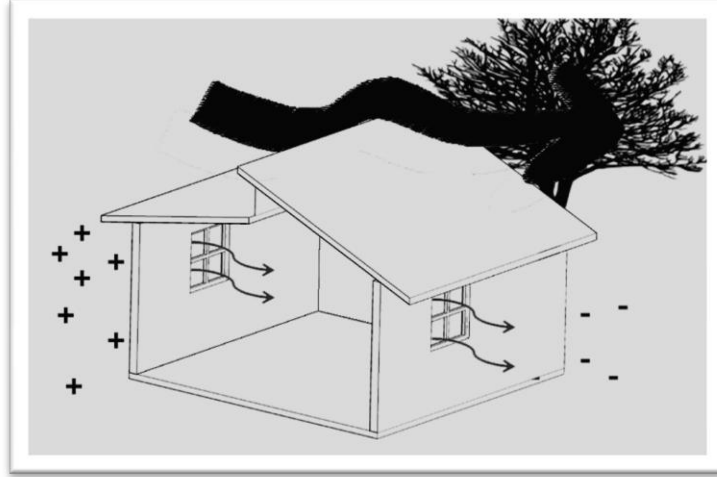
Además de la relación con el entorno es posible el verificar el comportamiento de las corrientes de aire en el interior, conociendo el efecto que producen puertas, ventanas, patios y sus posiciones relativas entre éstos.

El túnel de viento resulta ser un auxiliar no solo en el diseño de viviendas, sino en el proceso de mejoramiento de las ya existentes. Permite conocer de manera teórica/empírica la forma de depurar la arquitectura de una vivienda para mejorar su comodidad, esto de una manera precisa, ya que las pruebas se realizan en la maqueta y no en la vivienda real, ahorrando con esto tiempo y dinero.

#### **Utilización del túnel en el estudio de algunos aspectos básicos de la arquitectura bioclimática**

##### **Transmisión del calor**

Un problema que relacionado directamente con la comodidad de una vivienda es la pérdida de calor, es deseable en verano, pero no en invierno. Con el túnel de viento se pueden evaluar las entradas de ventilación de una vivienda en función de su orientación, generando con esto el tipo, tamaño y colocación ideal para una ventana.

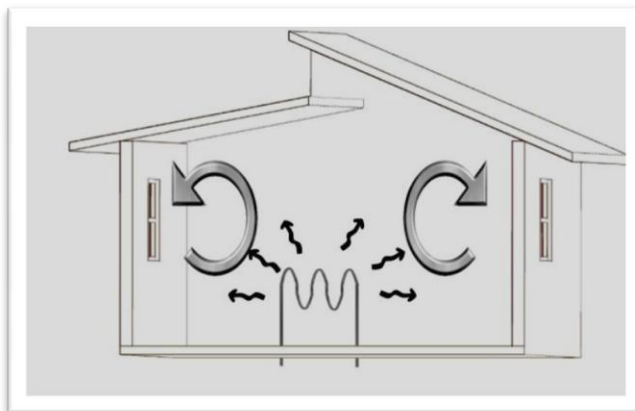


**Figura 14.** Las ventanas y la dirección del viento

### **Corrientes de convección**

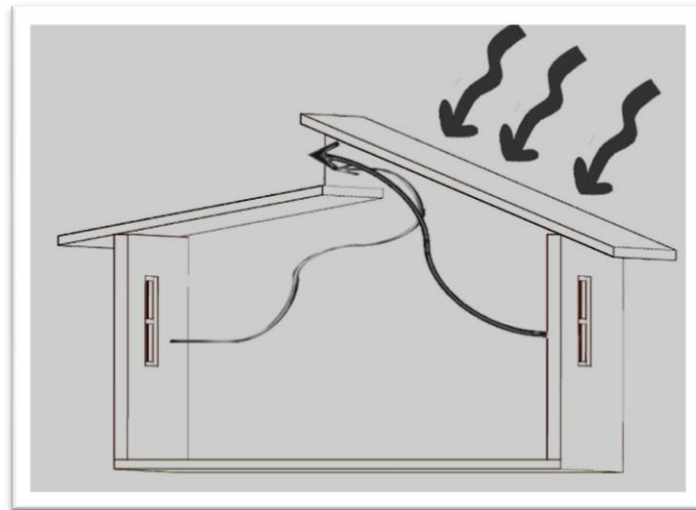
En este caso el túnel de viento se utiliza sólo como un medio para aislar al modelo de las corrientes de viento del propio laboratorio, el túnel no genera viento, sólo se trabaja en su sección de prueba.

Se pueden visualizar las corrientes de convección mediante la inyección de humo y utilizando un calefactor como una resistencia eléctrica, el modelo debe de ser construido con un material transparente como vidrio o acrílico.



**Figura 15.** Corrientes de convección (túnel apagado)

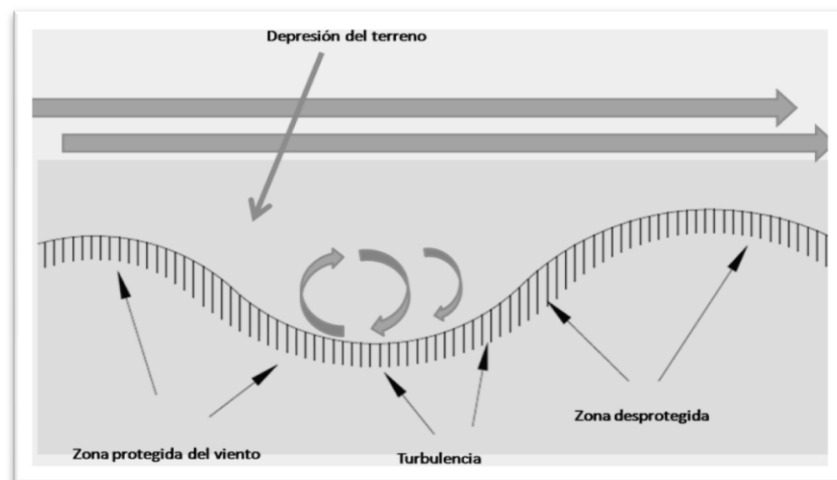
El túnel puede ponerse a funcionar a una velocidad conveniente y estudiar la relación entre la corriente de viento, la orientación de la vivienda, sus ventanas y las corrientes de convección.



**Figura 16.** Corrientes de convección (túnel funcionando)

### Pendiente del terreno

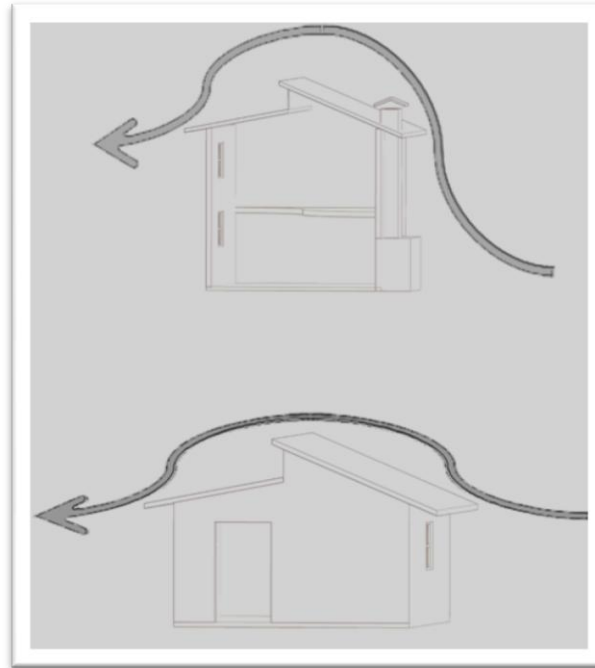
Es posible aprovechar gran parte de la extensión de la sección de prueba del túnel y construir un modelo rodeado de las condiciones topográficas a escala para poder conocer el comportamiento del viento bajo tales condiciones (Fig. 21):



**Figura 17.** Influencia de las características topográficas en el comportamiento del viento

## Relación entre la forma de la vivienda y el viento

Se pueden comparar distintas geometrías de viviendas para conocer el comportamiento del viento en función de su superficie de contacto o propiamente de su factor de forma<sup>6</sup>, detectando a detalle la forma de incidir en barlovento y en sotavento.



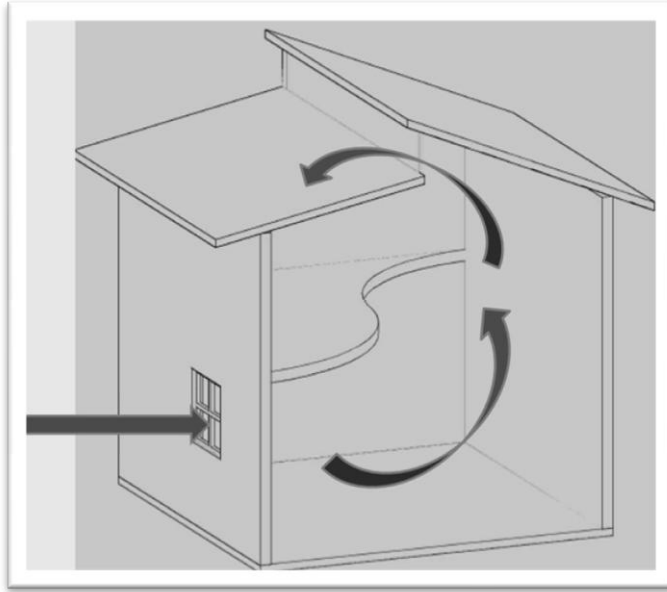
**Figura 18.** Comportamiento aerodinámico de la vivienda en función de su forma

## Ventilación natural

Mediante el uso del túnel de viento se puede conocer la forma en la que una vivienda logra ventilarse naturalmente, conociendo como trabajan los elementos que permiten el paso de las corrientes de aire como ventanas, rendijas, respiraderos etc.

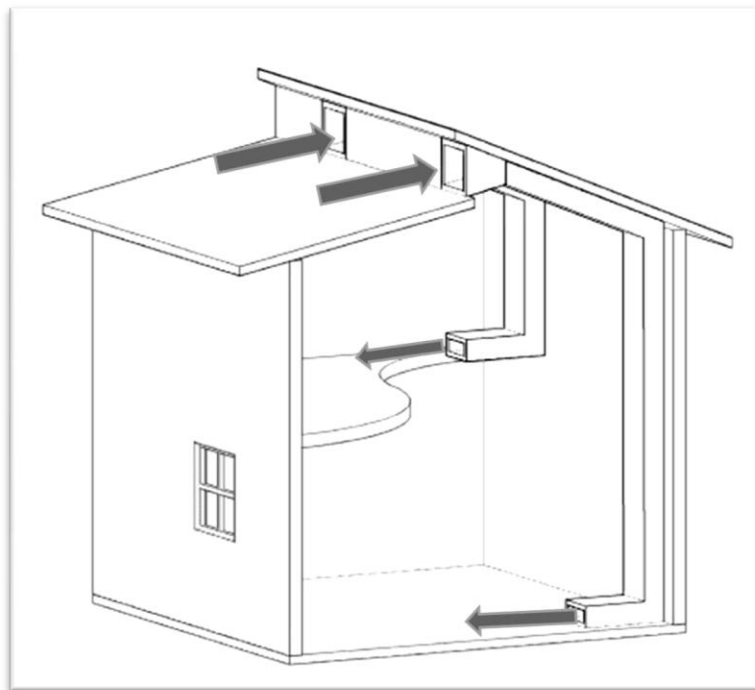
---

<sup>6</sup> Se le llama factor de forma al cociente que resulta de dividir la superficie del edificio entre su volumen



**Figura 19.** Identificación de corrientes generadas por la ventilación natural

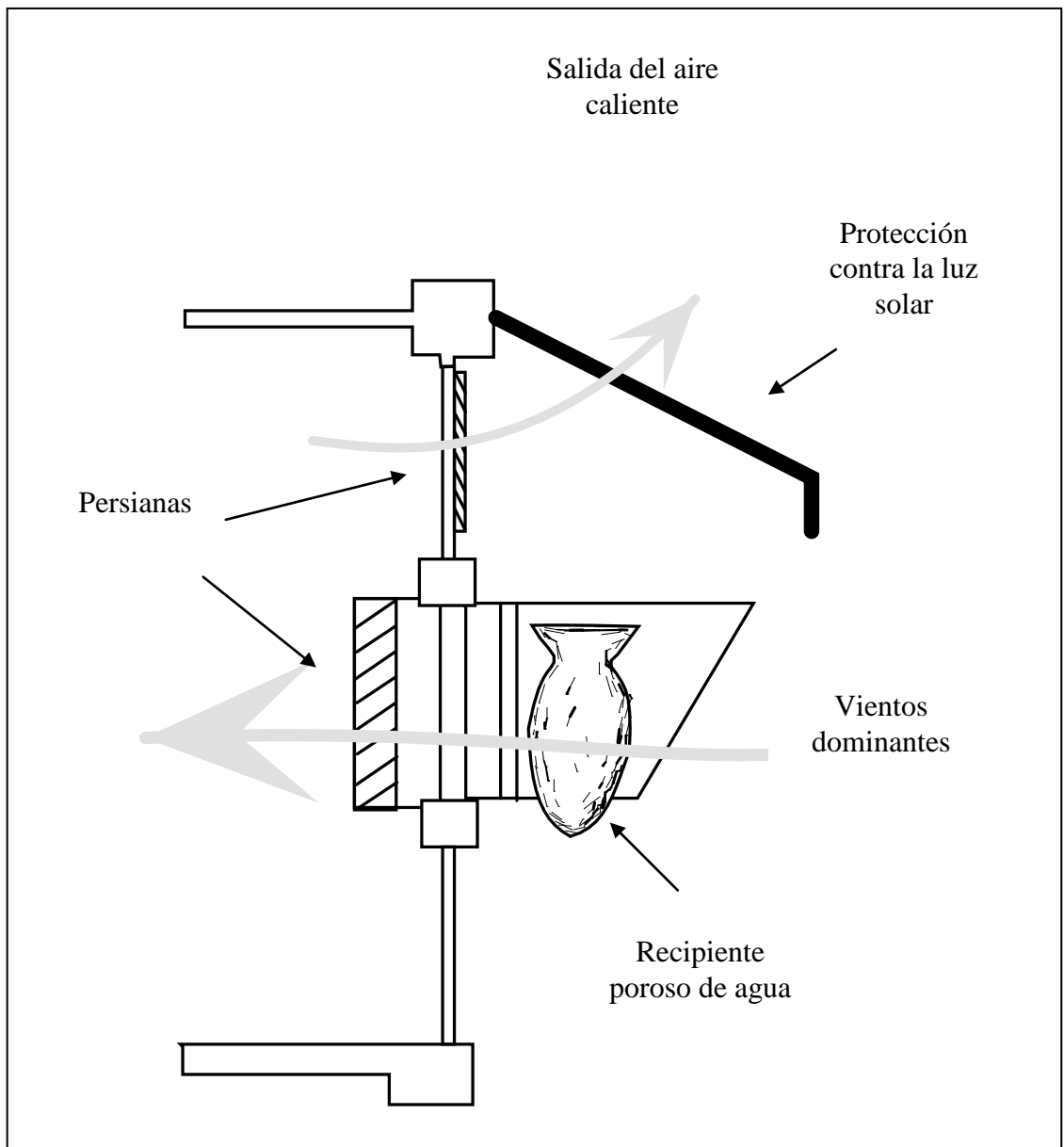
Incluso es posible el estudio de elementos arquitectónicos como los utilizados en medio oriente llamados “malgaf”, los cuales captan corrientes de viento y las introducen en la vivienda para refrescarla



**Figura 20.** Estudio del funcionamiento de “malgafs”



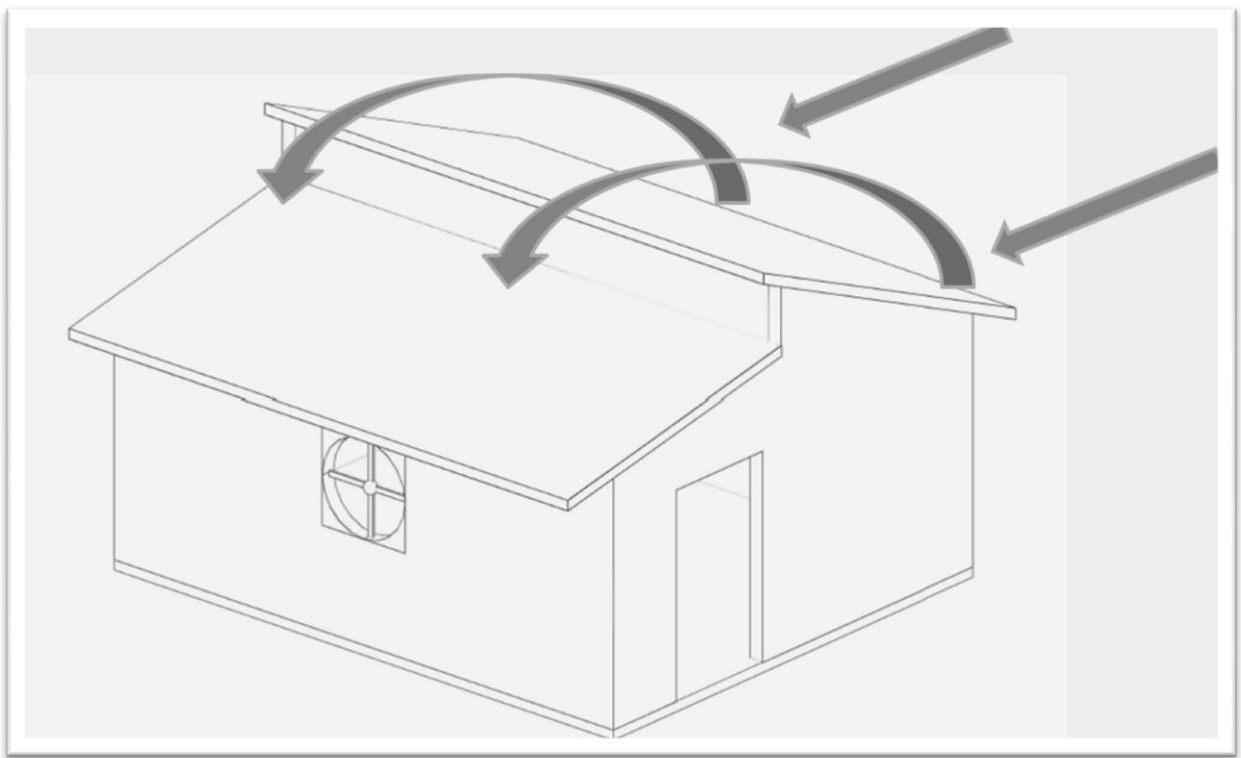
Otra aplicación del túnel de viento en lo que a ventilación concierne es el estudio de sistemas básicos de acondicionamiento de aire ya que se pueden determinar dimensiones óptimas para las entradas, salidas, volumen de agua necesario en los recipientes porosos etc.



**Figura 21.** Sistema básico de acondicionamiento de aire

## Ventilación artificial

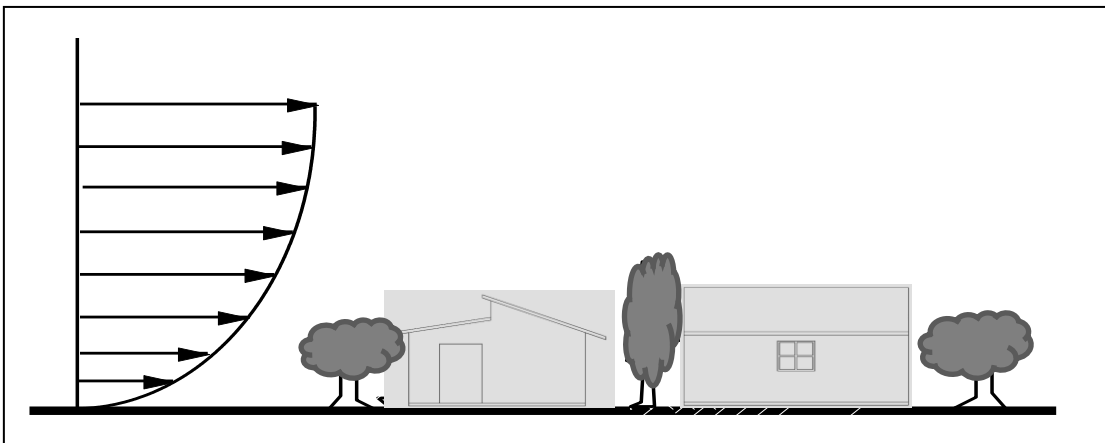
Cuando resulta indispensable el uso de elementos que generen ventilación artificial como ventiladores o extractores es muy útil un estudio previo en túnel de viento para que esta ventilación no interfiera con la ventilación natural, resultaría un error el colocar un extractor en una zona de la vivienda que tenga presión de impacto, igualmente erróneo sería colocar un ventilador en una zona de la vivienda en donde existan depresiones.



**Figura 22.** Lugar correcto para la colocación de extractores según vientos dominantes

### ***Simulación del perfil de velocidades del viento***

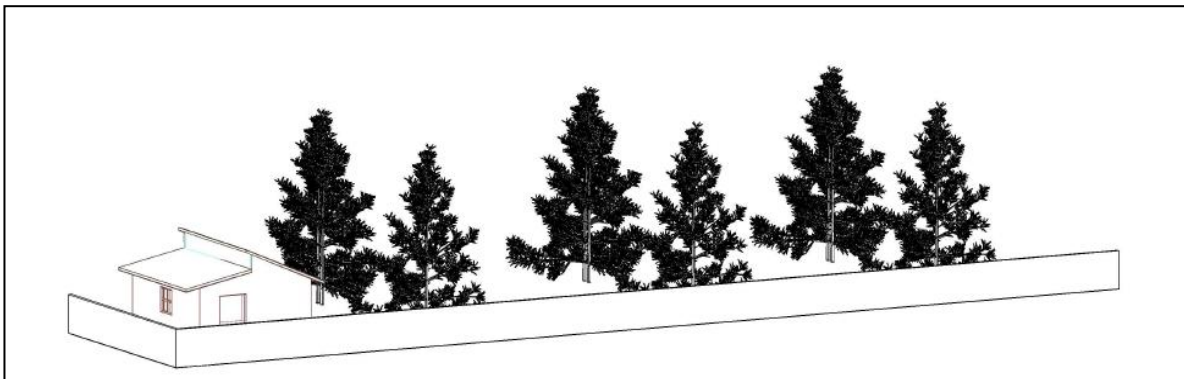
El viento atmosférico reduce su velocidad conforme se aproxima al terreno, esto tiene como resultado el describir un perfil de velocidades. Mediante el uso del túnel de viento es posible reproducir este perfil a escala, logrando con esto la realización del experimento bajo las mismas condiciones eólicas a las que están expuestas las edificaciones reales.



**Figura 23.** Perfil de velocidades en un medio suburbano

### ***Puesta a prueba de cortinas rompevientos***

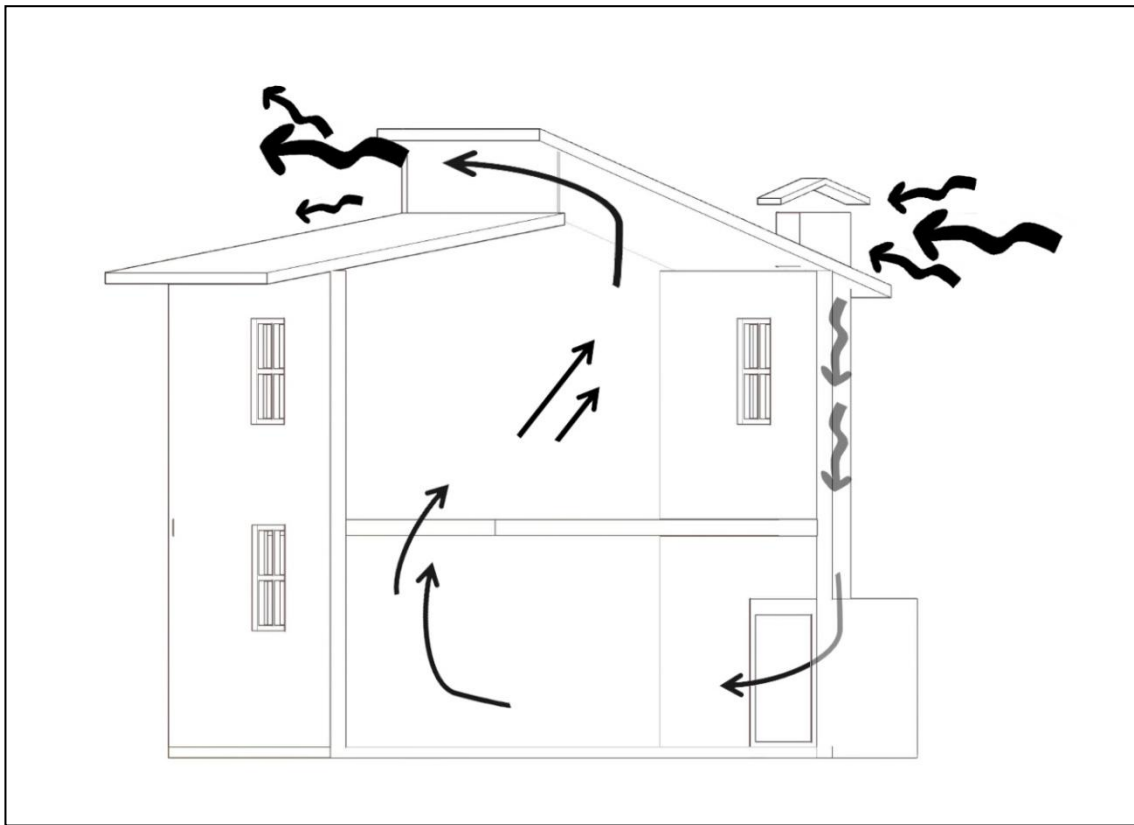
El empleo del túnel de viento se reduce el número de pruebas en campo, por ejemplo se puede verificar la eficiencia de una cortina rompevientos mediante un ensayo en él, seleccionando la mejor posición y las dimensiones óptimas para su diseño real.



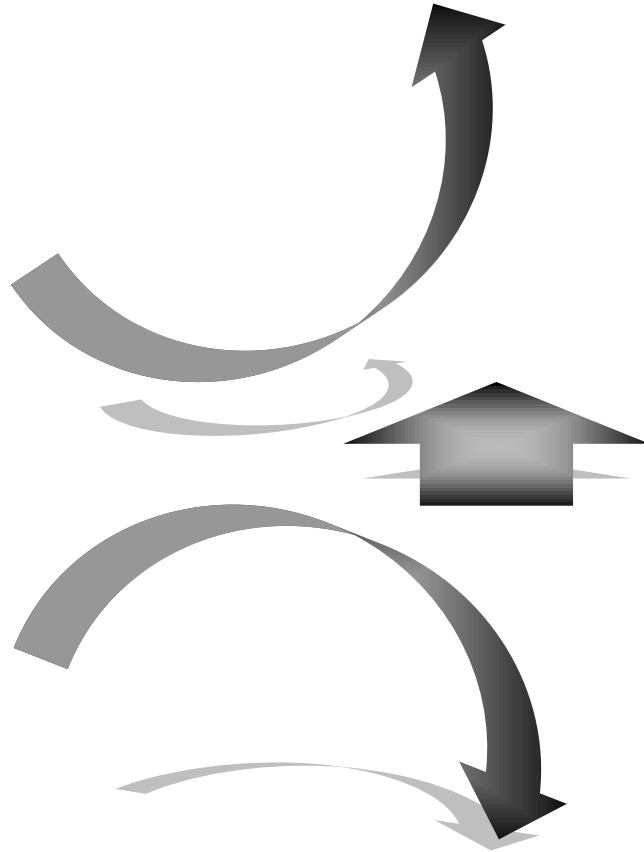
**Figura 24.** Colocación de una cortina rompevientos

### **Estudio del efecto “stack”**

El túnel de viento puede ayudar a conocer el comportamiento de una chimenea relacionado con la corriente exterior y el llamado efecto “stack”, el cual se produce cuando el aire caliente en el interior de la edificación sube y se genera una zona de baja presión en la parte inferior ocasionando un mal funcionamiento de la chimenea al permitir la entrada de aire cuando simultáneamente el aire caliente abandona la vivienda por la parte superior.



**Figura 25.** Mal funcionamiento de una chimenea debido al efecto “stack”



# Capítulo 4.

## Visualización de flujo

## Capítulo 4

### **Técnicas Empleadas en los Experimentos que se pueden Desarrollar en el Túnel de Viento relativos a la Arquitectura Bioclimática.**

#### **Visualización de flujo**

A continuación se explicarán las técnicas experimentales realizables en túnel de viento que se utilizan en los experimentos anteriormente descritos. Estas técnicas consisten en modificar, medir y simular las características del flujo que baña a la maqueta para poder representar el fenómeno que se verifica a escala real. Algunas técnicas son descriptivas o de naturaleza cualitativa, mientras que en otras es necesario realizar mediciones, y otras más son la combinación de las dos primeras.

#### **Visualización de flujo**

La visualización de flujo consiste en poder distinguir el camino que siguen las partículas fluidas en forma tal que se puedan conocer cualitativamente las propiedades vectoriales del campo de velocidades del flujo que baña al modelo.

Es conveniente el conocer algunos conceptos<sup>7</sup> importantes en la descripción de un flujo de fluido:

**Línea de corriente:** Es aquella que en un instante dado es tangente al vector velocidad en todo punto.

**Senda:** Es el camino seguido por una partícula fluida

---

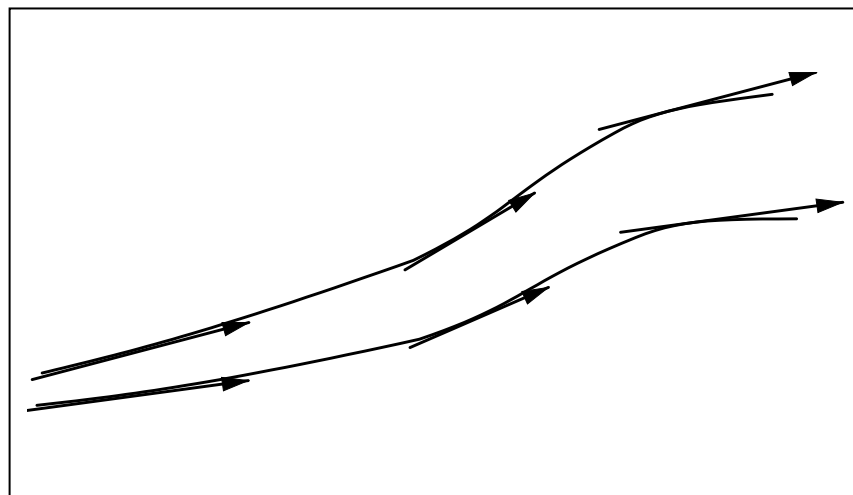
<sup>7</sup> Información más detallada se encuentra en F.M White, "Mecánica de Fluidos", McGraw Hill, 1988

Línea de traza: Es el lugar geométrico de las partículas que en instantes sucesivos pasaron por un punto dado.

Línea fluida: Es un conjunto de partículas fluidas que en un instante dado forman una línea.

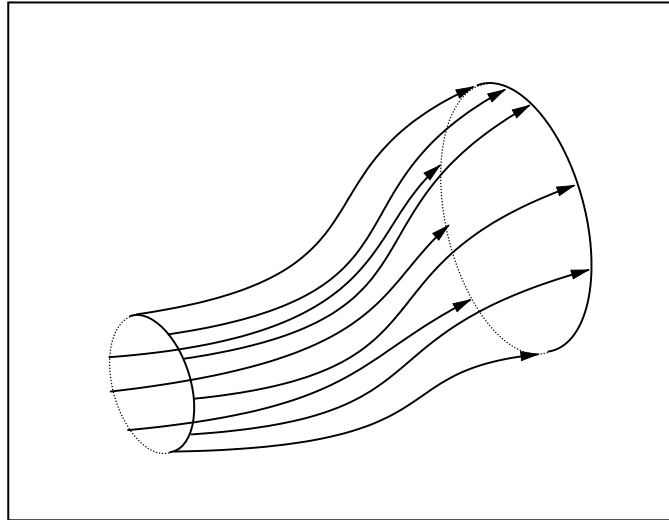
Cuando las propiedades dinámicas y cinemáticas del flujo no cambian en función del tiempo se dice que el flujo es estacionario. Para los flujos estacionarios las líneas de corriente, sendas y líneas de traza coinciden. Prácticamente las viviendas y edificaciones son bañadas por flujo estacionario. Un ejemplo de flujo no estacionario lo encontramos en una pala del rotor de un helicóptero, el flujo cambia según la posición azimutal de la pala y a lo largo de esta en función del tiempo.

De acuerdo a la definición de línea de corriente se deduce que estas no pueden cortarse entre sí, dado que una partícula fluida no puede tener dos vectores velocidad al mismo tiempo.



**Figura 26.** Líneas de corriente

En flujo tridimensional las líneas de corriente forman lo que se conoce con el nombre de tubo de corriente.



**Figura 27.** Tubo de corriente

Algunos de los resultados de la visualización de flujo que se obtienen mediante el estudio del comportamiento de las líneas de corriente son:

- Selección de puntos estratégicos para la colocación de tomas de presión.
- Grado de influencia del número de Reynolds en los coeficientes adimensionales.
- Identificación de zonas de desprendimiento de flujo.
- Identificación de zonas de flujo turbulento.
- Identificación de las zonas de variación de velocidad local.
- Identificación de puntos de estancamiento del aire.
- Identificación de corrientes de convección.
- Visualización de flujo en capa límite<sup>8</sup>.
- Conocimiento cualitativo de la velocidad del viento

---

<sup>8</sup> Se le llama capa límite a la región en donde se manifiestan los efectos viscosos del flujo por medio de la generación de un gradiente de velocidades.



Para seleccionar un método conveniente de visualización hay que tomar en cuenta lo siguiente:

a) Grado de turbulencia del flujo.

La forma más sencilla de visualizar flujo es cuando éste es laminar, si se tiene un alto grado de turbulencia será difícil o imposible el poder identificar a las líneas de corriente.

b) Presencia de corrientes de convección.

Si se desea visualizar corrientes de convección es importante elegir un método que contenga elementos reveladores<sup>9</sup> ligeros que puedan ser arrastrados por estas corrientes, la inyección de humo obtenido del calentamiento de la parafina líquida es una muy buena alternativa en estos casos

c) Tiempo de observación.

Cuando el tiempo de observación es prolongado debe de evitarse el uso de un elemento revelador como el humo, especialmente si el lugar de la visualización no tiene la renovación de aire adecuada.

d) Método de observación. (Visual o fotográfico).

Ya sea utilizando simplemente la vista o registrando las observaciones en un medio electrónico o fotográfico se necesita de una iluminación adecuada, utilizando lámparas incandescentes, fluorescentes, estroboscópicas etc.

---

<sup>9</sup> Se le llama así a la sustancia que se inyecta en la corriente de flujo o se coloca en el modelo para poder describir la trayectoria de las líneas de corriente.

e) Zona de observación del flujo. (En la superficie del objeto, en el entorno, etc.).

Existen técnicas de visualización específicas para flujo en la superficie del objeto como el colocar pequeños hilos con cinta adhesiva o utilizar una mezcla de aceite y polvo de aluminio administrada en la superficie de la maqueta.

f) Velocidad del flujo.

En ocasiones el comportamiento de algunos tipos de vórtices que se forman en la cercanía a la superficie de un objeto no es visible al ojo humano debido a su alta velocidad, es entonces necesario el optar por registro fotográfico con tiempo de exposición muy bajo, visualizando esto con humo de baja densidad.

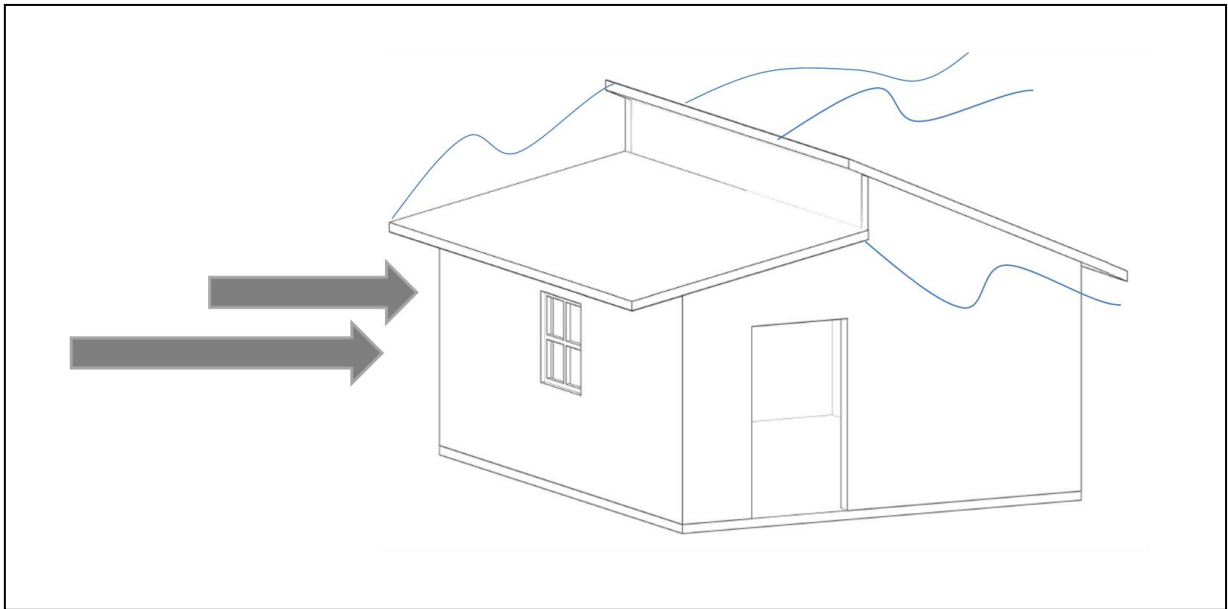
## Técnicas de visualización de flujo

A continuación se describen las técnicas de visualización de flujo más comúnmente empleadas:

### Visualización de flujo por medio de hilos colocados en la superficie

Esta técnica consiste en colocar pequeños segmentos de hilo en una superficie, permitiendo con esto que se orienten libremente según la dirección del viento esto es particularmente útil cuando se desea conocer el comportamiento del flujo en o cerca de una superficie.

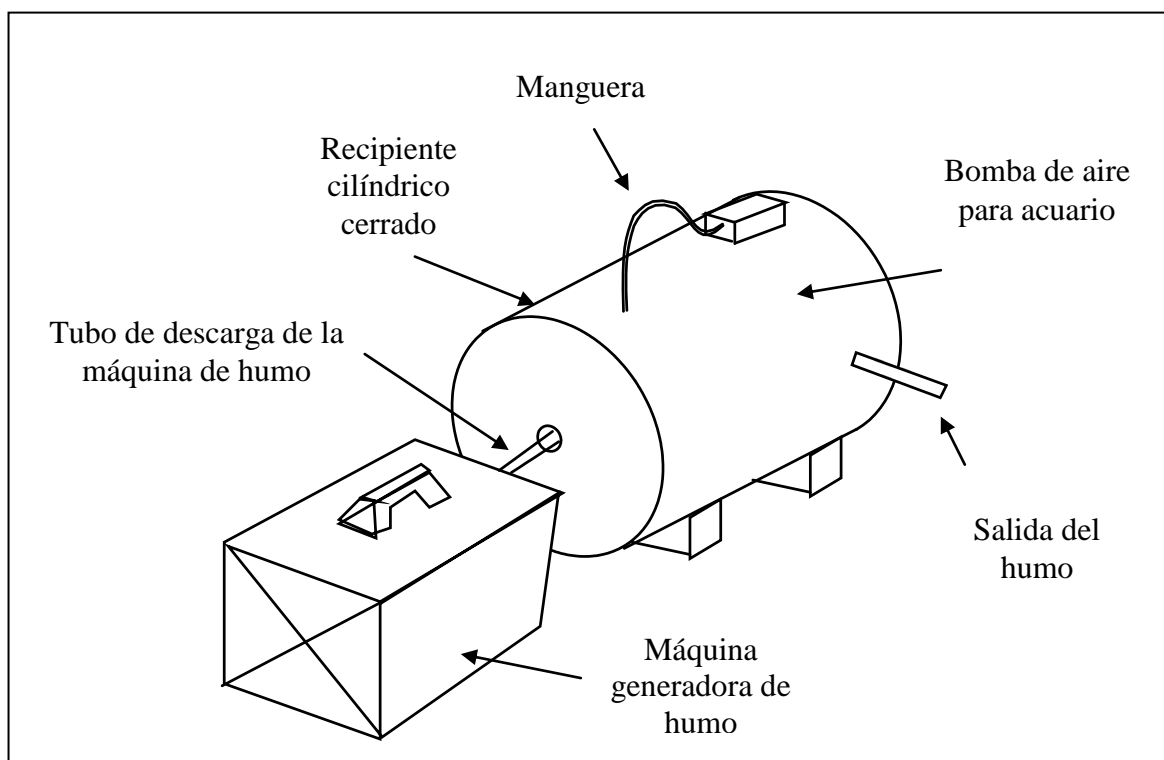
El tamaño y el calibre del hilo dependen de la magnitud del área cubierta así como el material de este, se recomienda ensayar diferentes medidas y materiales (seda, nylon, algodón etc.).



**Figura 28.** Visualización de flujo por medio de hilos

### **Visualización por medio de inyección de humo**

El humo puede obtenerse mediante un dispositivo cuyo esquema se muestra en la siguiente figura:



**Figura 29.** Dispositivo de inyección de humo

Como se puede observar en la figura anterior el dispositivo consta de una máquina generadora de humo, esta se puede adquirir en casas que se dediquen a la venta de material para fiestas y eventos, funcionan vaporizando parafina líquida. La máquina descarga directamente en un recipiente cilíndrico cerrado que hace la función de cámara de humo, para la manufactura de este recipiente se sugiere el empleo de un tramo de tubería de PVC de 12" de diámetro por aproximadamente 24" de longitud, cerrando sus extremos con lámina galvanizada. Encima del recipiente se coloca una bomba de aire de las que se utilizan en acuarios, ésta se conecta al recipiente por

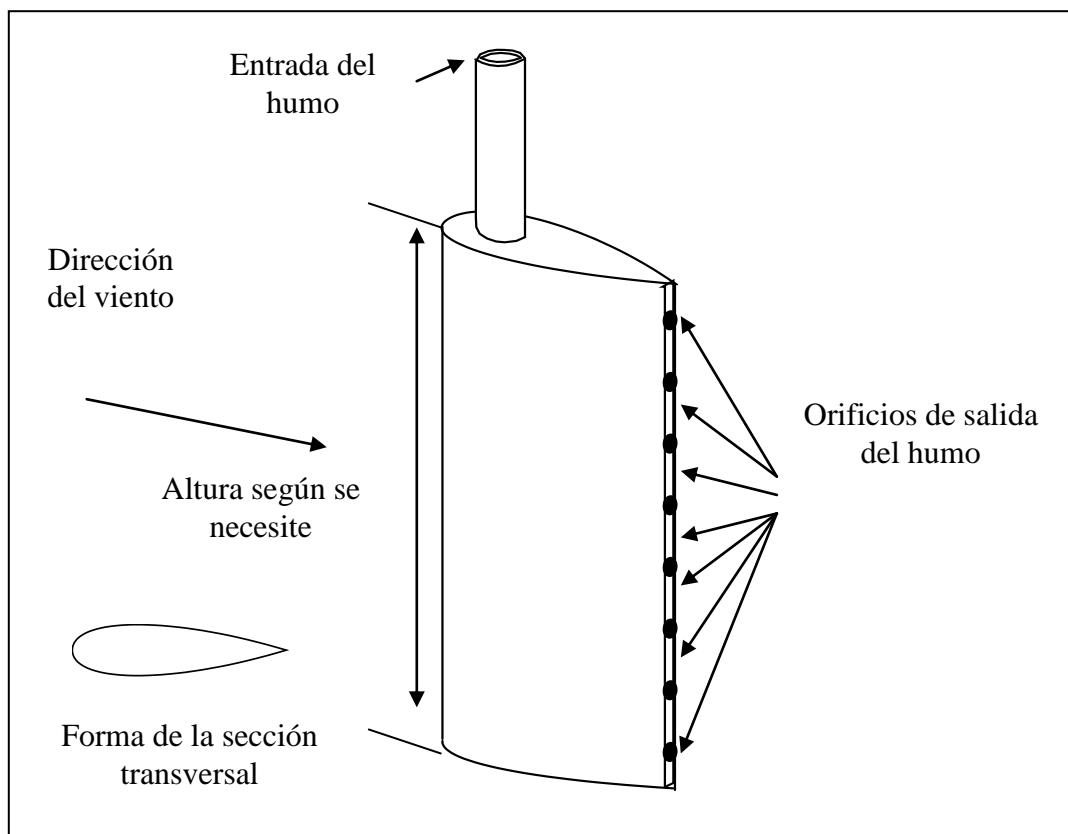
medio de una manguera. Finalmente, la salida del humo puede colocarse ya sea en el extremo opuesto a la descarga de la máquina o bien en un lado del recipiente.

Este dispositivo funciona como almacén de humo y como regulador de la velocidad de salida del mismo, siendo esta la razón principal para contar con él, ya que si se trabaja directamente con la descarga de la máquina se tiene una velocidad muy alta de salida del humo, lo cual no es conveniente para la visualización.

El humo puede ser utilizado en tres formas:

1.- Inyección de humo en la corriente libre.

Esta consiste en utilizar un inyector de humo conectado por medio de una manguera a la salida de la cámara de humo, y colocarlo corriente arriba del modelo o maqueta, en la figura se muestra un ejemplo de tal inyector.

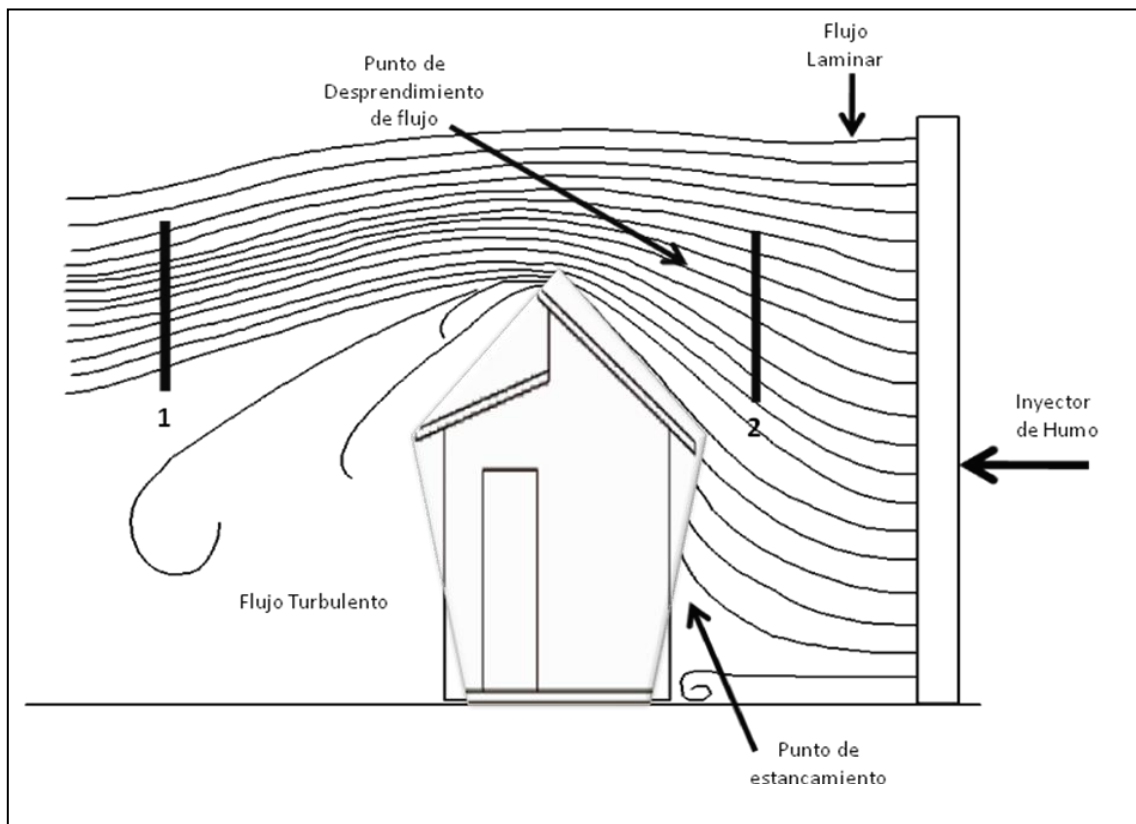


**Figura 30.** Inyector de humo, corriente arriba

Es importante respetar la forma de la sección transversal, de lo contrario el propio inyector puede generar turbulencia perturbando con esto al flujo arruinando la visualización.

Se recomienda que el diámetro de los orificios de salida no sea mayor a  $\frac{3}{32}$ ". El número de éstos está en función de la longitud total del inyector.

Este inyector se usa en un plano transversal a la sección de prueba de manera tanto horizontal como vertical.



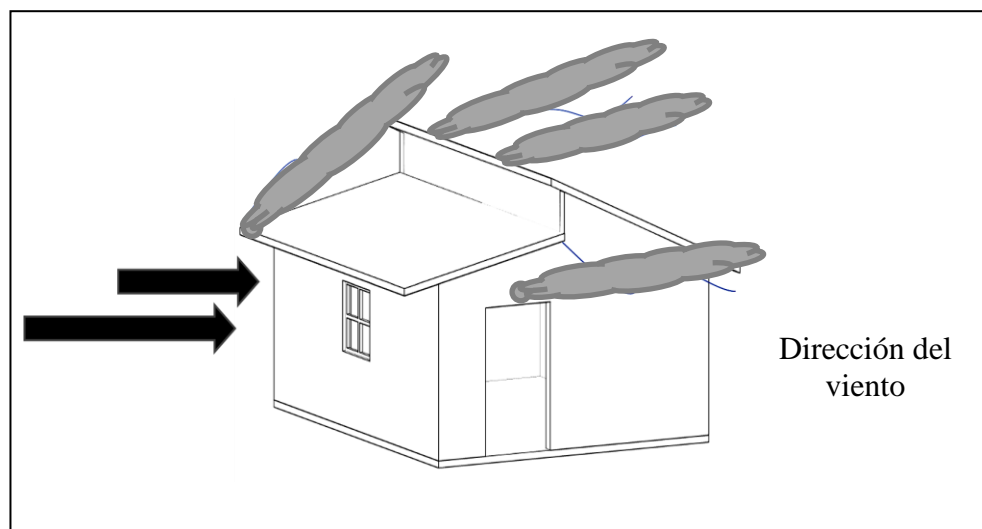
**Figura 31.** Densidad Lineal

En la figura 31 podemos observar un fenómeno que ayuda a distinguir la distribución de velocidad del viento. En el plano 1 apreciamos que existe un cierto número de líneas de corriente por unidad de longitud, a esto le podemos llamar “densidad lineal” de las líneas de corriente. En el plano 2 observamos que el número de líneas de corriente por unidad de longitud ha aumentado, es decir la densidad lineal se incrementó.

Por regla general, se tiene que mientras mayor sea la densidad lineal mayor será la velocidad del flujo y viceversa. Esto sucede debido a que al aumentar la velocidad del flujo la presión estática disminuye, creando este fenómeno el que las líneas de corriente viajen con menor separación entre ellas.

## 2.- Inyección de humo en la superficie del modelo.

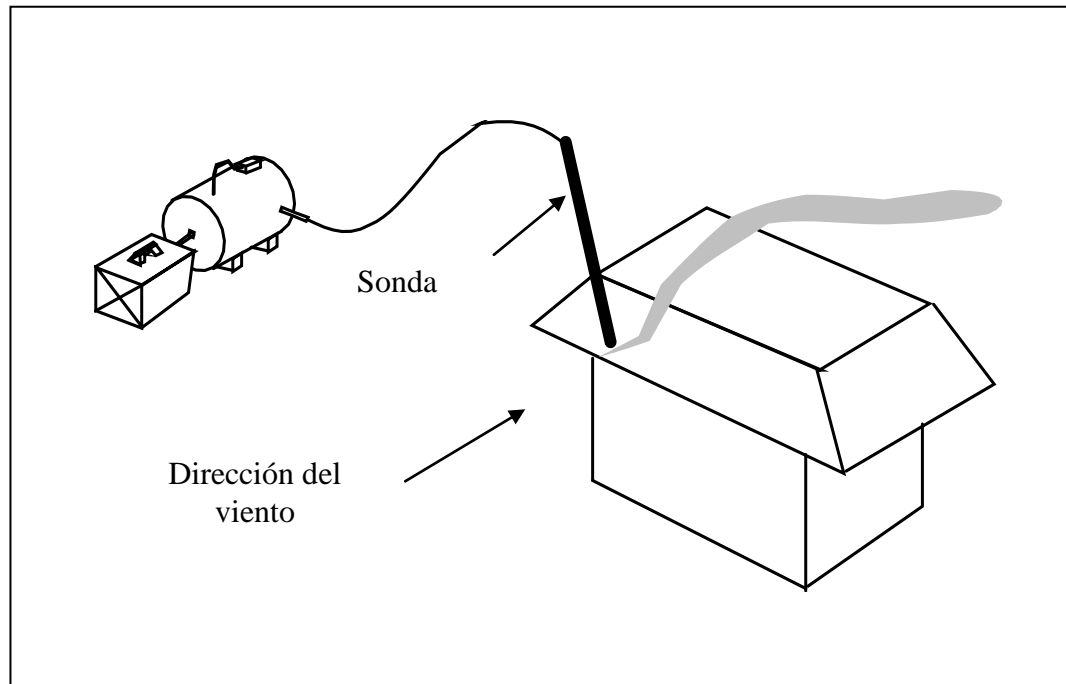
Otra forma de utilizar la inyección de humo en lugar de inyectarlo en la corriente libre es tener la posibilidad de que emane directamente de la superficie del modelo. Para esto previamente se debe de construir el modelo de manera tal que en su superficie se practiquen orificios y estos se conecten con mangueras a la descarga de la cámara de humo (Fig. 32). Este método se puede llevar a cabo tanto en superficies interiores como en superficies exteriores del modelo.



**Figura 32.** Inyección de humo en la superficie del modelo

### 3.- Inyección de humo en un punto específico.

También se puede realizar una inyección directa mediante la utilización de una sonda que aplique humo especialmente en alguna zona del modelo. Tal sonda puede fabricarse con un tubo de cobre con una boquilla en su extremo.



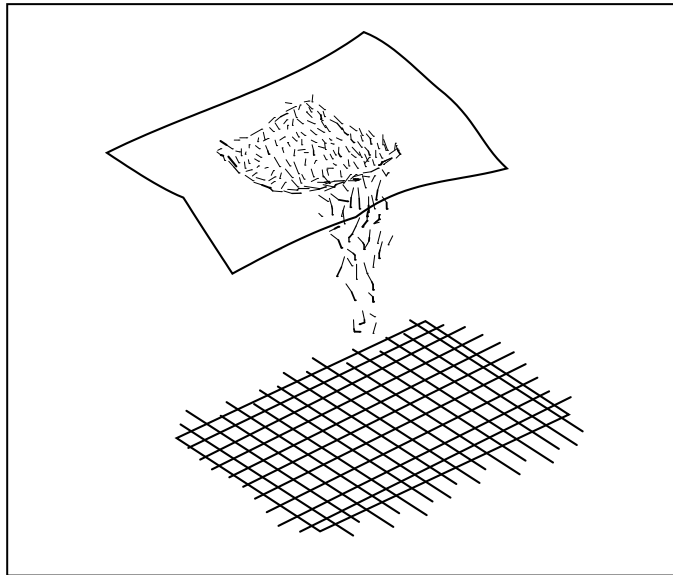
**Figura 33.** Punto específico de inyección de humo

O bien, se puede inyectar humo en el interior de la maqueta estando el túnel sin funcionar, y ya que se ha acumulado el suficiente volumen de este se procede a hacer funcionar al túnel y se registran las observaciones de la forma en la que el humo comienza a disiparse.



### ***Visualización por medio de polvo de madera balsa***

El polvo de madera balsa se puede obtener simplemente utilizando una lija mediana o fina, almacenando el polvo en un frasco de vidrio. Al momento de realizar la visualización y agregarlo al flujo se debe de utilizar una malla de alambre con un tamaño de cuadro de aproximadamente 2 milímetros.



**Figura 34.** Polvo de madera balsa a través de malla de alambre

También se puede esparcir en el piso de la maqueta o en algún punto de interés y a continuación poner a funcionar al túnel de viento.

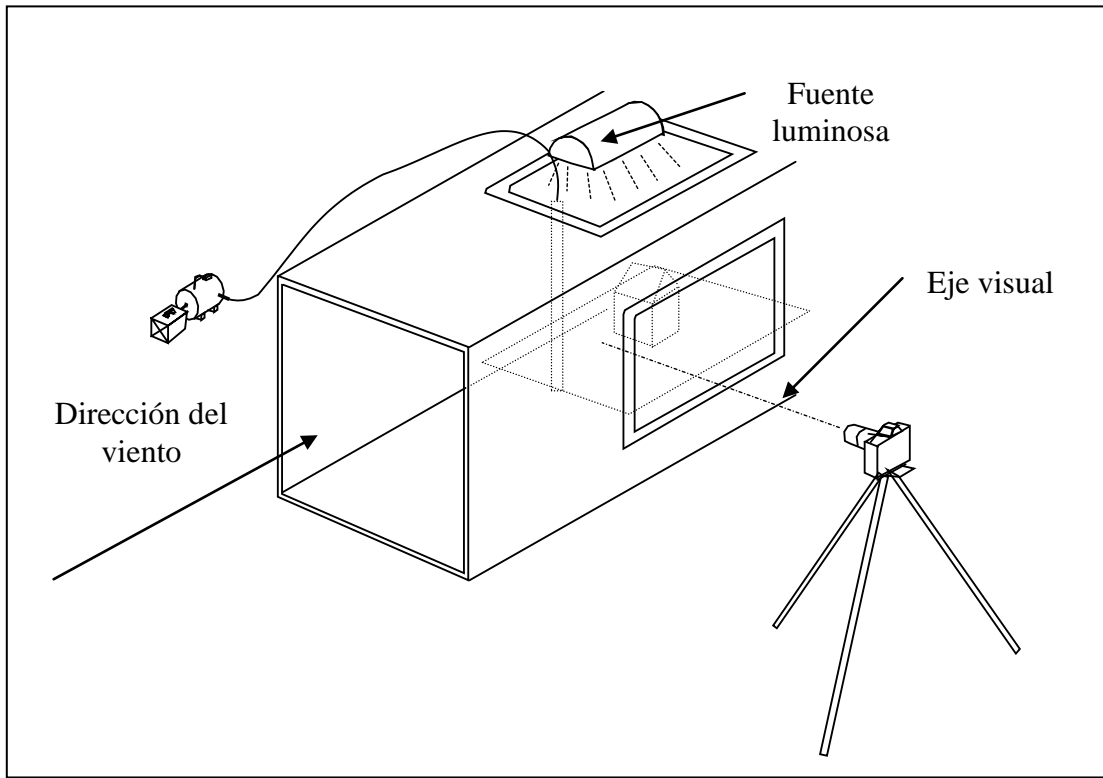
### **Registro fotográfico**

Debido a la naturaleza descriptiva de la visualización de flujo es conveniente registrarla mediante algún dispositivo fotográfico. Esto puede ayudar incluso a conocer el comportamiento del flujo en función del tiempo, por ejemplo, si se emplea una cámara

fotográfica tipo SLR, es posible graduar el tiempo de exposición y obtener diferentes resultados según la velocidad del flujo. Si se desea registrar al flujo de aire que se desplaza a alta velocidad es conveniente un tiempo de exposición bajo, menor a 1/1000 de segundo, teniendo en cuenta que para este tiempo de exposición y aún con película con un número ISO alto (400 u 800), se debe de iluminar al modelo con lámparas de alta intensidad. Por otro lado se puede registrar el movimiento del humo o del polvo de madera balsa mediante exposición prolongada, esto es con tiempo mayor a ½ segundo, requiriendo para esto menor intensidad luminosa. En general se puede asociar a una velocidad de flujo de aire alta un tiempo de exposición bajo, y viceversa. También se recomienda el uso de dispositivos electrónicos como videocámaras o cámaras digitales, teniendo estas últimas la ventaja de poder editar los resultados mediante el uso de una computadora con un programa adecuado.

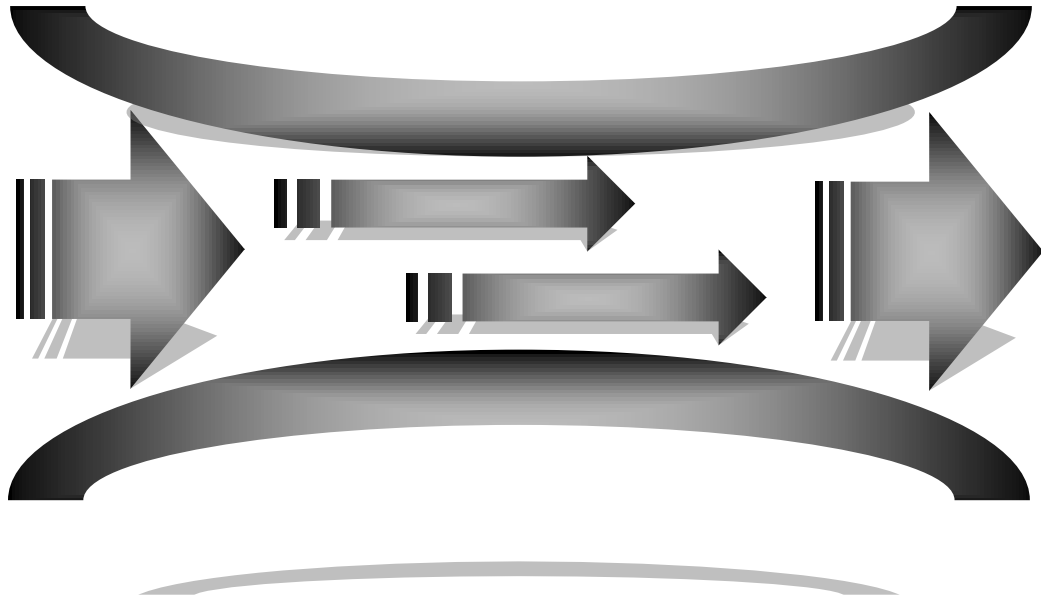
## **Iluminación**

Independientemente del método de visualización que se emplee es importante indicar que ya sea para registro fotográfico u observación directa, la iluminación debe ser en forma tal que siempre guarde un ángulo de 90° con respecto del eje visual.



**Figura 35.** Iluminación a 90°, respecto del eje visual

La fuente luminosa puede ser de varios tipos a elegir según la forma de registro visual, se tienen opciones como lámparas incandescentes, lámparas fluorescentes, lámparas estroboscópicas, lámparas de “luz negra”, estas son especialmente útiles si se utiliza polvo de madera balsa teñido con pintura fosforescente. En todo caso se debe proteger a las ventanas de acrílico del túnel del calor de las lámparas.



# Capítulo 5

**Acondicionamiento de la calidad de  
flujo en la sección de prueba**

## Capítulo 5

### Acondicionamiento de la Calidad del Flujo en la Sección de Prueba

El flujo que entra en la sección de prueba del túnel de viento puede ser modificado para cumplir con ciertas propiedades específicas de cada experimento. La facilidad para otorgarle tales características depende de la calidad inicial, esto permite facilitar la simulación del viento atmosférico en cualquier entorno, ya sea urbano, o suburbano.

Fundamentalmente en la sección de prueba la velocidad del flujo debe ser:

1.- Uniforme en dirección.

El flujo idealmente a lo largo de la sección de prueba debe mantener una dirección horizontal. Esto en la realidad no se cumple a menos de que se tomen las medidas correspondientes. Los obstáculos a vencer son:

- A. Corrección del desalineamiento a la entrada de la sección de prueba.
- B. Corrección de la inducción de rotación por parte de los abanicos<sup>10</sup>.

Para corregir el desalineamiento a la entrada de la sección de prueba se tienen dos opciones, la primera consiste en colocar una “campana abierta”, esta favorece el movimiento del aire a la entrada de la sección, sin embargo es sensible a las perturbaciones debidas al movimiento de personas cerca de la sección de prueba o a pequeñas corrientes de aire. Su eficiencia puede incrementarse colocando una malla de alambre justo a la entrada de la campana.

El tamaño del cuadro de la malla está en función de la velocidad de trabajo en la sección de prueba y de los resultados que de la experiencia se obtengan. Es recomendable tener un juego de mallas de diferentes anchos de cuadro para colocarlos

---

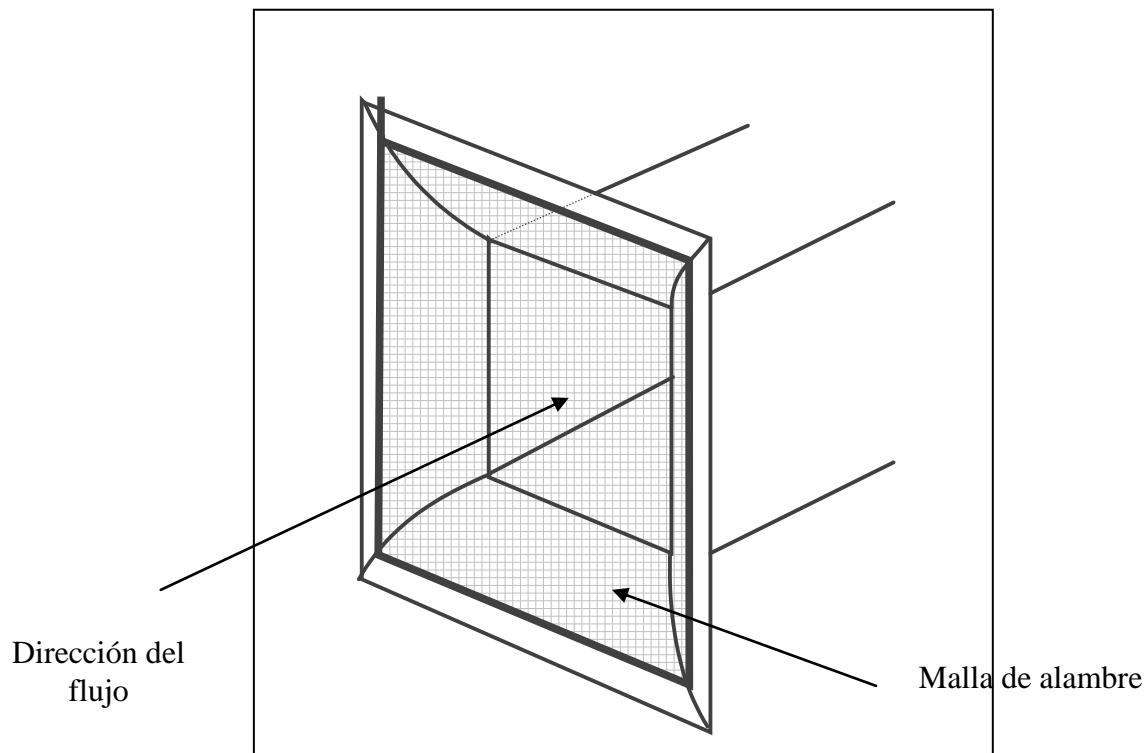
<sup>10</sup> En especial si se trata de abanicos de flujo axial, para abanicos centrífugos la inducción de rotación del flujo es despreciable.

según el experimento a realizar. Si se realiza visualización de flujo es recomendable una malla de cuadro pequeño (menor a 5mm de lado) o bien si se realizan experimentos de distribución de presión se recomienda una malla con cuadro mayor (mayor a 5mm de lado).

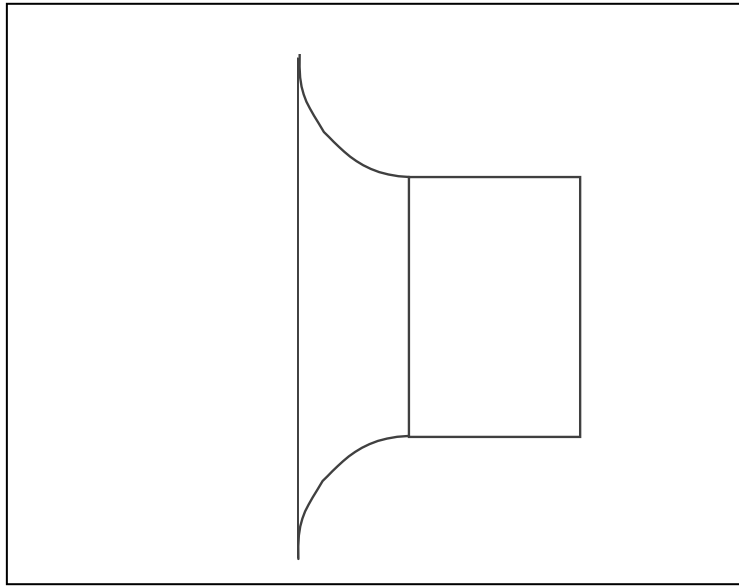
En todo caso la malla de alambre debe de colocarse exclusivamente a la entrada de la campana, ya que de no ser así el efecto de la malla será todo lo contrario a lo deseado, generará gran turbulencia en todo lo largo de la sección de prueba.

Al colocar la malla se recomienda estirla para evitar ondulaciones que generen perturbaciones en el flujo de entrada.

En las figuras 36 y 37 se ilustra el tipo de campana abierta y la forma de colocarle una malla de alambre:

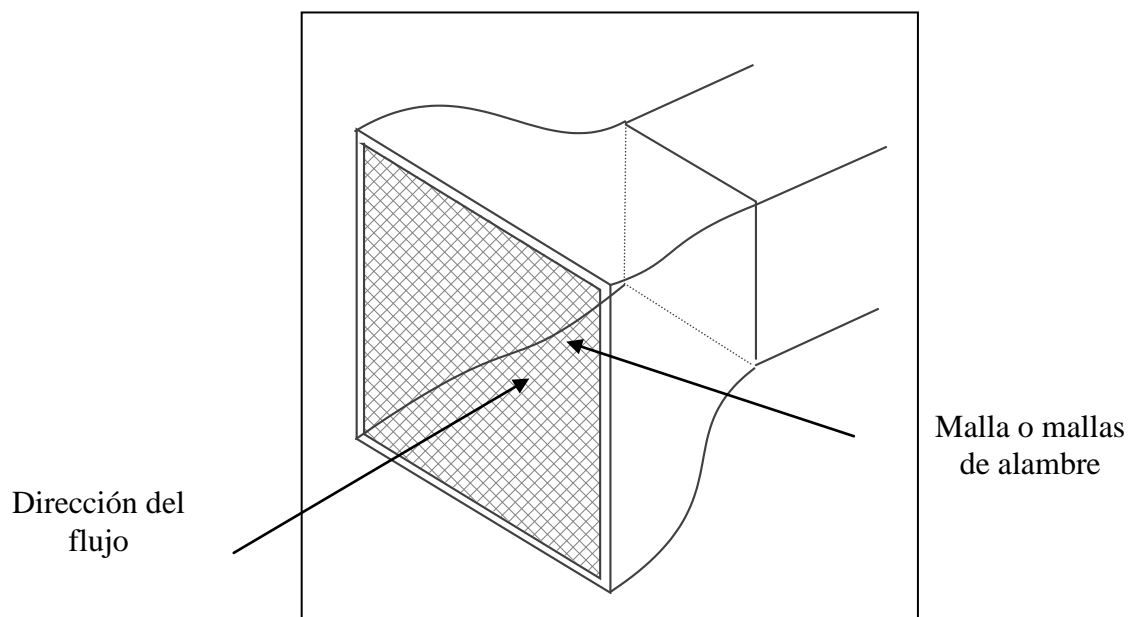


**Figura 36.** Campana abierta

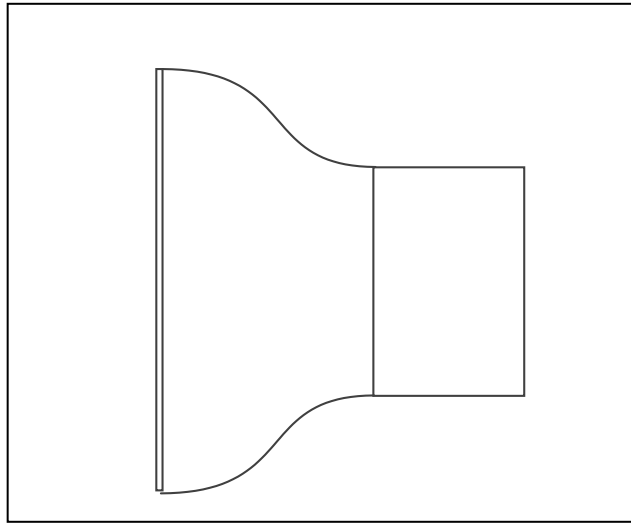


**Figura 37.** Vista lateral de la campana abierta

La otra opción que existe para alinear el flujo a la entrada de la sección de prueba es el uso de una “campana cerrada”, esta es más eficiente que el tipo anterior ya que no es vulnerable a las corrientes de aire en el laboratorio ni al movimiento de personas, además de que permite el colocar mas de una malla de alambre, generando con esto un alineamiento mayor al flujo. En las figuras 38 y 39 se muestra su geometría:

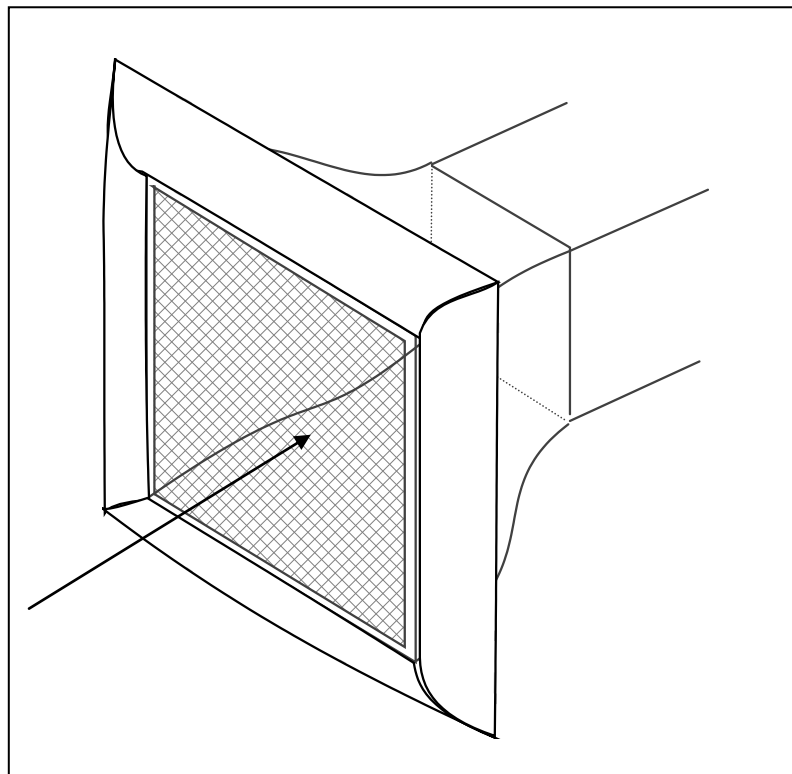


**Figura 38.** Campana cerrada



**Figura 39.** Vista lateral de la campana cerrada

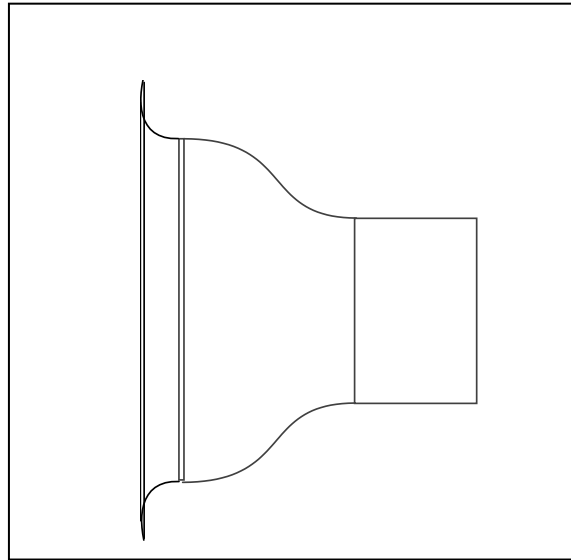
Finalmente se puede utilizar una combinación de las dos campanas de entrada anteriormente descritas, ésta es la solución ideal aunque representa mayor dificultad en su construcción (campanas combinadas):



Dirección del  
flujo

**Figura 40.** Campana combinada



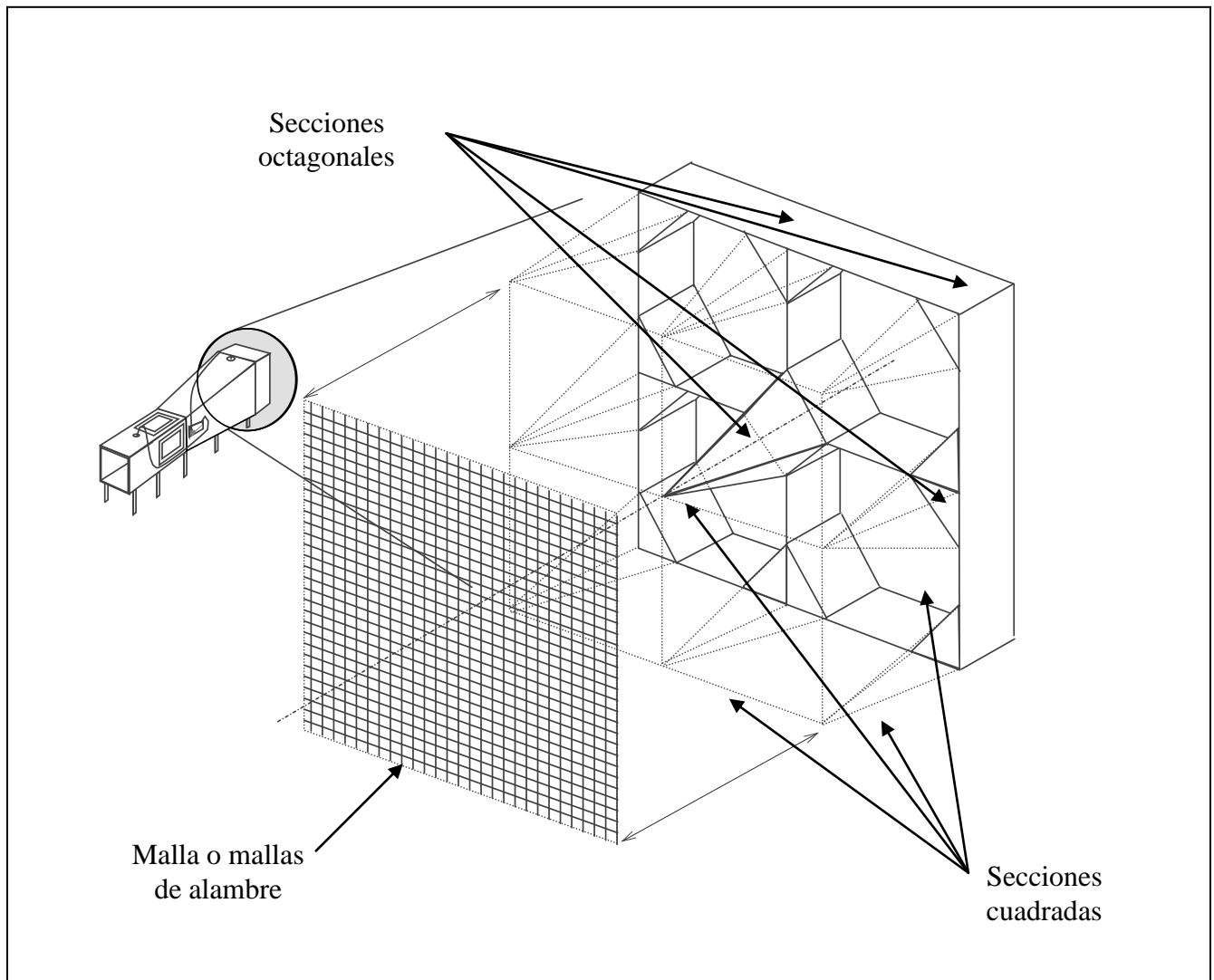


**Figura 41.** Vista lateral de la campana combinada

Para realizar la corrección de la inducción de rotación por parte de los abanicos se presenta la siguiente solución:

Se debe de realizar una transformación gradual de la sección cuadrada del difusor del túnel a cuatro subsecciones igualmente cuadradas, estas se transformaran gradualmente en secciones octagonales que son las que circunscribirán a las hélices o abanicos del túnel. Una alternativa es la transformación de tales secciones cuadradas en secciones circulares, sin embargo las secciones octagonales representan la solución más práctica.

En la figura 46 se muestra un ejemplo de esta solución, a la que se le puede acompañar con el uso de una malla de alambre o preferiblemente varias mallas colocadas justo al comienzo de la primera división en cuatro subsecciones.

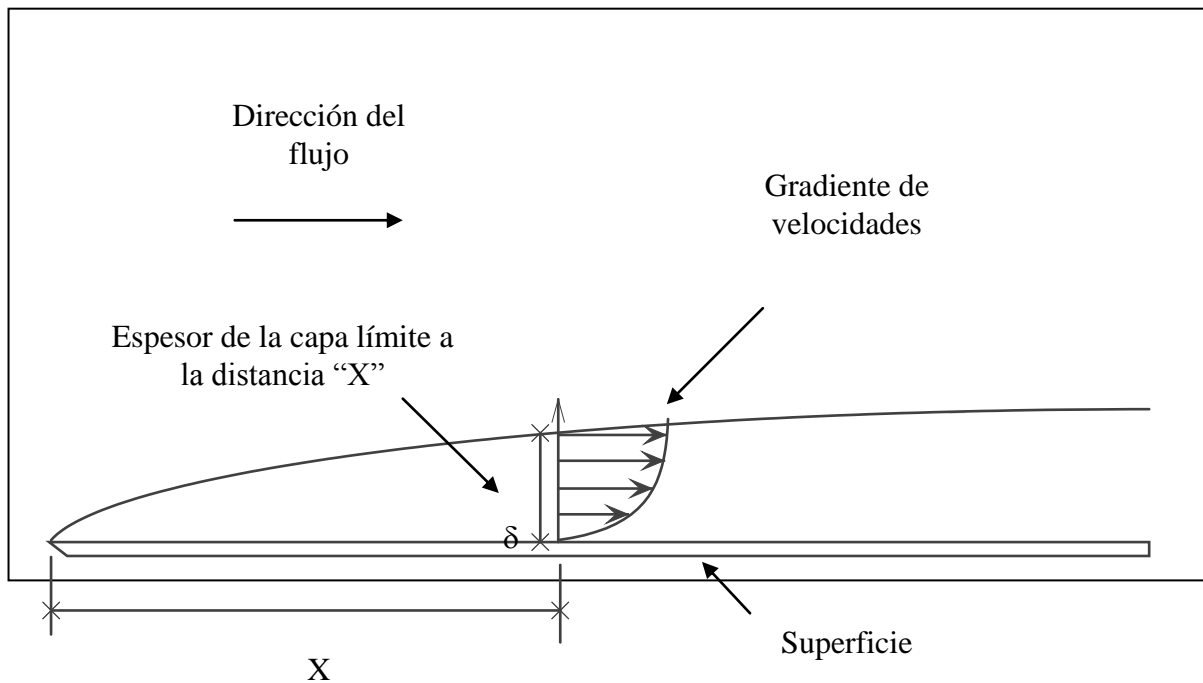


**Figura 42.** Detalle de la transformación de una sección cuadrada en cuatro subsecciones octagonales

## 2.- Uniforme en magnitud.

El crecimiento de la capa límite genera un fenómeno que consiste en la distribución desigual de la magnitud de la velocidad a lo largo de la sección de prueba, en pocas palabras el flujo no mantiene una velocidad constante.

Como ya se indicó en páginas anteriores la capa límite es el lugar en donde debido a los efectos viscosos del flujo se forma un gradiente de velocidades o perfil de velocidades, esto es, en la superficie que baña el flujo la velocidad es cero, creciendo gradualmente conforme se aleja de esta superficie hasta que se iguala el valor de la velocidad del flujo libre. La capa límite aumenta de espesor conforme aumenta la longitud de la superficie bañada.



**Figura 43.** Diagrama de la generación de capa límite sobre una placa plana

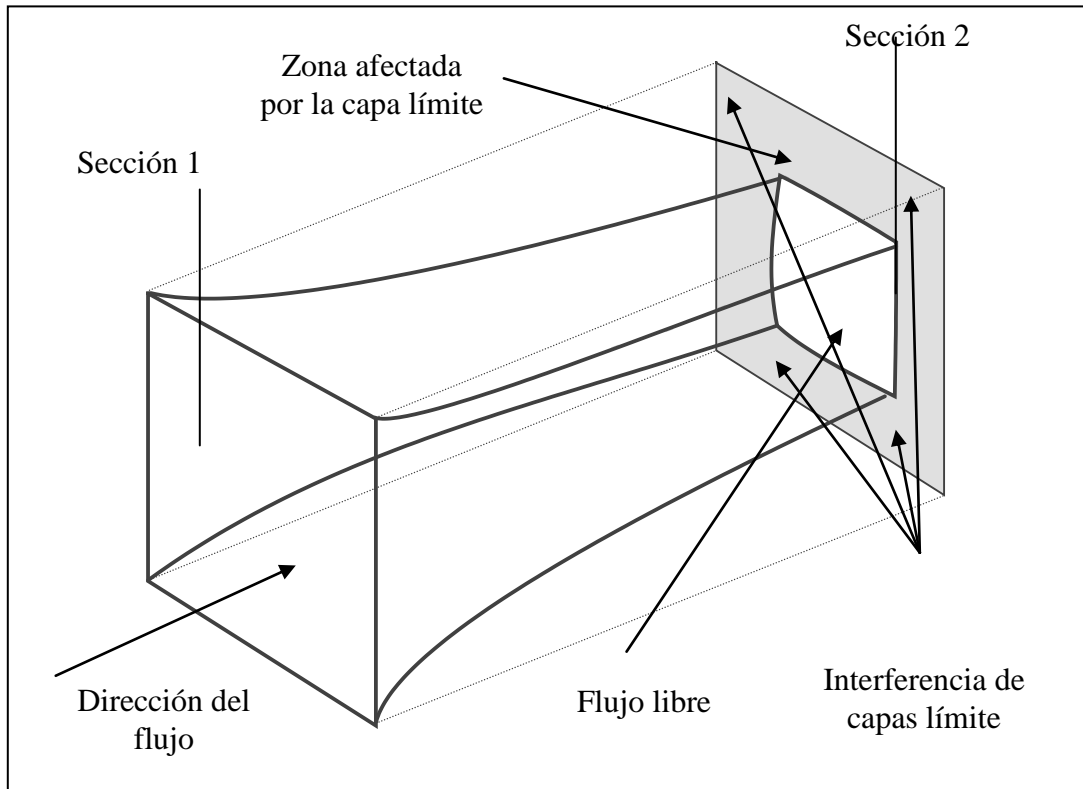
El espesor de la capa límite a una distancia "X" puede calcularse con la siguiente fórmula de origen empírico:

$$\delta = \frac{5.2X}{\sqrt{R_{Ex}}} \quad (R_{Ex} \leq 5 \times 10^4) \quad (4)$$

$R_{Ex}$  es el número de Reynolds en la distancia "X"

La fórmula es válida para los números de Reynolds que se obtienen con un túnel usado principalmente para estudios en arquitectura.

Como la capa límite se genera en las cuatro paredes de la sección de prueba del túnel se produce el efecto mostrado en la figura 48:



**Figura 44.** Crecimiento de la capa límite en las cuatro paredes de la sección de prueba del túnel

En la figura podemos apreciar que el crecimiento de las capas límite en las cuatro paredes de la sección de prueba del túnel tiene como consecuencia la reducción de área efectiva del flujo libre. Observamos que el área del flujo libre de la sección 1 es mayor que el área del flujo libre de la sección 2.

Lo anterior implica que la magnitud de la velocidad a lo largo de la sección de prueba no será constante, por la aplicación de la ecuación de continuidad<sup>11</sup> se sabe que la velocidad se incrementa cuando el área de la sección transversal disminuye.

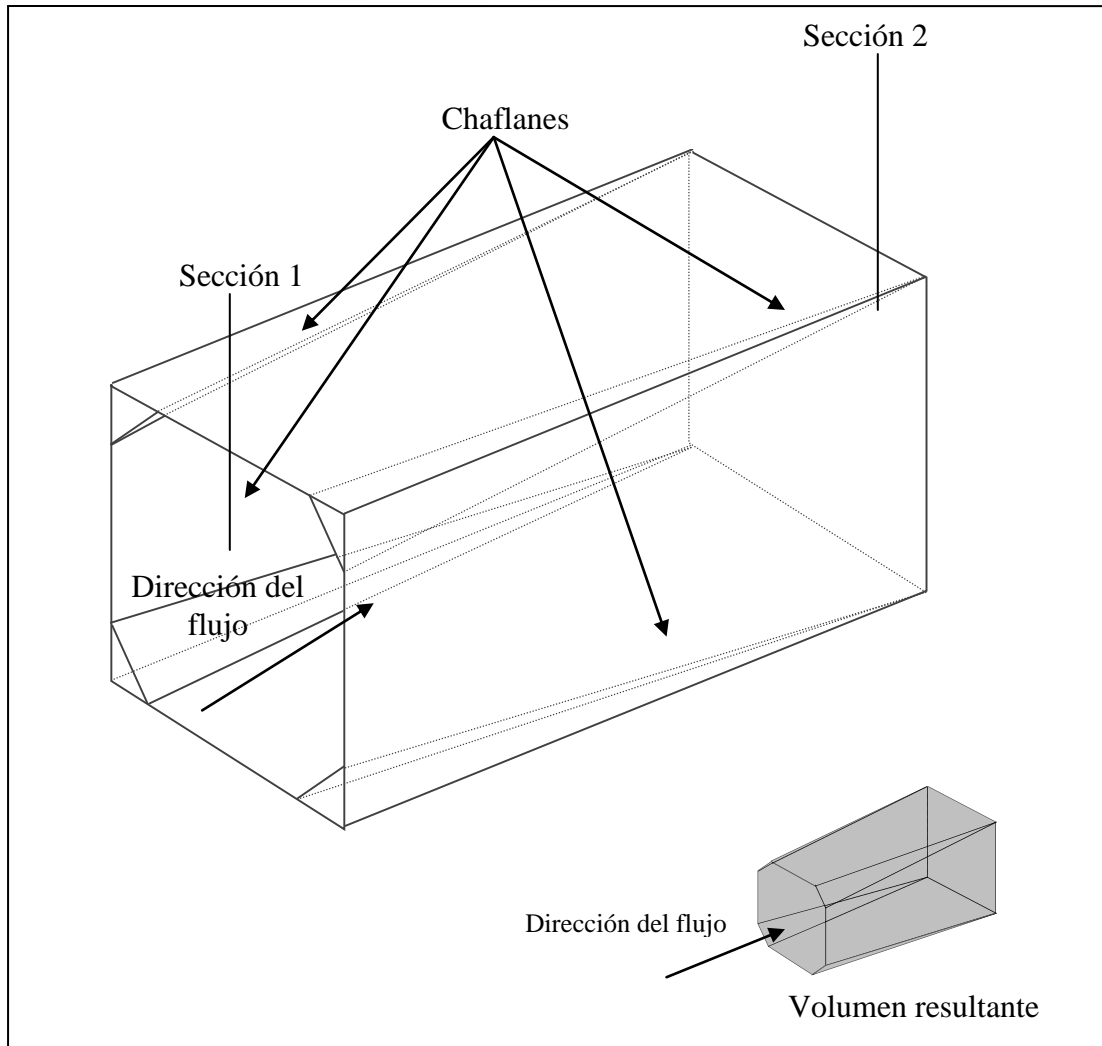
También en la figura anterior se ve que en las esquinas existe interferencia de las capas límites generadas en las paredes de la sección de prueba.

La velocidad constante en la sección de prueba puede obtenerse compensando la reducción de área de flujo libre producida por tal crecimiento. Obteniendo un efecto de sección transversal de flujo libre constante y por lo tanto igualmente así será la velocidad.

En la figura 45 se ilustra como compensar el crecimiento de la capa límite mediante el aumento del área transversal de la sección de prueba:

---

<sup>11</sup> La ecuación de continuidad  $A_1V_1 = A_2V_2 = A_3V_3 = \dots = A_nV_n$  se explicará en la sección siguiente “Medición de presión”.



**Figura 45.** Forma de colocar chaflanes a la sección de prueba para compensar el crecimiento de la capa límite y mantener una velocidad constante

Con la colocación de chaflanes en las esquinas de la sección de prueba se logran dos cosas, la primera es la reducción del área de la sección transversal 1 con respecto del área de la sección transversal 2, y la segunda es el evitar la zona de interferencia entre capas límite en las esquinas.

## **Regulación de la velocidad del viento**

Es necesario poder controlar el valor de la velocidad del viento en la sección de prueba para satisfacer las diferentes condiciones de simulación del fenómeno de estudio. La forma de regular la velocidad no debe de modificar las propiedades descritas en los párrafos anteriores.

Existen dos formas de controlar la velocidad del viento:

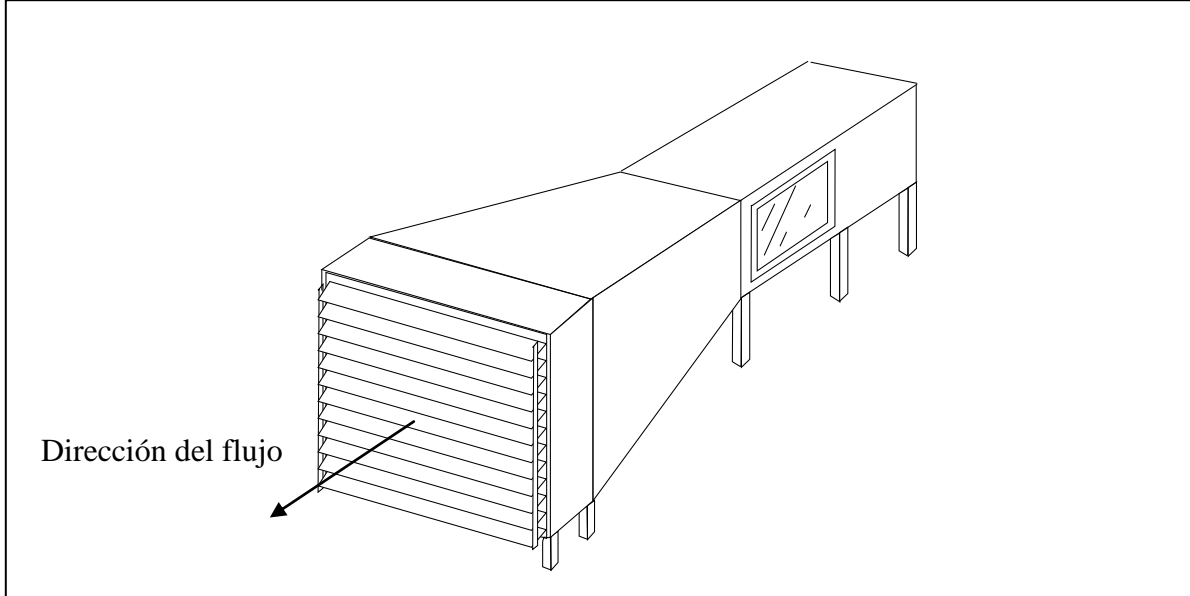
- 1.- Por estrangulamiento del flujo
- 2.- Por variación en la velocidad de rotación del motor.

La primera opción resulta la más económica, consiste en un mecanismo de compuertas que por medio de sus posiciones permitan o no el flujo de aire. En un túnel de presión de impacto son compuertas colocadas a la entrada del aire, antes del o los abanicos, y en un túnel de succión son compuertas colocadas a la salida, después de la sección de abanicos.

Tanto para túnel de succión como para túnel de presión de impacto las compuertas pueden ser de diferentes tipos, a continuación se describen los más utilizados:

### **Compuertas de persiana**

Un sistema de persianas resulta muy útil para la regulación del flujo especialmente en los túneles de succión (Fig. 46). Es recomendable que el número de persianas sea elevado ya que con esto se logra una mayor sensibilidad para el control de la velocidad del aire mediante cierre total, apertura total o posiciones intermedias.

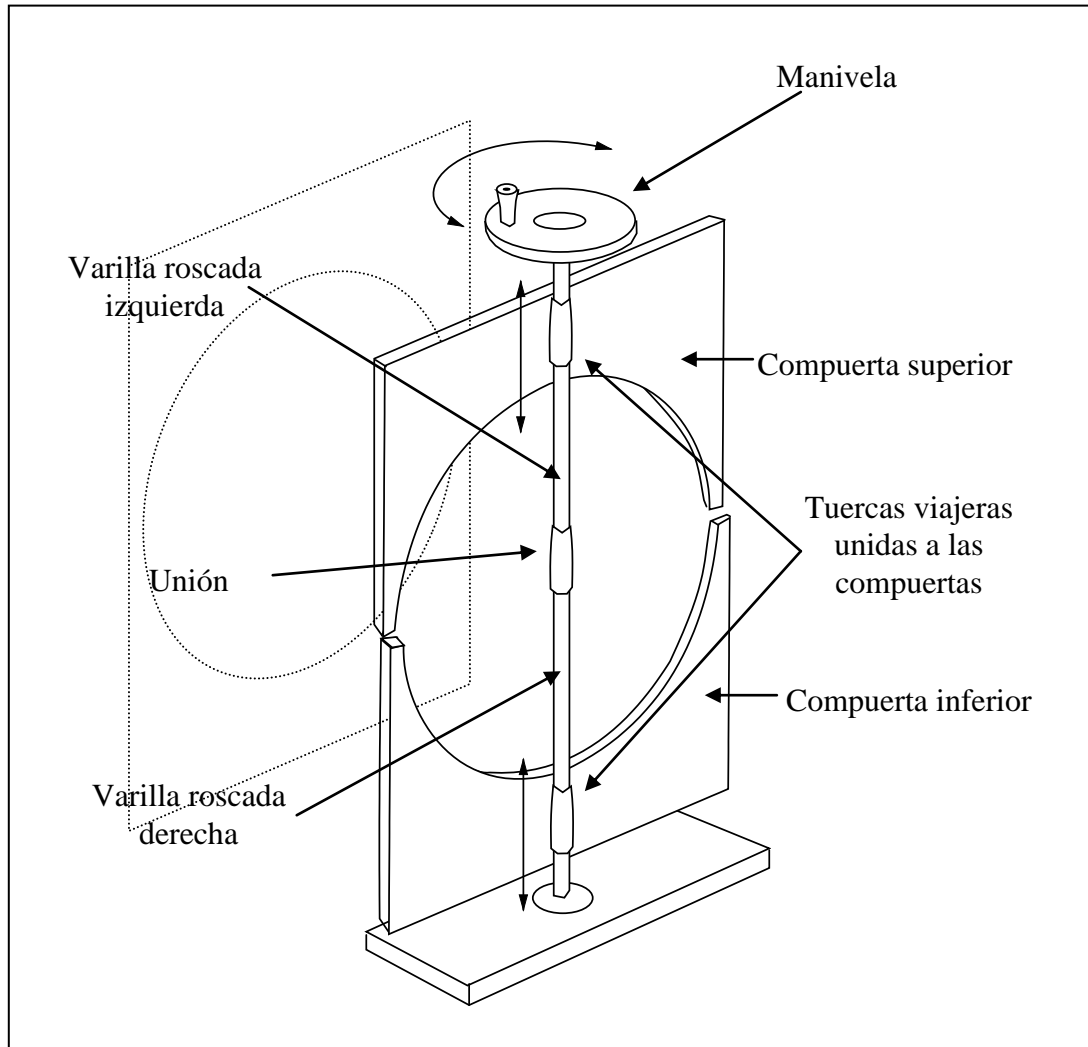


**Figura 46.** Regulación de la velocidad de flujo mediante el uso de persianas

Otra opción para regular la velocidad del flujo consiste en el uso de compuertas deslizables. Su construcción es un poco más complicada que la de las persianas pero ofrece un mucho mejor control de la velocidad del flujo.

Una ventaja de este sistema es que ofrece la posibilidad de automatización mediante la sustitución de la manivela por un mecanismo de poleas movido por un motor con control direccional operado desde la sección de prueba.

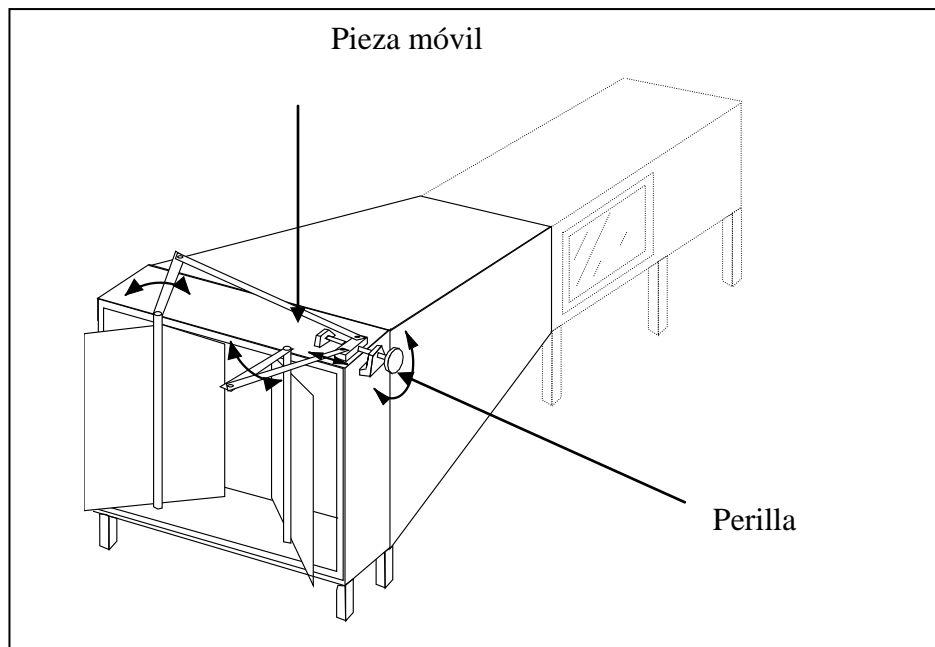




**Figura 47.**Regulación de la velocidad de flujo mediante el uso de compuertas deslizables

## Compuertas tipo mariposa

Este tipo de compuertas son la solución más sencilla y económica al problema de la regulación de la velocidad de flujo, su desventaja esta en la falta de sensibilidad para modificar los valores de velocidad, ligeros cambios en su posición generan grandes cambios en la velocidad. Por lo anterior se recomienda utilizarlas en túneles en donde no se requiere medir y mantener la velocidad con mucha exactitud o como un complemento al uso de las compuertas de persiana.



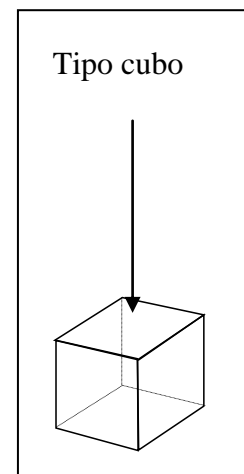
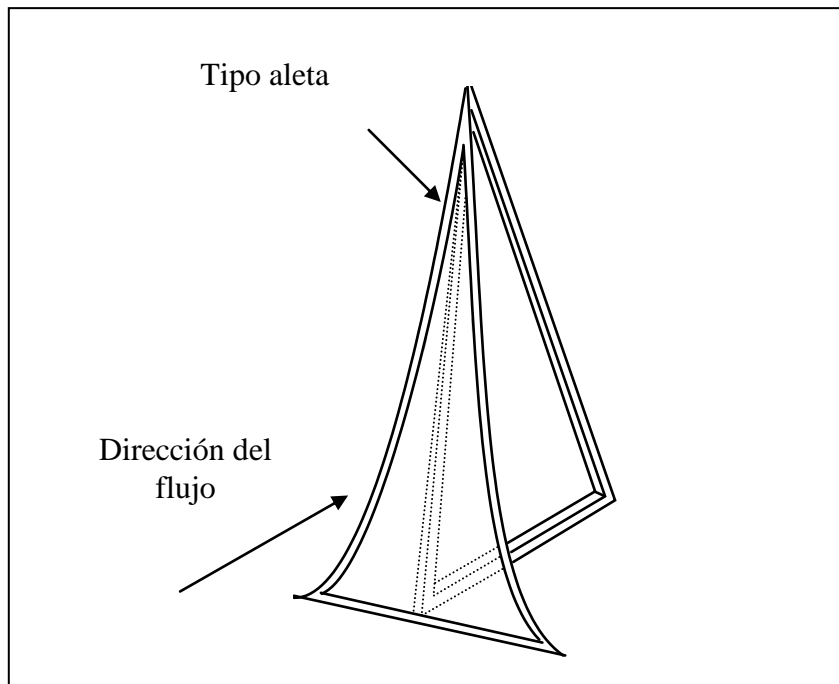
**Figura 48.** Regulación de la velocidad de flujo mediante el uso de compuertas

La segunda forma de controlar la velocidad del flujo es mediante la regulación de las revoluciones por minuto a las que giran los motores que mueven a los abanicos. Esto se logra con un dispositivo electrónico denominado variador de frecuencia y garantiza el cambio de flujo perfectamente regulado. Si bien esta es la forma ideal del control de la velocidad es la opción más costosa.

## Simulación de la capa límite terrestre

Para poder reproducir las propiedades del viento atmosférico que baña a una edificación es necesario simular en el túnel tanto la distribución de velocidades que existe en la capa límite como el grado de turbulencia que bañará al modelo.

Para poder lograrlo se utilizan elementos como los mostrados en las figuras 49 y 50, tales elementos generan un gradiente de velocidades y turbulencia equivalente a la atmosférica en el entorno del sitio de la edificación real.



**Figura 50.** Cubo

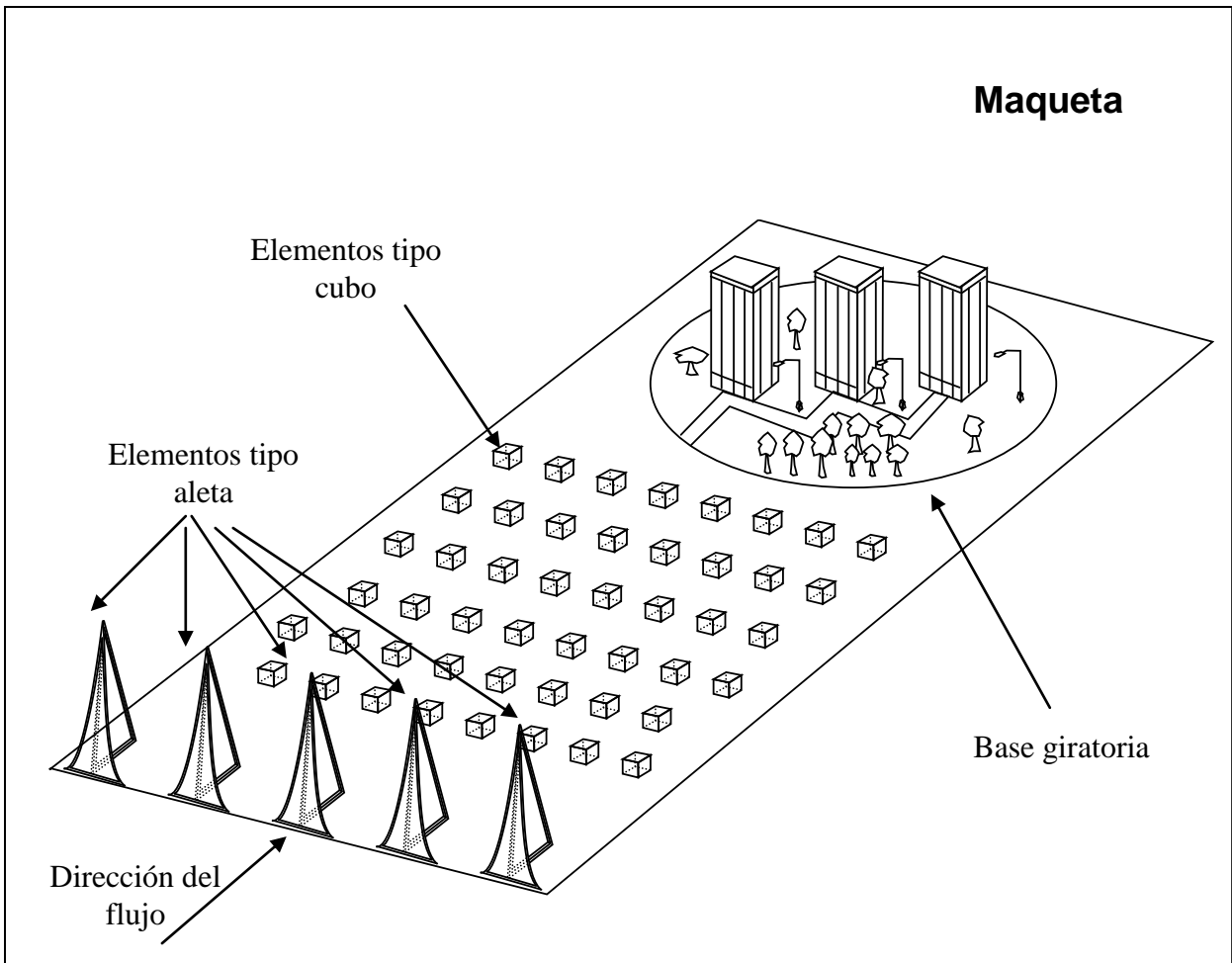
**Figura 49.** Elementos simuladores de turbulencia/capa límite terrestre

La altura del elemento tipo aleta va desde un 30% a un 50% de la altura total de la sección de prueba en caso de no usar piso falso. Si se utiliza un piso falso este porcentaje aplica sobre la altura libre entre el piso falso y la pared superior de la sección de prueba.

La altura del elemento tipo cubo es de un 5% a un 10% de la altura de la sección de prueba aplicando los mismos comentarios acerca del uso de un piso falso.

En todo caso los elementos anteriores se deben de colocar a la entrada de la sección de prueba tratándose de las aletas y desde la entrada hasta el comienzo de la maqueta para los cubos.

En la figura 51 se muestra un ejemplo de la colocación de los elementos anteriormente descritos:



**Figura 51.** Arreglo de los elementos generadores de turbulencias/capa límite en la sección de prueba del túnel de viento

En la tabla<sup>12</sup> siguiente se muestra un ejemplo de las magnitudes de la altura de la capa límite en la atmósfera según el entorno:

<i>Entorno</i>	<i>Altura de la capa límite en metros</i>
<i>Campo abierto</i>	<b>85.34</b>
<i>Suburbano</i>	<b>365.76</b>
<i>Urbano</i>	<b>518.16</b>

**Tabla 1.** Magnitudes de la altura de la capa límite

---

<sup>12</sup>Página 491 del libro “Low Speed Wind Tunnel Testing” Rae/Pope , Willey & Sons 1985.

## Medición de presión

El teorema de Bernoulli para un flujo horizontal y sin pérdidas por fricción establece lo siguiente:

$$P_T = P_E + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (5)$$

En donde  $P_T$  = Presión total

$P_E$  = Presión estática

$\rho$  = Densidad del aire

$V$  = Velocidad del viento

La ecuación anterior indica que la presión total que un flujo ejerce es igual a la suma de dos presiones, una llamada presión estática y otra presión dinámica<sup>13</sup> ( $\frac{1}{2} \rho V^2$ ).

La presión estática se debe a la energía interna del fluido actuando sobre la superficie de un objeto o entre las mismas partículas que forman al fluido, mientras que la presión dinámica se debe a la energía cinética, es decir a la velocidad que el fluido mantiene.

Por lo anterior se dice que el teorema de Bernoulli es un enunciado de la conservación de la energía. Dado este comportamiento se tiene una ecuación que establece la relación entre el área de la sección transversal del flujo y la velocidad que mantiene:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3 = A_n V_n \quad (6)$$

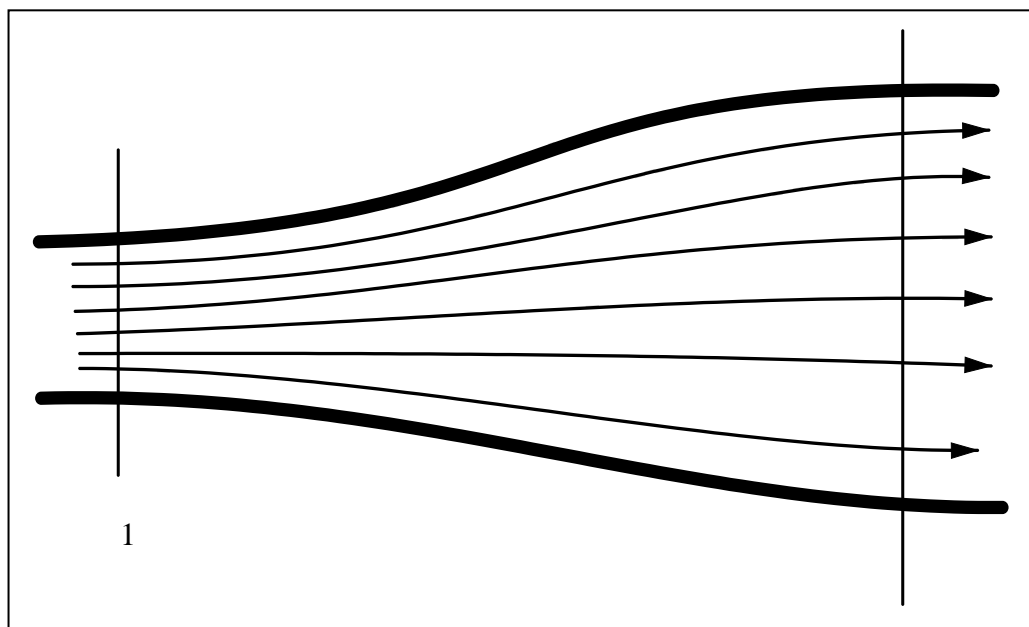
---

<sup>13</sup> A la presión dinámica se le representa con la letra “q”

A la ecuación anterior se le llama “ecuación de continuidad”, y podemos observar en ella que la velocidad es inversamente proporcional al área de la sección transversal del flujo. Teniendo esto como consecuencia que los cambios en el área se reflejan en cambios en la velocidad, mismos que a su vez generan cambios en el valor de la presión dinámica, y por teorema de Bernoulli finalmente se tienen también cambios en el valor de la presión estática, siendo lo único constante el valor de la presión total.

Podemos resumir el comportamiento anterior en las siguientes conclusiones obtenidas con ayuda de la figura y tabla mostradas a continuación:

Debido a que la presión total es una constante para un flujo sucede que los cambios en las presiones antes mencionadas son inversamente proporcionales como se ilustra en la figura 52.



**Figura 52.** Flujo de aire en un ducto de sección variable

	A	V	$P_T$	$P_E$	q
Sección 1	$A_1 < A_2$	$V_1 > V_2$	$P_{T1} = P_{T2}$	$P_{E1} < P_{E2}$	$q_1 > q_2$
Sección 2	$A_2 > A_1$	$V_2 < V_1$	$P_{T2} = P_{T1}$	$P_{E2} > P_{E1}$	$q_2 < q_1$

**Tabla 2.** Comparación de valores de presión, velocidad y área en las secciones 1 y 2

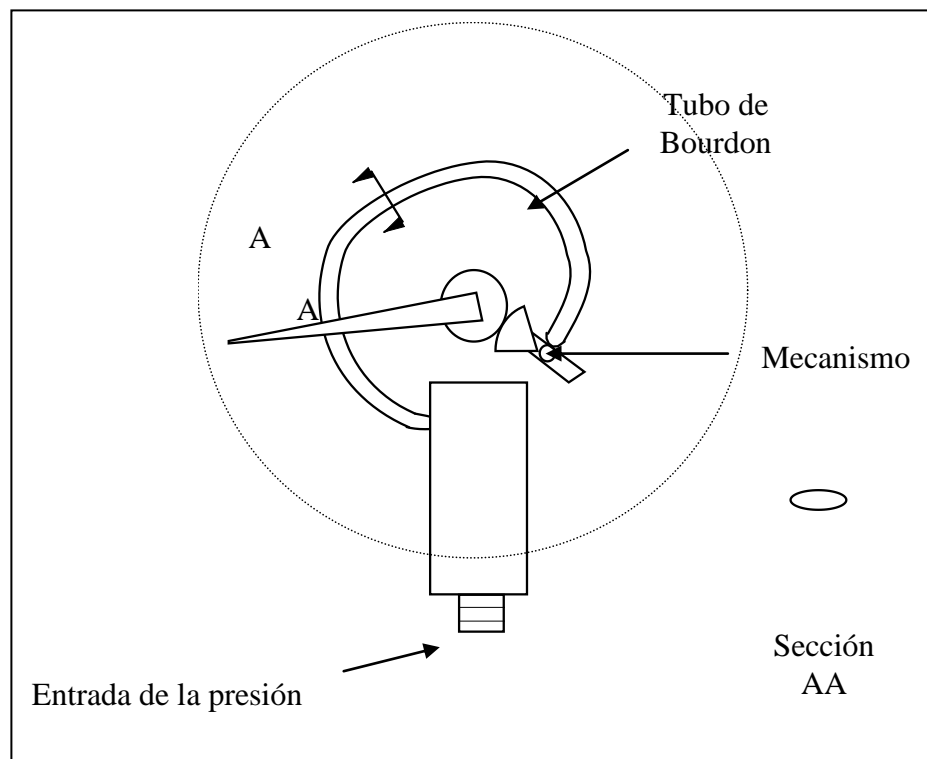


## Instrumentos medidores de presión

Básicamente son dos los tipos de manómetros que se utilizan para medir presión en un túnel de viento:

### 1.- Manómetro de tubo de Bourdon<sup>14</sup>

En la figura 53 se observa un diagrama del funcionamiento de este tipo de manómetro. Se compone de un tubo metálico flexible de sección mas ancha que alta, este tubo se conecta en un extremo a la entrada de la presión, y en el otro a un mecanismo que transmite el movimiento del tubo a la aguja. Dada la forma de la sección del tubo cuando éste recibe la presión el efecto es el de “desenrollarse” proporcionalmente a la magnitud de la presión. proporcionalmente a la magnitud de la presión.



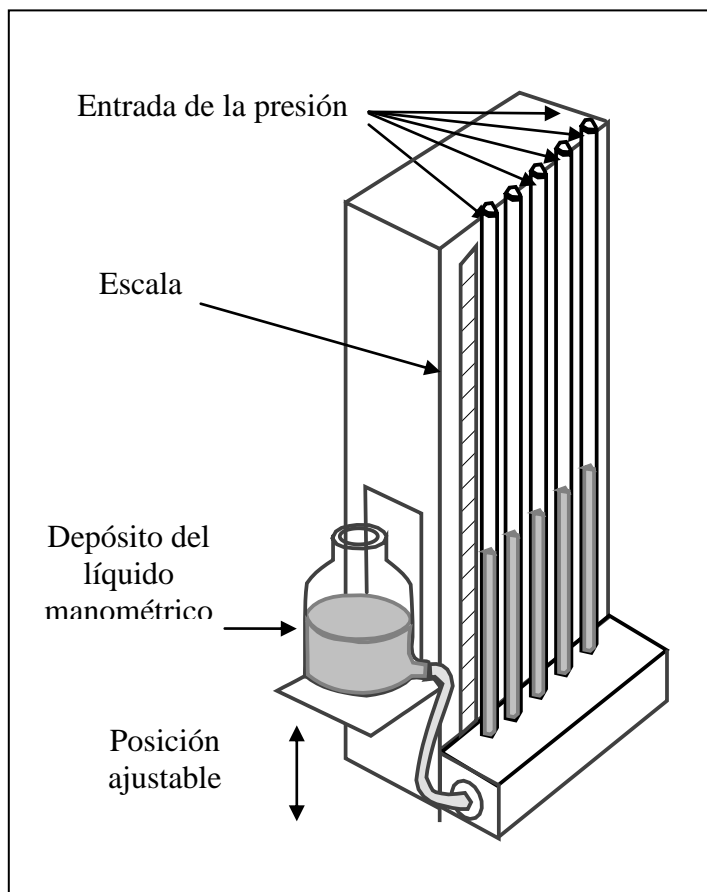
**Figura 53.** Diagrama de un manómetro de tubo de

<sup>14</sup> Recibe este nombre en honor al ingeniero francés Eugene Bourdon (1804-84)

La ventaja de este tipo de manómetro es que la lectura es directa, la desventaja radica en que después de un cierto número de ciclos de uso es necesario calibrar al instrumento.

## 2.- Manómetro de columnas líquidas

Este tipo de manómetro es de construcción muy sencilla, consta de un recipiente en donde se almacena el llamado “líquido manométrico” conectado a uno o varios tubos que generalmente son de vidrio (Fig. 54):

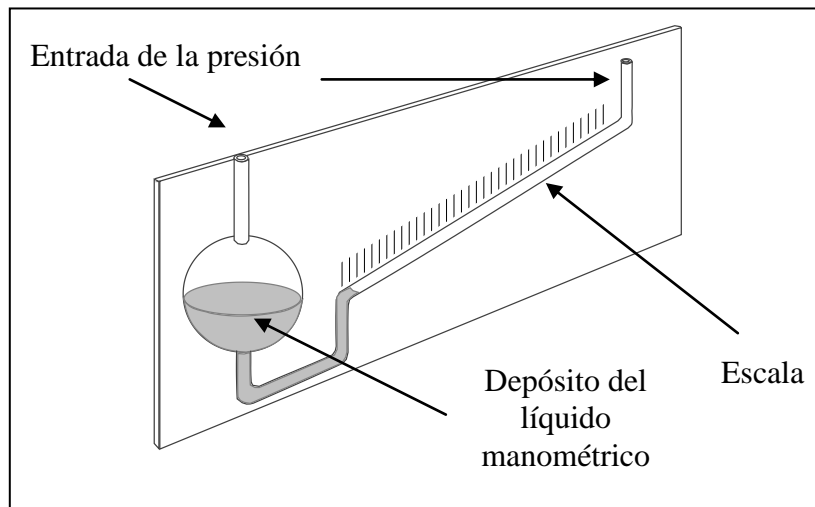


**Figura 54.** Manómetro de columnas líquidas

Este tipo de manómetro requiere de una corrección por dilatación del líquido manométrico. Este líquido puede ser agua destilada, alcohol, aceite mineral o mercurio, dependiendo de la magnitud de la presión por medir, siendo ésta directamente proporcional a la densidad del líquido utilizado.

También es importante notar que este manómetro permite medir presiones estáticas tanto positivas como negativas, distinguiéndolas como sigue: el signo de la presión lo dará el sentido de desplazamiento de la columna, si la columna asciende, se tratará de una presión negativa (de succión), si por el contrario la columna desciende se tratará entonces de una presión positiva o de impacto.

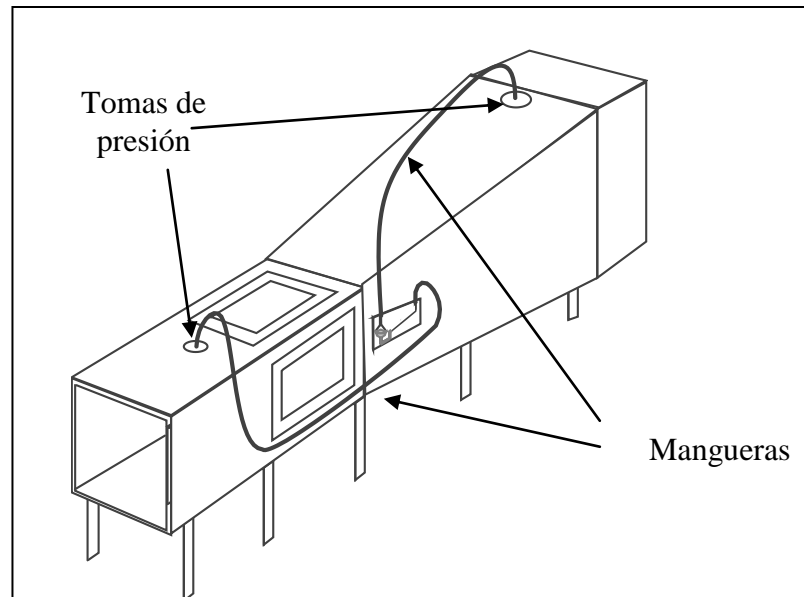
Un tipo especial de manómetro de columna líquida es el manómetro diferencial .



**Figura 55.**Manómetro diferencial

Este tipo de manómetro como su nombre lo indica se usa principalmente para medir diferencia de presiones, se colocan mangueras simultáneamente a las entradas de presión provenientes de dos puntos y la lectura que el manómetro registra es la diferencia de presión entre esos puntos.

Especialmente esto es útil para conocer la velocidad<sup>15</sup> del túnel mediante la diferencia de presión entre su sección mayor y la sección menor (Fig. 56), a esto se le conoce con el nombre de “presión diferencial de referencia”.<sup>16</sup> En la figura se observa la forma de colocar al manómetro diferencial para obtener la PDR:



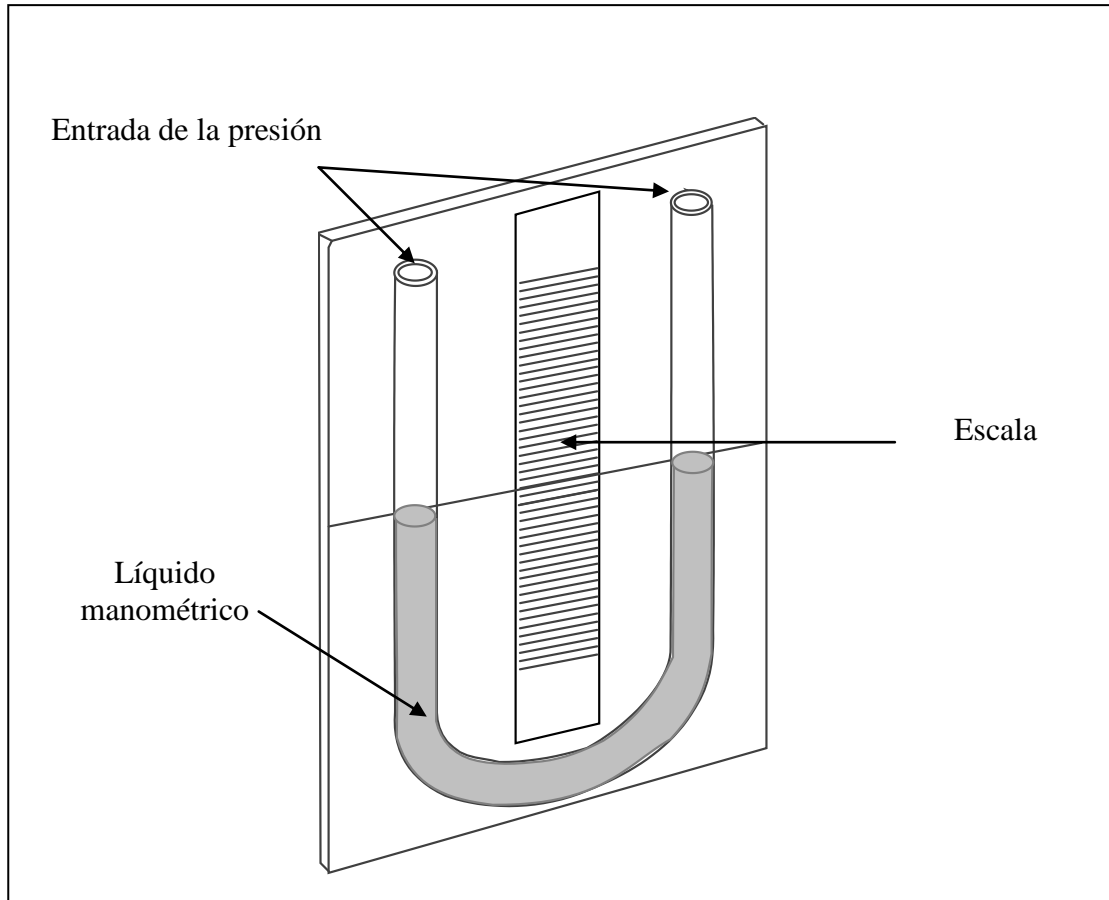
**Figura 56.** Forma de conectar el manómetro diferencial al túnel

El manómetro diferencial no solo mide diferencias de presión, puede medir presiones individuales ya sea positivas o negativas, para poder hacer esto simplemente se conecta una manguera a uno de los extremos del tubo del manómetro, dependiendo del signo de la presión, recordando que las presiones negativas producen ascenso de la columna líquida, mientras que las positivas producen lo contrario.

<sup>15</sup> Este procedimiento se explica más adelante en la página 109

<sup>16</sup> A esta presión se le acostumbra designar por sus siglas PDR.

Otro tipo de manómetro de columna líquida es el manómetro en “U” (Fig. 57)

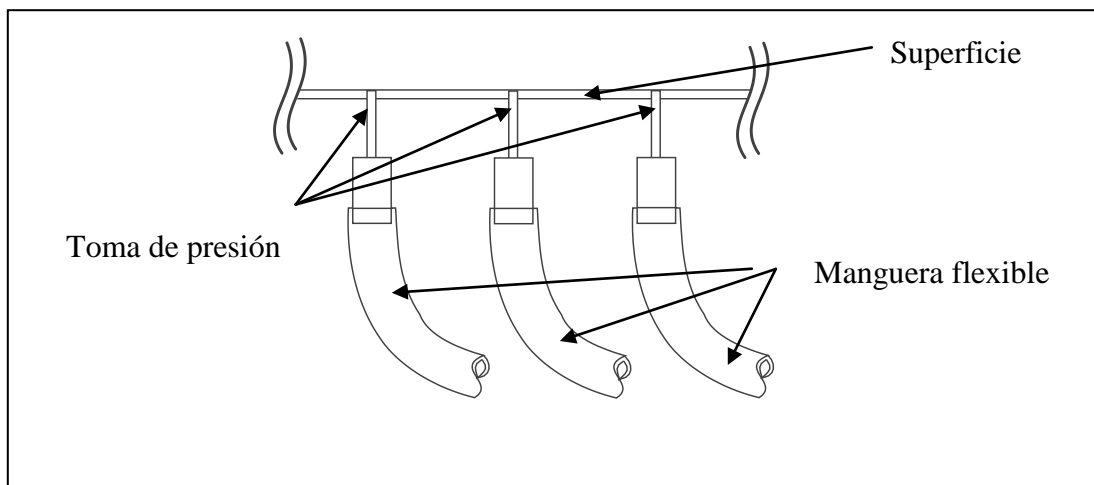


**Figura 57.**Manómetro en “U”

El funcionamiento del manómetro en “U” es similar al manómetro inclinado, la diferencia es que los desplazamientos del líquido manométrico son verticales, lo que reduce su sensibilidad, es por esto que generalmente se utiliza para medir valores de presión grandes.

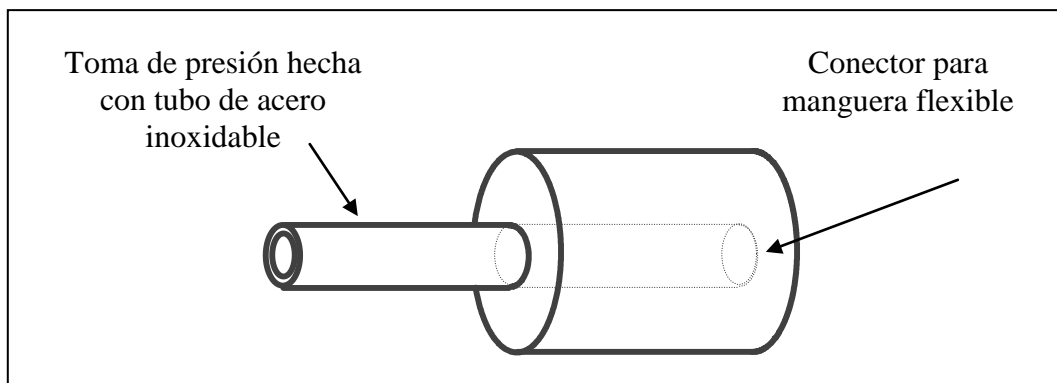
## Medida de la distribución de la presión en la superficie de un objeto

Para poder medir la presión sobre la superficie de un objeto se necesita construir una maqueta con “tomas de presión”. Estas consisten en un orificio menor a 1.5 mm de diámetro, conectado a una manguera que finalmente llega al manómetro de columnas. En la figura 58 se observa un arreglo de tres tomas de presión. Es importante notar que la salida de la toma debe quedar al ras de la superficie de la maqueta. Las tomas de presión pueden fabricarse con tubo de jeringa hipodérmica debidamente cortado y adaptado a las dimensiones internas de la maqueta.



**Figura 58.** Vista del arreglo de tres tomas de presión en una maqueta

Para tener una mejor idea de la manera en la que está constituida la toma de presión se tiene el diagrama siguiente (Fig. 59):

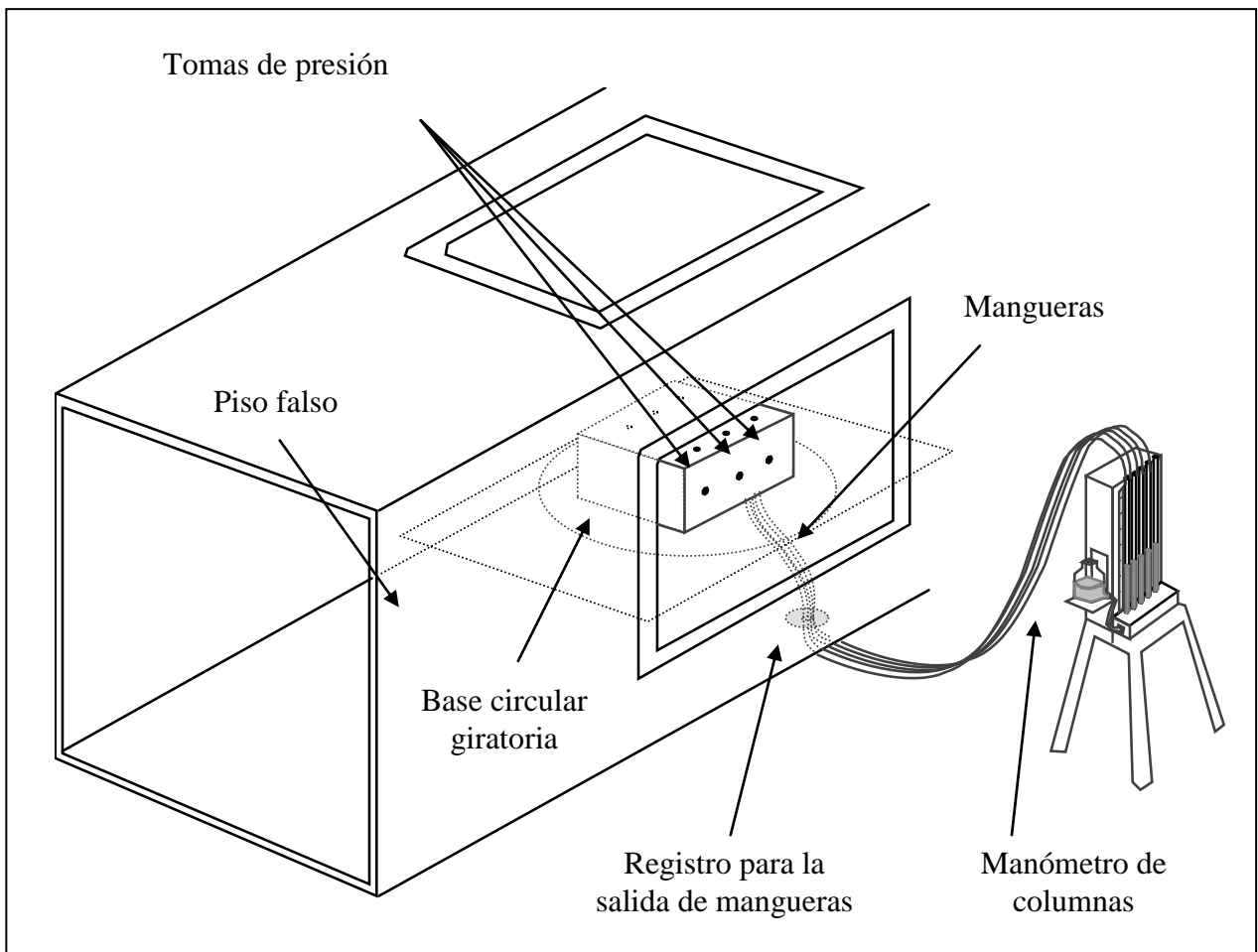


**Figura 59.** Detalle de la construcción de la toma de presión

El conector para la manguera flexible puede ser un segmento de varilla de cobre o bronce, con un orificio interno de igual diámetro exterior que el de la toma de presión. Se puede emplear soldadura de plomo estaño para fijar la toma al conector.

El número de tomas de presión que se le coloquen a la maqueta depende de la complejidad de esta, de los puntos en donde se desea conocer el comportamiento de la presión y de la cantidad de columnas disponibles en el manómetro.

En general no existe una regla para determinar el número total de tomas de presión pero se puede decir que mientras mayor sea la cantidad con la que se cuente será mucho mejor el resultado final.



**Figura 60.** Forma de colocar en el túnel de viento a una maqueta con tomas de presión

Es conveniente que la maqueta se coloque en un piso falso por las siguientes razones:

1.- Se evita la influencia del perfil de velocidades originado por las paredes del túnel sobre la maqueta.

2.- El piso falso permite albergar debajo de él a las mangueras de cada una de las tomas de presión.

3.- El piso falso permite construir una base giratoria circular para que con esta sea posible el orientar al modelo con diferentes ángulos de incidencia con respecto del viento.

4.- El piso falso permite el rápido desmontaje y cambio de maquetas entre una prueba y otra.

#### Diagramas de distribución de presión

Los resultados de la medición de presión de cada una de las tomas colocadas en toda la superficie de la maqueta permiten construir diagramas que indiquen el comportamiento de la presión.

En el segundo capítulo se mencionó a un número adimensional llamado coeficiente de presión, aplicando ese concepto a lo anteriormente expuesto se tiene:

$$C_p = \frac{P_L - P_E}{P_T - P_E} \quad (2)$$

En donde:

$P_L$  = presión local, es precisamente esta presión la que se mide en cada una de las tomas de la maqueta.



$P_E$  = presión estática, medida con un tubo pitot-estático en la corriente que baña a la maqueta

PT = Presión total, medida con un tubo pitot-estático en la corriente que baña a la maqueta.

Por lo tanto para cada valor de presión registrado en cada una de las tomas de la maqueta se calcula un coeficiente de presión, y teniendo en cuenta el procedimiento siguiente se podrá asociar a cada toma un vector representativo del coeficiente de presión generando con esto el diagrama de distribución de presión en la superficie de la maqueta.

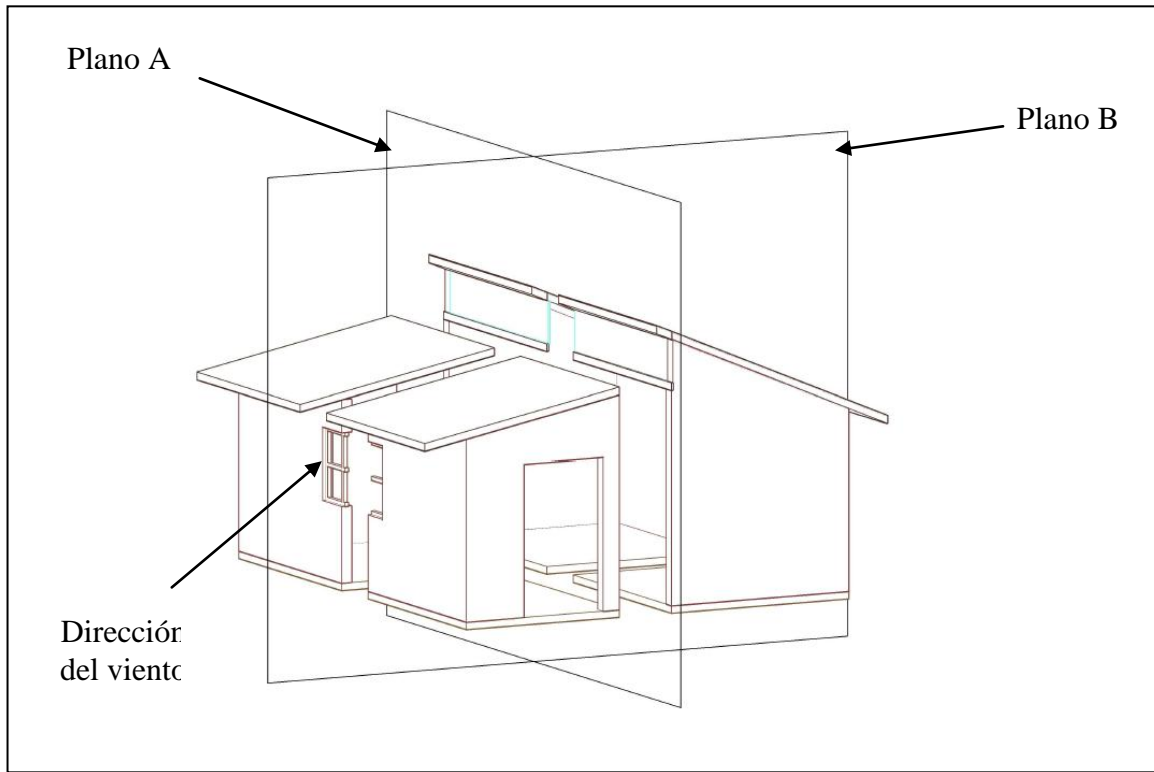
Procedimiento para la construcción de un diagrama de distribución de presión

Un diagrama de distribución de presión es realmente un diagrama de distribución de coeficientes de presión.

A continuación se detalla un procedimiento para su realización:

1.- Dibujo de la sección en donde se realiza el análisis de la distribución de presión

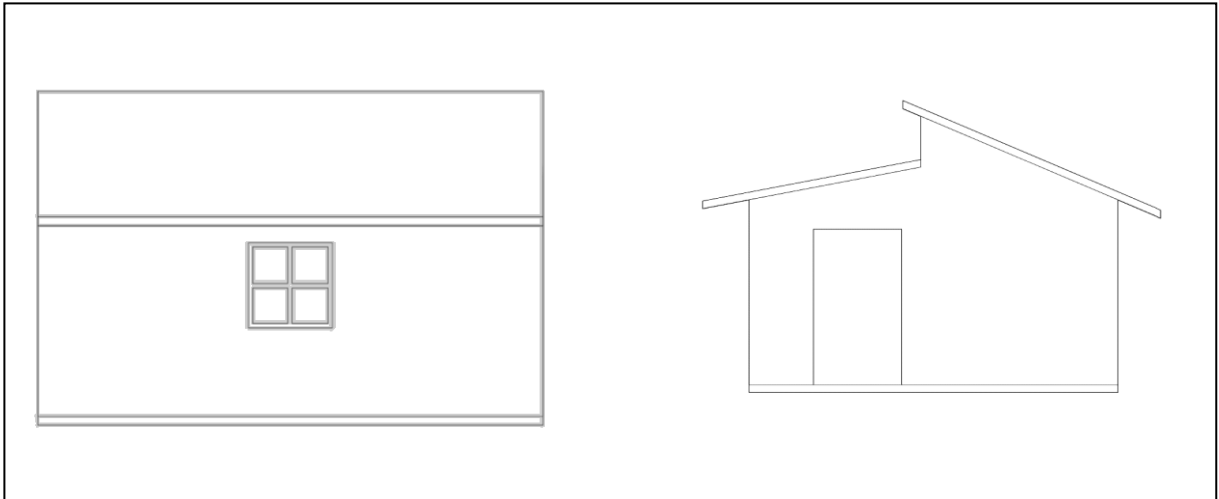
La distribución de presión se puede efectuar en planos transversales o longitudinales de la maqueta, según se ubiquen las tomas de presión, se tendrá que realizar un dibujo de la sección en cuestión para ubicar al diagrama correspondiente.



**Figura 61.** Selección de planos para la elaboración del diagrama de distribución de presión

Por ejemplo, se tiene una maqueta como la mostrada en la figura 61, En función de la ubicación de las tomas de presión se seleccionan dos planos de trabajo, el plano A que es perpendicular a la dirección del viento, y el plano B que es paralelo a esta. En este ejemplo solo se seleccionaron dos planos, pero se pueden seleccionar más planos paralelos entre sí, teniendo con esto la facilidad para poder realizar un estudio que resulta prácticamente tridimensional.

En las figuras 62 y 63 se observan los dibujos de las secciones cortadas por los planos A y B:



**Figura 62.** Plano A

**Figura 63.** Plano B

2.- Se selecciona una escala para representar en el papel a los valores del coeficiente de presión, por ejemplo  $0.1=5 \text{ mm}$ .

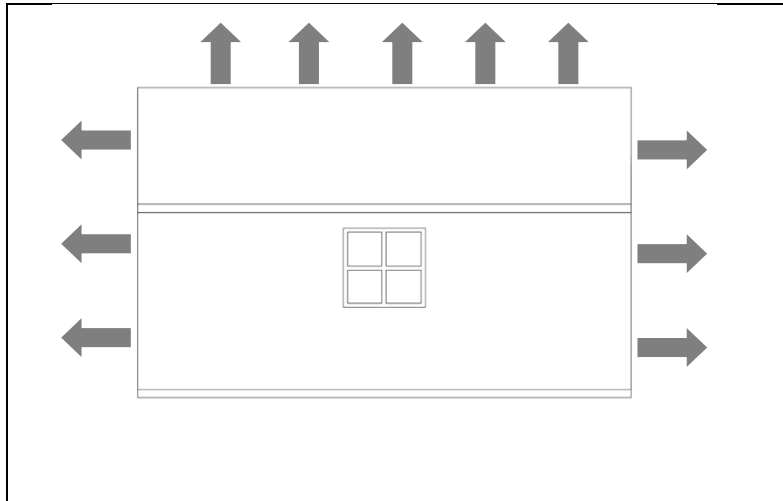
3.- En forma gráfica el coeficiente de presión será representado con un vector, en el que su magnitud estará dada por la escala obtenida en el punto anterior, y el sentido estará dado por el signo<sup>17</sup> de la presión

4.- Finalmente estos vectores se dibujan sobre la figura de cada plano de trabajo, en forma perpendicular a la superficie en donde se encuentre la toma de presión. Uniéndolos con una línea los inicios o las puntas de flecha según aplique.

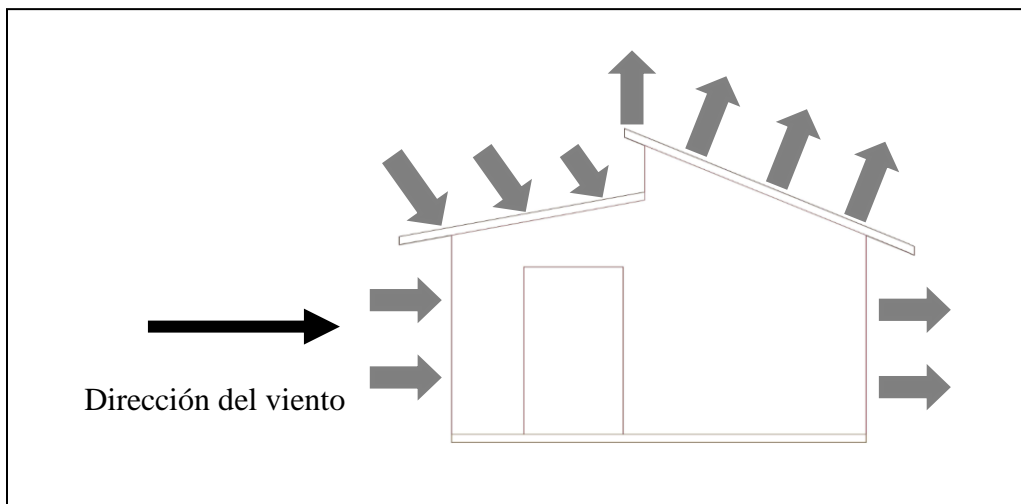
---

<sup>17</sup> El signo proviene desde la lectura en la columna del manómetro, la presión que haga que la columna líquida ascienda es negativa (succión), si la columna líquida desciende entonces la presión será positiva (presión de impacto).

Quedando los diagramas de presión como se ilustra en las figuras 64 y 65:



**Figura 64.** Distribución de presión en el plano



**Figura 65.** Distribución de presión en el plano B

En las figuras anteriores se aprecia la distribución de los coeficientes de presión y además el comportamiento del viento sobre la maqueta, particularmente en el plano B se tiene que en barlovento la maqueta tiene presión positiva, mientras que en sotavento es negativa

## Medición de velocidad

Es de fundamental importancia conocer la velocidad del viento en la sección de prueba del túnel. La velocidad es una cantidad vectorial, se necesitan además de la magnitud la dirección y el sentido para poder describirla.

En forma ideal en la sección de prueba del túnel se tiene un flujo con velocidad constante y dirección horizontal. Aprovechando el valor de la presión diferencial de referencia descrita en páginas anteriores y considerando que el túnel se comporta como un *tubo de Venturi*<sup>18</sup> y aplicando el teorema de Bernoulli entre la sección mayor y la sección menor se tiene (Fig. 66):

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (7)$$

Por ecuación de continuidad se sabe que:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (8)$$

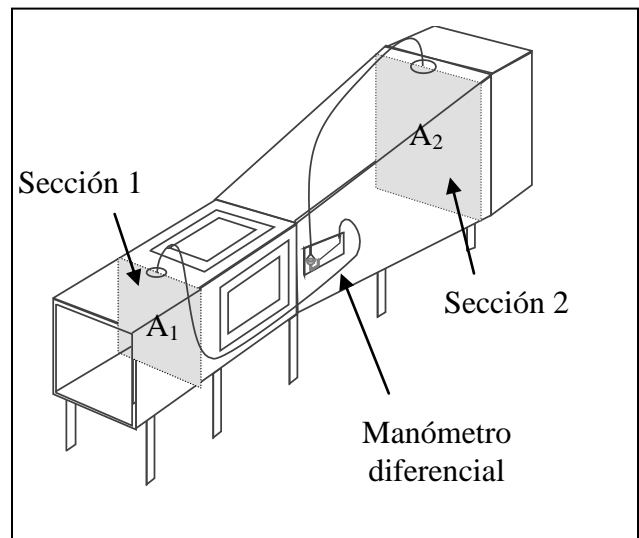


Figura 66. Colocación de tomas

Despejando a  $V_2$  y sustituyendo en la ecuación original se tiene:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho \frac{A_1^2}{A_2^2} V_1^2 \quad (9)$$

<sup>18</sup> Un tubo de Venturi es aquel ducto cuya sección varía continuamente, recibe este nombre en honor al físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822).

Finalmente la velocidad  $V_1$  queda:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left( \frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} \quad (10)$$

$V_1$  es la velocidad en la sección de prueba

$P_1 - P_2$  es la lectura del manómetro diferencial

(Presión diferencial de referencia)

Resumiendo, podemos conocer la magnitud de la velocidad en la sección de prueba utilizando la ecuación anterior y conociendo la relación área de la sección de prueba entre el área mayor<sup>19</sup>, el valor de la presión diferencial de referencia y la densidad del aire.

Obtención de la velocidad local a partir del coeficiente de presión

Como se ha explicado en las páginas anteriores el coeficiente de presión está dado por:

$$C_p = \frac{P_L - P_E}{P_T - P_E} \quad (2)$$

Además sabemos que por el teorema de Bernoulli la presión total es igual a la presión estática más la presión dinámica:

$$P_T = P_E + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (5)$$

---

<sup>19</sup> A este cociente se le conoce como “relación de contracción” del túnel.

Por otro lado, en lo que a las condiciones locales concierne se tiene que:

$$P_T = P_L + \frac{1}{2} \rho V_L^2 \quad (11)$$

Despejando a  $P_L$  y  $P_E$  de las últimas ecuaciones podemos volver a escribir a la ecuación del  $C_p$  como:

$$C_p = \frac{P_T - \frac{1}{2} \rho V_L^2 - (P_T - \frac{1}{2} \rho V^2)}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (12)$$

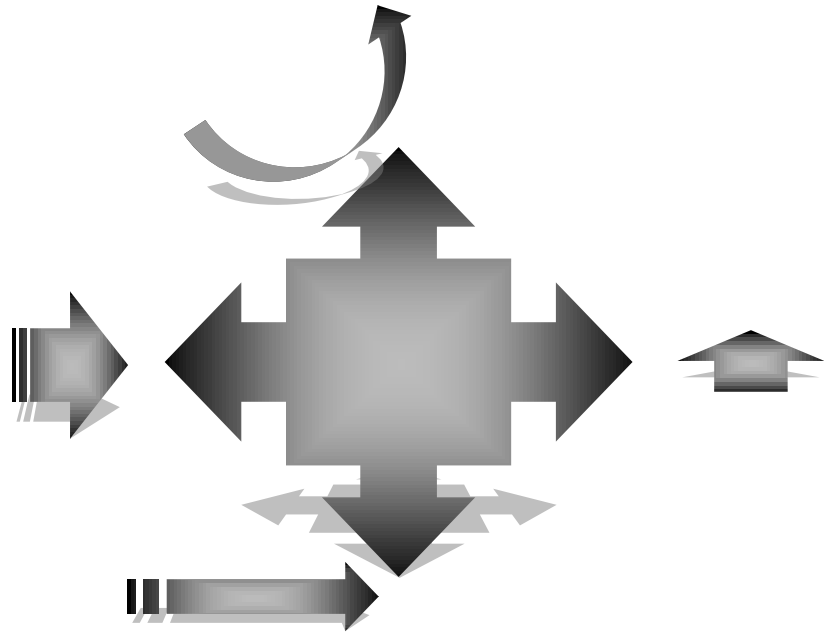
Quedando finalmente:

$$C_p = 1 - \left( \frac{V_L}{V} \right)^2 \quad (13)$$

De la ecuación anterior podemos conocer el valor de la velocidad local a partir del coeficiente de presión y de la velocidad del flujo libre en la sección de prueba:

$$V_L = V \sqrt{1 - C_p} \quad (14)$$

Con la ecuación anterior y con la distribución de coeficientes de presión podemos obtener una distribución de velocidades.



# Capítulo 6.

## Manual de pruebas para el túnel de viento



## Capítulo 6

### Manual de Pruebas para el Túnel de Viento

#### Análisis y Diseño de las Diferentes Pruebas a Realizar en el Túnel de Viento

En una institución de educación superior y posgrado el túnel de viento cumple tres objetivos:

Proveer un medio en donde se puedan verificar las pruebas y experimentos necesarios para el cumplimiento del proceso enseñanza-aprendizaje. Existen fenómenos cuya naturaleza no puede ser entendida totalmente cuando su enseñanza es meramente teórica y en el aula, se debe de complementar con la confirmación experimental de las leyes que los rigen. Por lo anterior, y tratándose de arquitectura bioclimática, el túnel de viento permite cumplir los objetivos didácticos de los planes de estudio de nivel superior y/o posgrado.

El segundo objetivo se encuentra en el cumplimiento de las metas de los proyectos de investigación o trabajos de tesis. El túnel de viento es una herramienta importante para realizar la simulación del flujo que baña a las edificaciones, reproduciendo con esto cualquier condición atmosférica o cualquier condición de la cinemática del viento en el interior de la edificación.

El tercer objetivo es el poder ofrecer a la industria servicios de experimentación en diversas áreas que interesan a las compañías constructoras de viviendas, entre otras:

- A. Comodidad de los peatones
- B. Ventilación
- C. Ahorro de energía eléctrica

Lo anterior además de representar un medio de ingreso de recursos para la propia institución de educación y del mismo laboratorio es también un vínculo con la industria en donde los alumnos podrán conocer de primera instancia la aplicación de los conocimientos adquiridos en sus estudios.

El propósito de este capítulo es el de proponer una serie de experimentos para cumplir estos objetivos, principalmente el primero. En las páginas siguientes se exponen experimentos o “prácticas de laboratorio” en orden de complejidad, pudiendo ser enriquecidas y adaptadas a las nuevas adquisiciones de la instrumentación y equipos de medición del laboratorio custodio del túnel de viento.

A continuación se expone un cuadro de prácticas de laboratorio dividido en tres módulos según su orden de dificultad:

Módulo Básico

Duración de cada práctica 1 hora.

<b><i>Prácticas</i></b>
<b>1.-Determinación de condiciones ambientales. 2.-Utilización del tubo Pitot 3.-Calibración del túnel de succión</b>

Módulo Intermedio

Duración de cada práctica 1.5 horas.

<b><i>Prácticas</i></b>
<b>4.-Técnicas de visualización de flujo 5.-Simulación de la capa límite</b>

terrestre

6.-Distribución de presión en el exterior de una edificación

7.-Distribución de presión en el interior de una edificación

Módulo Avanzado

Duración de cada práctica 2 horas.

### *Prácticas*

8.-Estudio de la influencia de los accidentes geográficos en las características del viento

9.-Estudio de la influencia de la vegetación exterior en la cinemática del viento alrededor de una edificación

10.-Estudio aerocinemático de la envolvente de las edificaciones

11.-Optimización de ventilación de una vivienda unifamiliar

En el módulo básico se tiene el propósito de introducir al alumno a las mediciones de las propiedades del aire atmosférico, presión, temperatura y humedad, utilizando los instrumentos de medición: barómetro, termómetro e higrómetro.

En la segunda práctica se propone el conocimiento de los instrumentos que miden la presión como manómetros de columna de agua y manómetros de tubo de Bourdon.

También se hace uso de anemómetros como el tubo Pitot.

Finalmente se incluye la calibración del túnel de succión para que el alumno conozca las propiedades del flujo que éste genera.

En el módulo intermedio se tiene el primer contacto con las técnicas de aerodinámica experimental en su rama de estudios cualitativos, se aprenden las técnicas de visualización aplicables a la arquitectura bioclimática en el túnel de viento.

También se aprende a aprovechar al túnel como un simulador de las condiciones del viento atmosférico, en especial en la reproducción de las características de la capa límite terrestre. Finalmente el módulo concluye con un análisis aerodinámico cuantitativo al medir la distribución de la presión del viento tanto en el interior como en el exterior de una maqueta de una edificación.

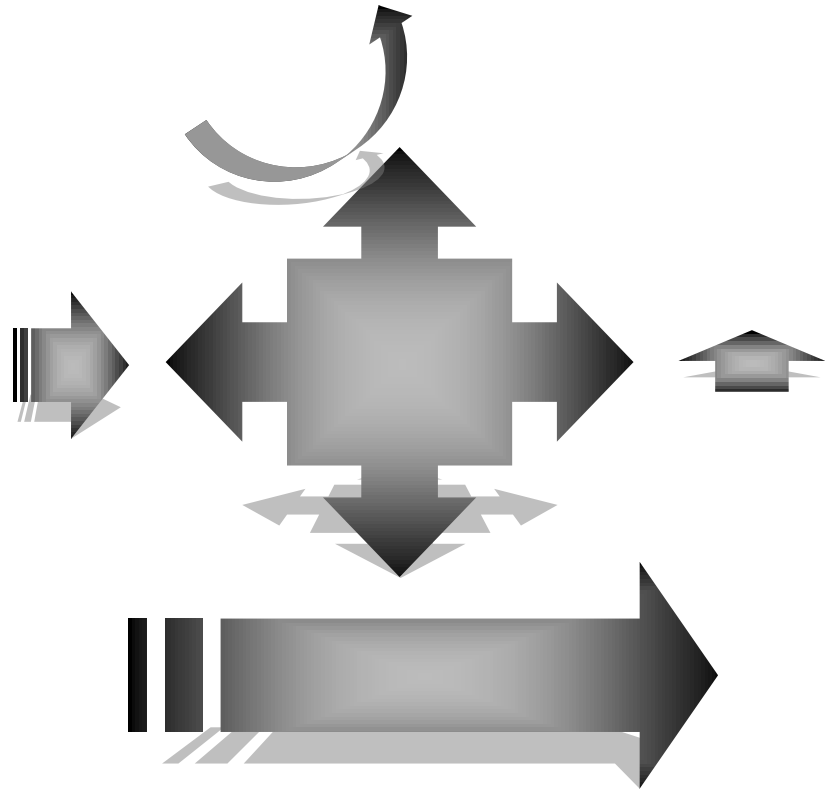
En el módulo avanzado se tienen aplicaciones específicas de la aerodinámica experimental en la arquitectura bioclimática, se aprende como influyen los accidentes geográficos y la vegetación circundante en las características del viento que bañan a la edificación. Se conoce como se puede modelar el comportamiento del viento mediante los elementos que integran a la envolvente de la edificación como cornisas, remates, doseles, tejados, etc.

Finalmente se experimenta con un modelo tipo estudio de casos para optimizar su ventilación.

Las prácticas tienen el esquema siguiente:

- 1.- Título
- 2.- Objetivo
- 3.- Equipos y materiales
- 4.- Consideraciones teóricas
- 5.- Desarrollo
- 6.- Conclusiones

En las páginas siguientes se presenta el formato de las prácticas propuestas



# Prácticas.

## **Índice de Prácticas**

### **Práctica 1**

Determinación de condiciones ambientales

### **Práctica 2**

Utilización del tubo Pitot

### **Práctica 3**

Calibración del túnel de succión

### **Práctica 4**

Técnicas de visualización de flujo

### **Práctica 5**

Simulación de la capa límite terrestre

### **Práctica 6**

Distribución de presión en el exterior de una edificación

### **Práctica 7**

Distribución de presión en el interior de una edificación

### **Práctica 8**

Estudio de la influencia de los accidentes geográficos en las características del viento

### **Práctica 9**

Estudio de la influencia de la vegetación exterior en la cinemática del viento alrededor de una edificación

### **Práctica 10**

Estudio aerodinámico de la envolvente de las edificaciones

### **Práctica 11**

Optimización de ventilación de una vivienda unifamiliar



# Práctica 1

## Determinación de condiciones ambientales

### Objetivo:

Conocer la utilización de los instrumentos medidores de presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa para poder calcular la densidad del aire.

### Equipo:

- Barómetro de fortín y barómetro aneróide
- Termómetro
- Higrómetro

### Consideraciones teóricas

Las condiciones ambientales como la presión atmosférica, la temperatura y la humedad se miden para conocer la **densidad del aire**.

A continuación se muestran las fórmulas para poder llegar al valor de la densidad del aire, se utilizará la notación indicada en la tabla siguiente:

$P_A$ =presión del aire seco.  $\text{Kg/m}^2$   
 $P_V$ =presión del vapor de agua.  $\text{Kg/m}^2$   
 $P_Z$ =presión de la mezcla aire seco + vapor de agua.  $\text{mmHg}$   
 $P_S$ =presión de saturación.  $\text{Kg/m}^2$   
 $T$ =temperatura ambiente en unidades absolutas.  $^\circ\text{K}$

$\rho_A$ =densidad del aire seco.  $\text{Kg/m}^3$   
 $\rho_V$ =densidad del vapor de agua.  $\text{Kg/m}^3$   
 $\rho_Z$ =densidad de la mezcla aire seco + vapor de agua.  $\text{Utm/m}^3$   
 $R_A$ =constante específica para el aire seco.  
 $R_V$ =constante específica para el vapor de agua

Las ecuaciones de estado para el aire seco y el vapor del agua son:

$$P_A = \rho_A g R_A T \quad (1)$$
$$P_V = \rho_V g R_V T$$

La presión total de la mezcla aire-vapor de agua es igual a la suma de la presión parcial ejercida por el aire seco y el vapor de agua:

$$P_Z = P_A + P_V \quad (2)$$

De la misma manera, la densidad de la mezcla aire-vapor de agua es:

$$\rho_Z = \rho_A + \rho_V \quad (3)$$

Entonces, despejando a la densidad de las ecuaciones 1 y sustituyendo 2 y 1 en ecuación 3 podemos obtener el valor de la densidad del aire en el laboratorio, esto es, la densidad de la mezcla aire seco más vapor de agua:

$$\rho_Z = \frac{1}{g R_A T} \left[ P_Z - P_V \left( 1 - \frac{R_A}{R_V} \right) \right] \quad (4)$$

Los valores de  $R_A$  Y  $R_V$  son:  $R_A=29.256 \text{ m}^2/\text{K}$   
 $R_V=47.031 \text{ m}^2/\text{K}$   
Entonces podemos volver a escribir a la ecuación 4 como:

$$\rho_Z = \frac{1}{g R_A T} [P_Z - 0.3779 P_V] \quad (5)$$

La ecuación 5 nos permite conocer el valor de la densidad del aire a partir de:

-La temperatura ambiente en grados Centígrados. Este dato se obtiene de la lectura del termómetro colocado en el laboratorio, aunque para su uso posterior en otras fórmulas se requiere su conversión a Kelvin y Fahrenheit.

-La presión atmosférica  $P_z$  en  $\text{kg/m}^2$ . Este dato se obtiene de la lectura del barómetro, ésta puede ser en mm de Hg o en pulgadas de Hg. Se debe **realizar una corrección** para eliminar el error producido por la dilatación del mercurio en el barómetro, mediante las instrucciones dadas por el fabricante del instrumento de medición y, finalmente convertir este valor a  $\text{kg/m}^2$ .

- La presión de vapor  $P_V$  en  $\text{kg/m}^2$ . Este dato se obtiene de la siguiente manera:

a) Se debe conocer el valor de la presión de saturación, que es el valor máximo de presión a la cual el aire puede mantener agua en estado gaseoso a una temperatura dada, su valor se puede calcular mediante la fórmula empírica:  $P_s = 2.685 + 3.537 \times 10^{-3} (t)^{2.245}$  (6)

( $P_s$  se obtiene en  $\text{lb/ft}^2$  y t debe estar en °F)

c) Se mide el valor de la humedad relativa que indica el higrómetro. La humedad relativa se define como el cociente que resulta de dividir la presión de vapor entre la presión de saturación:

$$H_r = \frac{P_V}{P_s}, \text{ finalmente la presión de vapor se obtiene con: } P_V = H_r P_s \quad (7)$$

Note que las unidades de la presión de vapor se obtienen de acuerdo con las unidades en que éste la presión de saturación, puesto que la humedad relativa es adimensional. Entonces si de la ecuación 6 se obtienen  $\text{lb/ft}^2$ , la presión de vapor también se obtendrá en estas unidades al utilizar la ecuación 7, y se deberá de convertir a  $\text{kg/m}^2$  para al utilizar la ecuación 5, o bien directamente convertir a  $\text{kg/m}^2$  el valor de  $P_s$  obtenido de la ecuación 6.

Para ilustrar el uso de las ecuaciones anteriores se tiene el siguiente ejemplo:

Supóngase que las condiciones ambientales son:

Temperatura ambiente: 18°C

Presión barométrica: 587.27 mmHg.

Humedad relativa: 72%.

1.- La presión barométrica es:

587.27 mmHg

**2.-** Calcular la presión de saturación, utilizando la fórmula:

$$P_s = 2.685 + 3.537 \times 10^{-3} (t^{2.245})$$

$P_s$  = presión de saturación (lb/pie<sup>2</sup>).

$t$  = temperatura ambiente dada en °C convertida en °F

*Nota:* Dado que la fórmula que se utiliza es de origen empírico es necesario convertir la temperatura ambiente (en este caso 18°C) a °F, introduciendo este valor de temperatura en la fórmula se obtiene la presión en lb/pie<sup>2</sup>.

$$t = \frac{9}{5}(18^\circ\text{C}) + 32 = 64.4^\circ\text{F}$$

$$P_s = 2.685 + 3.537 \times 10^{-3} (64.4^\circ\text{F})^{2.245} = 43.38 \frac{\text{lb}_f}{\text{pie}^2}$$

$$43.38 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} = 211.75 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2} = P_s$$

**3.-** La presión de vapor es:

$$P_v = H_r P_s$$

$P_v$  = presión de vapor.

$$P_v = 0.72 \left( 211.75 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2} \right) = 152.46 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2}$$

$H_r$  = humedad relativa

**4.-** Antes de utilizar la fórmula que nos dará el valor de la densidad del aire se requiere convertir la presión barométrica de mmHg a kg<sub>f</sub>/m<sup>2</sup>, y también debemos de expresar la temperatura ambiente en grados Kelvin:

$$P_z = 587.27 \text{ mmHg} = 7969.254 \text{ kg}_f/\text{m}^2.$$

$$18^\circ\text{C} = 291^\circ\text{K}$$

Finalmente se utiliza la fórmula:

$$\rho_z = \frac{P_z - 0.3779 \cdot P_v}{gRT}$$

$P_z$  = presión barométrica (corregida) (Kg/m<sup>2</sup>).

$P_v$  = presión de vapor (Kg/m<sup>2</sup>).

$g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$R$  = constante del aire = 29.256 m<sup>3</sup>/°K.

$T$  = temperatura ambiente ( °K ).

$\rho_z$  = densidad del aire en el lab. (utm/m<sup>3</sup>).

Obteniendo el valor de la densidad:

$$\rho_z = \frac{7969.254 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2} - 0.3779 \left( 152.46 \frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2} \right)}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 29.256 \frac{\text{m}}{\text{K}} \cdot 291^\circ \text{K}}$$

$$\rho_z = 0.0947 \frac{\text{UTM}}{\text{m}^3} = 0.9293 \frac{\text{kg}_m}{\text{m}^3}$$

**Desarrollo:**

1.-Tomar lecturas de presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa tanto para interiores como para exteriores, con intervalos de 10 minutos durante una hora y registrar los valores en las tablas siguientes:

Interiores	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Temperatura ambiente							
Presión barométrica							
Humedad Relativa							
Exteriores	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Temperatura ambiente							
Presión barométrica							
Humedad Relativa							

2.- Realizar el cálculo de la densidad del aire según las fórmulas expuestas en las consideraciones teóricas y registrar los resultados en las tablas siguientes:

Interiores	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Densidad del aire							
Exteriores	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Densidad del aire							

3.- Presentar los resultados para mediciones en interiores como en exteriores mediante las gráficas siguientes:

- a) Gráfica Temperatura ambiente vs. Tiempo
- b) Gráfica Presión barométrica vs. Tiempo
- c) Gráfica Humedad relativa vs. Tiempo
- d) Gráfica Densidad del aire vs. Tiempo

4.- Finalmente calcular los valores promedio de las condiciones ambientales y registrarlos en las tablas siguientes:

Valores Promedio	Interiores	Exteriores
Temperatura ambiente °C		
Presión barométrica mmHg		
Humedad Relativa %		
Densidad del aire Utm/m3		

### Conclusiones

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Práctica 2

### Medición de la velocidad mediante el uso del tubo Pitot

#### Objetivo:

Conocer prácticamente el uso del tubo Pitot y los métodos de medición de la velocidad del viento

#### Equipo:

- Manómetro de columnas.
- Tubo Pitot.

#### Consideraciones teóricas

En casi todos los estudios concernientes al uso de túnel de viento es necesario conocer la velocidad del viento. Para esto se utilizan diferentes instrumentos de medición que directa o indirectamente registran la magnitud y cambios en la velocidad del flujo de fluido ya sea por diferencia de presiones, de temperaturas o por medio de un dispositivo mecánico cuyo movimiento se asocie a la velocidad del viento.

El uso de cada tipo de instrumento depende de la naturaleza del flujo de aire a medir, es decir, para una condición particular de viento existen instrumentos adecuados para efectuar la medición de su velocidad.

Los instrumentos para la medición de la velocidad del viento más comunes son:

- Anemómetro de copas.
- Anemómetro de turbina.
- Tubo Pitot.
- Anemómetro diferencial.
- Anemómetro de hilo caliente.
- Anemómetro laser-doppler.

Como ya se mencionó el uso de los instrumentos anteriormente listados depende de las condiciones del flujo a medir, por ejemplo, medición de la velocidad del viento atmosférico, determinación del gradiente de velocidades del viento en la capa límite o bien calibración de la velocidad en el túnel de viento.

A continuación se explicará el funcionamiento y características del tubo Pitot a utilizar en esta práctica

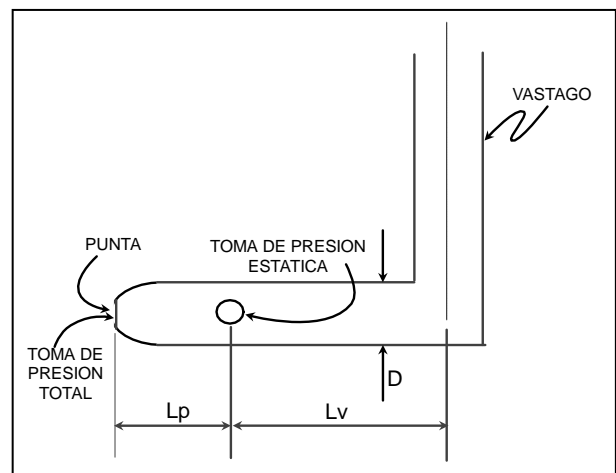
## TUBO PITOT.

El tubo Pitot es un instrumento que detecta la presión total y la presión estática en una corriente de aire, lo que nos permite conocer el valor de la presión dinámica y por lo tanto el valor de la velocidad del flujo. Recordando que la presión estática más la presión dinámica nos da la presión total. Quedando la velocidad del flujo como:

$$v = \sqrt{\frac{2q}{\rho}} \quad \text{en donde} \quad q = P_T - P_E \quad (15)$$

Cuando en el tubo Pitot además de la toma de presión total, también se incluye la toma de presión estática se le llama tubo **Pitot/estático**, un ejemplo se muestra en la **figura 67**.

Al utilizar el tubo pitot se debe de corregir el valor de la **presión dinámica (q)** debido a que la toma de presión estática detecta alteraciones en el flujo producidas por el **vástago (error de vástago)** y por la punta del tubo (**error de punta**).



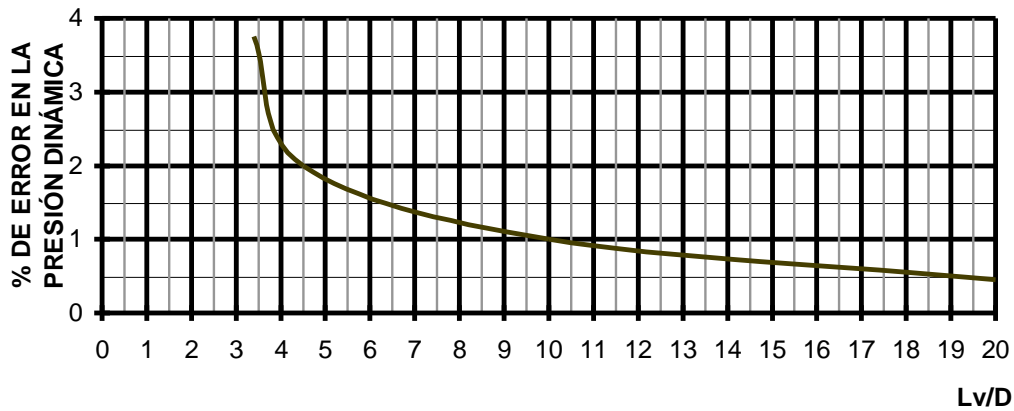
**Figura 67.**TuboPitot Estático

Para cuantificar esos errores se utilizan las **gráficas 1.1**<sup>20</sup>.

<sup>20</sup>Tomadas del libro "Low Speed Wind Túnel Testing, Rae/Pop. Wiley 1985. pp 104-105

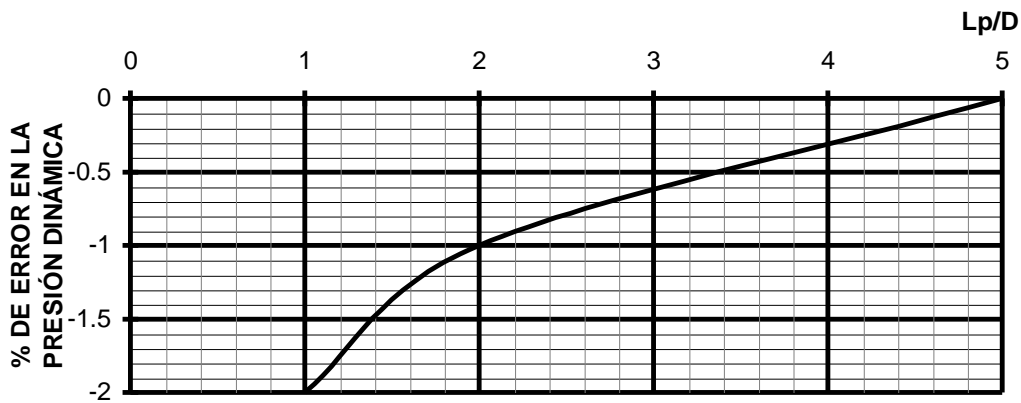
La **gráfica 1.1a** sirve para determinar el error en la presión dinámica producido por el vástago del tubo Pitot (**ev**).

**GRÁFICA 1.1a**



La **gráfica 1.1b** sirve para determinar el error en la presión dinámica producido por la punta del tubo Pitot (**ep**).

**GRÁFICA 1.1b**



**DESARROLLO:**

**1.- Determinación de las condiciones ambientales.**

A) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos (barómetro, termómetro e higrómetro) antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:



	INICIALES	FINALES	PROMEDIO
TEMPERATURA AMBIENTE(°C)			
PRESIÓN BAROMÉTRICA*(mmHg)	PRESIÓN LEÍDA= PRESIÓN CORREGIDA=	PRESIÓN LEÍDA= PRESIÓN CORREGIDA=	
HUMEDAD RELATIVA (%)			

B) Con los valores promedio obtenidos se deberá calcular **la densidad del aire en el laboratorio.**

Densidad del aire en el laboratorio:

$$\rho_z = \underline{\hspace{10cm}}$$

## 2.- Utilización del tubo Pitot.

**Para poder utilizar el tubo pitot es necesario cuantificar los valores de los errores de vástago y de punta.**

### A) Determinación del error total en la presión dinámica y su corrección.

Del tubo Pitot utilizado obtener las dimensiones:

$$L_v = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$L_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D = \underline{\hspace{2cm}}$$

Entonces se pueden determinar los cocientes **L<sub>v</sub>/D** y **L<sub>p</sub>/D** para que se obtengan los **porcentajes de error** en la presión dinámica debido al vástago y a la punta utilizando las gráficas **1.1a** y **1.1b** respectivamente. Cabe aclarar que en las gráficas los errores se expresan como porcentaje, para poder efectuar operaciones con estos valores se deben de dividir entre 100.

$$\text{de gráfica } E_v = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{de gráfica } E_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

El error total es igual a la suma del error de punta más el error de vástago:

$$E_T = (E_p + E_v) \quad (1)$$

$$E_T = \underline{\hspace{2cm}}$$

La presión dinámica que se lee en el manómetro se representará con **q<sub>leída</sub>**  
La **presión dinámica corregida** se representará con **q<sub>corr</sub>** es igual a:

$$q_{\text{corr}} = q_{\text{leída}} + E_T(q_{\text{leída}})$$

$$q_{\text{corr}} = q_{\text{leída}}(1 + E_T) \quad (2)$$

$(1 + E_T)$  es el **factor de corrección** de la presión dinámica.

$(1 + E_T) =$  \_\_\_\_\_

**C) Medición de la velocidad del flujo libre a diversas alturas de la sección de prueba del túnel utilizando un tubo Pitot.**

Utilizando el tubo Pitot del túnel, proceder a medir la presión total, la presión estática y la presión dinámica a diversas alturas desde el piso de la sección de prueba del túnel, registrando los resultados en la tabla siguiente, efectuando las correcciones a la presión dinámica.

DISTANCIA DESDE EL PISO DE LA SECCIÓN DE PRUEBA DEL TÚNEL ( cm )	P <sub>tot</sub> mmH <sub>2</sub> O	P <sub>est</sub> mmH <sub>2</sub> O	Q mmH <sub>2</sub> O	V m/s
0				
10				
20				
30				
40				
50 (eje de la sección de prueba)				

Con los datos anteriores realizar las gráficas

**Altura vs. Velocidad**

- Altura vs. Presión estática
- Altura vs. Presión total
- Altura vs. Presión dinámica



## Práctica 3

### Calibración del túnel de succión

#### Objetivo:

Obtener las constantes de calibración del túnel de succión.

#### Equipo:

- Túnel de succión.
- Manómetro de columnas.
- TuboPitot.

#### Consideraciones teóricas

Antes de proceder a realizar experimentos más complejos en el túnel de viento es necesario el efectuar una medición de la correspondencia de velocidad y de presión en función de la posición de las compuertas del túnel en un plano o varios planos de su sección de prueba, a esto se le llama calibración del túnel.

#### Desarrollo:

##### 1.- Determinación de las condiciones ambientales.

- a) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

#### Densidad del aire en el laboratorio:

$$\rho_z = \underline{\hspace{10em}}$$

## 2.- Determinación de la constante de calibración K en la sección de prueba.

- a) Colocar el tubo Pitot en el eje de la sección de prueba.
- b) Seleccionar un nivel de referencia en el manómetro de columnas y conectar dos columnas a sendas tomas de presión total y presión estática. (la toma de presión estática se encuentra en la pared superior del túnel).
- d) Accionar los dos motores del túnel y cerrar las compuertas, procediendo a registrar los valores de presión estática ambiental (leída en la columna del manómetro abierta a la atmósfera), presión total y presión estática, repitiendo el proceso para las posiciones de compuertas mostradas en la tabla siguiente:

POSICIÓN DE LAS COMPUERTAS	$P_{\text{AMBIENTAL}}$ (MANOMÉTRICA) mmH <sub>2</sub> O	$P_T$ mmH <sub>2</sub> O	$P_E$ mmH <sub>2</sub> O	$q$ mmH <sub>2</sub> O	$P_{\text{AMBIENTAL}} - P_E$ (PDR) mmH <sub>2</sub> O	$\frac{q}{(PDR)}$	$v$ m/s
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10 (Totalmente abiertas)							

Con los datos anteriores construir las gráficas:

Posición de compuertas vs. Velocidad.

Posición de compuertas vs. Presión estática.

Posición de compuertas vs. Presión dinámica.

Velocidad vs. Presión dinámica.

### 3.- Conclusiones.

---



---



---



---



---



---



---

## Práctica 4

### Técnicas de visualización de flujo

#### Objetivo:

Conocer las características de dos métodos de visualización de flujo en el túnel de succión.

#### Equipo:

- Generador de humo
- Cámara fotográfica
- Lámpara de halógeno de 80W
- Lámpara de "luz negra" de 40W

#### Consideraciones teóricas

La visualización de un flujo de fluido consiste en hacer posible la observación de la trayectoria que siguen las partículas fluidas cuando pasan por el contorno o la cercanía de un objeto.

Para seleccionar un método conveniente de visualización hay que tomar en cuenta lo siguiente:

- a) Tipo de fluido que se trate (flujo de líquido o flujo de gas).
- b) Grado de turbulencia del flujo.
- c) Compresibilidad del flujo. (cambios en la densidad).
- d) Tiempo de observación.
- e) Método de observación. (visual o fotográfico).
- f) Zona de observación del flujo. (en la superficie del objeto, en el contorno, aguas arriba o aguas abajo etc.).

En esta práctica se utilizarán dos métodos:

- 1.- Visualización de flujo de aire por medio de inyección de humo.
- 2.- Visualización de flujo de aire por medio de hilos.

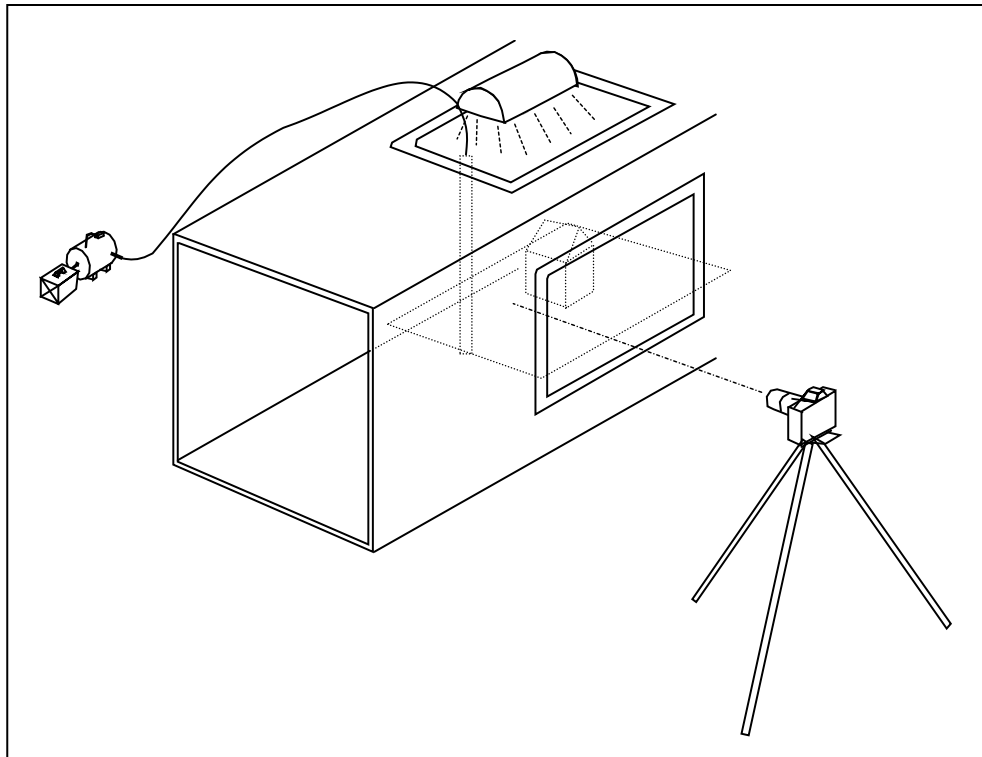
## Desarrollo:

### 1.- Visualización de flujo de aire por medio de inyección de humo.

Colocar el modelo en la sección de prueba del túnel tal y como se indica en la figura 68 posteriormente accionar el generador de humo en conjunción con el túnel, variando la velocidad del flujo hasta lograr la mayor nitidez en las líneas de corriente generadas con el humo.

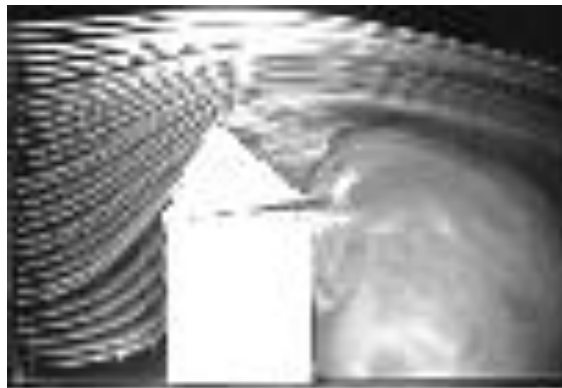
Encender la luz colocada en la ventana superior de la sección de prueba y proceder a fotografiar sin flash lo que sucede en la sección de prueba.

Precaución: Dado que se requiere una exposición con un tiempo elevado se debe tener cuidado de no mover la cámara o el tripié para evitar imágenes borrosas.



**Figura 68.**Luz encendida para fotografía con exposición prolongada

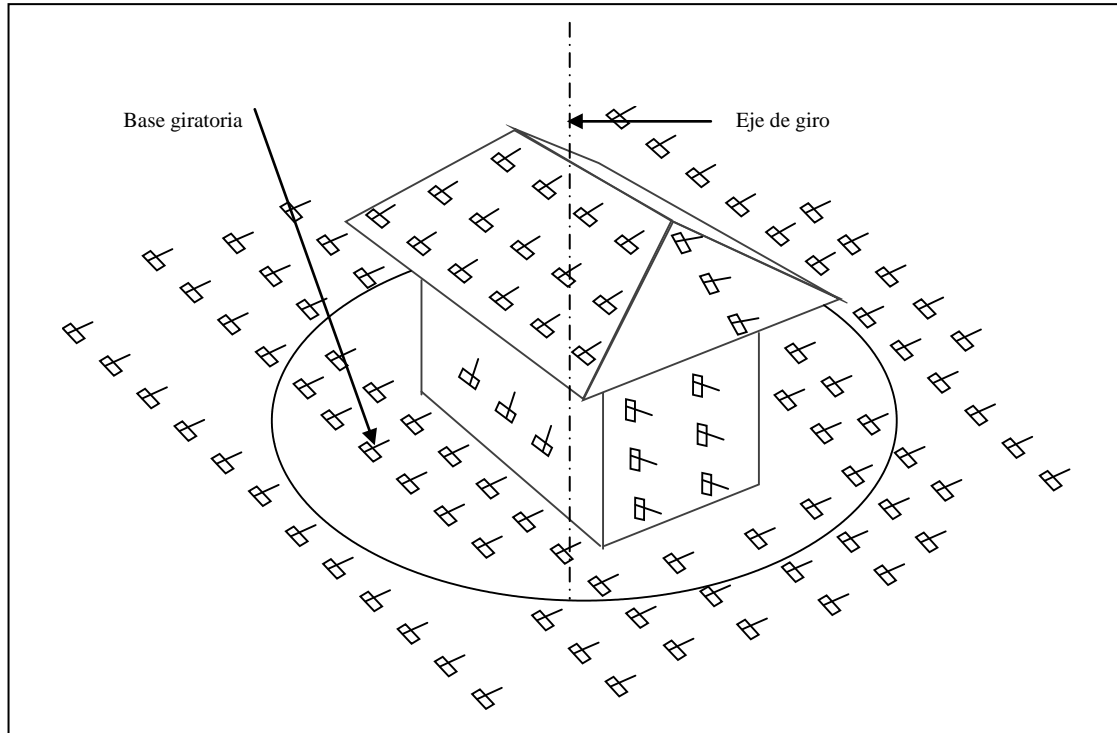
Los resultados fotográficos deben ser como los de la imagen siguiente:



**Figura 69.** Fotografía con iluminación artificial con exposición en tiempo elevado

## 2.- Visualización de flujo de aire por medio de hilos

Preparar un modelo como el que se ilustra en la figura 70:



**Figura 70.** Modelo con hilos para visualizar flujo de aire



Los hilos deben de ser de algodón teñido en pintura fluorescente, cortados a una longitud de aproximadamente 1.2 cm y colocados en la superficie del modelo con cinta adhesiva.

Colocar el modelo en la sección de prueba del túnel, y reemplazar la lámpara de halógeno por la de luz negra, procediendo a accionar el túnel y registrar fotográficamente vistas tanto lateral como superior a diversos ángulos de incidencia.

### 3.- Visualización de flujo de aire por medio de polvo de madera balsa.

Colocar el modelo en la sección de prueba del túnel previamente colocando en el piso de la maqueta una cantidad de polvo de madera balsa, tal y como se indica en la figura 71 posteriormente accionar el túnel de viento, regulando la velocidad del flujo hasta su valor mas bajo.

Encender la luz colocada en la ventana superior de la sección de prueba y proceder a fotografiar sin flash lo que sucede en la sección de prueba.

Precaución: Dado que se requiere una exposición con un tiempo elevado se debe tener cuidado de no mover la cámara o el tripié para evitar imágenes borrosas.

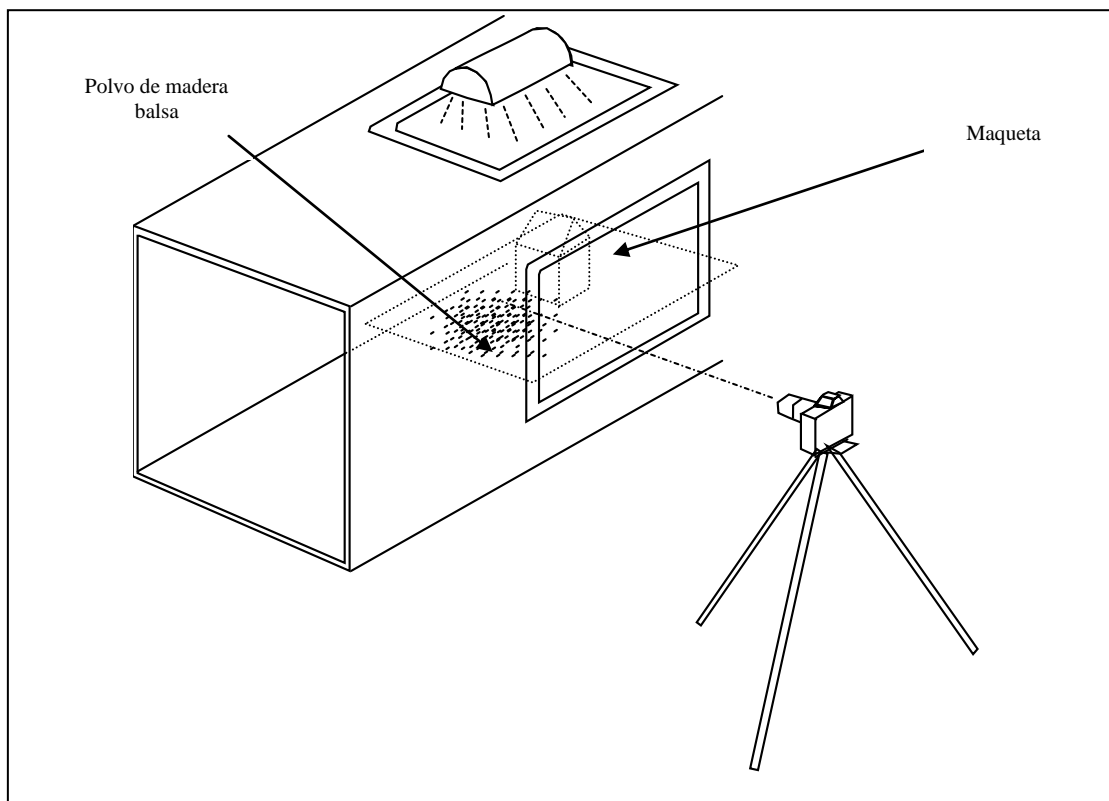


Figura 71. Modelo con polvo de madera balsa para visualizar flujo de aire

#### **4.- Conclusiones.**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Práctica 5

### Simulación de la capa límite terrestre

#### Objetivo:

Reproducir en el túnel de viento las propiedades de la capa límite terrestre para un ambiente urbano.

#### Equipo:

- TuboPitot
- Manómetro de columnas
- Elementos generadores de turbulencia

#### Consideraciones teóricas

Se define como gradiente de velocidad a la variación de la magnitud de la velocidad del viento con respecto a la distancia vertical al terreno. En la figura 72 se muestra una representación vectorial de un gradiente de velocidades:

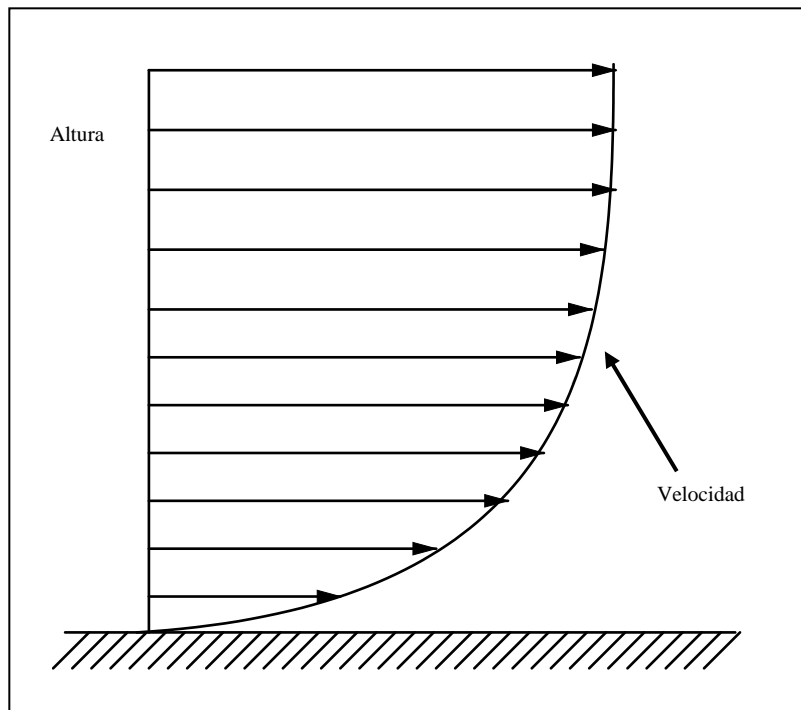


Figura 72. Perfil de velocidades

La forma del perfil de velocidades y su altura dependen del medio en donde se desarrolle, para medios urbanos se puede llegar a tener un perfil de velocidades con una altura hasta de 500 m, mientras que en campo abierto se logran valores más bajos, aproximadamente 80 m.

En el túnel de viento se pueden reproducir a escala tales perfiles de velocidades mediante la modificación de la distribución de velocidad en la sección de prueba del túnel. Inicialmente el túnel en su sección de prueba posee una distribución de velocidades prácticamente uniforme, la cual se puede modificar a conveniencia para poder desarrollar al perfil adecuado. Tal modificación se logra utilizando elementos que perturban al flujo y redistribuyen a la velocidad, tal y como se indica en la figura 73:

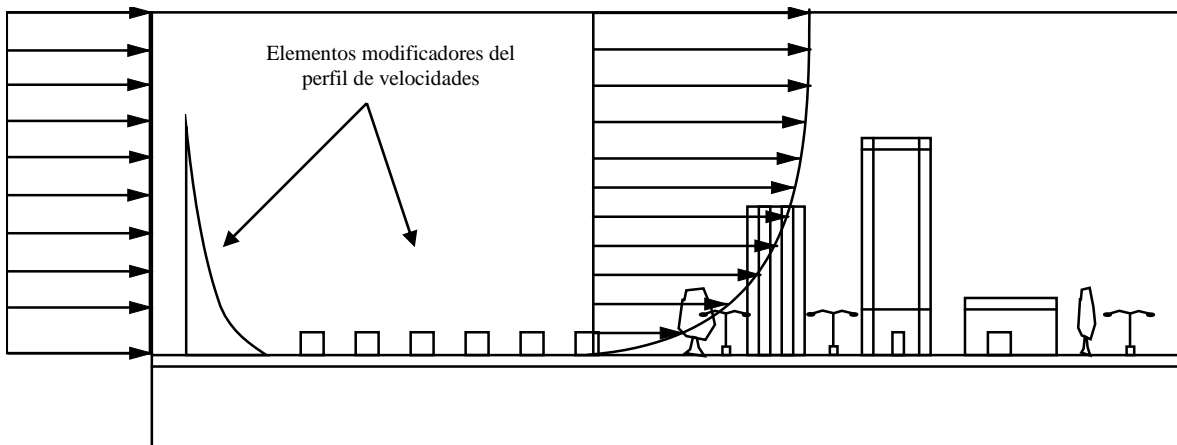


Figura 73. Elementos modificadores del perfil de velocidades

## Desarrollo:

### 1.- Determinación de las condiciones ambientales.

a) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

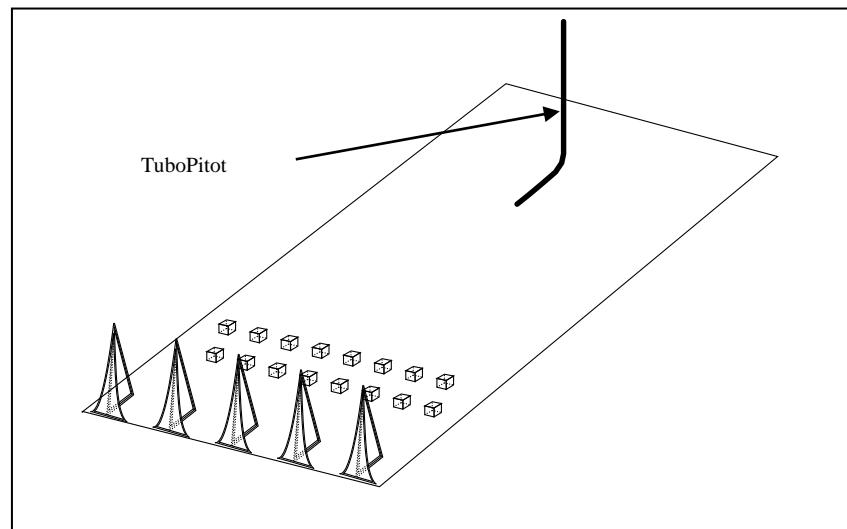
## Densidad del aire en el laboratorio:

$$\rho_z = \underline{\hspace{10em}}$$

### 2.- Medición del perfil de velocidades modificado con los elementos generadores de turbulencia.

Colocar en el piso falso de la sección de prueba del túnel a los elementos generadores de turbulencia según se indica en los dibujos, anotando en las tablas los resultados de las mediciones de la velocidad del flujo.

Colocar en el piso falso del túnel a la entrada de la sección de prueba 5 generadores de turbulencia triangulares, además de un par de filas de generadores de tipo cubo, tal y como se ilustra en la figura 74.



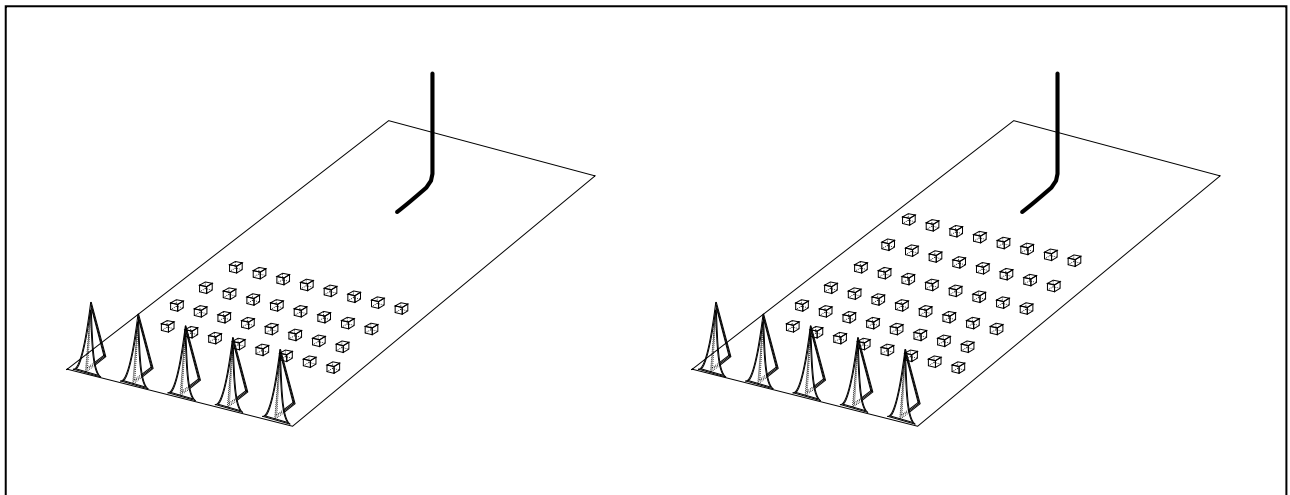
**Figura 74.** TuboPitot y generadores de turbulencia

Trabajando con el túnel a velocidad máxima y utilizando un tubo Pitot proceder a medir la presión total, presión estática y presión dinámica para finalmente calcular la velocidad

a diversas distancias desde el piso falso, anotando los resultados en las tablas siguientes:

Altura del tubo Pitot cm	$P_T$ mmH <sub>2</sub> O	$P_E$ mmH <sub>2</sub> O	$q$ mmH <sub>2</sub> O	$V$ m/s
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				

Repetir lo anterior dos veces pero en cada caso colocar un par de filas mas de generadores de turbulencia en forma de cubo según se muestra en la figura 75, registrando los resultados en las tablas siguientes:



**Figura 75.** Mayor cantidad de generadores de turbulencia

2 pares de filas de generadores de turbulencia

Altura del tubo Pitot cm	$P_T$ mmH <sub>2</sub> O	$P_E$ mmH <sub>2</sub> O	q mmH <sub>2</sub> O	V m/s
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				

3 pares de filas de generadores de turbulencia

Altura del tubo Pitot cm	$P_T$ mmH <sub>2</sub> O	$P_E$ mmH <sub>2</sub> O	q mmH <sub>2</sub> O	V m/s
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				





## Práctica 6

### Distribución de presión en el exterior de una edificación

#### Objetivo:

Conocer la forma en la que se puede medir la distribución de la presión sobre la superficie de una maqueta de una edificación

#### Equipo:

- TuboPitot
- Manómetro de columnas
- Maqueta preparada con tomas de presión

#### Consideraciones teóricas

El viento al bañar una edificación ejerce una presión cuyo valor depende de la geometría local del lugar en cuestión, dando con esto una distribución de presión resultante de las contribuciones individuales de cada punto que forma a la superficie de la edificación.

Por lo anterior podemos conocer la forma en la que la presión del viento se distribuye sobre la superficie si medimos valores discretos dispuestos estratégicamente en la superficie de la maqueta, registrando esto en forma gráfica mediante el uso de “vectores”. Si bien la presión no es una magnitud vectorial se pueden emplear estos para poder representar al comportamiento de la presión sobre la superficie del objeto, teniendo la convención siguiente:

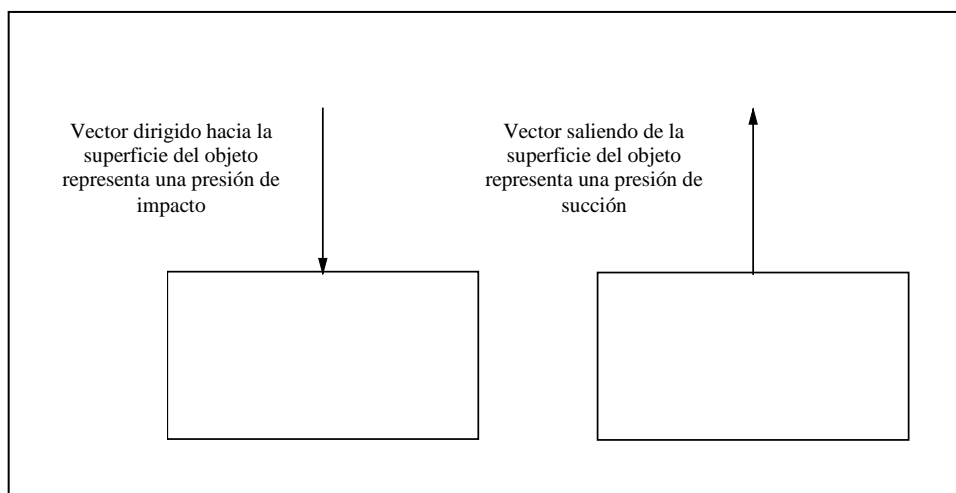


Figura 76. Vectores

La magnitud del vector representa el valor del coeficiente de presión, el cual se define como:

$$C_p = \frac{P_L - P_E}{P_T - P_E} \quad (2)$$

En donde:

$P_L$  = presión local, medida en un punto sobre la superficie del modelo o del prototipo.

$P_E$  = presión estática, medida con un tubo pitot-estático en la corriente que baña al modelo o al prototipo.

$P_T$  = Presión total, medida con un tubo pitot-estático en la corriente que baña al modelo o al prototipo.

### Desarrollo:

#### 1.- Determinación de las condiciones ambientales.

a) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

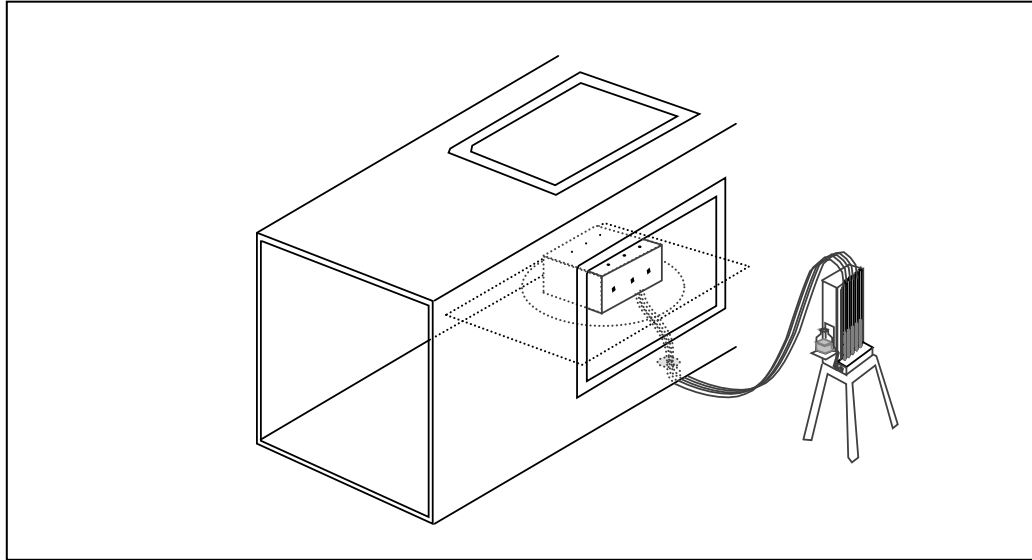
	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

#### Densidad del aire en el laboratorio:

$$\rho_z = \underline{\hspace{10em}}$$

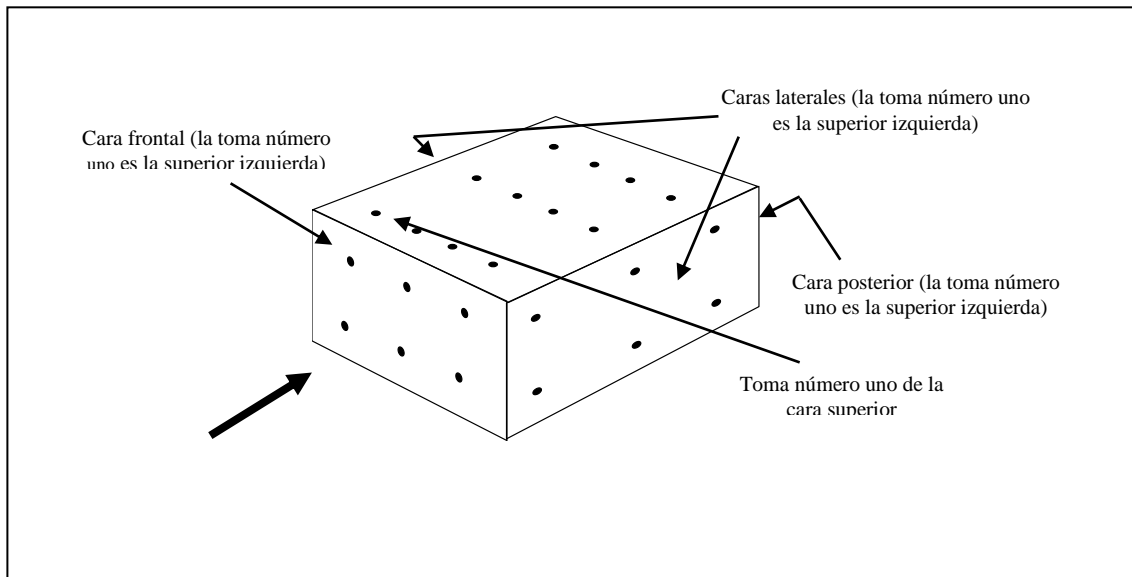
#### 2.- Medición de la distribución de presión sobre la superficie de una edificación.

Colocar sobre el piso falso del túnel a un modelo previamente preparado con tomas de presión y conectar estas a las mangueras del manómetro de columnas tal y como se indica en la figura 77:



**Figura 77** Modelo conectado a manómetro para medir presión exterior del mismo

La disposición de las tomas de presión en el modelo se ilustra en la figura 78



**Figura 78.** Disposición de tomas de presión

Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en las tablas siguientes:

Toma de presión	Presión local mmH <sub>2</sub> O	Presión total mmH <sub>2</sub> O	Presión estática mmH <sub>2</sub> O	C <sub>p</sub>
Cara frontal				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH <sub>2</sub> O	Presión total mmH <sub>2</sub> O	Presión estática mmH <sub>2</sub> O	C <sub>p</sub>
Cara lateral izq.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH <sub>2</sub> O	Presión total mmH <sub>2</sub> O	Presión estática mmH <sub>2</sub> O	C <sub>p</sub>
Cara lateral der.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara posterior.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara superior				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

### **3.- Registro gráfico**

Con los datos anteriores realizar los diagramas de distribución de presión en tres planos transversales y uno longitudinal.

### **4.- Conclusiones**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Práctica 7

### Distribución de presión en el interior de una edificación

#### Objetivo:

Conocer la forma en la que se puede medir la distribución de la presión en el interior de una maqueta de una edificación

#### Equipo:

- TuboPitot
- Manómetro de columnas
- Maqueta preparada con tomas de presión

#### Consideraciones teóricas

El viento, al incidir en el exterior de una superficie puede actuar ejerciendo presión de impacto o presión de succión. El interior de la edificación no está exento de este comportamiento. Mediante la medición de distribución de presión se puede conocer el comportamiento del viento en relación con la distribución de los espacios en el interior. La convención de signos que indican el comportamiento de la presión se mantiene vigente tanto para interiores como para exteriores.

#### Desarrollo

##### 1.- Determinación de las condiciones ambientales.

a) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

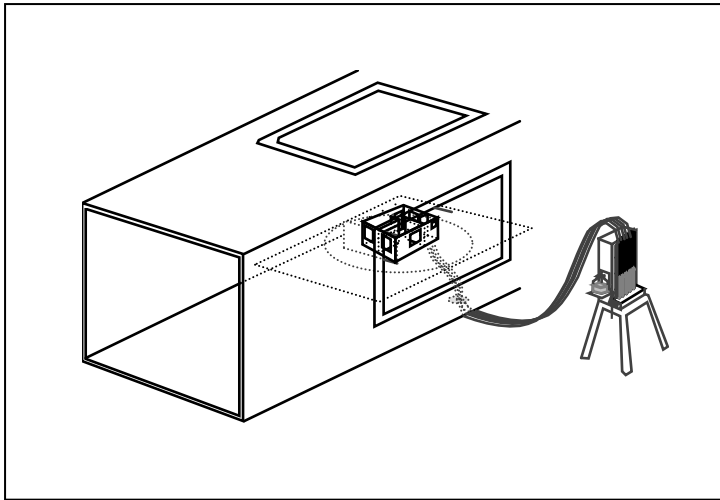
	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

Densidad del aire en el laboratorio:

$$\rho_z = \underline{\hspace{10em}}$$

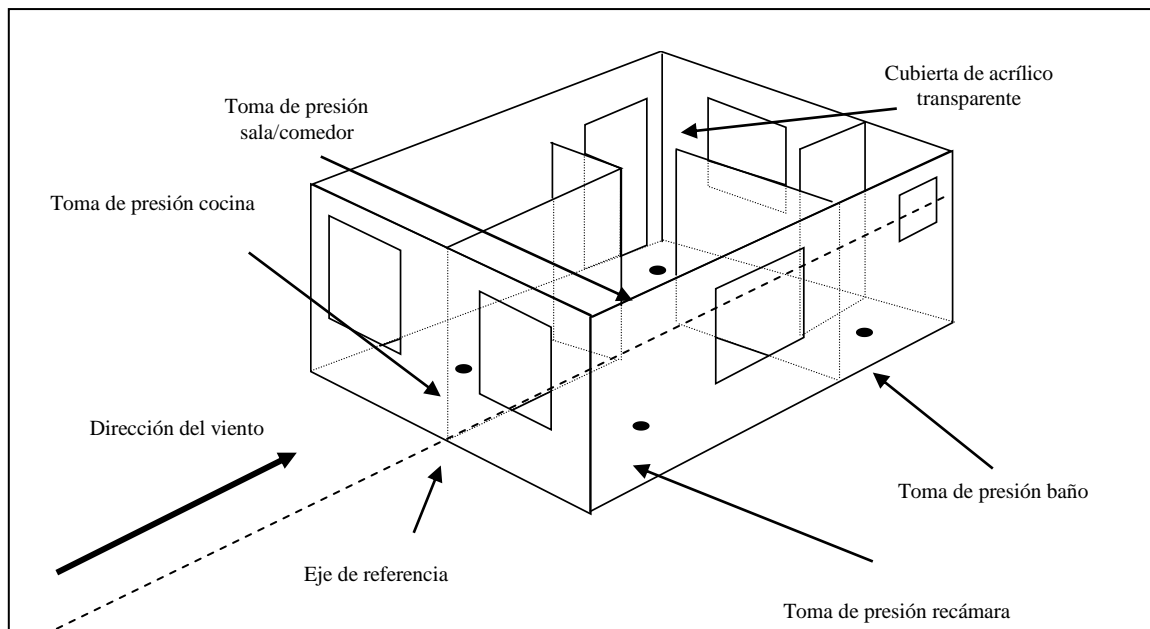
**2.- Medición de la distribución de presión sobre la superficie de una edificación.**

Colocar sobre el piso falso del túnel a un modelo previamente preparado con tomas de presión y conectar estas a las mangueras del manómetro de columnas tal y como se indica en la figura 79:



**Figura 79** Modelo conectado a manómetro para medir la presión interior del mismo

La disposición de las tomas de presión en el modelo se ilustra en la figura 80



**Figura 80.** Disposición de tomas de presión



Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en las tablas siguientes, moviendo la maqueta a las cuatro posiciones del eje de referencia con respecto al viento:

0°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

90°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

180°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

270°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

### 3.- Resumen de resultados

Resumir los resultados en la siguiente tabla:

Toma de presión	0° Cp	90° Cp	180° Cp	270° Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

### 4.- Conclusiones

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Práctica 8

### Estudio de la influencia de los accidentes geográficos en las características del viento

#### Objetivo:

Conocer la forma en la que los accidentes geográficos modifican las características del viento atmosférico

#### Equipo:

- TuboPitot
- Manómetro de columnas
- Maqueta preparada con tomas de presión

#### Consideraciones teóricas

Los accidentes geográficos, ya sean elevaciones o depresiones, modifican las características del viento atmosférico como presión, velocidad y dirección. Esto puede ser tanto a favor como en contra de las condiciones de comodidad de una vivienda cercana a tales accidentes geográficos.

El aire al moverse tiende a permanecer adherido al terreno, pero cuando se encuentra una depresión la inercia del movimiento en combinación con la presión atmosférica y el súbito cambio en la posición del terreno genera un desprendimiento que tiene como consecuencia la formación de una zona de turbulencia justamente en la depresión tal y como se muestra en la figura 81

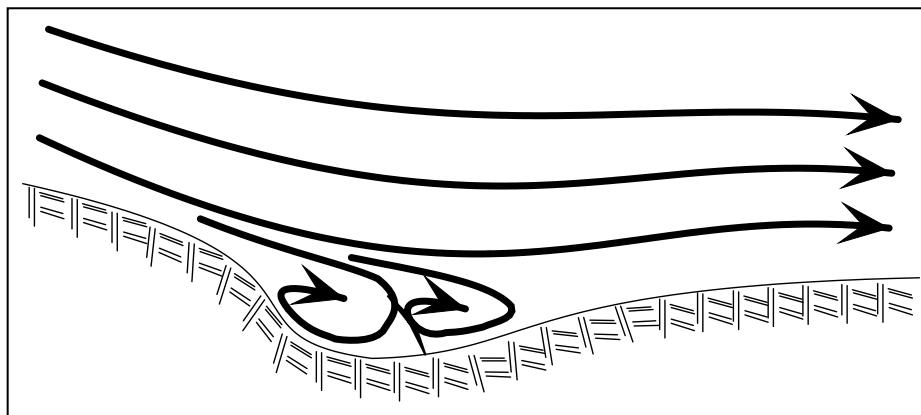
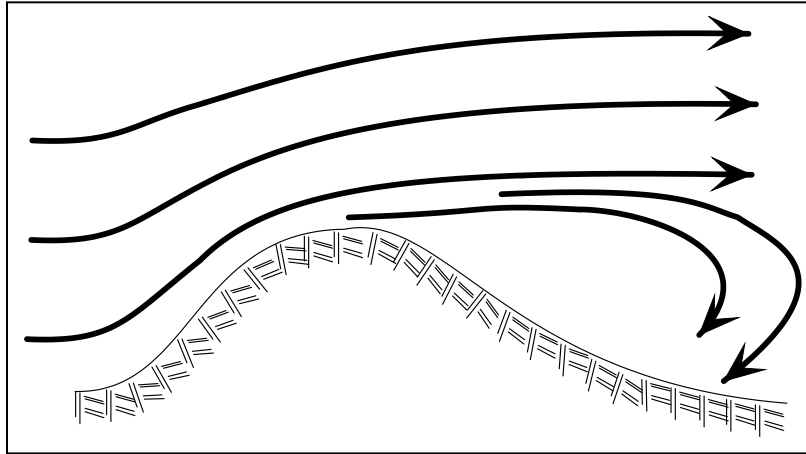


Figura 81. Efecto de una depresión en el viento

En el caso de una elevación en el terreno se produce un fenómeno de desprendimiento como el que se ilustra en la figura 82:



**Figura 82.** Elevación del terreno que provoca

**Desarrollo:**

**1.- Determinación de las condiciones ambientales.**

a) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

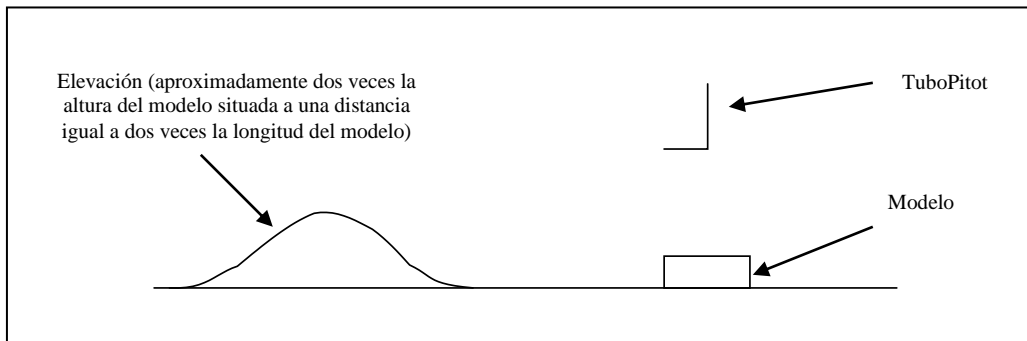
	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

**Densidad del aire en el laboratorio:**

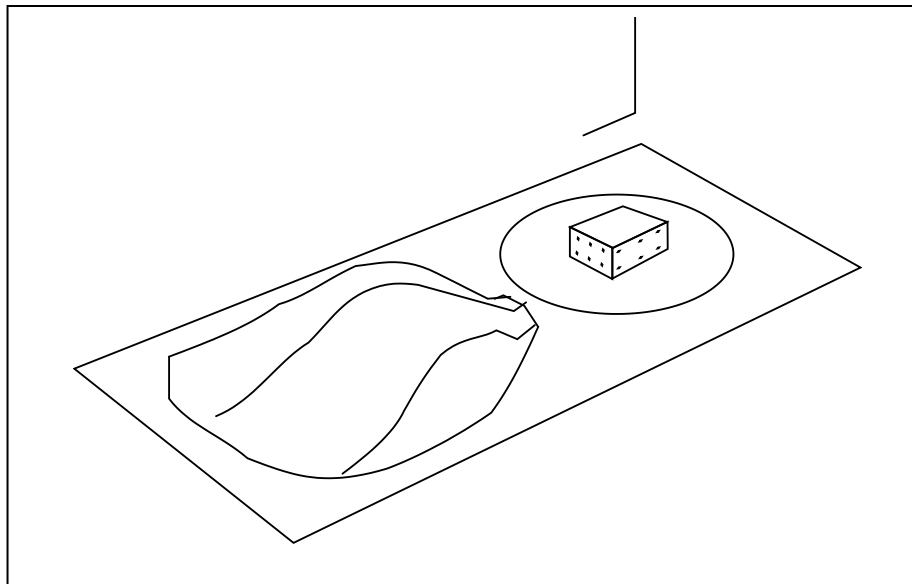
$$\rho_z = \underline{\hspace{10em}}$$

## 2.- Medición de la distribución de presiones sobre una edificación afectada por una elevación

Colocar en la sección de prueba del túnel un piso falso preparado con un modelo de terreno con cambio de elevación, situando en la base giratoria al modelo utilizado en la práctica 6, tal y como se ilustra en las figuras 83 y 84:



**Figura 83.** Vista lateral del montaje desprendimiento



**Figura 84.** Vista en perspectiva

Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en las tablas siguientes:

Toma de presión	Presión local mmH <sub>2</sub> O	Presión total mmH <sub>2</sub> O	Presión estática mmH <sub>2</sub> O	Cp
Cara frontal				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH <sub>2</sub> O	Presión total mmH <sub>2</sub> O	Presión estática mmH <sub>2</sub> O	Cp
Cara lateral izq.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH <sub>2</sub> O	Presión total mmH <sub>2</sub> O	Presión estática mmH <sub>2</sub> O	Cp
Cara lateral der.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara posterior.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

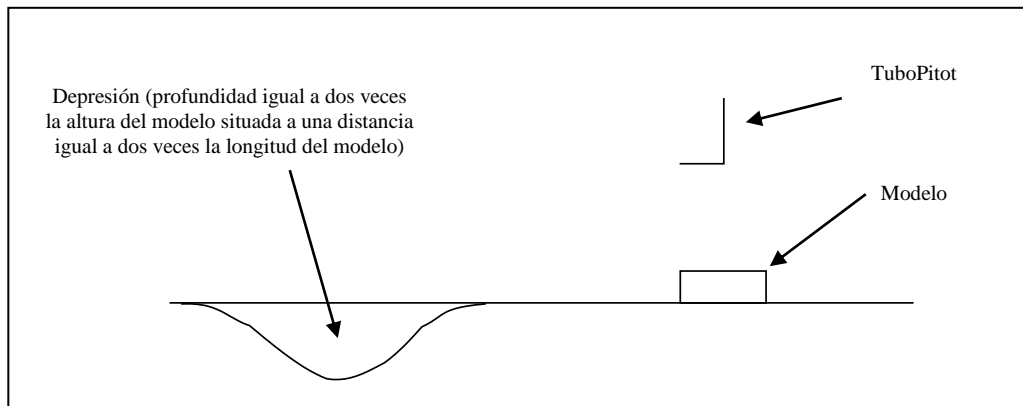
Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara superior				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

### 3.- Registro gráfico

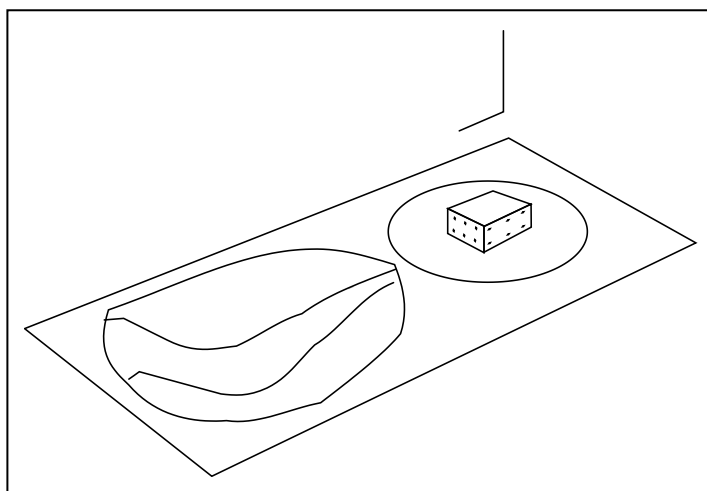
Con los datos anteriores realizar los diagramas de distribución de presión en tres planos transversales y uno longitudinal y compararlos con los resultados obtenidos en la práctica 6.

#### 4.- Medición de la distribución de presiones sobre una edificación afectada por una depresión

Colocar en la sección de prueba del túnel un piso falso preparado con un modelo de terreno con una depresión, situando en la base giratoria al modelo utilizado en la práctica 6, tal y como se ilustra en las figuras 85 y 86:



**Figura 85.** Vista lateral del montaje



**Figura 86.** Vista en perspectiva



Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en las tablas siguientes:

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara frontal				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara lateral izq.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara lateral der.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara posterior.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara superior				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

## 5.- Registro gráfico

Con los datos anteriores realizar los diagramas de distribución de presión en tres planos transversales y uno longitudinal y compararlos con los resultados obtenidos en la práctica 6 y con el punto 3 de esta práctica

## 6.- Conclusiones

---



---



---



---

## Práctica 9

### Estudio de la influencia de la vegetación exterior en la cinemática del viento alrededor de una edificación

#### Objetivo:

Conocer la forma en la que la vegetación modifica las características del viento atmosférico

#### Equipo:

- TuboPitot
- Manómetro de columnas
- Maqueta preparada con tomas de presión

#### Consideraciones teóricas

La existencia de vegetación exterior modifica al patrón de distribución de velocidad del viento atmosférico, y por lo tanto también al patrón de distribución de presión alrededor y en el interior de una edificación. Por lo anterior es necesario el realizar un estudio de distribución de presión tanto en el interior como en el exterior de la edificación considerando la presencia de vegetación.

En esta práctica se refrenda la validez y la importancia de los estudios de distribución de presiones, conservando la misma convención de signos y metodologías empleadas en prácticas anteriores.

#### Desarrollo:

##### 1.- Determinación de las condiciones ambientales.

a) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

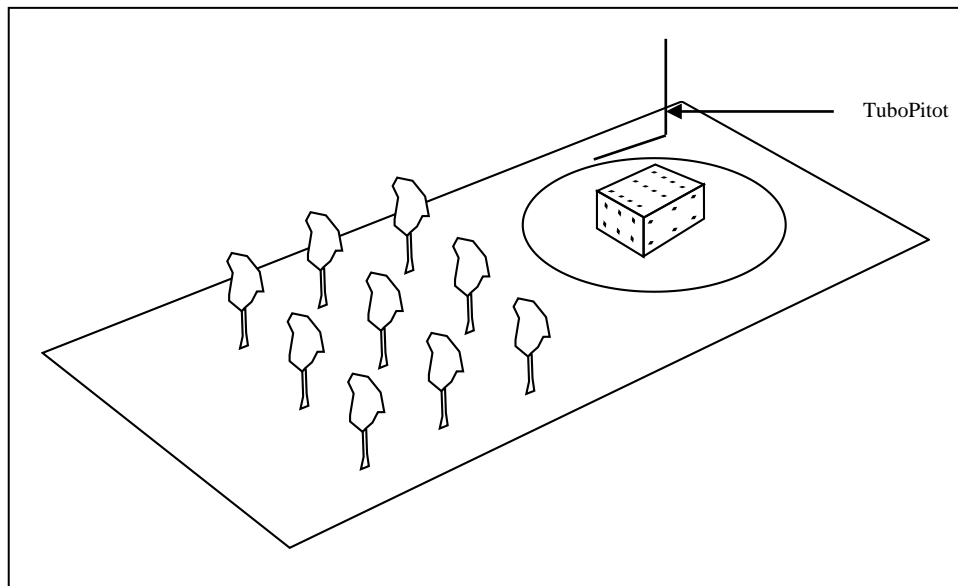
	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

**Densidad del aire en el laboratorio:**

$$\rho_z = \underline{\hspace{10em}}$$

**2.- Medición de la distribución de presiones sobre una edificación afectada por una arboleda**

Colocar en la sección de prueba del túnel un piso falso preparado con un modelo de una edificación y una serie de árboles dispuestos como se indica en la figura 87.



**Figura 87.**Modelo afectado por una arboleda

Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en las tablas siguientes:

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara frontal				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara lateral izq.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara lateral der.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cara posterior.				
1				
2				
3				
4				
5				
6				

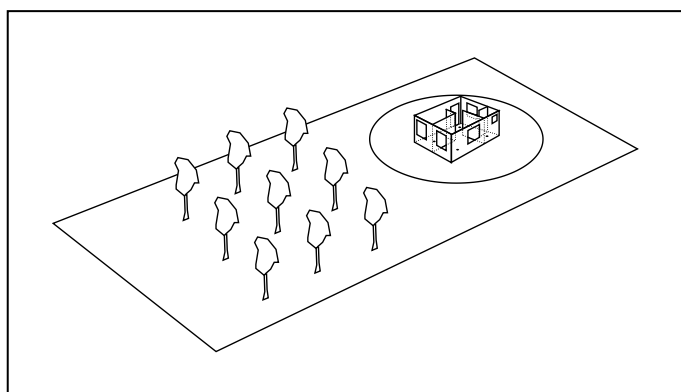
Toma de presión	Presión local mmH <sub>2</sub> O	Presión total mmH <sub>2</sub> O	Presión estática mmH <sub>2</sub> O	Cp
Cara superior				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

### 3.- Registro gráfico

Con los datos anteriores realizar los diagramas de distribución de presión en tres planos transversales y uno longitudinal y compararlos con los obtenidos en la práctica 6

### 4.- Medición de la distribución de presiones en el interior de una edificación afectada por una arboleda

Sustituir el modelo del punto anterior con el modelo utilizado en la práctica 7, tal y como se muestra en la figura 88.



**Figura 88.** Distribución de presión interior en edificación afectada por una arboleda

Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en la tabla siguiente, moviendo la maqueta a las cuatro posiciones del eje de referencia con respecto al viento:

0°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

90°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

180°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				

270°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
Cocina				
Baño				
Sala/comedor				
Recámara				





## Práctica 10

### Estudio aerocinemático de la envolvente de las edificaciones

#### Objetivo:

Conocer la influencia de los elementos exteriores de una edificación en el comportamiento cinemático del viento alrededor de una edificación.

#### Equipo:

- TuboPitot
- Manómetro de columnas
- Maqueta preparada con tomas de presión

#### Consideraciones teóricas

Los elementos superficiales en una edificación tales como repisas, marquesinas, antepechos tejados etc., modifican el comportamiento del viento tanto en su presión como en su velocidad. Resulta conveniente conocer la influencia de dichos elemento para así poder evitar influencias negativas como puntos de estancamiento del viento o zonas en donde se pueden generar turbulencias que produzcan ruido de baja frecuencia o generen infiltraciones en la vivienda.

#### Desarrollo

##### 1.- Determinación de las condiciones ambientales.

a) se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

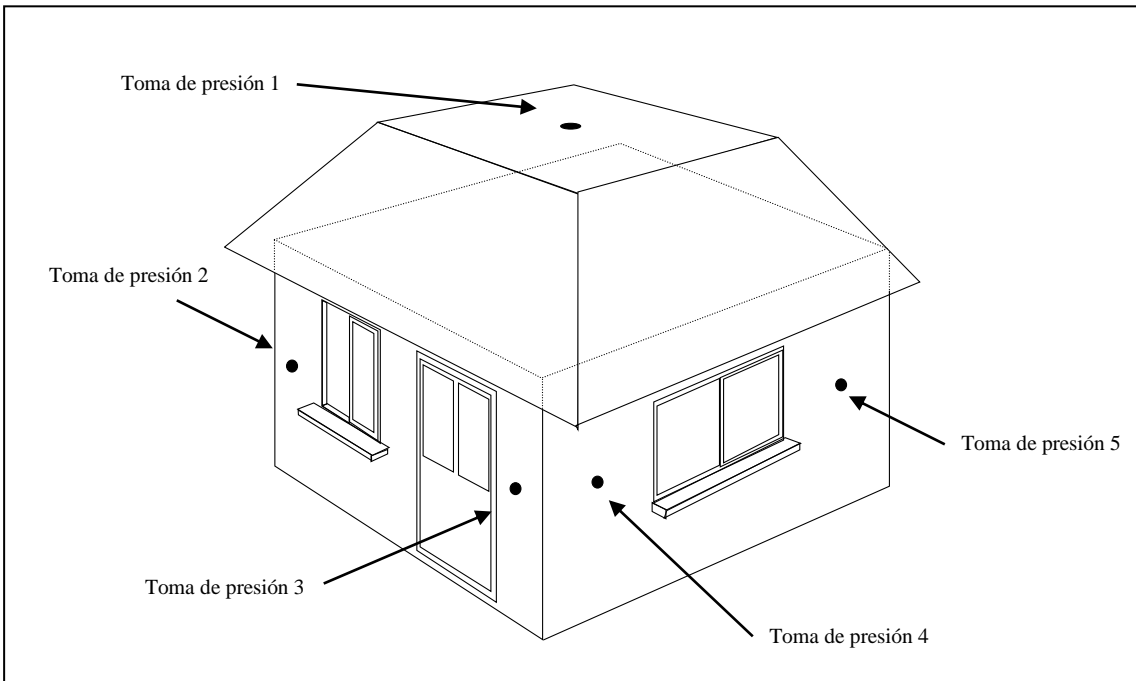
	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

**Densidad del aire en el laboratorio:**

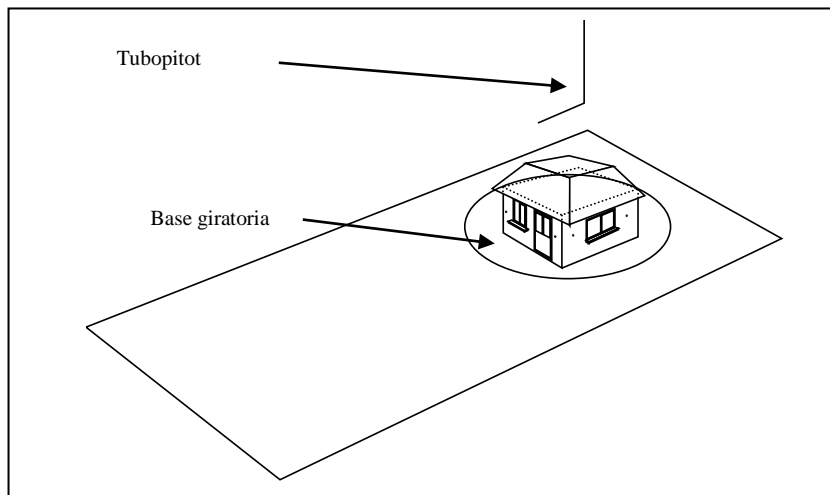
$$\rho_z = \underline{\hspace{2cm}}$$

**2.- Medición de la distribución de presión sobre la superficie de una edificación con envolvente definida**

Colocar en la sección de prueba del túnel de viento una maqueta como la que se muestra en la figura 89 y 90



**Figura 89.** Indicación de tomas depresión



**Figura 90.** Medición de presión en modelo con envolvente

Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en las tablas siguientes, moviendo la maqueta a las cuatro posiciones del eje de referencia con respecto del viento:

0°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

90°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

180°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

270°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

### 3.- Resumen de resultados

Resumir los resultados en la siguiente tabla:

Toma de presión	0° Cp	90° Cp	180° Cp	270° Cp
1				
2				
3				
4				
5				

### 4.- Medición de la distribución de presión sobre la superficie de una edificación sin tejado y con ventanas sin repisas.

Colocar en la sección de prueba del túnel de viento a la maqueta utilizada en el experimento anterior pero retirando de esta al tejado y las peanas de las ventanas, tal y como se muestran en las figuras 91 y 92

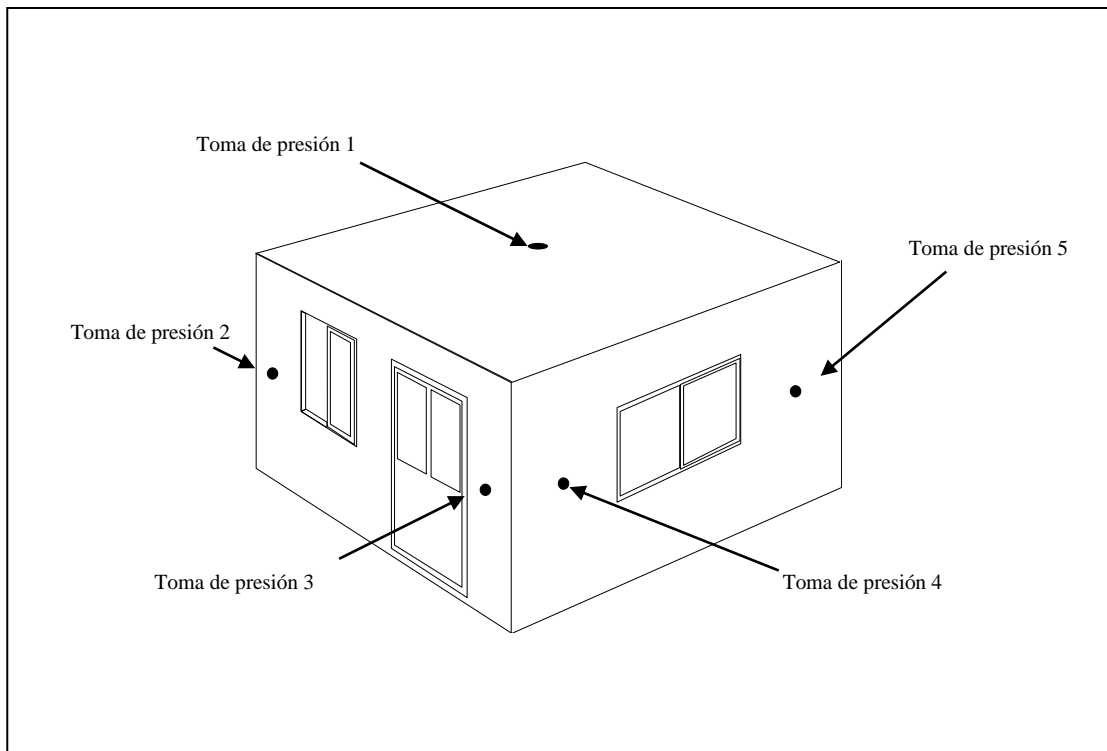
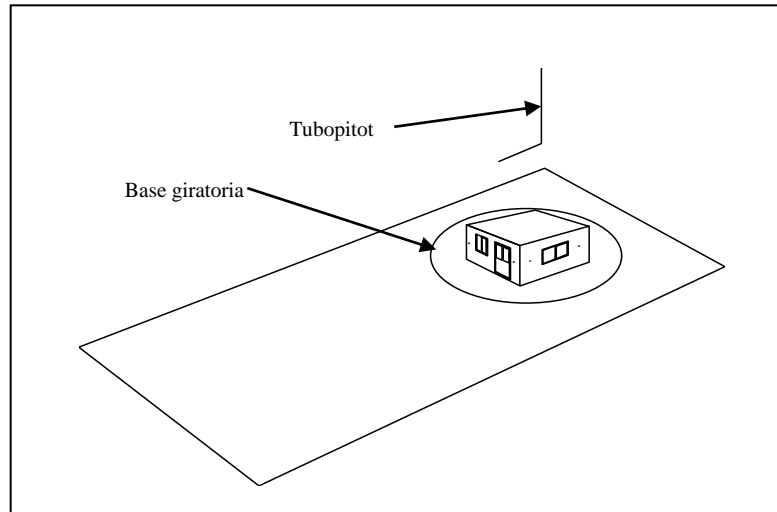


Figura 91. Modelo anterior sin tejado



**Figura 92.**Modelo anterior sin tejado

Accionar el túnel de viento a la máxima velocidad (compuertas totalmente abiertas) y registrar los resultados en las tablas siguientes, moviendo la maqueta a las cuatro posiciones del eje de referencia con respecto del viento:

0°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

90°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

180°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

270°

Toma de presión	Presión local mmH2O	Presión total mmH2O	Presión estática mmH2O	Cp
1				
2				
3				
4				
5				

### 5.- Resumen de resultados

Resumir los resultados en la siguiente tabla:

Toma de presión	0° Cp	90° Cp	180° Cp	270° Cp
1				
2				
3				
4				
5				



# Práctica 11

## Optimización de ventilación de una vivienda unifamiliar

### Objetivo:

Mejorar la forma en la que una vivienda puede ventilarse

### Equipo:

- TuboPitot
- Manómetro de columnas
- Maqueta preparada con tomas de presión

### Consideraciones teóricas

Muchos problemas referentes a la temperatura interior de una vivienda se deben a una mala ventilación. Esta puede llegar a ser buena si se conocen los elementos que favorecen o se oponen al flujo de aire. La importancia de la renovación del volumen de aire en una vivienda es insoslayable. Importancia presente no solo en viviendas, también en la industria teniendo foro con presencia humana, maquinaria o equipo electrónico.

La reducción de costos se puede enfocar en disminuir el uso de aire acondicionado y encontrar un modo de ventilación natural y económico.

### Desarrollo

#### 1.- Determinación de las condiciones ambientales.

a) Se deberán de efectuar lecturas en los instrumentos barómetro, termómetro e higrómetro antes de iniciar y al finalizar los experimentos, anotando los valores en la tabla siguiente:

	Iniciales	Finales	Promedio
Temperatura ambiente (°C)			
Presión barométrica (mmHg)			
Humedad Relativa (%)			

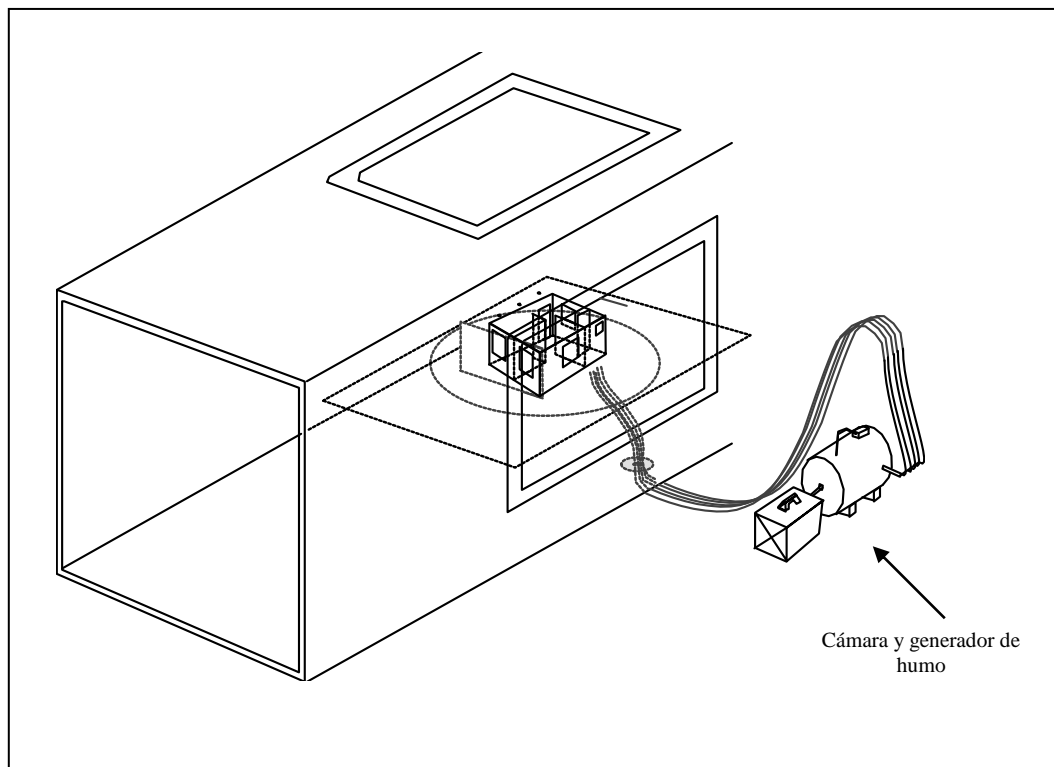


## Densidad del aire en el laboratorio:

$$\rho_z = \underline{\hspace{10em}}$$

## 2.- Visualización de flujo de la renovación de aire en el interior de una vivienda unifamiliar.

Colocar en la sección de prueba del túnel de viento a la maqueta semejante a la utilizada en la práctica 7, pero con la diferencia de que en esta ocasión las tomas de presión serán la salida del humo que se inyectará en el interior de la maqueta, además de que la maqueta debe de estar hecha totalmente de un material transparente como el "plexiglass" o acrílico.



**Figura 93.** Visualización de flujo al interior de una vivienda

Primero accionar el generador de humo y ya que se tenga la maqueta completamente llena proceder a accionar el túnel de viento a una velocidad baja y medir el tiempo en el que el humo tarda en abandonar completamente la maqueta.

Registrar el tiempo en la tabla siguiente:

Condición inicial de la maqueta	Tiempo de dispersión del humo
Sin ventilas	

### 3.- Análisis de la visualización con humo.

En función de lo observado mediante la inyección del humo y de los resultados de la distribución de presión de la práctica 7 evaluar lo siguiente:

- 1.-¿En donde el humo tarda más tiempo en dispersarse?
- 2.-¿Qué valor de  $C_p$  se tiene en ese punto en comparación con los demás?
- 3.-¿Hacia que parte de la vivienda tiende a salir el humo?
- 4.-¿En que lugares de la vivienda es conveniente colocar ventilas?
- 5.-¿Las ventilas deben orientarse hacia exteriores?
- 6.-¿O conectando las estancias interiores?

### 4.- Optimización de la ventilación.

En función de lo evaluado en el punto anterior proceder a construir una maqueta semejante pero con las modificaciones propuestas para favorecer la ventilación interior y repetir el experimento de visualización con humo. Anotando en la tabla siguiente el tiempo de dispersión del humo:

Condición inicial de la maqueta	Tiempo de dispersión del humo
Con ventilas	

Además comentar las diferencias en el comportamiento del viento revelado por el humo

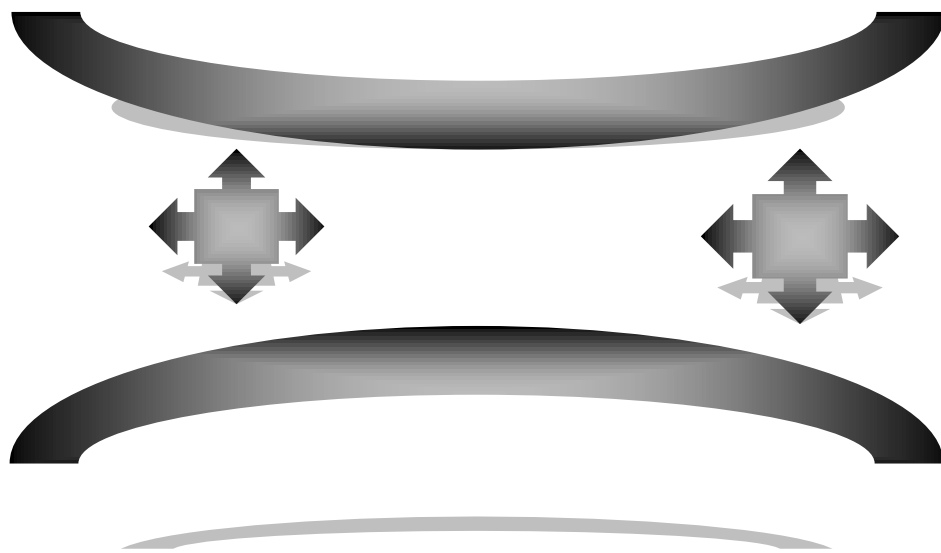
### 5.-Conclusiones

---

---

---

---



## Capítulo 7.

### Manual de Calibración y Operación del Túnel de Viento

# MANUAL DE CALIBRACIÓN Y OPERACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

## Características del flujo

Antes de comenzar a trabajar con el túnel de viento se deben de conocer las características del flujo que produce y si es necesario modificarlas. A continuación se conocerán cuales son esas características por medir y los instrumentos de medición necesarios.

### 1.- Medición de presión

La forma más simple de medir presión es utilizando un manómetro de columna líquida, el cual puede ser construido con un tubo de vidrio conectado a un depósito o un tubo en forma de "U". La lectura de la altura de la columna líquida (medida verticalmente desde un nivel de referencia inicial) nos da el valor de la presión según la fórmula siguiente:

$$P = \Delta h \times \gamma \times \text{sen}\beta \quad (16)$$

En donde:

$P$  = presión

$\Delta h$  = magnitud del desplazamiento del líquido manométrico

$\gamma$  = peso específico del líquido manométrico

$\beta$  = ángulo de inclinación de la columna líquida medido con respecto de la horizontal

Es importante notar que el sentido del desplazamiento del líquido manométrico da el signo de la presión, si el líquido asciende se tratará de una presión de succión<sup>21</sup> y la lectura se acompañará con un signo negativo, si por el contrario el líquido desciende será una presión de impacto y tendrá signo positivo.<sup>22</sup>

El líquido manométrico más comúnmente utilizado es el agua<sup>23</sup>, de preferencia destilada, a la que se le puede teñir para facilidad de lectura. Se pueden utilizar otros líquidos de menor densidad como alcohol isopropílico o aceite mineral especialmente si se desea medir presiones muy bajas. Para presiones elevadas se puede utilizar mercurio.

### 2.- Medición de velocidad

---

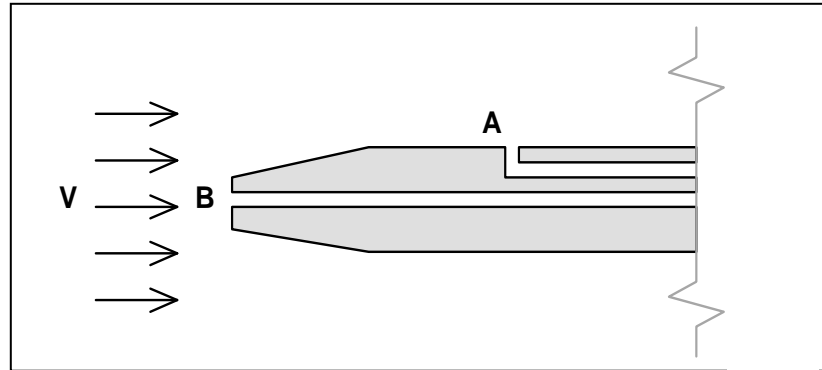
<sup>21</sup> A esta presión se le suele llamar incorrectamente "*presión de vacío*"

<sup>22</sup> Si bien la presión es una magnitud escalar, el uso del signo ayuda a conocer el efecto del flujo sobre del modelo.

<sup>23</sup> Una ventaja del uso del agua como líquido manométrico es que la medida en milímetros de la altura de la columna equivale numéricamente a la presión expresada en  $\text{kg/m}^2$  según se demuestra:

Para la presión dada por una altura igual a 1 mm se tiene que  $P=(=0.001\text{m})(1000\text{kg/m}^3)(\text{sen}90^\circ)=1\text{kg/m}^2$

El anemómetro más utilizado es el tubo pitot-estático. Es un instrumento que mide indirectamente la velocidad del viento mediante la medición de dos presiones, presión estática y presión total.



**Figura 94.** Anemómetro de tubo pitot-estático

El tubo pitot-estático tiene dos tomas de presión, la toma A sirve para que actúe en ella la presión estática  $P_E$  y en la toma B se percibe a la presión total  $P_T$ , conociendo el valor de la densidad del aire " $\rho$ " y por el teorema de Bernoulli<sup>24</sup> podemos obtener a la velocidad del aire mediante la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_T - P_E)}{\rho}} \quad (17)$$

Si se representa a la presión dinámica como "q" queda

$$V = \sqrt{\frac{2(q)}{\rho}} \quad (15)$$

Este anemómetro es fácil de construir y de usar, pero hay que tener en cuenta que produce errores<sup>25</sup> en las lecturas bajo las siguientes condiciones:

- Operación en muy bajas velocidades (números de Reynolds menores que 100)

<sup>24</sup> Este teorema establece que la presión total que ejerce un flujo de fluido se compone de la suma de dos presiones: presión estática y presión dinámica ( $P_T = P_E + q$ ).

<sup>25</sup> Véase "Low Speed Wind Tunnel Testing" / W.H. Rae, A. Pope / John Wiley & Sons.

- Operación en la cercanía de una pared (distancia menor a dos veces el diámetro del tubo)
- Turbulencia generada por la punta y/o el vástago del tubo
- Desalineación entre el eje del tubo y la dirección del viento (ángulos mayores que 5 grados).

El tubo pitot-estático mide velocidad puntual, para poder conocer el campo de velocidades es necesario colocar al tubo pitot-estático en diversos puntos, usualmente en un plano vertical de la sección de prueba del túnel.

### 3.- Medición de condiciones ambientales

Las condiciones ambientales se determinan para conocer la **densidad del aire**, la cual está afectada por la temperatura ambiente, la humedad y la presión atmosférica.

#### -Medición de la temperatura ambiente

La forma más económica y simple de medir la temperatura ambiente es el utilizar los llamados termómetros de "*líquido en vidrio*", aunque existen muchas otras opciones como los termómetros electrónicos o los de elemento bimetálico. Es conveniente que el termómetro se encuentre lo más cerca de la sección de prueba, o de ser posible en su interior en un punto en donde no perturbe al flujo. Para lograr esto los termómetros electrónicos representan una muy buena alternativa al contar con un elemento sensor (termistor) que es de reducidas dimensiones y puede colocarse en un sitio conveniente.

#### -Medición de la humedad relativa

La humedad relativa se puede medir directamente con un instrumento llamado higrómetro, en su defecto se puede utilizar un psicrómetro en combinación con una carta psicrométrica.

#### -Medición de la presión atmosférica

Esta se mide utilizando un barómetro que puede ser del tipo fortín o tipo aneroide.

#### -Obtención de la densidad del aire

El aire es una mezcla de gases, uno de ellos es el vapor de agua, la cantidad de éste puede variar en forma más notable que los otros gases, por lo que su influencia en la densidad del aire es mayor.

A continuación se muestra la deducción de la ecuación para obtener la densidad del aire a partir de la temperatura, humedad y presión. La notación será la siguiente:

$P_A$ =presión del aire seco. Kg/m <sup>2</sup>	$\rho_A$ =densidad del aire seco. Kg/m <sup>3</sup>
$P_V$ =presión del vapor de agua. Kg/m <sup>2</sup>	$\rho_V$ =densidad del vapor de agua. Kg/m <sup>3</sup>
$P_Z$ =presión de la mezcla aire seco + vapor de agua.mmHg	$\rho_Z$ =densidad de la mezcla aire seco + vapor de agua.Utm/m <sup>3</sup>
$P_S$ =presión de saturación. Kg/m <sup>2</sup>	$R_A$ =constante específica para el aire seco.
$T$ =temperatura ambiente en unidades absolutas. °K	$R_V$ =constante específica para el vapor de agua

Las ecuaciones de estado para el aire seco y el vapor del agua son:

$$\begin{aligned} P_A &= \rho_A g R_A T \\ P_V &= \rho_V g R_V T \end{aligned} \quad (1)$$

La presión total de la mezcla aire-vapor de agua es igual a la suma de la presión parcial ejercida por el aire seco y el vapor de agua:

$$P_Z = P_A + P_V \quad (2)$$

De la misma manera, la densidad de la mezcla aire-vapor de agua es:

$$\rho_Z = \rho_A + \rho_V \quad (3)$$

Entonces despejando a la densidad de las ecuaciones 1 y sustituyendo 2 y 1 en ecuación 3 podemos obtener el valor de la densidad del aire en el laboratorio, esto es, la densidad de la mezcla aire seco mas vapor de agua:

$$\rho_Z = \frac{1}{g R_A T} \left[ P_Z - P_V \left( 1 - \frac{R_A}{R_V} \right) \right] \quad (4)$$

Los valores de  $R_A$  Y  $R_V$  son:

$$\begin{aligned} R_A &= 29.256 \text{ m}^2/\text{°K} \\ R_V &= 47.031 \text{ m}^2/\text{°K} \end{aligned}$$

Entonces para obtener la densidad del aire en el laboratorio podemos volver a escribir a la ecuación 4 como:

$$\rho_Z = \frac{1}{g R_A T} [P_Z - 0.3779 P_V] \quad (5)$$

La ecuación 5 nos permite conocer el valor de la **densidad del aire** a partir de:

-La temperatura ambiente en grados Kelvin. Este dato se obtiene de la lectura del termómetro colocado en el laboratorio o en la sección de prueba del túnel. (no olvide efectuar la conversión de unidades ya que la escala del termómetro normalmente está graduada en centígrados o grados Fahrenheit.).

-La presión atmosférica  $P_z$  en  $\text{kg/m}^2$ . Este dato se obtiene de la lectura del barómetro, la escala de este puede estar graduada en mm de Hg o en pulgadas de Hg por lo que también se deben de efectuar conversiones.

- La presión de vapor  $P_v$  en  $\text{kg/m}^2$ . Este dato se obtiene de la siguiente manera:

a) Se debe conocer el valor de la presión de saturación, que es el valor máximo de presión a la cual el aire puede mantener agua en estado gaseoso a una temperatura dada, su valor se puede calcular mediante la fórmula empírica:

$$P_s = 2.685 + 3.537 \times 10^{-3} (t)^{2.245} \quad (6)$$

(En donde  $P_s$  se obtiene en  $\text{lb/ft}^2$  y  $t$  debe estar en  $^{\circ}\text{F}$ )

b) Se mide el valor de la humedad relativa que indica el higrómetro<sup>26</sup> o bien el valor dado por la carta psicrométrica.

La humedad relativa<sup>27</sup> se define como el cociente que resulta de dividir la presión de vapor entre la presión de saturación:

$H_r = \frac{P_v}{P_s}$ , finalmente la presión de vapor se obtiene con:

$$P_v = H_r P_s \quad (7)$$

---

<sup>26</sup>Se acostumbra graduar la escala de los higrómetros en porcentaje, indicándolo con %**rH**, en este caso, simplemente se deberá de cambiar la lectura a su valor decimal, por ejemplo: 23% a 0.23.

<sup>27</sup>Algunas veces se expresa también como **rH** (relativehumidity).



Puesto que la humedad relativa es adimensional las unidades de la presión de vapor se obtienen de acuerdo a las unidades en que este la presión de saturación. Entonces si de la ecuación 6 se obtienen lb/ft<sup>2</sup>, la presión de vapor también se obtendrá en estas unidades al utilizar la ecuación 7, y se deberá de convertir a kg/m<sup>2</sup> para al utilizar la ecuación 5, o bien directamente convertir a kg/m<sup>2</sup> el valor de P<sub>s</sub> obtenido de la ecuación 6.

## Actividades de calibración

### 1.-Variación de la magnitud de la velocidad en la sección de prueba

Para conocer la variación en magnitud se elige un plano transversal de la sección de prueba en su parte media y se procede a registrar valores de presión dinámica utilizando el tubo Pitot, los valores obtenidos se pueden registrar en una tabla como la que se muestra a continuación:

*Tabla para el registro de la variación de la magnitud de la velocidad*

Coordenadas de la posición del tubo Pitot (medidas en cm, el origen coincide con el eje de la sección de prueba)	Presión total P <sub>T</sub> mmH <sub>2</sub> O	Presión estática P <sub>E</sub> mmH <sub>2</sub> O	Presión dinámica P <sub>T</sub> -P <sub>E</sub> mmH <sub>2</sub> O	Velocidad <sup>28</sup> $V = \sqrt{\frac{2(P_T - P_E)}{\rho}}$ m/s

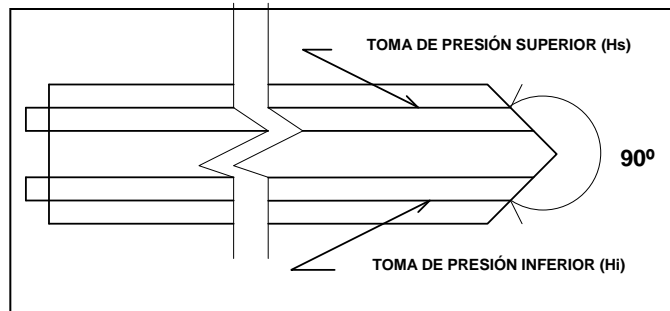
De los resultados de velocidad mostrados en la última columna se obtiene el promedio, y con esto se calcula la variación porcentual de cada uno de los valores registrados con respecto de la velocidad media.

### 2.-Variación de la dirección de la velocidad en la sección de prueba

Para conocer la variación en dirección se utiliza un instrumento llamado “guiñómetro<sup>29</sup>”, su construcción se describe con ayuda de la figura 95:

<sup>28</sup> Es importante saber que para utilizar esta ecuación se debe asegurar que las unidades pertenezcan a un solo sistema, por ejemplo si se mide la presión en kg/m<sup>2</sup> la densidad del aire debe expresarse en utm/m<sup>3</sup> (que es lo mismo que kgs<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>), o bien se puede medir la presión en Pascales (N/m<sup>2</sup>) y la densidad en kg/m<sup>3</sup>, ambas opciones darán m/s

<sup>29</sup> El movimiento de un objeto con respecto a su eje vertical se llama *guiñada*, como el movimiento que realiza una veleta al orientarse con respecto del viento.



**Figura 95.**Guiñómetro

Observando la figura vemos que si la dirección del viento coincide con el eje del guiñómetro entonces la toma de presión superior y la inferior registrarán la misma presión, si la dirección cambia una de las tomas registrará mayor presión que la otra.

Para poder utilizar este instrumento es necesario primero obtener una “curva de calibración”, esta se construye utilizando la tabla siguiente:

*Tabla para la obtención de la curva de calibración del guiñómetro*

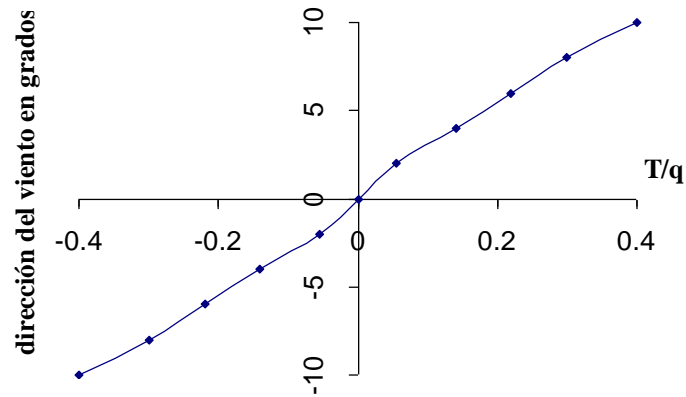
Dirección del viento	Hs mmH <sub>2</sub> O	Hi mmH <sub>2</sub> O	T=Hs-Hi mmH <sub>2</sub> O	T/q
-10°				
-9°				
-8°				
-7°				
-6°				
-5°				
-4°				
-3°				
-2°				
-1°				
0°				
1°				
2°				
3°				
4°				
5°				
6°				
7°				
8°				
9°				
10°				

Se coloca al guiñómetro en la sección de prueba y se ajusta de manera tal que la lectura de la toma superior y la inferior sean iguales y se registran estos valores en la fila correspondiente a 0°, posteriormente se ajusta la inclinación<sup>30</sup> del guiñómetro según los valores indicados en la primer columna (se sugiere de -10 a 10 grados con un incremento de 1 en 1) y se continúa registrando los valores de Hs y Hi, finalmente en la última columna se realiza un cociente T/q, en donde q se obtiene de la diferencia de la P<sub>T</sub> y P<sub>E</sub> registrada por el tubo Pitot.

<sup>30</sup> Se requiere que el guiñómetro se monte en un mecanismo de manera tal que pueda cambiar su inclinación,

Con los resultados de la tabla anterior se elabora una gráfica como la que se muestra a continuación:

Gráfica de la dirección del viento vs.  $T/q$

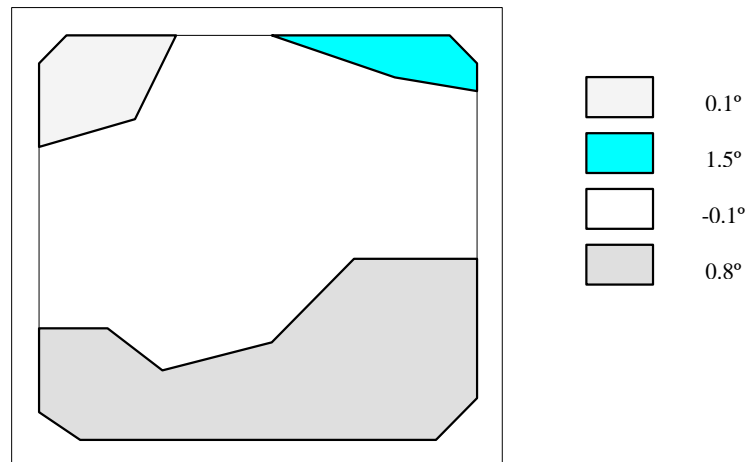


A continuación se coloca de nuevo al guiñómetro en la sección de prueba del túnel pero ahora en forma horizontal exclusivamente, procediendo a medir los valores de  $H_s$  y  $H_i$  y registrándolos en la tabla siguiente:

*Tabla para la determinación de la dirección del viento*

Coordenadas de la posición del guiñómetro (medidas en cm, el origen coincide con el eje de la sección de prueba)	$H_s$ mmH <sub>2</sub> O	$H_i$ mmH <sub>2</sub> O	$T=H_s-H_i$ mmH <sub>2</sub> O	$T/q$	Dirección del viento en grados

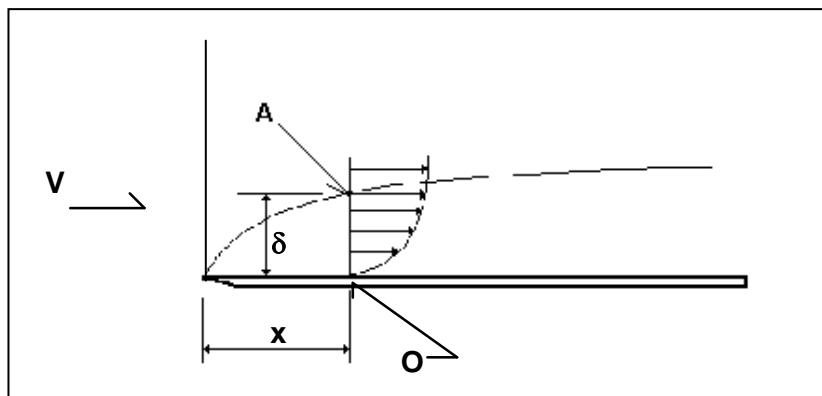
La última columna se obtiene con el uso de la gráfica anterior, se utiliza el valor de  $T/q$  para poder leer el valor de la dirección del viento en grados. Se puede construir un mapa del plano transversal de la sección de prueba en donde se indican zonas de igual variación angular (Fig. 96):



**Figura 96.** Plano transversal de la sección de prueba

### 3.-Obtención del perfil de velocidades en la cercanía de las paredes de la sección de prueba

En la sección de prueba el valor de la velocidad del viento comienza a disminuir en una región muy cercana a sus paredes, este efecto aumenta conforme aumenta la distancia desde la entrada de la sección:



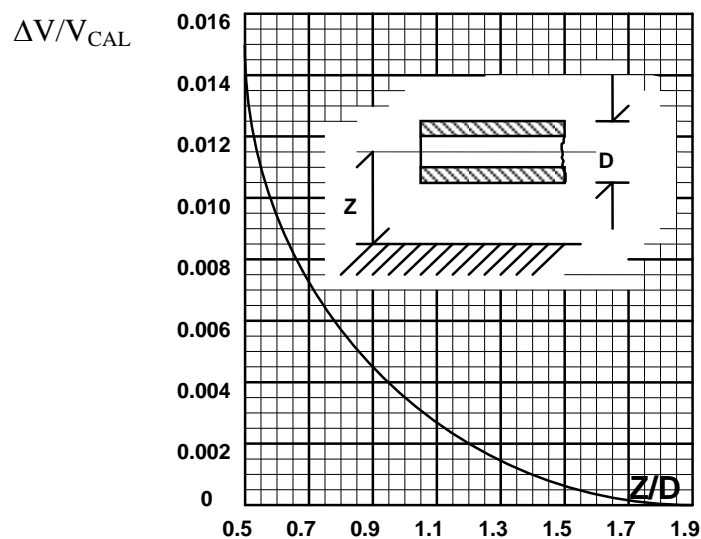
**Figura 97.** Disminución de velocidad del viento

En la figura 97 observamos que justo en la entrada de la sección de prueba la altura “□” del perfil de velocidades no existe, pero al incrementar la distancia “x” el perfil comienza a crecer. En el punto **A** el punto a la velocidad vale 0.99V, mientras que en el punto **O** la velocidad es nula. A la región que describen todos los perfiles de velocidades a las distancias “x” se le llama *capa límite*<sup>31</sup>.

Para poder conocer este perfil de velocidades a una distancia “x” es necesario utilizar el tubo pitot según lo indicado en la tabla siguiente:

X= cm	P <sub>T</sub> mmH <sub>2</sub> O	P <sub>E</sub> mmH <sub>2</sub> O	q mmH <sub>2</sub> O	V m/s
Distancia desde el piso hasta el tubo pitot mm				

De ser necesario, la velocidad obtenida en la última columna debe de corregirse por cercanía a la pared, esta corrección es necesaria cuando la distancia desde el piso hasta el tubo Pitot es menor o igual a 1.9 veces el diámetro del tubo, se debe de utilizar la gráfica siguiente<sup>32</sup>:



<sup>31</sup>Véase “Introduction to Fluid Mechanics” / Fox & McDonald /John Wiley & Sons.

<sup>32</sup>Véase página 104 “Low Speed Wind Tunnel Testing” / W.H. Rae, A. Pope /John Wiley & Sons

La velocidad corregida  $V_{CORR}$  se obtendrá a partir de la velocidad calculada  $V_{CAL}$  según las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned}
 V_{CORR} &= V_{CAL} + \Delta V \\
 V_{CORR} &= V_{CAL} + \frac{\Delta V}{V_{CAL}} V_{CAL} \\
 V_{CORR} &= V_{CAL} \left( 1 + \frac{\Delta V}{V_{CAL}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

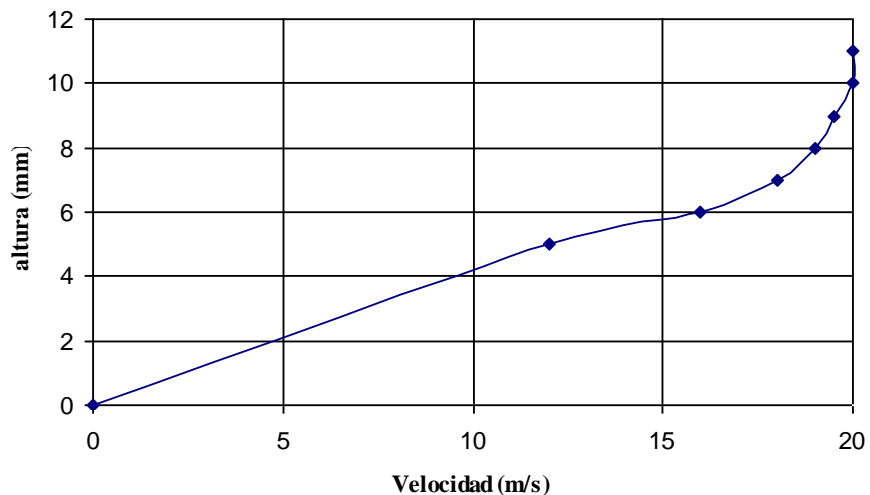
Por ejemplo, supóngase que se calcula una velocidad igual a 12.5 m/s, y que el diámetro del tubo pitot es de 4mm, y se encuentra a una altura de 6mm, entonces  $Z/D=1.5$

Utilizando la gráfica podemos leer  $\square V/V_{CAL}=0.0006$ , y sustituyendo en la última ecuación tenemos:

$$V_{CORR}=12.5(1+0.0005)=12.5075\text{m/s}$$

Finalmente se pueden elaborar gráficas en donde se aprecie le perfil de velocidades a la distancia “x” en cuestión:

Gráfica del perfil de velocidades a una distancia “x” de la entrada a la sección de prueba



## Conclusiones de las Actividades de Calibración

1.- Se debe de verificar el correcto nivel horizontal en dos ejes del túnel. Para esto se debe utilizar un nivel de burbuja tanto para corroborar la posición de la sección de prueba como la posición del tubo pitot y del guiñómetro

2.- Se debe verificar el correcto nivel horizontal del manómetro, se recomienda utilizar un nivel de burbuja de ojo de pescado. Además se debe constatar la correcta conexión entre las mangueras del manómetro y el tubo pitot o el guiñómetro.

3.- Se deberán medir las condiciones ambientales (presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad) al inicio y al final de las actividades de calibración, y con el promedio de estos valores se calculará la densidad para poder obtener la velocidad del viento.

4.- El resultado de la medición de la variación de la velocidad tanto en su magnitud como en su dirección sirve para poder seleccionar la malla o mallas a la entrada del túnel para poder depurar al flujo, una vez que se han colocado tales mallas es conveniente recalibrar al túnel para la comparación de resultados.

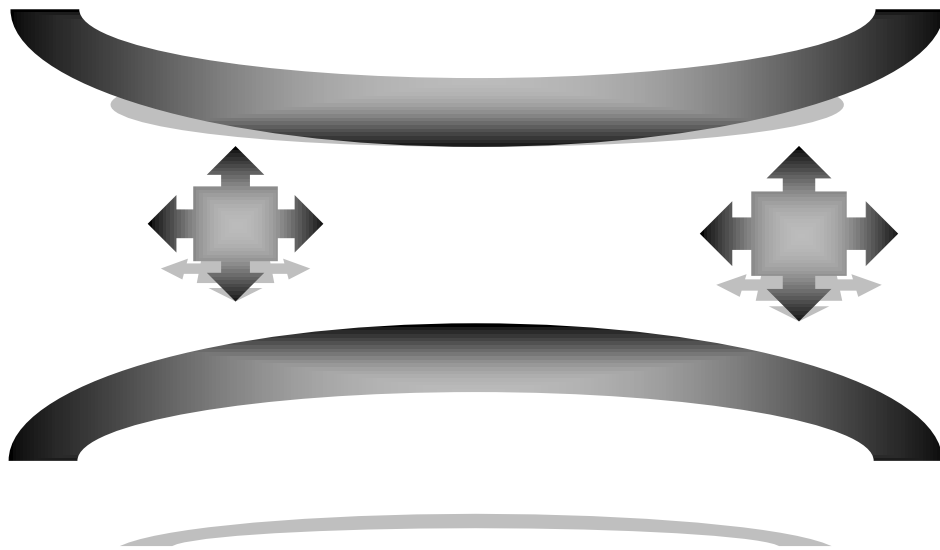
5.- Es conveniente trabajar con tubos Pitot lo más delgados posibles, ya que éstos son los que afectan al flujo en menor medida y permiten colocarlos muy cerca de las paredes del túnel para obtener un perfil de velocidades más exacto.

6.- Es recomendable que periódicamente se efectúen pruebas de calibración del túnel para verificar las características del flujo. Pueden existir modificaciones en éstas debido a ligeros cambios en la geometría del túnel así como desalineamiento de sus partes.

7.- Durante las actividades de calibración se debe de impedir que existan objetos o personas que obstruyan la entrada y la salida del túnel. Particularmente el túnel es muy sensible ante las obstrucciones en la descarga.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> Si se debe de cambiar la posición del túnel por razones de falta de espacio o colocación de otros equipos, siempre se le deberá de dar preferencia de espacio a la descarga del túnel, como regla general podemos decir que por lo menos debe de existir una distancia igual al diámetro de un círculo que circunscriba a la descarga al objeto más próximo.



**Conclusiones.**



## **Conclusiones**

### **Capítulo II Túnel de Viento**

El túnel de viento resulta un medio indispensable para la verificación de los modelos del comportamiento del flujo alrededor o en el interior de las edificaciones.

Su configuración y características están en función de factores como:

- a) Objeto de su uso. El túnel de viento puede ser utilizado con fines académicos, didácticos o de investigación.
- b) Tiempo de uso. El conocer la utilización en horas semanales permite tomar decisiones en lo que respecta al tamaño de la sección de prueba, tipo de motor propulsor y en sus dimensiones generales
- c) Área de estudio. El túnel de viento puede ser tan especializado o general según se requiera. Podemos tener túneles de viento cuyo uso se restringe a visualización de flujo, otros pueden ser exclusivamente para estudio y simulación de la capa límite terrestre, o bien se puede tener un túnel multipropósito
- d) Espacio disponible. Se puede tener como regla general que la longitud total del túnel de viento es de 7 a 10 veces el ancho de su sección de prueba. Adicional a esto se debe de considerar que la descarga como la admisión del aire debe de estar a por lo menos un ancho de la sección de prueba con respecto a cualquier pared u obstáculo alrededor.

### **Capítulo III Túnel de Viento y Arquitectura Bioclimática**

El viento es uno de los elementos principales para poder diseñar una edificación con características bioclimáticas favorables. El túnel de viento permite visualizar y cuantificar a los fenómenos eólicos que son críticos al momento de tomar decisiones en la elección del tipo y el dimensionado de partes como puertas, ventanas, ventilas, chimeneas etc. También permite conocer las influencias del entorno de la edificación sobre las corrientes de viento externas e internas; características del entorno como la orografía aledaña, la vegetación circundante y edificaciones vecinas.

Por lo anterior, mediante el uso del túnel de viento, es posible recrear y modificar los posibles entornos y combinación de orientaciones de la vivienda según los vientos predominantes y decidir la posición de la edificación a barlovento y sotavento. La experimentación en el túnel de viento permite ahorrar recursos y reducir la improvisación de soluciones una vez construida la edificación.

Tratándose de edificaciones ya construidas, por medio de estudios en túnel de viento se pueden obtener soluciones altamente eficientes que permitan elevar la calidad de las propiedades bioclimáticas eólicas del entorno, además de definir las modificaciones en la geometría de los elementos de las viviendas o edificaciones en cuestión.

## **Capítulo IV Visualización de Flujo**

Previo a todo estudio cuantitativo en túnel de viento, es necesario realizar un estudio cualitativo. Este estudio es poder conocer el camino que recorren las partículas que forman al aire alrededor o en el interior de las edificaciones. Tal estudio permite determinar zonas críticas en donde el flujo tiene características peculiares, como cambio de dirección, vorticidad, estancamiento, turbulencia etc.

El objeto de la visualización de flujo no solo radica en el acto contemplativo (de gran valor dado que permite corroborar las ideas intuitivas preconcebidas o bien corregirlas), también se tiene que una vez observadas las características de las corrientes de viento locales, es posible determinar el tipo de instrumentación por utilizar en algún estudio cuantitativo, definiendo también la forma en la que el modelo podrá ser habilitado con tomas de presión o algún tipo de sensor adecuado a las variables por medir.

Finalmente se puede indicar que los estudios de visualización de flujo son muy valiosos debido a su naturaleza descriptiva. La complejidad de un fenómeno se puede comprender si se puede ver de manera activa, no es necesario desarrollar complicadas ecuaciones de líneas de corriente, basta con tener un adecuado registro fotográfico o videográfico, pudiendo presentarse este material a todo tipo de público.

## **Capítulo V Acondicionamiento de la Calidad de Flujo en la Sección de Prueba**

Las propiedades del viento que transita en la sección de prueba del túnel de viento son modificables. Es importante conocer las características del flujo que debe de bañar al modelo para poder garantizar la semejanza con respecto de las condiciones reales. El éxito o fracaso de la experimentación depende de la fidelidad del flujo en el interior de la sección de prueba en comparación con el flujo real.

Lograr acondicionar al flujo no es tarea fácil. Se requiere de paciencia, metodología, medición y verificación de las mediciones para poder asegurar la veracidad y repetibilidad de las cifras obtenidas. En ocasiones es necesario el uso de parámetros adimensionales como el número de Reynolds o el coeficiente de presión para tener las condiciones cinemáticas semejantes a las del flujo que se desea imitar.

Para lograr lo anterior, es necesario colocar a la entrada de la sección de prueba diversos elementos geométricos que en la mayor de las veces obedecen a reglas empíricas, mismas que se aplican exclusivamente a las propiedades del túnel de viento en donde se llevan a cabo las pruebas. No obstante esto en ningún momento representa una pérdida de validez universal de los resultados. Simplemente se trata de elementos requeridos por el túnel de viento para poder imitar a las corrientes de viento en cuestión.

## **Capítulo VI Manual de Pruebas para el Túnel de Viento**

Para todo túnel de viento existen ensayos o pruebas típicas. Mismas que tienen un alto valor didáctico, además de que capacitan al usuario del túnel en el manejo del propio túnel y de los instrumentos de medición necesarios en cada ensayo.

La recopilación aquí presentada es solamente un ejemplo de lo que se puede realizar. Son pruebas de carácter general. Sin embargo se debe de tener en cuenta que manteniendo un espíritu académico se pueden generar pruebas específicas para alguna asignatura de Arquitectura o alguna disciplina relacionada. Se puede implementar un grupo de prácticas de túnel de viento según los requerimientos de las materias de los planes de estudio tanto de nivel licenciatura como de posgrado.

## **Capítulo VII Elaboración de un Manual de Calibración y Operación del Túnel de Viento**

Toda máquina requiere de un manual de operación. Tanto para el neófito como para el usuario experimentado es importante contar con un documento de consulta en el que se sinteticen las propiedades, rangos de operación, precauciones y seguridad, el caso del túnel de viento no es la excepción. Además este documento sirve como guía y referente obligado al momento de generar nuevas prácticas de laboratorio o al momento de diseñar un experimento de aplicación específica.

## Glosario

**Anemómetro.** Se llama así a todo instrumento medidor de la velocidad del viento

**Barlovento.** Dirección de donde viene el viento, opuesta al sotavento.

**Barómetro.** Manómetro destinado exclusivamente a la medición de la presión atmosférica.

**Corrientes de convección.** Son aquellas que se generan por diferencia de temperatura en las capas de un fluido.

**Flujo Laminar.** Se presenta cuando es posible identificar la trayectoria que siguen las partículas fluidas.

**Flujo Turbulento.** Sucede cuando no es posible definir la trayectoria de las partículas que forman al fluido.

**Gradiente de velocidades.** Se llama así a la variación de la velocidad con respecto de la altura.

**Línea de corriente.** Es aquella que en un instante dado es tangente al vector velocidad en todo punto.

**Línea de traza.** Es el lugar geométrico de las partículas que en instantes sucesivos pasaron por un punto dado.

**Línea fluida.** Es un conjunto de partículas fluidas que en un instante dado forman una línea.

**Manómetro.** Se llama así a todo instrumento medidor de la presión de un fluido

**Senda.** Es el camino seguido por una partícula fluida

**SLR.** Siglas de “Single Lens Reflex”.

**Sotavento.** Dirección hacia donde va el viento.

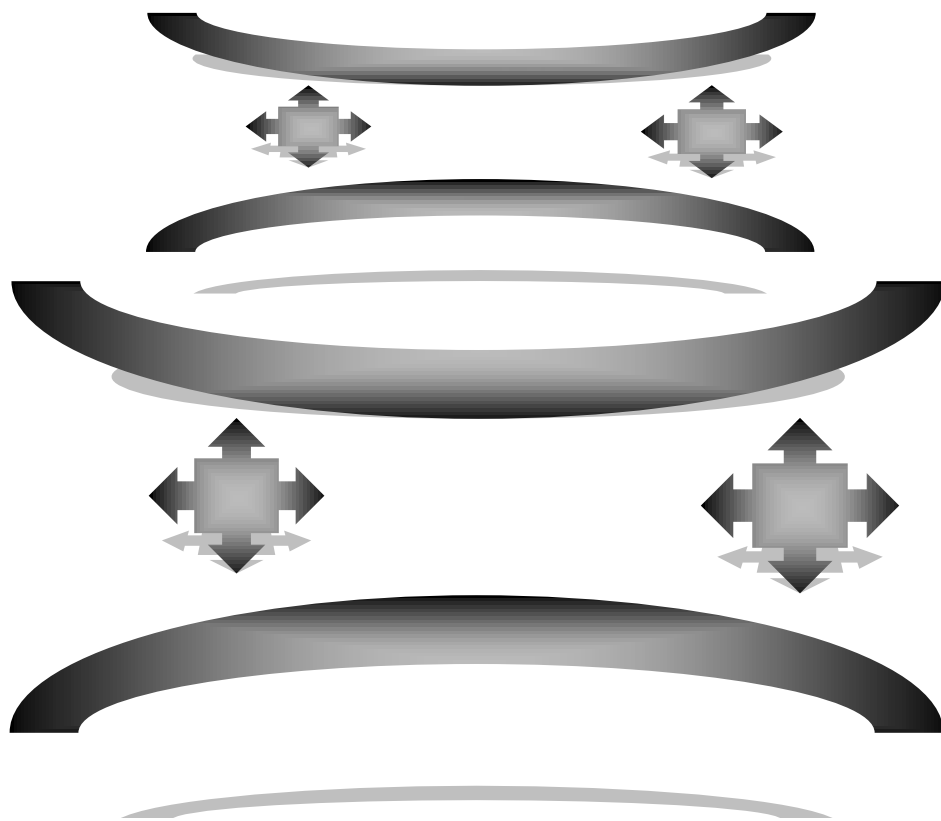
**Stack.** Anglismo que se utiliza para indicar un efecto de apilamiento del flujo generando una inversión en el sentido de la corriente por consecuencia de la diferencia de temperaturas y presiones.

**UTM.** Siglas de “unidad técnica de masa”. Unidad perteneciente al sistema métrico técnico equivalente a  $1 \text{ kgs}^2/\text{m}$ .

## Bibliografía

1. Alcántara L. (2005).Diseño y Construcción de un túnel de viento bidimensional Subsónico de Circuito Abierto por inyección.Universidad de Colima.
2. Anderson, J (1990) Fundamentals of Aerodynamics (McGraw Hill)
3. Autores varios (1983) El libro del clima (H. Blume, Madrid)
4. Autores varios (1986) Proyecto, clima y arquitectura (G. G, México)
5. Autores varios (1998) Las energías renovables en España (IDAE, Madrid)
6. Brown, G. Z. Sol, Luz y Viento (Ed. Trillas)
7. Deffis Caso Armando. Arquitectura Ecológica Tropical (Ed. Árbol)
8. Duque J.(2005)Túnel de Viento Virtual en aplicaciones aerodinámicas.Universidad EAFIT, Medellín ,Colombia.
9. Fernández A. (1989) Sol y Viento, de la Investigación al Diseño. Buenos Aires, Argentina.
- 10.Fernández, B. (1999) Introducción a la Mecánica de Fluidos ( Alfa omega, México)
- 11.Feustel, H. u.a.: Fundamentals of the Multizone Air Flow Model – COMIS. International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, published by Annex V: The Air Infiltration and Ventilation Centre in May 1992
- Fuentes, V. (2004) Ventilación Natural, Cálculos Básicos para Arquitectura (U.A.M.-A, México)
- 12.García, J. R. Fuentes, V. (1995) Viento y Arquitectura (Trillas, México)
- 13.García, J. R. Fuentes, V. (2000) Arquitectura y Medio ambiente en la Ciudad de México: hacia un desarrollo sustentable del Hábitat construido para el nuevo milenio (Publicaciones, UAM).
- 14.García, J. R. Fuentes, V. (1985) Arquitectura Bioclimática y energíasolar : viento y Arquitectura. (Publicaciones UAM).

15. García, J. R. (1999) Arquitectura, medio ambiente y desarrollo sustentable: un nuevo enfoque para un nuevo milenio. (Publicaciones UAM).
16. García, J. R. (2000) Hacia una arquitectura ecológica y sustentable. (Publicaciones UAM).
17. Garzón B. (2007) Arquitectura Bioclimática. Nobuko, Buenos Aires.
18. Izard, J. L (1983) Arquitectura Bioclimática (Ed. Gustavo Gili, México)
19. Merzkirch Wolfgang (1974) Flow visualization (Ed. Academic Press)
20. Olgyay, V (1998) Arquitectura y clima (Ed. Gustavo Gili, Barcelona)
21. Pankhurst, R.C. (1977) The measurement of air flow (Pergamon press)
22. Pope/Rae (1985) Low Speed Wind Tunnel Testing (Ed Wiley)
23. Serra Florensa R,; CochRoura, H (1995) Arquitectura y energía natural, UPC, Barcelona
24. Serra Florensa, R, (1999) Arquitectura y climas (Ed. Gustavo Gili, Barcelona)
25. White F.M. (1992) Mecánica de Fluidos (Ed. Mc Graw Hill)



**Anexos.**

## **Índice de Anexos**

### **Anexo 1**

**Utilización de los Túneles de Viento a Nivel Mundial**

### **Anexo 2**

**Fotografíasde instrumentación**

### **Anexo 3**

**Fotografías de del túnel de viento del laboratorio de bioclimática en la UAM  
Azcapotzalco**

### **Anexo 4**

**Sistemas de unidades, Sistema internacional de medidas**



## Anexo 1

### Utilización de los Túneles de Viento a Nivel Mundial

A continuación se incluye una recopilación de las empresas y universidades en el extranjero que utilizan túneles de viento:

Empresas:

Nombre: CermakPeterkaPetersen, Inc.

Dirección:

1415 Blue Spruce Drive, Suite 3

Fort Collins, CO 80524 USA

Telephone - (970) 221-3371

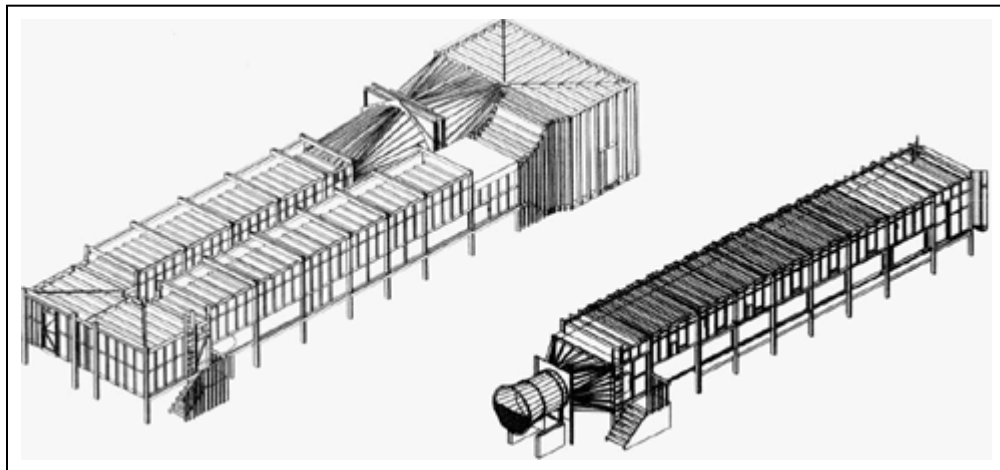
FAX - (970) 221-3124

[www.cppwind.com](http://www.cppwind.com)

Servicios:

- Medición de la distribución de presión en paredes y techos
- Comodidad de los peatones
- Requerimientos de calidad del aire en laboratorios y talleres
- Análisis medioambientales y meteorológicos alrededor de edificaciones
- Respuesta dinámica en edificaciones y estructuras

Equipo:



**Figura 98.** Túneles de viento simuladores de capa límite atmosférica.

Nombre: Rowan Williams Davies & Irwin, Inc.

Dirección:

Rowan Williams Davies & Irwin Inc.

650 Woodlawn Road, West

Guelph, Ontario

Canada N1K 1B8

Tel: (519) 823-1311

Fax: (519) 823-1316

[www.rwdi.com](http://www.rwdi.com)

Servicios:

- Medición de cargas por viento
- Vibraciones inducidas por viento
- Calidad del aire
- Ventilación
- Estudio de microclimas
- Comodidad de los peatones
- 

Equipo (Fig. 15):

- Túneles de viento simuladores de capa límite
- Computadoras para dinámica de fluidos computacional



**Figura 97.** Túnel de viento simulador de capa límite

Nombre: Flow Science Limited Goldstein Research Laboratory

Dirección:

BartonAirport

Eccles

Manchester UK

M30 7RU

Tel / Fax : 0161 787 8749

[www.flowscience.co.uk](http://www.flowscience.co.uk)

Servicios:

- Medición de cargas por viento
- Optimización de sistemas de ventilación
- Efectos de la topografía en la dispersión de contaminantes
- Comodidad de los peatones y vientos locales

Equipo:



**Figura 99.** Túnel de viento simulador de capa límite

Sección de prueba de 4.57 m x 1.52 m x 9.14 m  
Disco central de base para maquetas de 4.4 m de diámetro  
Velocidad máxima 20 m/s

Nombre: Von KarmanInstitute

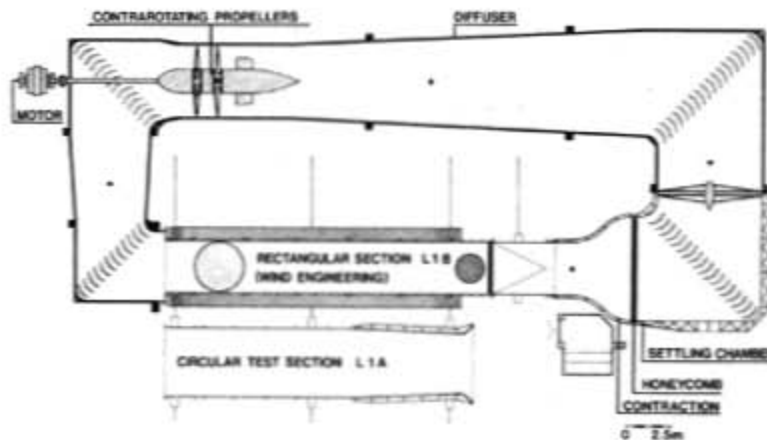
Dirección:

Ch. de Waterloo, 72  
1640-Rhode-St-Genese  
Belgium  
[www.vki.ac.be](http://www.vki.ac.be)

Servicios:

- Estudio de microclimas
- Cargas de viento en estructuras
- Dispersión de contaminantes
- Energía eólica

Equipo:



**Figura 100.** Túnel de viento de circuito cerrado

Sección de prueba de 3mx2m  
 Velocidad de 2 a 50 m/s

Nombre: Colorado StateUniversity

Dirección:

WindEngineering and FluidsLaboratory  
 EngineeringResearch Center  
 Colorado StateUniversity  
 Fort Collins, CO 80523, U.S.A.  
[www.windlab.colostate.edu](http://www.windlab.colostate.edu)

Equipo:

Características	Túnel de viento para estudios meteorológicos	Túnel de viento para aerodinámica industrial	Túnel de viento para estudios del medio ambiente
Longitud de la sección de prueba	88 ft	60 ft	60 ft
Área de la sección se prueba	6 ft x 6 ft	6 ft x 6ft	12 ft x 8 ft
Relación de contracción	9:1	4:1	3.35:1
Potencia del motor	400 hp	75 hp	50 hp
Velocidad	0 a 120 ft/s	0 a 80 ft/s	0 a 40 ft/s

Tabla 1 Características de los túneles de viento según su uso

Nombre: Oxford University

Dirección: Wind Engineering Research Group,  
Department of Engineering Science,  
Parks Road,  
Oxford.  
OX1 3PJ  
[www.eng.ox.ac.uk](http://www.eng.ox.ac.uk)

Equipo:

Túnel de viento de circuito abierto  
Sección de prueba de 2m x 4m.  
Velocidad de 0.3 a 25 m/s  
Cuenta con dos motores de 350 kW c/u

## Anexo 2

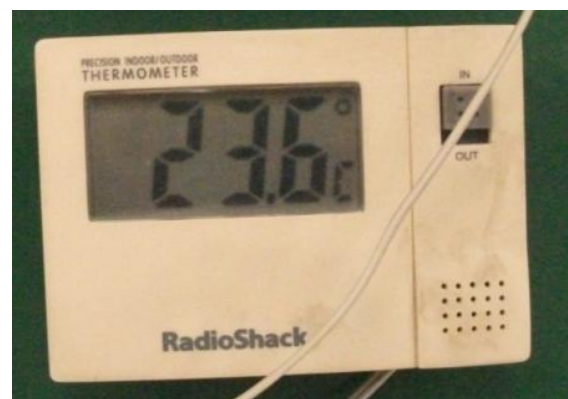
### Instrumentación en el laboratorio de aerodinámica de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politecnico Nacional



**Figura 101.** Estación del Laboratorio de Aeronáutica en Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica IPN Ticoman



**Figura 102.** Higrómetro / Termómetro



**Figura 103.** Termómetro digital



**Figura 104.** Manómetro de columna



**Figura 105.** Manómetro Digital



**Figura 106.** Anemómetro Digital

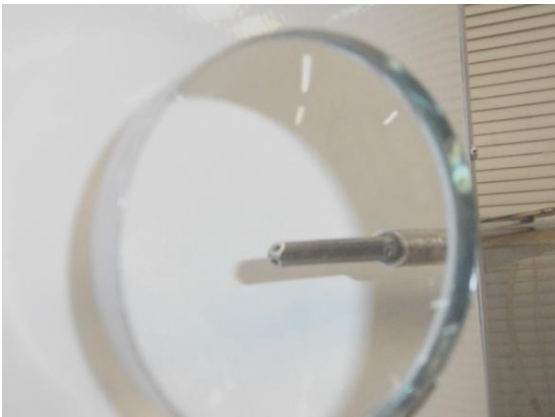




**Figura 107.** TuboPitot



**Figura 108.** Anemómetro



**Figura 109.** Guiñómetro



**Figura 110.** Complemento de Guiñómetro

### Anexo 3

### Fotografías del túnel de viento del laboratorio de bioclimática en la UAM-A

#### Ubicación Anterior



**Figura 111.** Túnel de Viento en ubicación anterior



**Figura 112.** Túnel de Viento en ubicación anterior

## Ubicación Actual



**Figura 113.** Túnel de Viento en su nueva ubicación



**Figura 114.** Adecuación en salida de Túnel de Viento



**Figura 115.** Colocación de chaflanes en interior de Túnel de Viento



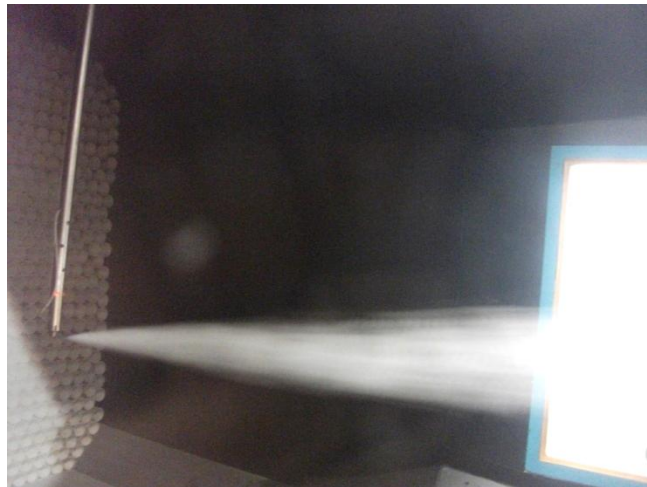
**Figura 116.** Manómetro Digital



**Figura 117.** Sistema de Inyección de Humo

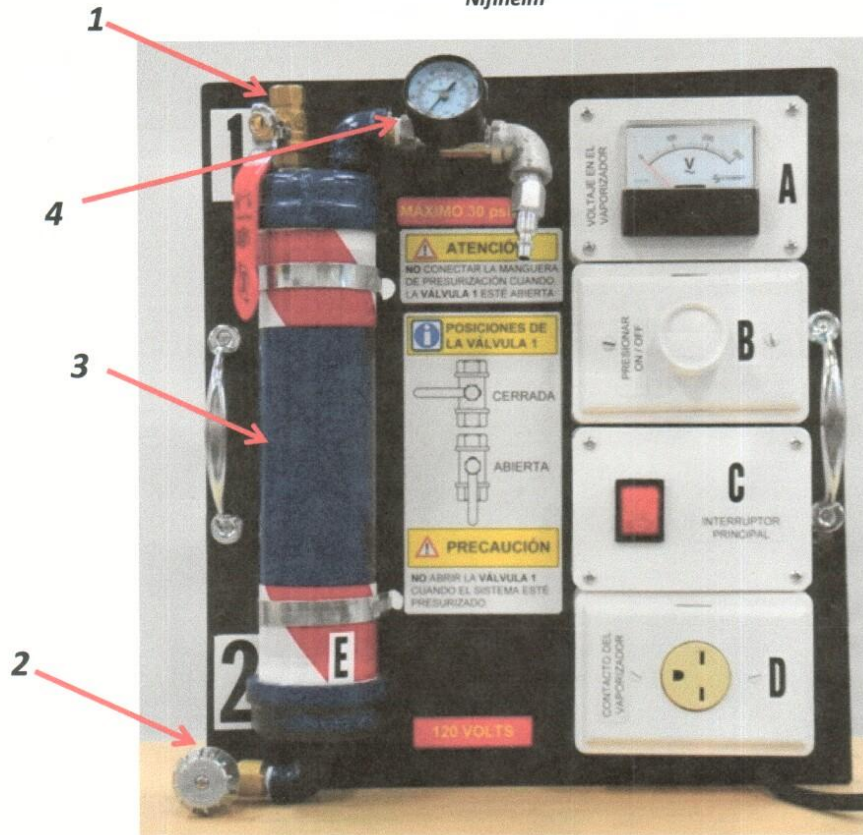


**Figura 118.** Sistema de Inyección de Humo



**Figura 119.** Inyección de Humo

**Sistema de inyección de humo de alta velocidad  
Niflheim**



- |   |   |
|---|---|
| 1.- Válvula de llenado de líquido               | A Voltaje aplicado a la resistencia del vaporizador |
| 2.- Válvula dosificadora de líquido             | B Control de voltaje aplicado (control de calor)    |
| 3.- Recipiente a presión contenedor del líquido | C Interruptor principal                             |
| 4.- Regulador de presión                        | D Contacto de la sonda                              |

**Consideraciones Generales**

- 1.- Es importante verificar que fluya líquido hacia la sonda antes de encender a la resistencia eléctrica (acción de la perilla del control de temperatura)
- 2.- **No conectar la sonda a un contacto de 110 V**, solamente se debe de conectar al módulo de control "D"
- 3.- No se deben de rebasar las **30 PSI** en el manómetro del regulador
- 4.- Se debe de tener un balance adecuado entre caudal del líquido y temperatura de la sonda, la proporción correcta varía según las condiciones de temperatura ambiente, humedad y la velocidad del viento en la sección de prueba del túnel, por lo que se deben de hacer varios ensayos hasta lograr el desempeño deseado
- 5.- Se debe de usar como líquido generador de humo propilenglicol al 90% o aceite mineral blanco
- 6.- A terminar de utilizar la sonda, es recomendable dejar fluir un poco de líquido a través del inyector para ayudar al enfriamiento, por esto se debe tener la previsión de contar con un recipiente, el líquido recibido se puede volver a utilizar
- 7.- La tensión de alimentación es de 120 V

**Figura 120.** Sistema de Inyección de Humo

## Anexo 4

### Sistemas de unidades.

Existen dos grandes clasificaciones de sistemas de unidades:

- a) Sistema absoluto.
- b) Sistema gravitacional o técnico terrestre.

1. La diferencia entre estas dos clasificaciones radica en las **unidades fundamentales**<sup>34</sup>. En el sistema absoluto las unidades fundamentales son: longitud, masa y tiempo. En el sistema gravitacional las unidades fundamentales son: longitud, fuerza y tiempo.

Según lo anterior, mientras que en el sistema absoluto la masa es una unidad fundamental y la fuerza es una **unidad derivada**<sup>35</sup>. En el sistema gravitacional la masa es unidad derivada, quedando la fuerza como unidad fundamental.

En la tabla siguiente se pueden ver como se desarrollan las unidades derivadas a partir de las fundamentales en ambos sistemas de unidades:

Sistema absoluto			Sistema gravitacional o técnico terrestre		
Unidad fundamental	Sistema métrico (S.I.)	Sistema inglés	Unidad fundamental	Sistema métrico	Sistema inglés
<b>Longitud</b>	Metro ( m )	Pie ( ft )	<b>Longitud</b>	Metro ( m )	Pie ( ft )
<b>Masa</b>	Kilogramo (kg <sub>m</sub> )	Libra ( lb <sub>m</sub> )	<b>Fuerza</b>	Kilogramo (kg <sub>f</sub> )	Libra ( lb <sub>f</sub> )
<b>Tiempo</b>	Segundo ( s )	Segundo ( s )	<b>Tiempo</b>	Segundo ( s )	Segundo ( s )
<b>Unidades derivadas</b> <sup>36</sup>			<b>Unidades derivadas</b>		
Velocidad	m/s	ft/s	Velocidad	m/s	ft/s
Aceleración	m/s <sup>2</sup>	ft/s <sup>2</sup>	Aceleración	m/s <sup>2</sup>	ft/s <sup>2</sup>
Fuerza	kg <sub>m</sub> m/s <sup>2</sup>	lb <sub>m</sub> ft/s <sup>2</sup>	Masa	kg <sub>f</sub> s <sup>2</sup> /m	lb <sub>f</sub> s <sup>2</sup> /ft
	1 kg <sub>m</sub> m/s <sup>2</sup> =1 Newton			1 kg <sub>f</sub> s <sup>2</sup> /m =1 UTM	1 lb <sub>f</sub> s <sup>2</sup> /ft =1 slug

Como se puede observar en la tabla anterior, la palabra kilogramo se utiliza para nombrar a la unidad de masa en el sistema métrico absoluto (sistema internacional) y a la unidad de fuerza en el sistema métrico técnico, pero hay que tener en cuenta que aunque estas dos unidades se llamen de la misma forma **representan a conceptos totalmente diferentes**.

<sup>34</sup>Unidad fundamental es aquella que no se puede expresar con unidades mas simples.

<sup>35</sup>Unidad derivada es aquella que si se puede expresar con unidades mas simples, es decir, se compone de unidades fundamentales.

<sup>36</sup> Sólo se muestran algunas

Es por eso que se acostumbra colocar un subíndice "f" al kilogramo que representa fuerza y un subíndice "m" al kilogramo que representa masa<sup>37</sup>. Lo mismo se aplica al caso de la unidad del sistema inglés que es la libra.

Por lo anterior *no* se pueden hacer operaciones matemáticas con unidades de diferentes sistemas, es decir, se debe de trabajar solamente con un sistema, y en el caso de que inicialmente se tengan magnitudes con diferentes unidades pertenecientes a diferentes sistemas se deberán de efectuar las conversiones correspondientes.

### Sistema internacional de medidas

Magnitud física básica	Símbolo dimensional	Unidad básica	Símbolo de la unidad	Observaciones
<u>Longitud</u>	L	<u>metro</u>	m	Se define fijando el valor de la <u>velocidad de la luz</u> en el <u>vacío</u> .
<u>Tiempo</u>	T	<u>segundo</u>	s	Se define fijando el valor de la <u>frecuencia</u> de la transición hiperfina del átomo de <u>cesio</u> .
<u>Masa</u>	M	<u>kilogramo</u>	kg	Es la masa del «cilindro patrón» custodiado en la <u>Oficina Internacional de Pesos y Medidas</u> , en <u>Sèvres, Francia</u> . Equivale aproximadamente a la masa de un litro de <u>agua pura</u> a 14'5 °C o 286'75 K.
<u>Temperatura</u>	Θ	<u>kelvin</u>	K	Se define fijando el valor de la temperatura termodinámica del <u>punto triple del agua</u> .
<u>Cantidad de sustancia</u>	N	<u>mol</u>	mol	Se define fijando el valor de la <u>masa molar</u> del átomo de <sup>12</sup> C a 12 gramos/mol. Véase también <u>número de Avogadro</u> .
<u>Intensidad luminosa</u>	J	<u>candela</u>	cd	

<sup>37</sup>De aquí los nombres de los sistemas de unidades; si se tiene **un kilogramo masa** de materia, en la tierra esta **pesará un kilogramo fuerza**, pero en la luna o en otro planeta un kilogramo masa ya **no pesará** un kilogramo fuerza, esto es, la masa es absoluta, mientras que el peso es relativo al campo gravitacional del lugar.

