
UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

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

**CARACTERIZACIÓN DEL
TÚNEL AERODINÁMICO DEL
LABORATORIO DE BIOCLIMÁTICA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA:
COMO HERRAMIENTA PARA ESTUDIOS
DE MODELOS ARQUITECTÓNICOS**

Andrea Elena Fernández Meza

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

Miembros del Jurado:

Mtra. Verónica Huerta Velázquez

Directora de la tesis

Dr. Cesar Augusto Real Ramírez.

Co-Director de la tesis

Dr. Georgiy Polupan.

Mtro. Manuel Gordon Sánchez.

Mtro. Víctor Fuentes Freixanet.

México D.F.
Noviembre del 2008

Mención aprobada por el Jurado

DIRECTORES DE TESIS:

Mtra. Verónica Huerta Velázquez.

Dr. Cesar Augusto Real Ramírez.

MIEMBROS DEL JURADO:

Dr. Cesar Augusto Real Ramírez.

Dr. Georgiy Polupan.

Mtro. Manuel Gordon Sánchez.

Mtra. Verónica Huerta Velázquez.

Mtro. Víctor Fuentes Freixanet.

ASESORES:

Dr. Jesús Isidro González Trejo.

Ing. Antonio Medrano Mejía.

AGRADECIMIENTOS

Gracias infinitas a mis Tutores y Asesores, por su dedicación, por su tiempo, por todas sus enseñanzas y paciencia, por su apoyo incondicional...

Muchas gracias a mí jurado por su tiempo y todas las atenciones brindadas a este trabajo.

Muchas gracias,

Mtro. Antonio Abad.
Mtro. Jesús Hernández.
Mtro. Héctor García Urbina
Ing. Fausto Ibarra.
Ing. Jesús Arturo Mota.
Yahir Zúñiga Flores.
Arq. Alberto Zurita.
Arq. Víctor Hugo Rodríguez.
Arq. Alejandro Díaz.
Sra. María de la Luz Ruiz.
Sr. Víctor de Ferracsa.

Porque con su apoyo hicieron posible la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi Papá Danicio Fernández, eres mi ejemplo de perseverancia y fortaleza, amor al trabajo, superación, dedicación, honestidad, rectitud y de más virtudes que te hacen un gran hombre.

Dedico este trabajo a mi mamá Vera Meza, eres mi ejemplo de fe, seguridad en Dios, paz y tranquilidad, consuelo, humildad, dedicación, ternura y de más virtudes que te hacen una gran mujer.

RESUMEN

Hoy en día es de vital importancia proyectar confort no sólo al usuario, sino también, el provocar confort al entorno mismo donde se suscribe una obra arquitectónica. Hacer uso de estrategias pasivas es un camino que lleva a la satisfacción del ser profesional y un aporte a mejorar las condiciones ambientales de nuestro planeta.

Es una gran oportunidad el poder contar con herramientas que permitan hacer evaluaciones de diseño, y no dejar que el objeto de estudio sea explorado una vez terminada su construcción, momento en donde la mejora del proyecto se ve condicionada al tiempo y al presupuesto.

Mediante simulaciones en túneles aerodinámicos, fundamentadas con análisis cuantitativo y cualitativo, posibilita una descripción del flujo alrededor de las edificaciones utilizando modelos a escala. Estas simulaciones permiten la realización de diagnósticos y el estudio de soluciones, mediante resultados fiables de gran apoyo que sustenten las decisiones de diseño. Esta herramienta permite conocer de manera visual y práctica la forma de desarrollar la arquitectura, consolidando los conocimientos adquiridos durante el proceso de enseñanza-aprendizaje.

El presente trabajo de investigación expone la necesidad de caracterizar el túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana, con la finalidad de conocer los alcances y limitaciones del mismo, para posteriormente utilizar esta valiosa herramienta de ensayos. El documento expone los antecedentes de los túneles, presenta las características del fenómeno del viento, da los elementos a considerar para el estudio de modelos arquitectónicos, propone una metodología para estudios y presenta la situación actual y posibles líneas de investigación alrededor del túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana. Todo ello con la intención de abrir un panorama de investigación dentro del Área de la Arquitectura Bioclimática.

Índices

INDICE GENERAL

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Índices

Prologo

1. Planteamiento del Problema:

- 1.1. Justificación del Tema. **Pág.6.**
- 1.2. Objetivo General. **Pág.7.**
 - 1.2.1. Objetivos Específicos. **Pág.7.**
- 1.3. Hipótesis. **Pág.8.**
- 1.4. Metodología de la Investigación. **Pág.8.**
 - 1.4.1. Metas. **Pág.9.**
- 1.5. Aporte al Diseño. **Pág.10.**

2. Marco Teórico.

- 2.1. Antecedentes. **Pág.12.**
- 2.2. Túneles Aerodinámicos. **Pág.17.**
 - 2.2.1. Tipos de Túneles. **Pág.18.**
 - 2.2.2. Categorías de Túneles. **Pág.20.**
 - 2.2.3. Áreas de Desarrollo. **Pág.22.**
- 2.3. Túnel Aerodinámico para estudios en Arquitectura Bioclimática. **Pág.28.**
 - 2.3.1. Parámetros de similitud. **Pág.28.**
 - 2.3.2. Consideraciones Físicas Funcionales. **Pág.38.**
- 2.4. Túnel del Laboratorio de Bioclimática UAM. **Pág.43.**
 - 2.4.1 Descripción Física Funcional. **Pág.44.**
 - 2.4.2. Modificaciones Pertinentes. **Pág.46.**

3. Elemento de Estudio.

- 3.1. Conceptualización del Flujo de Aire. **Pág.57.**
- 3.2. Instrumentación. **Pág.62.**
- 3.3. Patrón de Flujo de Aire. **Pág.70.**

4. Caracterización del flujo de aire en la sección de pruebas del Túnel Aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática UAM.

- 4.1. Procedimiento de Caracterización. **Pág.73.**
- 4.2. Estudio 1:
 - Visualización de la dirección del Flujo de Viento por medio de la Técnica Cualitativo de Hilos. **Pág.81.**
- 4.3. Estudio 2:
 - Medición de Velocidad en la sección de pruebas con Anemómetro de Hilo Caliente. **Pág.87.**
- 4.4. Estudio 3:
 - Medición de Presiones en la sección de pruebas con Tubo Pitot Extendible Tipo L. **Pág.96.**
- 4.5. Estudio 4:
 - Medición de Presiones en la sección de pruebas con Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática UAM. **Pág.105.**

5. Conclusiones, Recomendaciones y Aportes

- 5.1. Conclusiones. **Pág.112.**
- 5.2. Recomendaciones. **Pág.120.**
- 5.3. Aportes. **Pág.122.**

Bibliografía. Pág.133.

Curriculum Vitae. Pág.141.

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1:** Esquema del péndulo y brazo giratorio por Benjamín Robins. **Pág.13.**
- Figura 2:** Imagen ilustrativa de la construcción de la Torre Eiffel. **Pág.14.**
- Figura 3:** Esquema de corte de túnel Aerodinámico por Gustav Eiffel, 1909. **Pág.15.**
- Figura 4:** Reproducción de la vista lateral túnel aerodinámico de los hermanos Wright. **Pág.16.**
- Figura 5:** Túnel de Viento del Instituto de Ingeniería del Viento al Servicio de la construcción y del Confort Urbano en Chile. **Pág.18.**
- Figura 6:** Túnel de Circuito Abierto de Succión. **Pág.19.**
- Figura 7:** Túnel de Circuito Cerrado. **Pág.20.**
- Figura 8:** Túnel Subsónico Abierto. **Pág.21.**
- Figura 9:** Túnel Subsónico Cerrado. **Pág.21.**
- Figura 10:** Túnel Aerodinámico del Instituto Politécnico Nacional de México, Escuela Superior de Ingeniería Aeronáutica, Unidad Ticomán. **Pág.22.**
- Figura 11:** Túnel Aerodinámico de la Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Civil. **Pág.23.**
- Figura 12:** Imágenes Ilustrativas de un modelo a escala de un avión dentro de Túnel con una sección de prueba elíptica y circular. **Pág.23.**
- Figura 13:** Estudio aerodinámico de carrocerías con técnica de visualización con humo. **Pág.24.**
- Figura 14:** Ensayos de saltos con paracaídas. **Pág.24.**
- Figura 15:** Estudio para equipo de ciclismo. **Pág.24.**
- Figura 16:** Imagen ilustrativa de generadores de energía eólica. **Pág.25.**
- Figura 17:** Sección de Pruebas de Túnel Aerodinámico de la Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. **Pág.26.**
- Figura 18:** Detalle de un modelo a escala para estudio de presiones, en Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. **Pág.26.**
- Figura 19:** Modelo a escala, técnica de visualización con humo. Edificio del World Trade Center. **Pág.27.**
- Figura 20:** Modelo a escala, estudio del comportamiento de viento en un contexto urbano. Túnel Aerodinámico de capa límite terrestre. **Pág.27.**

Figura 21: Imagen Ilustrativa de la capa límite atmosférica, donde se muestran los gradientes de velocidad en distintos tipos de terreno. **Pág.33.**

Figura 22: Vista de los elementos simuladores de gradiente de velocidad para. A la izquierda se aprecia las agujas Staden que en conjuntos con los elementos rugosos reproducen una capa límite atmosférica de espesor total y a la derecha se ven las agujas truncadas que permiten junto con la rugosidad una simulación parcial de la capa límite. **Pág.35.**

Figura 23: Dimensiones de los simuladores de gradiente de velocidad para capa límite atmosférica y el desarrollo del perfil de velocidad. **Pág.35.**

Figura 24: Disposición de los simuladores de gradiente de velocidad para capa límite atmosférica y el desarrollo del perfil de velocidad. **Pág.36.**

Figura 25: Imagen ilustrativa de ensayo de la incidencia del viento sobre cuatro rascacielos dentro de un contexto urbano. **Pág. 36.**

Figura 26: Esquema de túnel aerodinámico de circuito abierto, tipo Eiffel con cámara de ensayos cerrada. **Pág.38.**

Figura 27: Esquema Longitudinal de túnel aerodinámico de circuito abierto (tipo Eiffel) con cámara de ensayos cerrada. **Pág. 38.**

Figura 28: Rotor del ventilador axial de 2,5 m de diámetro, diseñado en la Facultad de Ingeniería Universidad de la República Oriental del Uruguay. Condiciones de diseño: carga: 43,9m; caudal: 121,5 m³/s; velocidad de giro: 750 rpm. **Pág.42.**

Figura 29: Elevación longitudinal del túnel del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática. **Pág.44.**

Figura 30: Vistas longitudinales de Túnel Aerodinámico del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática. **Pág.44.**

Figura 31: Campana de Contracción. **Pág.45.**

Figura 32: Retícula de tubos PVC. **Pág.45.**

Figura 33: Control eléctrico tipo Varic. **Pág.46.**

Figura 34: 4 motores de 5 caballos de fuerza. **Pág.46.**

Figura 35: Detalle en la sección transversal del comportamiento del flujo de viento en cuanto a la posición de una de las persianas y esquema de la entrada del flujo por la campana de contracción. El comportamiento del flujo es modificado según ángulo de las persianas. **Pág.48.**

Figura 36: Detalle en la sección transversal del comportamiento del flujo de viento en cuanto a la posición de una de las persianas y un esquema de la entrada del flujo por la campana de contracción. El comportamiento del flujo es modificado según ángulo de las persianas. **Pág.48.**

Figura 37: Campana de entrada con las persianas, nótese la disposición de las persianas. **Pág.49.**

Figura 38: Campana de entrada sin persianas. **Pág.49.**

Figura 39: Costado lateral derecho del túnel sin la palanca de acción para las persianas. **Pág.50.**

Figura 40: Sistema de posicionamiento global, que permitió establecer impecablemente alineados los puntos para las perforaciones en las ventanas de la sección de pruebas. **Pág.51.**

Figura 41: Perforación y colocación de soporte. **Pág.51.**

Figura 42: Ventanas con soportes instalados. **Pág.51.**

Figura 43: Diagrama de distribución de puntos para medición, elevación de la sección de pruebas, sin escala con cotas en metros. **Pág.52.**

Figura 44: Flechas soporte. **Pág.52.**

Figura 45: Sondas para Tubo Pitot a Manómetro. **Pág.53.**

Figura 46: Soportes, equipo de apoyo. **Pág.53.**

Figura 47: Concepto de sistema de operación para el peine de humo. **Pág.54.**

Figura 48: Imagen ilustrativa, pruebas con el peine de humo de 0,98m x 0,28m. **Pág.54.**

Figura 49: Compresora de aire, marca Goni, modelo 977. De 3.5 HP y una capacidad de 40 Lt de aire. **Pág.55.**

Figura 50: Instalación de la pistola de aire de extensión marca Goni. **Pág.55.**

Figura 51: Instalación de todo el equipo para la técnica de visualización con humo. **Pág.55.**

Figura 52: Instalación del equipo en el Túnel. **Pág.56.**

Figura.53: Pruebas de funcionamiento. **Pág.56.**

Figura 54: Pruebas de funcionamiento. **Pág.56.**

Figura 55: Diagrama de magnitud de de velocidad. **Pág.57.**

Figura 56: Barómetro. Marca: OTA Keikiseisakisho. Magnitud: presión barométrica. Tipo: Analógico. Rango de medición: 488 a 788 mmHg. Resolución mínima: 1mbar = 0.75m. **Pág.63.**

Figura 57:Termo-Higrómetro. Marca: TES. Modelo 1360. Magnitud: Temperatura /Humedad. Tipo:Digital. Rango de medición: 10% a 95% humedad; 20 °C a +60 °C temperatura. Resolución mínima: 0.1% humedad. 0.1°C temperatura. **Pág.64.**

Figura 58: Tubo Pitot Estático Tipo L. Marca: Air Flow. Material: Acero inoxidable. Diámetro:4 mm. Nariz: Elipsoidal.Coeficiente de corrección: 0.85. **Pág.65.**

Figura 59: Esquemas de Tubo Pitot Estático Tipo L. **Pág.66.**

Figura 60: Nariz del Tubo y soporte. **Pág.67.**

Figura 61: Salida de presión total y estática. **Pág.67.**

Figuras 62: Manómetro Inclinado. Se aprecia el líquido manométrico indicador de la lectura de la presión correspondiente. **Pág.68.**

Figura 63: Anemómetro. Marca Air Flow . Modelo TA5 Permite hacer lecturas de la velocidad y la temperatura, digitales y almacenaje de hasta 30 datos. El periodo de estabilización para cada punto fue de 1min. **Pág.69.**

Figura 64: Capa límite sobre objeto en estudio en túnel aerodinámico, con técnica de visualización con humo. **Pág.71.**

Figura 65: Espesor de la capa límite de la sección de pruebas del Túnel del Laboratorio de Bioclimática. **Pág.72.**

Figura 66: Imagen ilustrativa del área efectiva y el volumen de estudio para la sección de pruebas del Túnel del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág.76.**

Figura 67: Imagen ilustrativa de las secciones A-B-C para estudio de la sección pruebas del Túnel del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág.77.**

Figura 68: Imagen ilustrativa de la sección A y la malla de puntos de estudio de la sección pruebas del Túnel del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág.78.**

Figura 69: Imagen ilustrativa de la sección de pruebas y de la ubicación de los instrumentos y equipo de apoyo. **Pág.80.**

Figuras 70: Imágenes ilustrativas de la Técnica de visualización por medio de varillas de acero e hilos de algodón, empleada para la definición de la dirección del flujo de viento en la sección de pruebas. **Pág.82.**

Figura 71: Imagen ilustrativa de Marco metálico y malla en hilo de algodón utilizado en la técnica de visualización. **Pág.83.**

Figura 72: Imagen ilustrativa de la construcción de la malla de hilos de algodón. **Pág.83.**

Figuras 73: Imágenes ilustrativas de la malla de algodón, sin accionar el túnel. **Pág.84.**

Figura 74: Imagen ilustrativa de la vista transversal de la Malla de hilos de algodón bajo la frecuencia de 5hz. **Pág.85.**

Figura 75: Imagen ilustrativa de la vista lateral de la Malla de hilos bajo la frecuencia de 25 hz. **Pág.85.**

Figura 76: Nivel de burbuja y recopilador de datos digital del anemómetro de hilo caliente. **Pág.88.**

Figura 77: Toma de valores de velocidad en A1. **Pág.89.**

Figura 78: Imagen ilustrativa de los puntos de medición con el anemómetro de hilo caliente. **Pág.90.**

Figura 79: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Desarrollo de Magnitud en 12 frecuencias con el Anemómetro de Hilo Caliente. **Pág.91.**

Figura 80: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Desarrollo de Magnitud por altura, con el Anemómetro de Hilo Caliente. **Pág.92.**

Figura 81: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Sección A Desarrollo de Magnitud Transversal a la Sección de Pruebas, con el Anemómetro de Hilo Caliente. **Pág.93.**

Figura 82: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Eje Central Desarrollo de Magnitud por secciones, con el Anemómetro de Hilo Caliente. **Pág. 94.**

Figura 83: Imagen ilustrativa del tubo Pitot Tipo L Extendible, dentro de la sección de pruebas. **Pág.97.**

Figura 84: Imagen ilustrativa de la medición con tubo Pitot Tipo L Extendible, en el punto A1, con nivel de burbuja, que verifica su correcta colocación. **Pág.98.**

Figura 85: Imagen ilustrativa de los puntos de medición con el Pitot Tipo Estático Tipo L, ejemplo de la sección A. **Pág. 99.**

Figura 86: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Eje Central Desarrollo de Magnitud por secciones obtenidas con el Tubo Pitot Tipo L Extendible. **Pág.100.**

Figura 87: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad en la sección A. Desarrollo de Magnitud por altura, obtenidas con el Tubo Pitot Tipo L Extendible. **Pág.101.**

Figura 88: Gráfico de muestra Perfil de Velocidad en la sección A Desarrollo de Magnitud Transversal a la Sección de Pruebas, obtenidas con el Tubo Pitot Tipo L Extendible. **Pág.102.**

Figura 89: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad en el Eje Central. Desarrollo de Magnitud por secciones, obtenidas con el Tubo Pitot Tipo L Extendible. **Pág.103.**

Figura 90: Imagen ilustrativa del tubo Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, donde se aprecia la salida de la toma de presión total y salida de la presión estática. **Pág.106.**

Figura 91: Imagen ilustrativa del tubo Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, donde se aprecia su colocación dentro de la sección de pruebas, con el equipo de apoyo de flechas soporte, así como el nivel de burbuja. **Pág.107.**

Figura 92: Imagen ilustrativa del tubo Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, donde se aprecia la nivelación y el alineamiento de la nariz con el flujo de aire, así como el nivel de burbuja. **Pág.107.**

Figura 93: Imagen ilustrativa de los puntos de medición con el Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág.109.**

Figura 94: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Eje Central Desarrollo de Magnitud con el Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág.110.**

Figura 95: Planta esquemática del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág.114.**

Figura 96: Corte esquemática del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág.115.**

Figura 97: Imágenes ilustrativas de la incidencia de la estructura sobre el comportamiento del flujo de aire. **Pág.116.**

Figura 98: Imágenes ilustrativas de la matriz con irregularidades formales y como inciden en el comportamiento del flujo de viento. **Pág.117.**

Figura 99: Gráfico que ilustra los perfiles de velocidad en el eje central, comprando el desarrollo de velocidad entre los tres instrumentos de medición. **Pág.119.**

Figura 100: Planta del Laboratorio de Bioclimática con sugerencias de remodelación. **Pág.121.**

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Constantes de rugosidad del terreno para diferentes capas límites atmosféricas. **Pág. 34.**

Tabla 2: Ejemplo de Tabla para recopilar la información. **Pág. 79.**

Tabla 3: Promedio de los datos climáticos obtenidos durante las mediciones con el Anemómetro de hilo caliente. **Pág. 87.**

Tabla 4: Rangos de frecuencia y velocidad para Anemómetro de Hilo Caliente. **Pág. 95.**

Tabla 5: Promedio de los datos climáticos obtenidos durante las mediciones con el Tubo Pitot Tipo L Extendible. **Pág. 96.**

Tabla 6: Rangos de frecuencia y velocidad para el Tubo Pitot Tipo L Extendible. **Pág. 104.**

Tabla 7: Promedio de los datos climáticos obtenidos durante las mediciones con el Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. **Pág. 105.**

Tabla 8: Rangos de frecuencia y velocidad para el Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana. **Pág. 111.**

Tabla 9: Se muestra los rangos de velocidad por instrumento, el porcentaje de variación con respecto al Tubo Pitot Tipo L Extendible y la resolución aproximada de cada instrumento. **Pág. 118.**

Tabla 10: Tabla de rangos de velocidad en relación a los valores de frecuencia que genera el variador de potencia, para el Anemómetro de Hilo Caliente. **Pág. 123.**

Tabla 11: Tabla de rangos de velocidad en relación a los valores de frecuencia que genera el variador de potencia, para el Tubo Pitot tipo L Extendible. **Pág. 123.**

Tabla 12: Tabla de rangos de velocidad en relación a los valores de frecuencia que genera el variador de potencia, para el Tubo Pitot tipo L del Laboratorio de Bioclimática. **Pág. 124.**

Tabla 13: Escala de Beaufort, tomada de la enciclopedia Wikipedia y modificada con referencias de Fuentes Víctor y Rodríguez Manuel. "Ventilación Natural, Cálculos Básicos para la Arquitectura" **Pág. 124, 125, 126 y 127.**

Tabla 14: Tabla comparativa de la Escala de Beaufort y Rangos de Velocidad generados por el Túnel de Viento del Laboratorio de Bioclimática de la la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. **Pág.128.**

Tabla 15: Tabla de Parámetros de Similitud para ensayos con modelos arquitectónicos, en el Túnel de Viento del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. **Pág.131.**

PROLOGO

Desde que se reconoce al viento como parte de los elementos vitales del medio ambiente que influye sobre cada actividad del hombre, tanto para la renovación del aire, acondicionamiento higrotérmico y fuente de energía limpia, aparece un amplio panorama de investigación con la finalidad de su mayor comprensión y manipulación. El viento es aire en movimiento relativo a la superficie de la Tierra, usado casi exclusivamente para denotar la componente horizontal (tierra)¹. Este movimiento es generado por las diferencias de temperatura y presión atmosférica que son causadas por un calentamiento no uniforme de la superficie terrestre. Mientras el sol calienta el aire, el agua y la tierra de un lado de la Tierra, el otro lado es enfriado por la radiación nocturna hacia el espacio. Este desigual calentamiento de la atmósfera origina movimientos compensatorios que tienden a equilibrar el sistema, es decir, a reducir la diferencia horizontal de temperatura y por lo tanto, las diferencias de presión².

En el ámbito de la arquitectura, el *viento* ventila, evapora la humedad, seca las superficies, refresca, produce energía, calienta evitando que se asiente el frío de la noche; pero también debido a que es una razón para conocer su movimiento y su fuerza, el *viento* trae humo y olores, ayuda al agua a penetrar superficies, enfría, ayuda a la acumulación de la nieve, obliga a reforzar las construcciones para resistirlo. A veces los vientos traen la humedad de agua marina, otras veces el frío de las montañas o bien de las arenas cálidas y la sequedad del desierto; puede soplar con dirección e intensidad constante durante largos periodos o variar de momento a momento.

¹ SMN. Glosario de Términos. Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua-México. Gobierno de México. <http://smn.cna.gob.mx>

² Fuentes Víctor. "Clima y Arquitectura". Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Los vientos sin lugar a duda influyen y condicionan el clima³. Además influyen de manera notable en las condiciones psicológicas de los habitantes, por el ruido y vibraciones que pueden ocasionar los flujos intensos que producen sensaciones de desamparo aún cuando la protección física esté presente.

Dentro de la Arquitectura Bioclimática, proyectos urbano-arquitectónicos no se pueden aislar de la influencia del viento. La zonificación de estos depende en buena parte de la incidencia de los vientos dominantes, por ejemplo debe evitarse que los residuos volátiles de ciertas actividades sean transportados por los vientos y llevados a zonas habitacionales o comerciales. Además una cuidadosa orientación de las calles en relación a la dirección de los vientos constantes produce efectos benéficos, por ejemplo al retomar la brisa marina a favor de la dirección del viento contribuye al confort higro-térmico para los usuarios. Para comprender el ejemplo anterior, el concepto de confort: Higro-Térmico² lo explica Fuentes Freixanet, como la percepción del medio circundante que se da principalmente por los pulmones así como la piel; en un proceso de sudoración, por medio de la evaporación e intercambio térmico de humedad entre el cuerpo y ambiente.

Por medio del diseño de los espacios arquitectónicos y sistemas pasivos de climatización es posible conseguir condiciones térmicas confortables, lo cual repercute en la salud y confort de los usuarios. Condiciones de humedad y temperatura, tienen efectos directos en el sistema respiratorio y circulatorio, entre otros.

El viento no sólo interactúa con lo construido sino también con el paisaje de un sitio. Con las barreras vegetales, se rompen los vientos y se retiene el polvo, con la sombra se modera la temperatura o por la humedad del follaje se reduce la sequedad. La vegetación en conjunto a

² Fuentes Víctor. "Clima y Arquitectura". Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

³ Rodríguez Humberto y Sandoval María Lourdes. "Una Alternativa de Enseñanza" pag. B-C. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México, 1988.

las corrientes de aire, representan elementos que los urbanistas y arquitectos pueden utilizar para modificar las condiciones climáticas de las ciudades y crear microclimas placenteros a los habitantes, es decir promover la arquitectura bioclimática.

La arquitectura bioclimática, se define como toda edificación o planteamiento urbano que además de hacer uso eficiente de la energía, se integra armónicamente al entorno natural para propiciar espacios dignos, confortables y saludables para el cuerpo, la mente y el espíritu de los usuarios⁴; se considera a la ventilación natural como una de las estrategias principales de climatización pasiva; sin embargo, al tratarse de un elemento climático variable, es necesario entender adecuadamente su comportamiento en las edificaciones y tener definidos sus límites de aplicación y posibles efectos sobre los usuarios.

La reflexión sobre la importancia de los espacios construidos sobre la calidad de vida de sus usuarios, considerando las condiciones climáticas se comprendía desde que el hombre establece sus primeras viviendas. Tratadistas como Palladio hacen referencia a la importancia de los espacios habitables, su ubicación y el comportamiento del viento:

En lo que se refiere a la salubridad del aire,... hay que señalar que los edificios antiguamente construidos servirán de índice (para la selección de un sitio), observando el estado de deterioro o de corrosión, mirando si los árboles del entorno son hermosos, bien nutridos y no doblados por los vientos. No hay que construir en valles cerrados o rodeados por montañas porque los edificios escondidos en los valles, además que no pueden ser percibidos desde lejos, no tendrían ni dignidad ni majestuosidad, resultan ser insalubres; porque la tierra saturada por las aguas pluviales producen neblina muy nociva para la mente como para el cuerpo. La gran humedad que existe en estos lugares echa a perder las provisiones. Además si el sol penetra en estos lugares en el verano, la reflexión de los rayos provocara calores excesivos y de no penetrar, la sombra continua dará a los habitantes un aire atontado y una tez terrosa. Así

⁴ García José y Fuentes Víctor. "Arquitectura y medio ambiente en la ciudad de México" Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México, 2000.

*mismo, si los vientos dominan en estos valles, al pasar apretado como dentro de unos canales estrechos entonces soplarán con furor; pero sí, de lo contrario los vientos no penetran, el aire siempre será mal sano y pesado.*⁵

En esta línea de pensamiento Vitruvio expone las características de los vientos que se observan en el hemisferio norte y hace recomendaciones utilizando la estrategia de ventilación⁶:

“ Una vez construido el recinto amurallado, hay que proceder a la distribución de las áreas interiores y las adecuadas vías de acceso a las plazas, las calles y callejones, tomando en cuenta que orientación sea la más adecuada. Se deberá poner mucho cuidado para evitar que los vientos penetren directamente por las calles, las cuales, si son húmedos, dañan. (...) Por lo tanto, es necesario evitar tales inconvenientes y tener cuidado de que no suceda lo que suele pasar en muchas ciudades (...) emplazadas con poca visión, pues cuando sopla el viento del sur, que es Austro, las personas enferman; cuando sopla el Coro, tosen; y con el Tramontana, se restablecen; pero éste es tan frío, que cuando sopla es imposible permanecer en las plazas y calles.(...) ”

Es así como los antecesores describen pautas y estrategias de diseño bioclimático, que eran consideradas tan naturalmente como la funcionalidad de cada espacio. Sin embargo al trascurrir los años, se relegó los beneficios de un adecuado estudio del contexto sobre la arquitectura; tanto así que con la aparición de sistemas de acondicionamiento artificiales; se desvaloriza las ventajas de considerar el medio natural circundante de un proyecto.

La situación alarmante de nuestro planeta obliga a retomar las reflexiones de nuestros antepasados, y a considerar las variables climatológicas que inciden en aspectos de salud, bienestar, confort y

⁵ Palladio. “De la selección de un sitio para la construcción de una casa de campo.” 1518 – 1580.

⁶ Viqueira Manuel. “Estudios de Arquitectura Bioclimática” 1er Libro de Vitruvio, cap 4; volumen VII, pag 25-26, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México,2000.

ahorro energético. Aún más ante un planeta que día a día se enfrenta a un sobrecalentamiento, nos exige tomar acciones en favor de una larga vida para nuestro planeta y una mejor calidad de vida para quienes lo habitamos.

Estas acciones se ven beneficiadas al desarrollo continuo de nuevas tecnologías en beneficio de fiables y más profundos estudios arquitectónicos. Dentro de esta área se encuentra el análisis de proyectos dentro de túneles aerodinámicos. Estos estudios sobre modelos a escala, permiten estudiar proyectos arquitectónicos previos a su construcción, considerando la influencia del viento y su contexto, la influencia del viento sobre la forma, así como la envolvente, la influencia del viento sobre determinada función y espacio. Estos análisis permiten establecer, visualizar y concretar estrategias de diseño que contemplan el flujo de viento, como un elemento innegable dentro del diseño arquitectónico.

CAPITULO 1

Planteamiento del Problema

CAPITULO 1

El capítulo a continuación presenta el planteamiento del problema de investigación a abordar, por medio de una justificación del tema, el planteamiento de los objetivos a desarrollar, la hipótesis del tema, la metodología aplicada y los aportes que esta investigación va a generar.

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

El túnel para estudios de viento es un medio en donde se pueden realizar ensayos y experimentos necesarios para el cumplimiento del proceso de la enseñanza y aprendizaje dentro del área de la arquitectura bioclimática.

Existen fenómenos cuya naturaleza no puede ser entendida totalmente, aún más cuando su enseñanza es meramente teórica y en aula. El túnel es una herramienta que permite que el flujo de aire sea medible y visible para llegar a comprender fenómenos muy particulares para el correcto estudio de modelos arquitectónicos.

El túnel aerodinámico de baja velocidad de la Universidad Autónoma Metropolitana fue construido en el año 2000, sin embargo desde entonces ha carecido de una caracterización que permita conocer el tipo de flujo de viento que genera; aspecto indispensable para la realización de cualquier estudio; si se carece de información, es posible generar una base de datos para la validación de los resultados obtenidos a través de cualquier método de estudio referente al viento y a la arquitectura.

Los túneles para el estudio del viento o túneles aerodinámicos, en la actualidad, han ido presentando un mayor universo de aplicación debido al desarrollo tecnológico; aumentando el alcance de ejecución de sus simulaciones. La Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco cuenta con una valiosa herramienta tanto para el área didáctica y para la investigación.

Es por ello que surge el interés de caracterizar esta herramienta, conocer los alcances y finalmente ponerla a disposición de estudiantes, profesores y profesionales del área de la arquitectura.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización del comportamiento del flujo de viento en la sección de pruebas del túnel aerodinámico del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para validarlo como una herramienta para el estudio de modelos arquitectónicos a escala.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Proponer una metodología de accesible comprensión tanto para estudiantes, profesores y profesionales dentro del área de la arquitectura, para el análisis del flujo de viento en el túnel aerodinámico.
2. Establecer los criterios de caracterización del flujo de viento para llevar a cabo las mediciones.
3. Establecer el volumen de estudio de la sección de pruebas, considerando el efecto de las paredes, así como las condiciones físicas de cada instrumento.
4. Realizar perfiles de velocidad en el volumen de control establecido dentro de la sección de pruebas, para hacer un análisis cuantitativo y cualitativo del flujo de viento.

5. Proponer un programa de funcionamiento, actualización y mantenimiento para el correcto funcionamiento del túnel aerodinámico.

6. Establecer los parámetros de similitud considerando las características del flujo de viento en el túnel del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, bajo los criterios de semejanza entre prototipos arquitectónicos reales y modelos a escala.

1.3. HIPOTESIS

La caracterización del túnel de viento del laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la UAM-Azcapotzalco permitirá conocer el comportamiento del flujo de viento de la sección de pruebas y en función de este, se establecerán los parámetros de similitud entre los prototipos arquitectónicos y los modelos a escala.

1.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para poder considerar a un túnel de viento como una herramienta de ensayos para estudios aerodinámicos, es fundamental conocer el flujo de viento característico que el túnel genera.

A pesar de que la caracterización del flujo es un requisito ambiguo, debido a que el fenómeno del viento no es constante, ni en tiempo, ni en espacio y su explicación matemática suele ser compleja, para múltiples estudios arquitectónicos establecer el requisito de cálculo de velocidad suele ser el valor de referencia satisfactorio¹.

¹ Ruiz José, Sanz Ángel, Perales José y Pindado Santiago. "Aerodinámica Civil, cargas de viento en edificaciones." Ed.McGraw-Hill. Madrid 2001.

La metodología empleada para la caracterización del flujo de viento de la sección de pruebas del túnel en el Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, es diseñada bajo la referencia y asesoría profesional del Dr. Cesar Augusto Real Ramírez², del Ing. Antonio Medrano Mejía y del aporte investigativo del Ing. Fausto Rodríguez Ibarra³. La metodología propuesta contempla el método cualitativo y el método cuantitativo, a través de una serie de ensayos y procedimientos que son el resultado del estudio, análisis y síntesis de metodologías de caracterización; tiene como finalidad que sea de accesible comprensión, para que tanto estudiantes, profesores y profesionales de la arquitectura, la utilicen y adapten a sus necesidades de estudio.

1.4.1. METAS

1. Se recopiló y analizó la información bibliográfica referente al tema de estudio.
2. Se estructuró un marco teórico con antecedentes, conceptos claves y fundamentos teóricos para el tema en estudio.
3. Se estudió los modelos matemáticos implicados para el procesamiento de los ensayos.
4. Se recopiló y adaptó el equipo necesario para la experimentación cualitativa y cuantitativa.
5. Se realizó la descripción física y funcional del túnel.
6. Se realizaron las modificaciones físicas al túnel necesarias para el inicio de los ensayos.

² Real Cesar. "Acreditación del LABINTHAP como laboratorio secundario en velocidad de aire." Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 2002. y sus asesorías profesionales.

³ Rodríguez Fausto, "Aplicaciones de la Aerodinámica Experimental a la arquitectura Bioclimática

" Instituto Politécnico Facultad de Ingeniería Aerodinámica. Agosto 2005.

7. Se realizó estudios del flujo de viento con 3 instrumentos accesibles al Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana.
8. Se organizó los resultados obtenidos.
9. Se procesó los datos a través de modelos matemáticos.
10. Se comparó los resultados.
11. Se estableció los parámetros de similitud.
12. Se concluye y plantean recomendaciones.

1.4. APORTE AL DISEÑO

El desarrollo de estudios o simulaciones en túneles aerodinámicos se había enfocado a otras vertientes ajenas a la arquitectura e ingeniería. El actual uso de los túneles para el estudio de la incidencia del viento sobre proyectos arquitectónicos y estructuras, presenta a los túneles como una herramienta clave para el estudio del fenómeno del viento. El poder cuantificar y caracterizar los efectos por la acción del viento sobre modelos arquitectónicos a escala, previo a la construcción del prototipo real, permite analizar y en el caso requerido modificar de forma precisa el modelo, volverlo a estudiar, y consolidar el diseño final. Esto brinda la seguridad de no encontrar desaciertos una vez terminada la construcción.

Por otro lado el túnel aerodinámico es un dispositivo elemental para la confirmación de los conceptos enseñados en el área de la arquitectura bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana; al conocer los alcances de esta herramienta, se fomenta la investigación y permite el aprendizaje de soluciones técnicas y formales a problemas de diversa índole, por ejemplo:

- Estudio de la acción del viento sobre el diseño de la envolvente de las edificaciones.
- Estudio de la acción del viento sobre el diseño de edificaciones en contextos rurales, suburbanos y/o urbanos.
- Estudio de los efectos del viento sobre los peatones.

- Estudio de estrategias pasivas: amplificación de los efectos del viento o modificación del flujo por obstáculos naturales próximos.
- Estudios de edificios en entornos industriales donde se genera contaminación, para asegurar la dispersión adecuada.

El desarrollo de un proceso de aprendizaje, investigación y realización profesional en el cual se plantean propuestas, evaluaciones, diagnósticos y criterios en función a los resultados obtenidos gracias a la experimentación con el túnel de viento, consolida los criterios aprendidos sobre confort higrotérmico establecidos dentro del plan de estudios de la Arquitectura Bioclimática: *Identificar las variables que intervienen en el diseño de las edificaciones y en su contexto urbano o rural, con el objetivo de comprobar estrategias de ventilación natural, con la intención de fomentar dentro de los diseños el confort espacial, la salud e higiene para los ocupantes, así como el ahorro energético.*

CAPITULO 2

Marco Teórico Referencial

CAPITULO 2

El capítulo a continuación desarrolla el tema de los túneles aerodinámicos contemplando aspectos desde sus orígenes, tipos y categorías de túneles que encontramos hoy en día en el medio de la investigación aerodinámica; algunas áreas de aplicación. Así como una descripción física y funcional de los túneles para estudios de modelos arquitectónicos, considerando las bases de parámetros de similitud. Concluye el capítulo con una descripción de la situación actual del túnel de viento del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco y modificaciones pertinentes para poder abordar los objetivos específicos de esta investigación.

2.1. ANTECEDENTES

Desde que se tiene registro de la historia, el hombre ha reconocido ser parte de un eslabón inseparable de elementos naturales que constituyen nuestro medio ambiente: fuego, agua, tierra y aire. Al establecerse en un sitio e iniciar la construcción de sus primeras viviendas, contempla al aire – viento como un elemento que puede manipular en su beneficio, contemplando diversas áreas de búsqueda y descubrimiento.

Alrededor de 150 a.C., el hombre inicia estudios científicos para la manipulación y comprensión del viento. Es en este periodo, durante la civilización griega, que Herón de Alejandría, conocido por sus descubrimientos en la geometría y en la mecánica, fabricó una turbina de vapor proveniente de una caldera, con la cual logra elevar un objeto en el aire¹⁰.

El conocimiento se comienza a enriquecer con la experimentación y se propone la creación de leyes - fórmulas, aparatos e instrumentos

¹⁰ Heron de Alejandría, Abril 1999. <http://www.history.mcs.standrews.ac.uk/Mathematicians/Heron.html>

que le permitan medir las fuerzas que se aplican a experimentos de cuerpos dentro del aire.

Se tiene conocimiento que desde el siglo XVIII se tuvo la idea de que estas fuerzas dependían de la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido, bajo este concepto Benjamin Robins¹¹ desarrolló dos mecanismos; como se muestra en la figura 1; el péndulo balístico y el brazo giratorio, con el que demostró experimentalmente las características aerodinámicas de los cuerpos a bajas y altas velocidades. Fue el primero en demostrar que dos cuerpos aerodinámicos con diferentes formas, pero la misma área frontal proyectada, tenían distintos valores de resistencia. Al inicio, el péndulo trabajó en conjunto con el brazo que giraba radialmente. Posteriormente el brazo fué modificado; a rieles, que sostuvieron distintos modelos; el problema de este sistema era que el modelo se movía a través de un flujo turbulento, desordenado por el movimiento del brazo. Para obviar este obstáculo, se decidió dejar el modelo inmobilizado y hacer que circulara el aire alrededor de él; y si a esta idea la colocamos dentro de un ducto, obtenemos lo que conocemos como un túnel de viento¹².

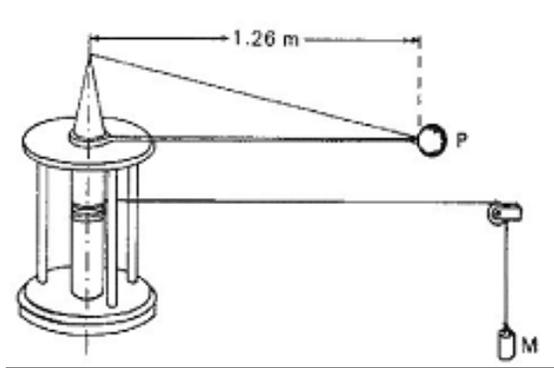


Figura 1: Esquema del péndulo y brazo giratorio por Benjamín Robins¹¹

¹¹ Bases Científicas del Barroco al Siglo XX. 1980-2005.

http://www.aero.upm.es/es/alumnos/historia_aviacion/tema2.html

¹² Santamaría Alejandra. Mecánica de Vuelo Número 98-11. www.cvlmallorca.com/teoria2-e.php

Los experimentos a finales del siglo XVIII, definieron que el mejor método para medir la resistencia del viento consistía en colocar un modelo en una corriente de viento artificial, es decir el método del túnel aerodinámico. El primero en realizar este tipo de instalación fue Francis Herberth Wenheman, en 1871, miembro fundador de la Sociedad de Aeronáutica de Gran Bretaña. En 1884, el inglés Horacio Phillips construye otro túnel aerodinámico. Posterior a este se desencadena la construcción de pequeños túneles casi en todos los países. Estas instalaciones tenían un máximo alcance de 100 caballos de fuerza. Algunos ejemplos de túneles de la época son el de la Universidad de Moscu- Rusia construido en 1891 por Nikolai E. Joukowski y Riabouchiniski; en Inglaterra por Stanton y Maxim; en Alemania por Prandtl; en Italia por Crocco y en Francia por Eiffel y Rateau, como se muestra en la figura 2, en el año de 1891; dos años después del fin de la construcción de la Torre Eiffel.

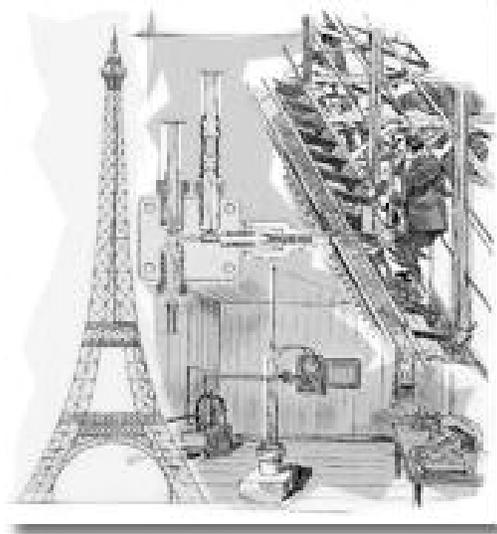


Figura 2: Imagen ilustrativa de la construcción de la Torre Eiffel¹⁴.

Esta construcción ofreció el ideal de condiciones para la instalación de un manómetro de flujo libre a 300 metros de altura. Todos los componentes de éste, estaban ligados a la estructura y podían ser

vistos desde cualquier parte del monumento. Eiffel tenía la intención de darle un uso práctico a la torre, que había sido construida solamente para estar en pie por veinte años, por lo que la emplea para experimentos de la resistencia del viento, como poste de observación meteorológico, y sobre todo, como antena aérea gigante para la nueva ciencia, la difusión de radio.

Eiffel recopiló datos meteorológicos en los postes instalados, y al mismo tiempo persiguió su investigación en el tema de la aerodinámica, instalando un laboratorio en el segundo piso de la torre. Construyó un túnel de viento a la derecha del pie de la torre. La figura 3 muestra un esquema de corte de este túnel y un segundo túnel, sobre el Rue Boileau en París, en 1909. Este último túnel aerodinámico todavía está en servicio¹³.

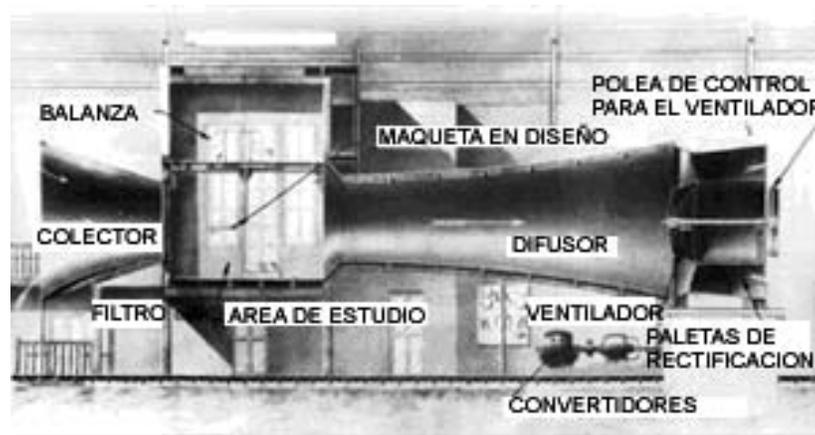


Figura 3: Esquema de corte de túnel Aerodinámico por Gustav Eiffel, 1909¹⁴.

Otro ejemplo relevante en la historia de los túneles, data del año 1901. Es el afán por dominar las alturas y el deseo de volar, que impulsa a los hermanos Wright a crear otro Túnel Aerodinámico¹⁴, la figura 4 muestra un levantamiento de este túnel. Con la finalidad de obtener un instrumento útil que los ayudara a rediseñar las alas de los prototipos de

¹³ Pineda Villabizar Andrés, Republica Dominicana, www.arghys.com

¹⁴ Primer Centenario de Aviación en el Mundo. Fundación Aeronáutica Guadalquivir. www.fag.es/aviacion/historia/centenario.htm

sus aviones. Los hermanos Wright deciden comenzar una “serie de experimentos para determinar exactamente la cantidad, la dirección, y la presión que se produciría en superficies curvas, por flujos de viento desde varios ángulos; iniciando desde cero grados hasta noventa grados. Los hermanos Wright hicieron centenares de pruebas en el túnel de viento, registrando todas las medidas exactas de presión. Después de algunos meses, los hermanos Wright tenían la mejor colección de datos del mundo.

En 1905 patentan este invento para convertirse también en pioneros de la Documentación Aeronáutica, a través de los resultados obtenidos con el túnel de viento.¹⁵

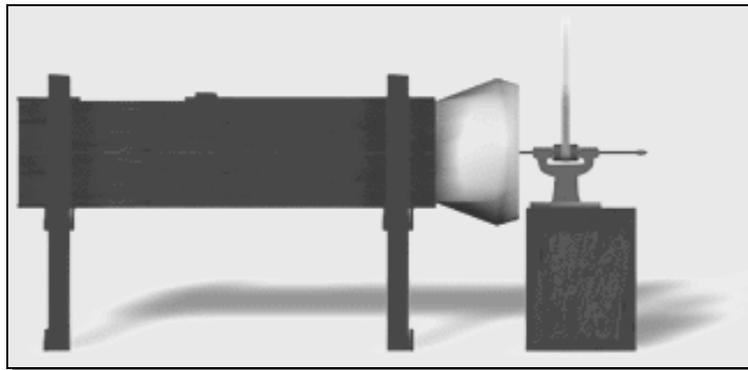


Figura 4: Reproducción de la vista lateral túnel aerodinámico de los hermanos Wright¹⁴

Previo y durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) el desarrollo de los aviones de combate evoluciona a un ritmo sorprendente. Ya que fué necesario hacer estudios experimentales para la implementación de mejores diseños de aeronaves. En este momento se da pie a que los túneles aerodinámicos comiencen a utilizarse con gran desempeño en el campo de la investigación del viento en diversas áreas de aplicación.

¹⁵ First Flights. Part I –Part II. <http://www.fi.edu/flights/first/before2.html>

2.2. TÚNELES AERODINAMICOS

Los túneles aerodinámicos, también llamados túneles de viento por una traducción no muy acertada a “*wind tunnel*”, son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente de aire, de propiedades conocidas y controladas, para la medida de las acciones del viento sobre elementos de diversa índole¹⁶. Esto permite poder efectuar experimentos que reproduzcan las condiciones reales de la acción del viento sobre un prototipo real, reproducidas sobre un modelo a escala.¹⁷

La importancia de estos instrumentos radica en la posibilidad de estudiar el comportamiento del flujo de viento sobre modelos a escala, con la complejidad real de un fluido. Posibilita la obtención de una gran cantidad de valiosa información, fundamental a la hora de soportar decisiones de diseño.

Son tan confiables los ensayos realizados en túneles aerodinámicos, que industrias e inclusive gobiernos contratan los servicios de universidades para la realización de investigaciones y ensayos con propósitos civiles; desde estudios para la definición de zonas aptas para la generación de energía eólica, estudios para el desarrollo de objetos como aeronaves y automóviles, estudios de proyectos en ingeniería y arquitectura, entre otros.

Existe una organización que ha integrado el interés de todas estas áreas, su nombre es Asociación de Ensayos Aerodinámicos Subsónicos, conocida como SATA, siglas en inglés referentes a Subsonic Aerodynamic Testing Association.

¹⁶ Ruiz José, Sanz Ángel, Perales José y Pindado Santiago. “Aerodinámica Civil, cargas de viento en edificaciones.” Ed.McGraw-Hill. Madrid 2001.

¹⁷ Rodríguez Fausto. “ Aplicaciones de la Aerodinámica Experimental a la Arquitectura Bioclimática ” Instituto Politécnico Escuela Superior de Ingeniería Aeronáutica. México 2005.

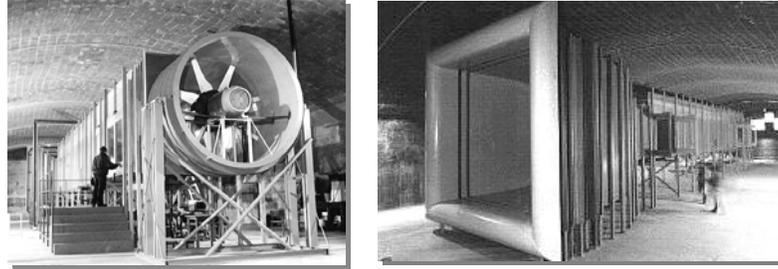


Figura 5: Túnel de Viento del Instituto de Ingeniería del Viento, Chile.

2.2.1. TIPOS DE TÚNELES

Existen dos tipos de túneles aerodinámicos, la principal diferencia entre ellos es la posibilidad o no de recirculación del aire; esta condición determina la composición física del mismo. Un túnel aerodinámico se compone básicamente de:

1. Campana de Contracción.
2. Sección de Pruebas o Cámara de Ensayos.
3. Difusor.
4. Ventiladores o Abanicos.
5. Descarga del flujo de Aire

En caso de ser de circuito cerrado la descarga de aire ingresa nuevamente a la zona de contracción.

Circuito abierto, este tipo de túnel presenta la característica de utilizar el aire externo para desarrollarlo en su interior y descargarlo al exterior. Tiene la ventaja de ser relativamente más barato en su construcción, sin embargo al utilizar una sola vez la carga de aire consume más energía que otros. Al ser una instalación de ducto abierto, la succión y la descarga de aire provoca más ruido en comparación a una instalación de ducto cerrado. Las condiciones termodinámicas del aire para ensayos en el túnel de circuito abierto son las que disponga el laboratorio, es decir las condiciones ambientales locales. Dentro de este tipo de túnel se encuentran:

Túnel de Succión: Como se aprecia en la figura 6 este túnel posee la sección de prueba a la entrada del aire, esto tiene como consecuencia que el flujo que ingresa presente un régimen laminar el cual puede ser modificado para obtener un flujo de aire turbulento. Es importante mencionar que un flujo se denomina laminar cuando sus partículas describen una trayectoria definida y paralela entre si, contrario al flujo turbulento en donde las trayectorias de las partículas están indefinidas.

En la figura 6 se muestra un túnel tipo succión de circuito abierto con sus partes enumeradas según el apartado inicial.

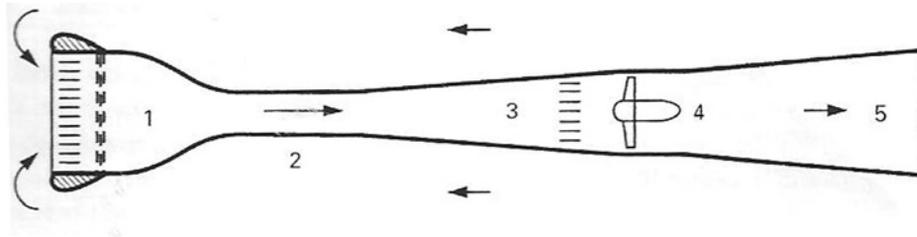


Figura 6: Túnel de Circuito Abierto de Succión¹⁶.

Túnel de Presión de Impacto: este túnel posee la sección de prueba 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.

Circuito cerrado: como se observa en la figura 7, este tipo de túnel presenta una conformación física cerrada, permitiendo que el aire utilizado realice siempre el mismo recorrido; por lo tanto consume la energía necesaria para restaurar las pérdidas por fricción. El consumo de energía es menor que otros sin embargo, resulta mucho más costosa su fabricación y montaje. Las propiedades termodinámicas del aire tales como temperatura, presión y densidad, son controladas. Este tipo de túnel requiere de un gran espacio para su instalación, además de un sistema que controle las características del aire como humidificadores, calefactores, compresores, etc.

En la figura 7 se muestra un túnel tipo de circuito cerrado con sus partes enumeradas según el apartado inicial.

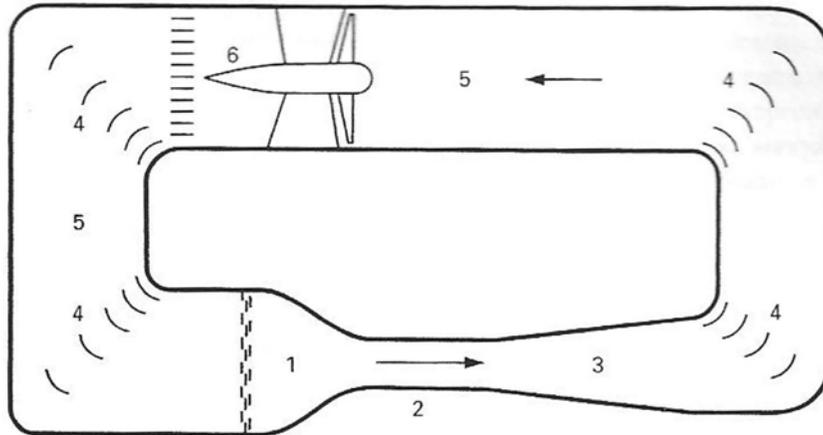


Figura 7: Túnel de Circuito Cerrado¹⁶.

2.2.2. CATEGORÍAS DE TUNELES

Los túneles de viento se clasifican según la velocidad que logren desarrollar¹⁸.

Túnel de Baja Velocidad: dentro de esta clasificación se encuentra el:

Túnel Subsónico: es un túnel aerodinámico que opera a una velocidad menor a la del sonido, es decir experimenta velocidades menores a 300m/s. Puede ser de circuito abierto como se muestra en la figura 8 o bien de circuito cerrado como se muestra en la figura 9. El aire se mueve con un sistema de propulsión mediante un ventilador axial que provoca una velocidad menor a la velocidad del sonido.

¹⁸ Tópicos Avanzados en Aerodinámica. <http://www.aerodyn.org/WindTunnel/tunnels.html>

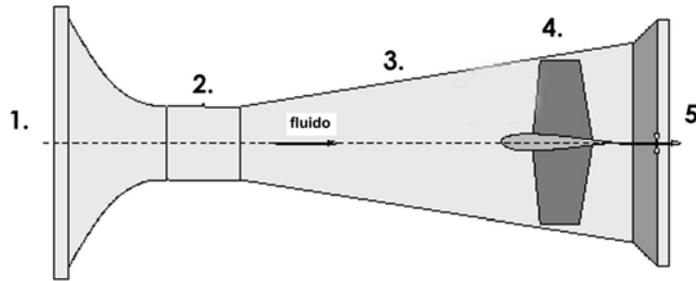


Figura 8: Túnel Subsónico Abierto¹⁸.

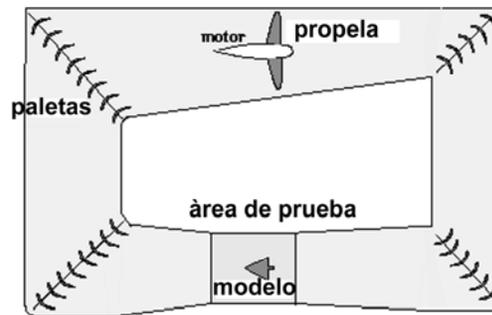


Figura 9: Túnel Subsónico Cerrado¹⁸.

Túnel de Alta Velocidad: se denominan de alta velocidad cuando se utilizan para la investigación de flujos donde las principales fuerzas que actúan se deben a la inercia y a la compresibilidad.

Túnel Transónico: este túnel tiene la capacidad de operar a la velocidad del sonido, 300m/s. La mayor velocidad se alcanza en el área de prueba. Este tipo de túnel presenta cierta dificultad a la hora de realizar las pruebas debido a las ondas de choque.

Túnel Supersónico: este túnel opera a una velocidad mayor que la del sonido, es decir mayor que 300m/s. Para poder alcanzar estas velocidades cuenta con un diseño apropiado de un inyector convergente-divergente.

Túnel Hipersónico: este túnel funciona a una magnitud de velocidad aún mayor que la del túnel supersónico.

Otra clasificación que se hace para los túneles se basa según la forma de la sección transversal de la zona de prueba, la cual puede ser cuadrada, rectangular, rectangular con esquineros, octogonal, circular o elíptica.

2.2.3. ÁREAS DE DESARROLLO

A pesar de que la conceptualización histórica del túnel aerodinámico se centro en el análisis del comportamiento aeronáutico, hoy en día, las áreas de desarrollo donde se utilizan los túneles como herramienta de estudio e investigación son muy amplias. A continuación unos ejemplos de sus aplicaciones:

En la Mecánica de Fluidos: se estudia de manera controlada los fenómenos reales que ocurren, por ejemplo en la formación y desprendimiento de la capa límite, o bien, en el comportamiento de gases a diferentes velocidades, densidades, presiones, o el efecto de la fricción superficial.

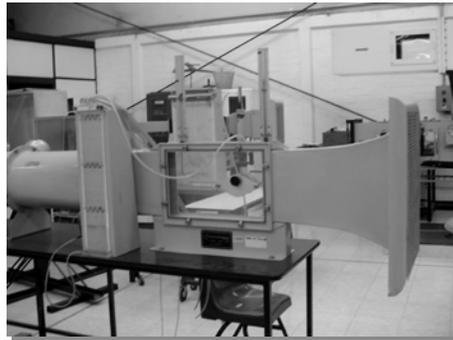


Figura 10: Túnel Aerodinámico del Instituto Politécnico Nacional de México, Escuela Superior de Ingeniería Aeronáutica, Unidad Ticoman.



Figura 11: Túnel Aerodinámico de la Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Civil.

En la Industria Aeronáutica: se estudia el vuelo de las naves y realiza estudios de sustentación de alas, resistencia de avance, estabilidad estática y dinámica.

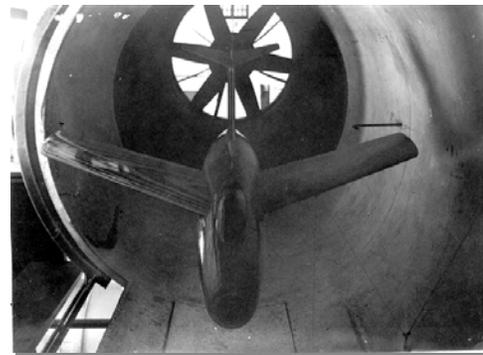


Figura 12: Imágenes ilustrativas de un modelo a escala de un avión dentro de Túnel con una sección de prueba elíptica y circular.

En la Industria Automotriz: se experimenta nuevas geometrías en carrocería, la optimización de sistemas de enfriamiento, aire acondicionado y estudios de la distribución de la presión del viento sobre la superficie del automóvil para el diseño de carrocerías. En la figura 13 se ejemplifica un estudio de diseño aerodinámico, por medio de la técnica de visualización con humo.



Figura 13: Estudio aerodinámico de carrocerías con técnica de visualización con humo.

En la Industria del Deporte: se estudia y se perfecciona diseños de bicicletas, como se ilustra en la figura 15, trineos, autos de carreras, vestimenta, etc. Con la finalidad de tener la menor resistencia posible durante la actividad, ejemplo de ensayos para saltos con paracaídas como se ilustra en la figura 14.

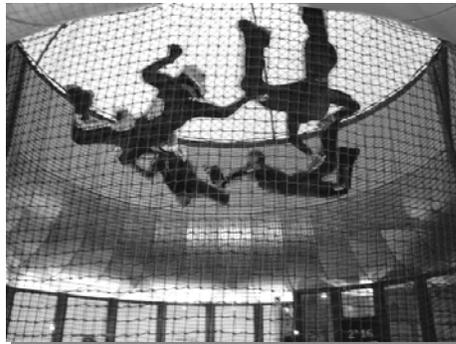


Figura 14: Ensayos de saltos con paracaídas.



Figura 15: Estudio de equipo para ciclismo.

En la Ingeniería de Medio Ambiental: se estudia el desplazamiento de contaminantes, el arrastre de nieve y lluvia, estudios de transporte de suelos como es la formación de dunas, erosión. Se practican ensayos del comportamiento de diversos aerogeneradores, como se muestra en la figura 16.

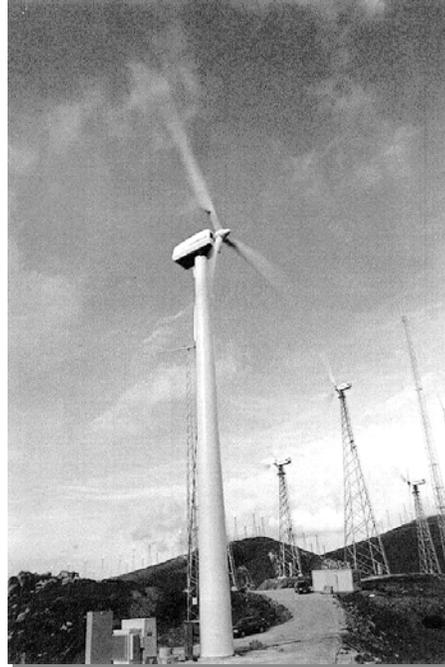


Figura 16: Imagen ilustrativa de generadores de energía eólica.

En la Ingeniería Civil: se realizan pruebas para cuantificar la carga dinámica y estática del viento en edificios de gran altura, en la figura 17 se muestra una torre de transmisiones dentro de la sección de pruebas durante un ensayo. Este tipo de experimentos provee información sobre la flexibilidad de la estructura, vibraciones inducidas por el viento, puentes de gran e incluso mediana luz sometidos a la acción del viento, etc.

En la figura 18 se aprecia el tipo de modelos y adaptaciones con sondas de toma para presiones, sobre la superficie del modelo a escala.

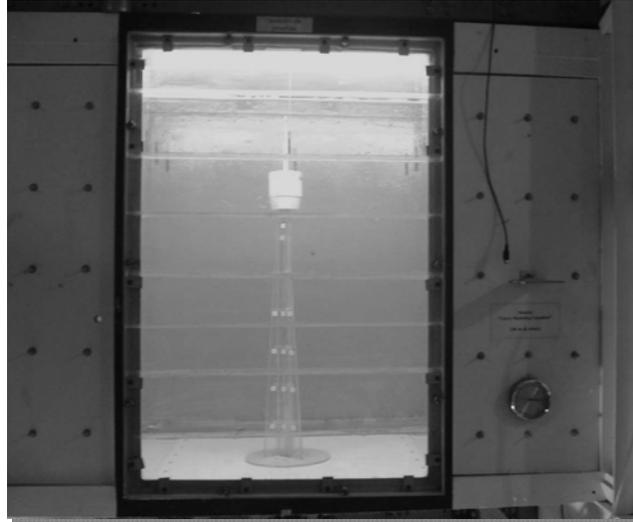


Figura 17: Sección de Pruebas de Túnel Aerodinámico de la Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.



Figura 18: Detalle de un modelo a escala para estudio de presiones, en Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

En la Arquitectura: se realizan estudios del comportamiento del viento en determinadas geometrías y complejos arquitectónicos, medición de corrientes de convección natural o forzada, determinación de

orientaciones óptimas según los vientos dominantes, estudios de proyectos en diferentes contextos topográficos, estudios de la incidencia del viento sobre los peatones, diseño y selección de estrategias pasivas.



Figura 19: Modelo a escala, técnica de visualización con humo. Edificio del World Trade Center,

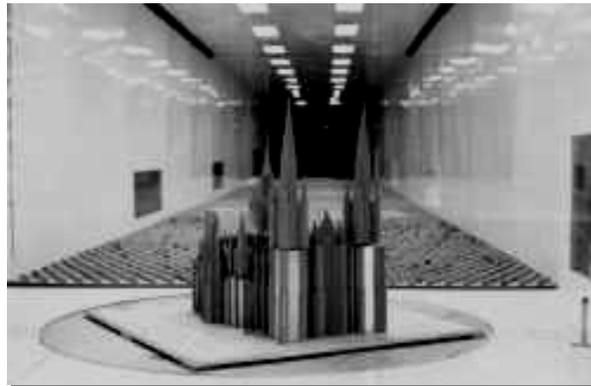


Figura 20: Modelo a escala, estudio del comportamiento de viento en un contexto urbano. Túnel Aerodinámico de capa límite terrestre.

2.3. TÚNEL AERODINÁMICO PARA ESTUDIOS EN ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

Los aspectos físicos y funcionales en el diseño de un túnel están condicionados al uso específico que se le dará. En el caso particular de los túneles aerodinámicos para arquitectura bioclimática, se debe considerar que el objetivo principal es identificar las variables en un ensayo, estas serían las presiones o las velocidades, condiciones atmosféricas, contexto ya sea urbano-suburbano o rural, establecidas según la localidad del caso en estudio. Estas variables intervienen directamente en las estrategias pasivas de aprovechamiento o bloqueo del flujo de viento; con la intención de provocar confort espacial, salud e higiene para los usuarios, considerando el menor impacto al medio ambiente. Con esta línea de pensamiento, se proyectan diseños sustentables que permiten el estudio y la posibilidad de incorporar sistemas de generación de energías limpias. El túnel permite analizar puntos estratégicos para proyectos de generación de energía eólica. La información obtenida por medio de los ensayos en los túneles aerodinámicos permitirá consolidar las decisiones en el diseño formal y funcional de proyectos arquitectónicos o propuestas urbanas.

2.3.1. PARAMETROS DE SIMILITUD CONSIDERACIONES FÍSICAS FUNCIONALES DEL TÚNEL

De acuerdo con los principios de análisis dimensional y de semejanza, habituales en Mecánica de Fluidos, la realización de un ensayo en túnel aerodinámico con un modelo a escala del prototipo real requiere de la semejanza geométrica, semejanza cinemática y semejanza dinámica entre el flujo de aire alrededor del modelo a escala y el movimiento de viento alrededor del prototipo real. Los parámetros de similitud deben ser seleccionados considerando la información que se quiere obtener¹⁶.

La **Semejanza Geométrica**, implica que en el modelo de ensayos se debe considerar todas las variables formales que aerodinámicamente son significativas en determinado caso de ensayo. No quiere decir que la maqueta debe ser detalladamente una replica del prototipo real, debe manejar similitud formal y reproducir todos los elementos del contexto aerodinámicamente relevantes.

La **Semejanza Cinética**, implica la velocidad del fluido en este caso la semejanza de velocidad del viento del prototipo real y el modelo a escala.

La **Semejanza Dinámica**, implica que el flujo de aire alrededor del modelo a escala, debe ser también semejante al flujo de viento alrededor del prototipo real, esto se obtiene cuando las fuerzas que actúan sobre una masa de aire están en la misma relación sobre el modelo que en el prototipo. Existen números que involucran una amplia variedad de fuerzas que pueden actuar sobre una partícula fluida (inercial, de presión, viscosa), estos números reciben los siguientes nombres:

- Número de Euler
- Número de Mach
- Número de Reynolds
- Número de Jensen
- Número de Froude
- Número de Strouhal
- Número de Cauchy
- Número de Grashof

Estos parámetros establecen, que si determinado valor en el modelo a escala es el mismo o similar al del prototipo real, se da por validado el ensayo. Para seleccionar el valor adimensional que nos permitirá establecer los parámetros de semejanza, primero se debe especificar cuales serían los casos de estudio. A continuación se describen algunos ejemplos:

1. Estudio del comportamiento del viento sobre un diseño con formas poco habituales, por ejemplo diseños orgánicos.
2. Estudio de la acción del viento sobre el diseño de edificaciones en contextos rurales, suburbanos y urbanos.
3. Estudio de los efectos del viento sobre los peatones en contextos rurales, suburbanos y urbanos.
4. Estudio de estrategias pasivas: amplificación de los efectos del viento o modificación del flujo por obstáculos en contextos rurales, suburbanos y urbanos.
5. Estudios de edificios en entornos industriales donde se genera contaminación, para asegurar la dispersión adecuada de contaminantes.
6. Estudio para la selección de una ubicación para proyectos de generación de energía eólica.

En el caso de estudiar el comportamiento del viento sobre un diseño con formas poco habituales, se debe contemplar la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas por fricción, normalmente expresadas en función de parámetros geométricos (la longitud característica L , que es la altura del prototipo real) y del flujo (densidad ρ , velocidad V y viscosidad dinámica ν). El valor adimensional que define los parámetros de similitud bajo las condiciones mencionadas se denomina Número de Reynolds¹⁹.

Su importancia radica en provocar una semejanza aerodinámica, tomando en cuenta la forma del proyecto que repercute en las presiones del viento²⁰. Este número se utiliza para experimentos donde el modelo a escala se mantiene estático. Si en una simulación el número de

¹⁹ Este número recibe su nombre en honor a Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883. www.wikipedia.org

²⁰ Melaragno Michele. Wind in Architectural and Environmental Design. Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA, 1982.

Reynolds es similar o igual al del prototipo a escala real, se da por válido los resultados obtenidos y se concluye que el modelo y el prototipo tienen similitud dinámica²¹. Es decir el comportamiento del flujo del viento simulado es similar o igual al flujo de viento real.

$$Re_{\text{modelo}} = Re_{\text{prototipo}}$$

El número de Reynolds se define por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}}$$

Si la fuerza inercial es la resistencia frontal al flujo de viento, y la fuerza viscosa es la fricción entre las líneas de flujo y los costados del objeto en estudio, proyectos arquitectónicos cuya cara frontal al viento le presenta menor resistencia y gran rozamiento en sus caras laterales dará como resultado números de Re pequeños y un régimen de comportamiento de las partículas del flujo laminar; así como proyectos arquitectónicos cuya cara frontal al viento le presenta mayor resistencia y menor rozamiento en sus caras laterales dará como resultado números de Reynolds altos y un régimen de comportamiento de las partículas del flujo turbulento.

Para definir este número se debe considerar los mismos componentes del fluido tanto para el modelo como para el prototipo. Por lo tanto la ecuación también se puede expresar:

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

²¹ Barlow, Rae & Pope. Low Speed Wind Tunnel-Testing. 3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc.USA 1999.

Estas variables son:

ρ : Densidad del aire

μ : Viscosidad dinámica del aire.

ν : viscosidad cinemática del aire.

T: Temperatura del aire.

V: velocidad del aire.

L: longitud característica del objeto de estudio.

La dependencia de las cargas aerodinámicas del número de Reynolds puede plantear errores de interpretación, presentando un régimen de turbulento en el prototipo y un régimen de flujo laminar en el modelo a escala. Para conservar el número de Reynolds, se tendría que conservar el valor de la velocidad de tal forma que si la escala es 1:100, la velocidad en los ensayos será proporcional a la escala; y se imposibilita debido a la categoría del túnel, ya que los valores de la velocidad superan la velocidad del sonido. Para poder realizar este tipo de ensayos considerando geometrías redondeadas, bastaría que el modelo presentara rugosidades en las superficies curvas, creando así artificialmente una capa límite turbulenta sobre la superficie; se debe considerar que la rugosidad puede reducir los efectos de escala, pero no eliminarlos totalmente. Este aspecto abre un gran panorama de investigación para estudios sobre proyectos formalmente orgánicos y parámetros de similitud.

Si se desea ensayar con proyectos de geometrías ortogonales o bordes afilados, en diferentes contextos urbanos la igualdad del número Reynolds es una condición de ensayo que no es necesaria reproducir, bastando con comprobar que el número de Reynolds de los ensayos este por encima del valor crítico, es decir $<100,000^{21}$. Sin embargo existe una variable inseparable de cualquier prototipo arquitectónico, esta es la rugosidad de su contexto. El contexto puede ser urbano, suburbano o rural.

Fuentes Freixanet y Rodríguez Viqueira²², explican detalladamente por medio de modelos matemáticos la estimación de la velocidad del viento considerando la rugosidad del contexto. Se puede explicar básicamente que entre mayor rugosidad, mayor será la afectación o disminución de la velocidad y mayor será la zona de gradientes de velocidad hasta llegar a la capa límite atmosférica. Como se muestra en la figura 21, la capa límite atmosférica es el límite donde se muestra un gradiente de velocidad, es decir, donde se presenta mayor o menor turbulencia condicionada a la rugosidad terrestre. Esta se clasifica según el tipo de terreno, por clase de rugosidad y longitud de la misma, como se muestra en la tabla 1, además es necesario considerar un factor de corrección, por incertidumbres en las correcciones. En caso de profundizar en el tema se recomienda consultar las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento del Gobierno de México.

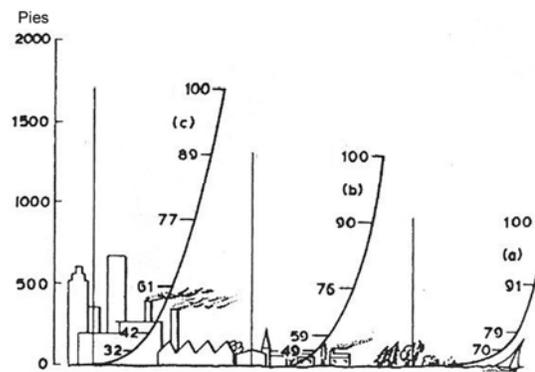


Figura 21: Imagen Ilustrativa de la capa límite atmosférica, donde se muestran los gradientes de velocidad en distintos tipos de terreno²⁰.

²² Fuentes Freixanet Víctor y Rodríguez Viqueira Manuel. "Ventilación Natural: Cálculos Básicos para Arquitectura", Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México.

Tipo de terreno	Altura de obstrucciones	Capa de fricción o altura de capa límite	Constante de rugosidad	Longitud de rugosidad	Exponente de velocidad media	Velocidad de fricción
		δ	A_0	Z_0	a	v^*
	(m)	(m)		(m)		%v
Mar abierto, tundra o desierto	0 - 0.30	250	1.16	0.001	0.11	0.01596v
Campo abierto con arbustos bajos o Aeropuertos	0.30 - 0.60	300	1.00	0.030	0.15	0.02530v
Campo con vegetación media	0.95 - 1.90	350	0.76	0.095	0.20	0.03156v
Suburbios, poblados bajos (máximo 2 niveles)	3.0 - 6.0	400	0.59	0.30	0.25	0.04192v
Zona Urbana (entre 3 y 6 niveles)	9.5 - 19.0	450	0.46	0.95	0.30	0.06240v
Centros Urbanos, edificios altos (más de 6 niveles)	20.0 - 60.0	500	0.35	3.00	0.36	0.12208v

Tabla 1: Constantes de rugosidad del terreno para diferentes capas límites²².

Con el objetivo de reproducir el comportamiento del flujo de los vientos naturales, se debe replicar la apropiada distribución de los gradientes de velocidad en función al caso de estudio. Para ello se utilizan simuladores de gradiente de velocidad, estos son dispositivos, como barras horizontales o verticales, grillas, entre otros; que simulan la rugosidad del terreno²³. En las figura 22 a 25 se observa las dimensiones y disposición de los simuladores para un caso en estudio de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. En donde se muestra elementos rugosos, agujas para la simulación de la capa límite atmosférica y agujas para la capa límite

²³ Campbel y Standen." Progress report ii on simulation of earth's surface winds by artificial thickened wind tunnel boundary layers". 1969.

parcial. La dimensión de cada una de ellas depende de cada contexto, y escala en estudio²⁴.

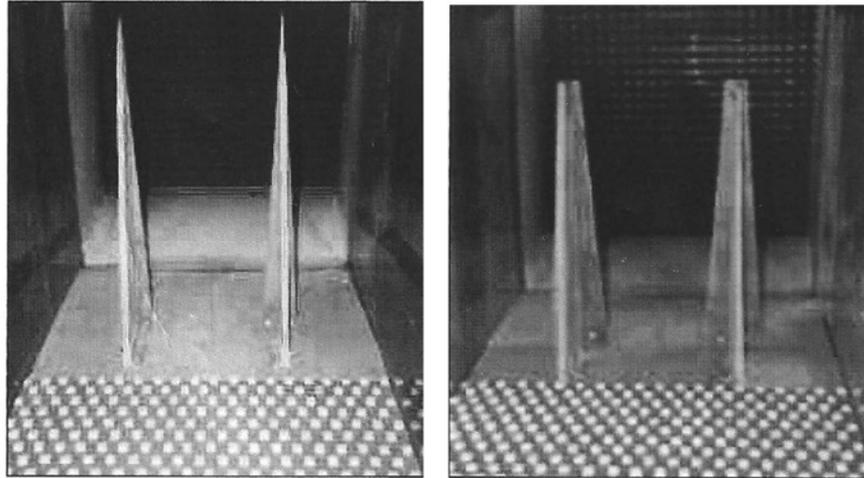


Figura 22: Vista de los elementos simuladores de gradiente de velocidad. A la izquierda se aprecia las agujas Staden que en conjuntos con los elementos rugosos reproducen una capa límite atmosférica de espesor total y a la derecha se ven las agujas truncadas que permiten junto con la rugosidad una simulación parcial de la capa límite.

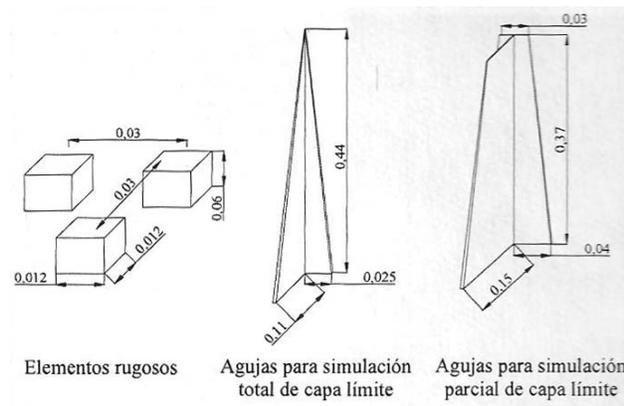


Figura 23: Dimensiones de los simuladores de gradiente de velocidad para capa límite atmosférica y el desarrollo del perfil de velocidad.

²⁴ Irwin, H.P.A.H. "The design of spires for wind simulation", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1981.

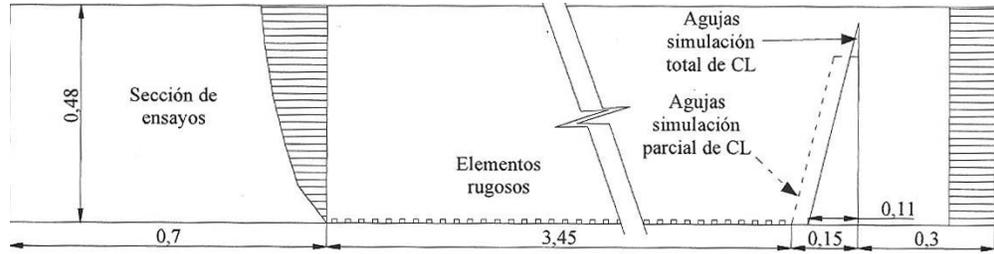


Figura 24: Disposición de los simuladores de gradiente de velocidad para capa límite atmosférica y el desarrollo del perfil de velocidad.

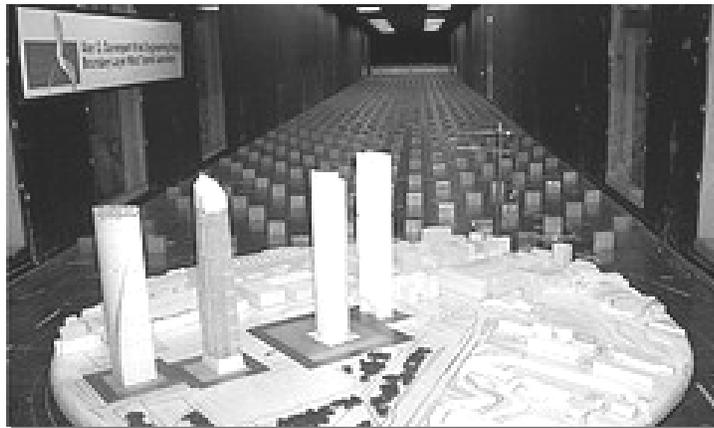


Figura 25: Imagen ilustrativa de ensayo de la incidencia del viento sobre cuatro rascacielos dentro de un contexto urbano.

En estos casos de estudio es importante que se replique correctamente la rugosidad del contexto²⁵. Para validar estos resultados se utiliza el valor adimensional de Jensen. Este se define como la relación entre la longitud característica del prototipo, L , y la longitud de rugosidad del terreno, Z_0 . Este valor adimensional demostraría que la turbulencia del flujo de viento en el túnel aerodinámico tiene o no, el mismo comportamiento que el flujo de viento natural.

²⁵ Cermak, J.E. "Applications of wind tunnels to investigation of wind engineering problems". A1AA Journal, vol.17.1979.

La ecuación expresa:

$$J_e = \frac{L}{Z_o}$$

La verificación del cumplimiento del parámetro de semejanza por medio del Número de Jensen en un ensayo específico, requiere solo la determinación experimental del perfil de velocidades (y por lo tanto de la longitud de rugosidad Z_o) en el túnel. Para que se cumpla este parámetro de similitud, debe de simularse satisfactoriamente el perfil de velocidades en la parte inferior de la capa límite, en la cual la rugosidad superficial es la escala de longitud característica. No obstante, las fluctuaciones turbulentas de baja frecuencia, que se escalan con la altura de la capa límite atmosférica, no estarán representadas automáticamente siendo necesario puntualizaciones adicionales; para mayor detalle consultar Dyrbye & Hansen²⁶.

Es importante considerar que a la hora de planificar una prueba, y considerar al prototipo y a su contexto, dentro de la variable de rugosidad, se podran presentar cambios. La rugosidad del contexto podría variar por crecimiento o retiro de la vegetación, edificación o demolición de construcciones, por lo que la variable de rugosidad debe considerar el caso menos favorable, según la estrategia a estudiar. Por ejemplo si se desea ensayar un modelo bajo la consideración de ventilación, se recomienda considerar un panorama con obstrucciones. En caso contrario si se desea estudiar el bloqueo o la menor incidencia de los vientos, es necesario considerar un campo abierto. Estas consideraciones deben de estar bajo los criterios de cada diseñador.

²⁶ Dyrbye & Hansen. "Wind Effects on Buildings and Structures". Technical Committee T12: Wind Effects, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Brussels. 1978.

2.3.2. CONSIDERACIONES FISICAS FUNCIONALES

Como se muestra en la figura 26 y 27 los elementos que conforman un túnel aerodinámico se presentan a continuación:

1. Campana de Contracción.
2. Sección de Pruebas o Cámara de Ensayos.
3. Difusor.
4. Sistema de Propulsión (Ventiladores o Abanicos).
5. Descarga del flujo de Aire.

En caso de ser de circuito cerrado la descarga de aire ingresa nuevamente a la zona de contracción.

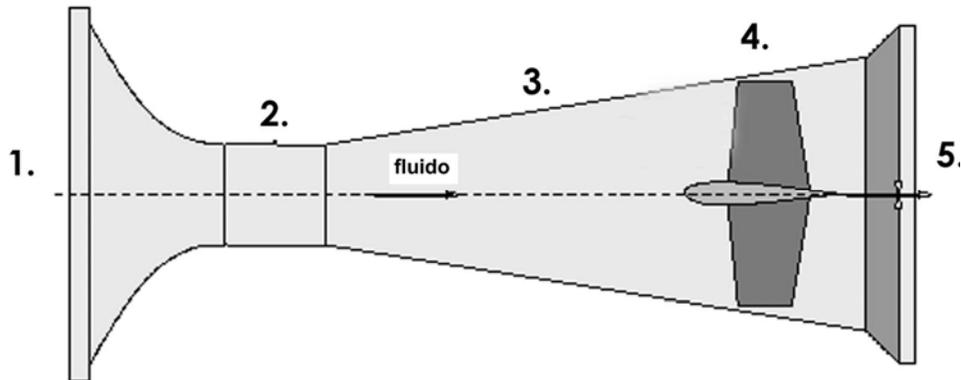


Figura 26: Esquema de túnel aerodinámico de circuito abierto, tipo Eiffel con cámara de ensayos cerrada¹⁵.

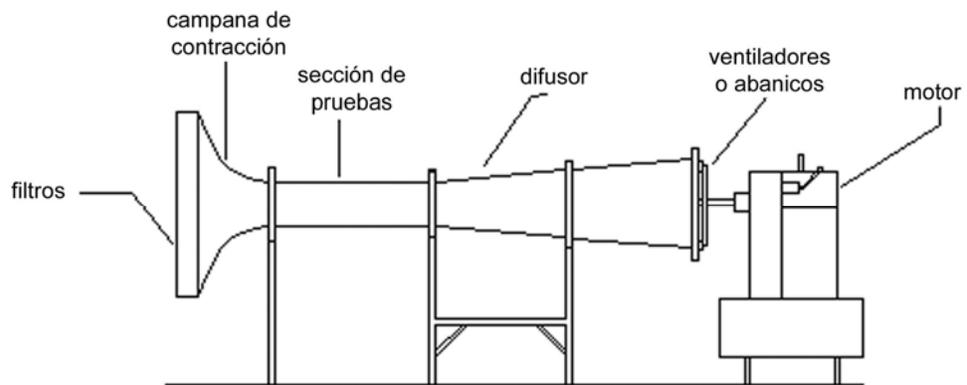


Figura 27: Esquema Longitudinal de túnel aerodinámico de circuito abierto (tipo Eiffel) con cámara de ensayos cerrada.

Se desarrolla el siguiente apartado bajo las consideraciones del marco referencia y estableciendo que el tipo de ensayos va direccionado a la arquitectura bioclimática. La primera consideración física-funcional para un túnel aerodinámico, a tener en cuenta es que suelen ser instalaciones voluminosas, que requieren mucho espacio dentro del laboratorio o incluso del edificio.

Iniciando la descripción del túnel por su eje central, es fundamental que la sección de pruebas sea de menor área que el resto del túnel, por un concepto de conservación de masa del caudal de viento. Al ser esta área menor que el resto del área del túnel, se genera una velocidad mayor cerca del modelo a estudio, ahorrando energía en el ventilador; este aspecto además reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel.

Es importante considerar que el tamaño de la sección de pruebas, puede variar mucho los valores de magnitud de velocidades. Esto es así por las limitaciones señaladas anteriormente en relación con el número de Reynolds y con la potencia requerida.

En cualquier caso que se involucre el Número de Reynolds, parte de las características que sea un valor superior a 10^5 . Teniendo en cuenta la definición del Número de Reynolds, dado que las propiedades del fluido son difícilmente modificables, aumentar el valor de este parámetro significa aumentar el valor de la velocidad en la sección de ensayos, aumentar el valor de la longitud característica de los modelos a ensayar o ambos. En el caso de la longitud característica L , está limitada por características geométricas y dimensionales de la sección de pruebas, ya que el modelo no puede bloquear excesivamente el conducto. Por lo que se establece un valor máximo para el coeficiente de bloqueo (este coeficiente, es la relación entre el área frontal del modelo y el área frontal de la sección de pruebas) del 10%, lo que significa que el área frontal de la sección de pruebas deberá de ser superior a L^2 . Por lo tanto resulta más ventajoso incrementar el valor de Re , aumentando el

tamaño de la sección de pruebas y por ende el del modelo que incrementar únicamente la magnitud de la velocidad.

Otra razón para la dimensión de la sección de pruebas radica en el tipo de estudio. Si se pretende que el fenómeno para el modelo a escala y para el prototipo sean iguales y así poder validar los resultados, es vital la simulación de la capa límite atmosférica. Por lo que la escala del modelo fijaría la escala de la capa límite atmosférica (300m o más), la consecuencia sería: una sección de pruebas grande o una escala muy pequeña para el modelo. Una escala reducida para el modelo, no es una decisión conveniente, por las dificultades de fabricación y medición, aún más si se involucra los valores del número de Reynolds. La longitud de la sección de ensayos se precisa que sea al menos 10 veces la dimensión transversal característica. Esta longitud permite colocar los simuladores de gradiente de velocidad, que facilitan la simulación de la capa límite terrestre por crecimiento natural del fenómeno de acuerdo con el valor adimensional Jensen.

Por lo tanto; túneles de viento de grandes dimensiones, a bajas velocidades, presenta leves cargas aerodinámicas sobre la estructura, lo que permite abaratar su construcción.

La sección de ensayos se recomienda que sea cerrada y de área constante, de sección cuadrada o rectangular; el área transversal con una relación 1:4 veces la otra cara transversal. Las esquinas pueden ser biseladas para minimizar interferencias entre las capas límites. Se recomienda que el material que compone a la sección de pruebas sea completamente transparente para permitir la visualización en el caso de utilizar técnicas de ensayos cualitativas; o que la sección tenga ventanas y puertas que permitan la instalación del modelo y la instrumentación en su interior. Si el diseño de la sección de ensayos lo permite, se recomienda que la base pueda girar, con la intención de analizar al modelo considerando distintos puntos de incidencia del flujo de viento.

1. La Contracción: Está compuesta por una campana donde ingresa el flujo y el cono de contracción. Esta zona de contracción tiene

como finalidad que la corriente llegue a la sección de pruebas con un perfil de velocidad uniforme, con baja turbulencia y una capa límite delgada. La contracción puede ser bidimensional, es decir que se contrae en la dirección de uno de los planos de simetría del túnel, lo que simplifica enormemente el proceso de construcción, o tridimensional, es decir, que se contrae en las dos direcciones de los planos de simetría; esto permite un mayor control sobre el crecimiento de la capa límite del túnel.

Los dos problemas que debe superar un cono de contracción tienen que ver con su geometría; primero, se produce un gradiente de velocidad opuesto al que se desea en la entrada y salida de la contracción, este fenómeno promueve el crecimiento de la capa límite, por lo que requiere una mayor potencia en el sistema de propulsión y como consecuencia se observa una disminución de la calidad de la medición. Además, la superficie de las líneas de flujo de una contracción rectangular choca con las paredes, lo que genera un flujo secundario, responsable del crecimiento de la capa límite y la reducción de la velocidad promedio, en ocasiones esto puede solucionarse haciendo un corte angulado en el cono de contracción.

3. El Difusor: debido a que las pérdidas a través de un ducto varían proporcionalmente con el cubo de la velocidad, el objetivo del difusor es reducir la velocidad expandiendo el fluido y recuperando la presión estática, el difusor está dividido en dos partes por el ventilador. Los difusores son muy sensibles a errores de diseño, pueden crear la separación de la capa límite del túnel de manera intermitente o estable, que es difícil de detectar y puede causar vibración en el túnel, oscilación del ventilador y variación en la velocidad de la sección de pruebas. El diseño del difusor resulta ser clave en el éxito del túnel, es necesario encontrar el punto óptimo para aumentar el área, sin permitir que la capa límite se desprenda. Los difusores se describen con la relación entre las áreas de entrada y salida o con el ángulo equivalente de cono, que es el

ángulo que surgiría al trazar un cono con un mayor ángulo de ataque entre el área de entrada y la de salida.

Hay que tener en cuenta que al difusor no le llega un flujo laminar, el aire que sale de la sección de pruebas no es uniforme lo que hace aún más difícil el papel del difusor¹².

El ángulo de divergencia de las paredes debe ser menor a 7° , para evitar el desprendimiento de la corriente.

4. Sistema de propulsión: para propiciar un flujo de aire en el túnel es necesario un generador de viento, el cual posee un motor o abanico; actualmente son eléctricos. Sin embargo existen túneles con motores de combustión interna especialmente para túneles no fijos. Los antecesores de estos túneles tenían ventiladores que eran accionados con cuerdas y poleas. Los abanicos pueden ser de flujo axial o de flujo radial también conocidos como ventiladores centrífugos, la elección de uno u otro depende de la configuración y del espacio destinado a la instalación del túnel.

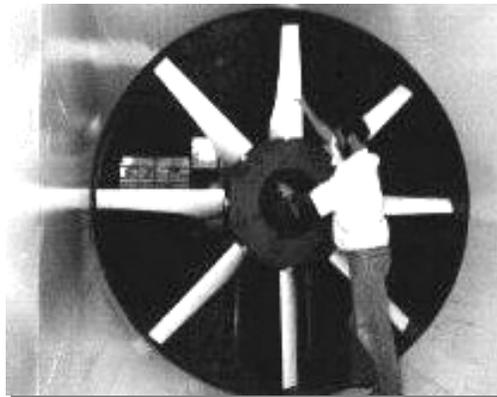


Figura 28: Rotor del ventilador axial de 2,5 m de diámetro, diseñado en la Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Ingeniería.

Condiciones de diseño: carga: 43,9 m; caudal: 121,5 m³/s; velocidad de giro: 750 rpm.

Para poder controlar el valor de la velocidad del viento en la sección de prueba y satisfacer las condiciones de simulación del

fenómeno de estudio, se debe de cuidar el no modificar las propiedades del flujo, este control debe estar en un rango amplio, por medio de:

Estrangulamiento del Flujo es una opción económica y consiste en regular la entrada o salida del viento por medio de persianas. El inconveniente es que podría perturbar el patrón de flujo y es de baja precisión. En un túnel de presión estas persianas o compuertas están colocadas a la entrada del aire, después del sistema de propulsión. Y en un túnel de succión las compuertas se encuentran a la entrada del aire y antes del sistema de propulsión.

Control de revoluciones esta opción es la más eficiente, mediante un sistema electrónico se modifica la magnitud de la frecuencia en el suministro de la energía eléctrica, a través de esta técnica es posible controlar el régimen del flujo de salida del sistema de propulsión.

2.4. TÚNEL AERODINÁMICO DEL LABORATORIO DE BIOCLIMÁTICA

La Universidad Autónoma Metropolitana en su Laboratorio de Bioclimática Unidad Azcapotzalco, cuenta con un túnel de viento tipo succión de circuito abierto de baja velocidad.

Este túnel fue diseñado y construido específicamente para utilizarse en pruebas experimentales para analizar el comportamiento del viento dentro y en el entorno exterior de las edificaciones, tanto en ambientes urbanos, suburbanos y rurales. Este equipo está particularmente enfocado a la realización de estudios en arquitectura bioclimática²⁷.

²⁷ García Chávez José Roberto. "Túnel de viento para pruebas experimentales en modelos físicos tridimensionales del laboratorio de arquitectura bioclimática". Pag 131. Departamento de Medio Ambiente para el Diseño. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

2.4.1. DESCRIPCIÓN FÍSICA Y FUNCIONAL

El túnel del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática es de circuito abierto, también conocido como túnel tipo Eiffel; de succión y de baja velocidad. Fue construido con madera, metal y acrílico. Como se muestra en la figura 29, tiene una longitud de 8,8m y una dimensión transversal en la sección de pruebas de 1m x1m x 1,20m.

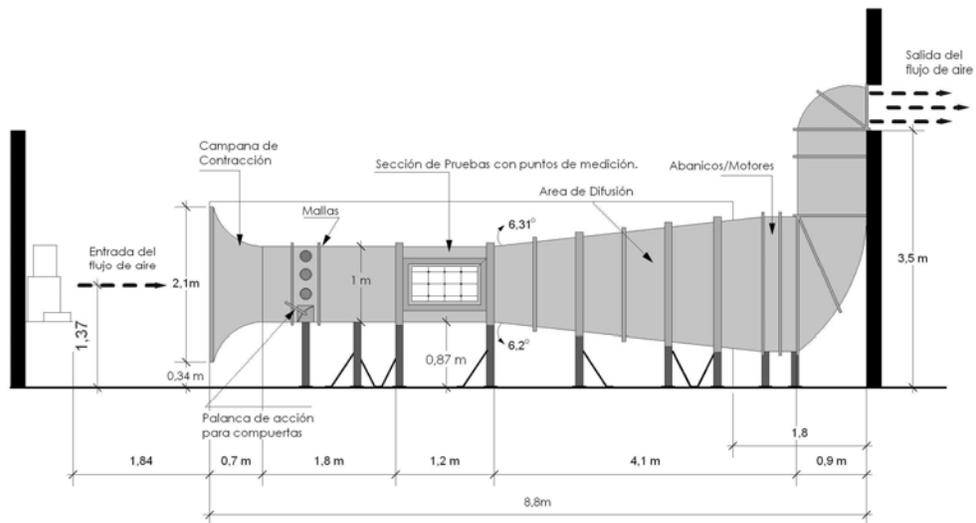


Figura 29: Elevación longitudinal del túnel del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática.



Figura 30: Vistas longitudinales de Túnel Aerodinámico del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática.

Como se mostró en la figura 29, el túnel está compuesto por:

1. Campana de Contracción.
2. Sección de Pruebas o Cámara de Ensayos.
3. Difusor.
4. Sistema de Propulsión (Ventiladores o Abanicos).
5. Descarga del flujo de Aire.

El flujo de viento entra por la campana de contracción que tiene una sección para la entrada del aire de 2,3m x 2,1m. Originalmente fue concebido con un sistema de persianas como se muestran en la figura 31, las cuales giran por medio de una palanca de acción manual, permitiendo la aceleración o desaceleración del flujo según su posición. Como se ilustra en la figura 32, el flujo de aire se filtra a través de una retícula de tubos PVC que tiene la finalidad de estabilizar el flujo entrante.

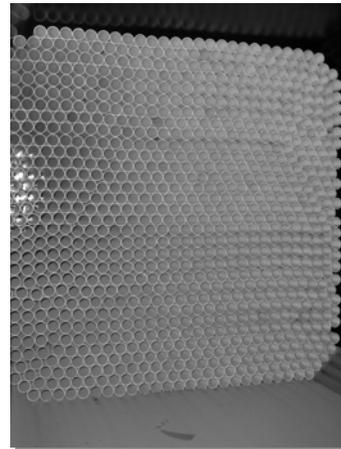


Figura 31: Campana de Contracción

Figura 32: Retícula de tubos PVC.

La sección de prueba es de 1m x 1m x 1,2m, con ventanas en acrílico en 3 de sus caras, cada cara posee 9 perforaciones que permiten introducir el soporte para el equipo de medición. Posee un área de difusión, la cual induce la salida del flujo de viento con menor velocidad que a su entrada. La cara superior tiene una inclinación de $6,31^\circ$ hacia

arriba y la cara inferior tiene una inclinación de $6,2^\circ$ hacia abajo, como se muestra en la figura 29.

Como se aprecia en las figuras 30 y 33, el túnel aerodinámico se acciona con sistema digital para control eléctrico tipo Varic (variador digital de frecuencia). Permite frecuencias de 0,1hz hasta 60hz. Este variador acciona 4 ventiladores con motores de 5 caballos de fuerza cada uno que se muestran en la figura 34.



Figura 33: Control eléctrico tipo Varic.

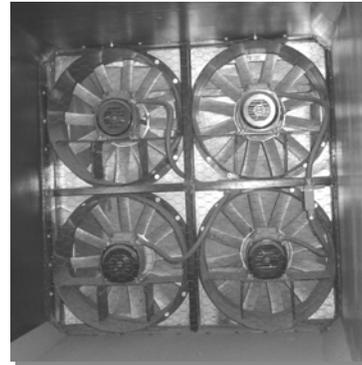


Figura 34: 4 motores de 5 caballos de fuerza.

El túnel de viento tiene incorporado a su estructura el conjunto de ventiladores y es soportado por una estructura metálica con una distancia promedio de 1.2m de distribución aleatoria, como se mostró en la figura 29.

2.4.2. MODIFICACIONES PERTINENTES

Retomando los conceptos desarrollados en el presente capítulo, el objetivo del túnel aerodinámico es realizar estudios con modelos arquitectónicos, se tomó la decisión de realizar una serie de modificaciones previo al inicio del desarrollo de las pruebas, que co ayuden al mejor desarrollo del flujo de viento.

Modificación en la Campana de Contracción

Eliminación de las persianas-generadores de turbulencia:

Los generadores de turbulencia consisten en cuatro persianas, sujetas a los costados laterales de la campana de contracción, es decir perpendiculares al eje longitudinal del túnel. Por medio de una palanca colocada al costado izquierdo del túnel, es posible modificar el ángulo de ataque de las persianas con respecto al eje longitudinal. Otra condición para los generadores de turbulencia es que la magnitud del ángulo entre cada persiana es el mismo, únicamente que entre las persianas las direcciones deben de ser opuestas entre ellas²⁸. Este dispositivo tiene la función de controlar la velocidad de entrada, al aumentar o disminuir la turbulencia del flujo. Al aumentar el ángulo de las persianas, aumenta la turbulencia.

Este fenómeno se explica de la siguiente manera; al aumentar el ángulo de incidencia de las persianas, aumenta la interacción entre las líneas de flujo; por lo tanto el número de Reynolds efectivo aumenta. Entonces al aumentar la inercia y disminuir el área de entrada del flujo de aire que queda entre cada persiana, la velocidad aumenta. Este efecto se comporta inversamente al disminuir el ángulo de las persianas. Por lo tanto este dispositivo es un variador de flujo. El concepto se describe en las siguientes imágenes.

²⁸ Medrano Mejía Antonio. "Optimización Aerodinámica de un Automóvil mediante deflectores de Viento: Proyecto Tarasko I" Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Unidad Adolfo López Mateos. México. D.F. 1998.

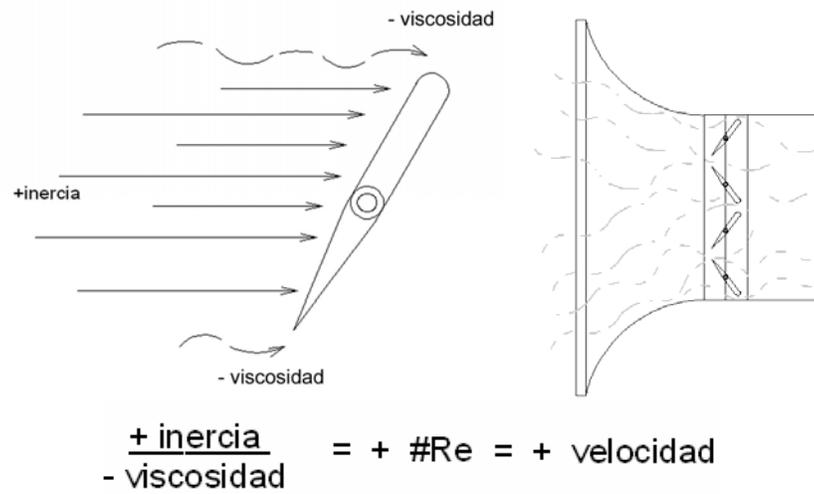


Figura 35: A la izquierda se observa en detalle la sección transversal y el comportamiento del flujo de viento en cuanto a la posición de una de las persianas. A la derecha un esquema de la entrada del flujo por la campana de contracción. El comportamiento del flujo es modificado según ángulo de las persianas.

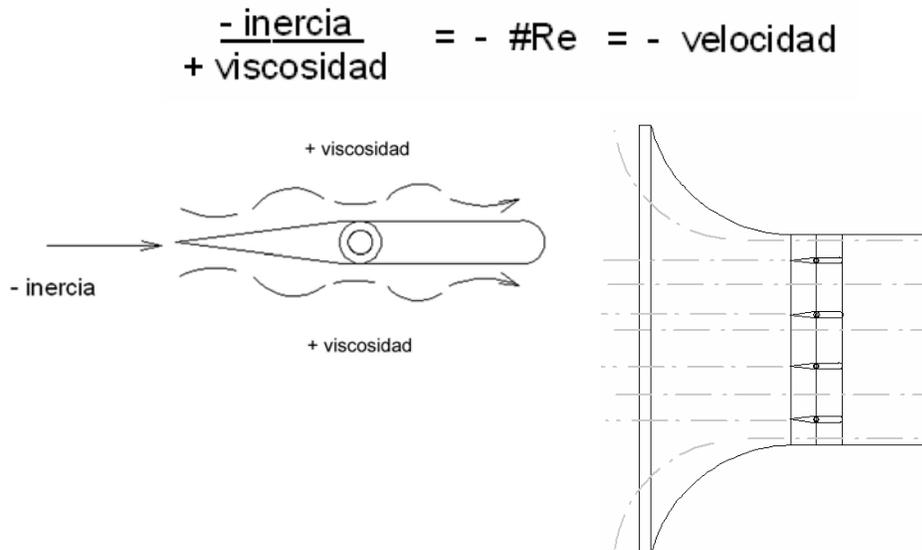


Figura 36: A la izquierda se observa en detalle en sección transversal el comportamiento del flujo de viento en cuanto a la posición de una de las persianas. A la derecha un esquema de la entrada del flujo por la campana de contracción. El comportamiento del flujo es modificado según ángulo de las persianas.

Sin embargo el túnel ya posee una unidad impulsora que cuenta con un variador de frecuencia digital que permite controlar el caudal del flujo de aire. Así que la presencia de las persianas representaba una obstrucción al ingreso del aire; forzando innecesariamente a la unidad impulsora y provocando mayor gasto energético. Otra razón es que las persianas para que cumplan su función deben ser colocadas en direcciones opuestas y las del túnel del Laboratorio de Bioclimática no fueron colocadas con la configuración adecuada. Estas modificaciones se muestran en las siguientes imágenes.



Figura 37: Campana de entrada con las persianas, nótese la disposición de las persianas.

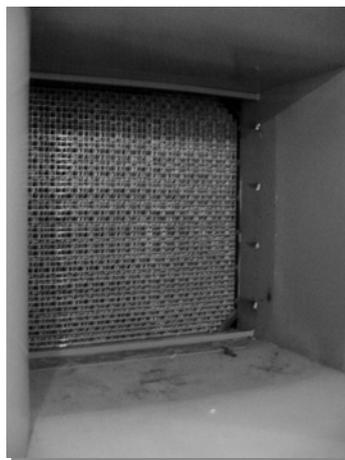


Figura 38: Campana de entrada sin persianas



Figura 39: Costado lateral derecho del túnel sin la palanca de acción para las persianas.

Modificación en la Sección de Pruebas

Definición de los puntos de medición:

La sección de pruebas cuenta con 3 ventanas en acrílico, estructuradas en madera. Fue necesario reemplazar el material, debido a grietas, y a deformaciones en las paredes del túnel, que conforma los puntos donde se inserta los instrumentos de medición. Con la ayuda de un equipo que determina la posición de determinado punto establecido completamente nivelado, se ubican y alinean todos los puntos para los orificios por donde se ingresó los instrumentos de medición. Se recomienda que estos orificios no se encuentren a una distancia menor de 6 veces el diámetro del instrumento de medición.



Figura 40: Con el apoyo un sistema de posicionamiento global, que permite establecer impecablemente alineados los puntos para las perforaciones en las ventanas de la sección de pruebas.

Se realizan nuevamente las perforaciones y se instrumenta con soportes como se muestra en la figura 41 (piezas en acero que cumplen la tarea de estabilizar cualquier instrumento que ingrese por el punto de medición) así como con tapones que permiten sellar los puntos donde no se esté midiendo. En las siguientes imágenes se muestra el proceso de modificación e implementación de la sección de pruebas.



Figura 41: Perforación y colocación de soporte. **Figura 42:** Ventanas con soportes instalados.

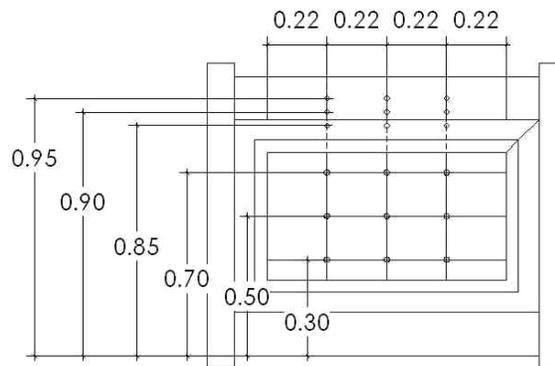


Figura 43: Diagrama de distribución de puntos para medición, elevación de la sección de pruebas, sin escala con cotas en metros.

Por las condiciones físicas de los instrumentos disponibles para las mediciones fue necesario implementarse con equipo de apoyo que permitiera colocar los instrumentos dentro de la sección de prueba y adaptarlos para las tomas de medición. En las figuras siguientes se muestra el equipo de apoyo empleado:

- Soportes.
- Flechas Soporte.
- Niples.
- Sujetadores.
- Sondas.
- Tapones, entre otros.



Figura 44: Flechas soporte.



Figura 45: Sondas para Tubo Pitot a Manómetro. **Figura 46:** Soportes

Se consideró la posibilidad de realizar un ensayo con la técnica de visualización con humo, por lo que se implementó al túnel con un equipo que permite hacer ejercicios de visualización con humo. Por lo que se diseñó un sistema proporcionado a la escala y a la fuerza de succión del túnel.

Este sistema considera las siguientes partes:

- Peine de Humo dimensión 0,98m x 0,28m.
- Resistencia para evitar la condensación.
- Compresora: potencia 3.5 HP
- Pistola distribuidora de aire y humo.
- Bomba de Humo.
- Tanque de Almacenamiento de Humo.

En la figura 47 se muestra el sistema de operación:

1. Se genera humo por medio de la bomba.
2. Se almacena en el tanque.
3. Por medio de la compresora se inyecta humo con la pistola al peine.
4. El peine distribuye el humo a la sección de pruebas, el peine cuenta con una resistencia que evita la condensación del gas.

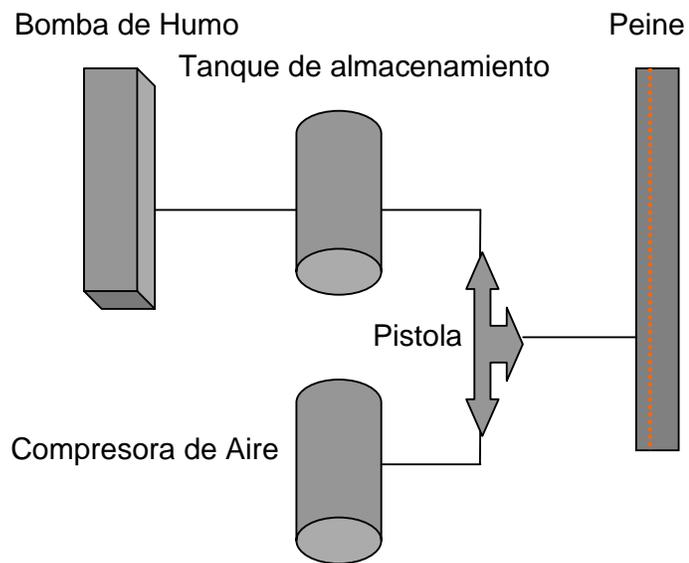


Figura 47: Concepto de sistema de operación para el peine de humo.

Las imágenes siguientes muestran el proceso de implementación para el sistema de generación de humo.



Figura 48: Imagen ilustrativa, pruebas con el peine de humo de 0,98m x 0,28m.



Figura 49: Compresora de aire, marca Goni, modelo 977. De 3.5 HP y una capacidad de 40 Lt de aire.



Figura 50: Instalación de la pistola de aire de extensión marca Goni.



Figura 51: Instalación de todo el equipo para la técnica de visualización con humo.



Figura 52: Instalación del equipo en el Túnel Aerodinámico.

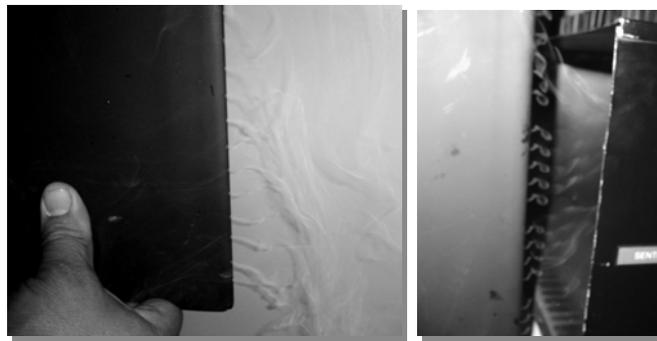


Figura.53: Pruebas de funcionamiento.

Figura 54: Pruebas de funcionamiento.

Mantenimiento del Túnel:

Debido a las características de túnel aerodinámico de circuito abierto, una de las desventajas que se presenta es la falta de control de las partículas que ingresen al ducto. No se puede colocar filtros en la campana con la intención de minimizar su contaminación, ya que restarían potencia y alterarían el comportamiento del flujo. Sin embargo se recomienda colocar una malla antes de los ventiladores. Previendo que una maqueta o algún objeto se desprenda durante algún ensayo y dañe los ventiladores. Se realizó una limpieza profunda, eliminando cualquier partícula de polvo con la intención de eliminar la posibilidad de que alguna partícula obstruyera los instrumentos de medición como los Tubos Pitot, o afectara el comportamiento del flujo de viento. Este ejercicio deberá realizarse como medida preventiva en el inicio de cada ensayo.

CAPITULO 3

Elemento de Estudio:

Flujo de viento en la Sección de
Pruebas

CAPITULO 3

El presente capítulo explica de manera accesible los conceptos referentes al flujo de aire, así como los instrumentos utilizados para su medición en la sección de pruebas de túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática.

3.1. CONCEPTOS CARACTERÍSTICOS DEL FLUJO DE AIRE

El flujo de aire que produce un túnel de viento y atraviesa la sección de prueba presenta variaciones de presión. Mediante la metodología propuesta es posible determinar el patrón de flujo y cuantificar la velocidad promedio, así como valores puntuales del ángulo de incidencia y dirección del flujo. Para definirlo se obtiene primeramente sus diferentes presiones. Este conjunto de conceptos describe la tipología del flujo de viento. La **magnitud de la velocidad** es la razón del movimiento del viento en una unidad de distancia por unidad de tiempo. Se representa por la letra V . En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en metros por segundo. Como se ejemplifica en la figura 55, para definir la velocidad de las partículas del aire se debe considerar no sólo la distancia que recorren por unidad de tiempo, sino también el régimen de desplazamiento y la dirección, por lo que la velocidad se expresa como una magnitud vectorial.

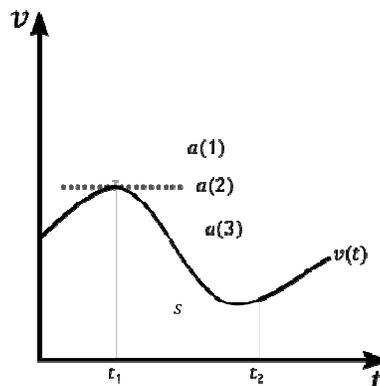


Figura 55: Diagrama de magnitud de velocidad.

El aire siempre fluirá de una región de presión mayor a una región de presión baja en la ausencia de adición de trabajo, por ejemplo los abanicos de succión. En el caso del túnel de viento los ventiladores provocan el movimiento de las partículas de aire, presentándose así tres tipos de presiones:

Presión Estática, representada por P_e .

Presión Dinámica, representada por q .

Presión Total, representada por P_t

La **presión estática** puede existir en un fluido en movimiento o en reposo, ya que todo fluido ejerce una presión sobre las paredes que lo contienen, manifestándose por igual en todas las direcciones. Esta presión puede ser positiva o negativa.

La **presión dinámica** se ejerce únicamente en la dirección del flujo de aire y es siempre positiva; es aquella que corresponde a la velocidad con que fluye el aire. Es la medida de la energía cinética del mismo. Se define por la siguiente ecuación:

q = Presión Dinámica.

ρ = Densidad del aire.

V = Velocidad.

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Se puede ejemplificar, como la presión generada por el viento en un determinado lugar y la energía cinética es decir la energía generada por el movimiento del viento que envuelve o choca contra el edificio.

La **presión total** depende del grado de compresión del aire y a su movimiento, se obtiene cuando el aire que fluye se desacelera hasta una velocidad cero mediante un proceso de fricción. Si el aire se encuentra en reposo, la presión total será igual a la presión estática.

Es necesario observar que mientras la presión estática es negativa en la succión y positiva en la descarga del flujo, la presión dinámica es siempre positiva, por lo que la presión total es la suma algebraica de ambas⁸.

Pt = Presión Total.

Pe= Presión Estática.

q = Presión Dinámica.

$$Pt = Pe + q$$

El teorema de Bernoulli explica este comportamiento para un flujo horizontal y sin pérdidas por fricción; indica como la presión total que un flujo ejerce es igual a la suma de dos presiones. Relacionando los cambios de velocidad y de presión a lo largo de una línea de corriente. Se establece de la siguiente manera:

Pt = Presión Total.

Pe= Presión Estática.

q = Presión Dinámica.

ρ = Densidad del aire.

V = Velocidad del viento.

$$Pt = Pe + \frac{1}{2} \rho V^2$$

ó

$$q = Pt - Pe$$

⁸ Real Cesar. "Acreditación del LABINTHAP como laboratorio secundario en velocidad de aire." Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 2002. y sus asesorías profesionales.

Y para la velocidad se establece la siguiente ecuación:

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

Por otro lado se tiene el enunciado a la conservación de la masa, es decir que todo el flujo de aire que entra a un ducto es la misma cantidad de flujo de aire que sale; y su velocidad es inversamente proporcional al área transversal que lo contiene.

Por lo tanto un cambio provocado en la sección transversal es proporcional a la diferencia de velocidad. Estos mismos cambios provocan variación en la presión dinámica y estática, siendo constante la presión total.

Este comportamiento se describe mediante la siguiente ecuación:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3 = A_n V_n$$

Las condiciones ambientales como presión atmosférica, temperatura y humedad relativa son variables necesarias para calcular la densidad del aire, variable que interviene en la magnitud de la velocidad del flujo de aire en el túnel de viento. Así como la energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. Así la energía del viento depende de la densidad del aire. Es decir su masa por unidad de volumen. En otras palabras en cuanto más pesado sea el aire más energía recibirá. Las notaciones y ecuaciones pertinentes para el despeje de la densidad del aire son las siguientes¹⁷:

¹⁷ Rodríguez Fausto. " Aplicaciones de la Aerodinámica Experimental a la Arquitectura Bioclimática " Instituto Politécnico Escuela Superior de Ingeniería Aeronáutica. México 2005.

A. Valor de la Presión de saturación, representada por Ps. Este valor es la máxima presión a la cual el aire puede mantener agua en estado gaseoso a una temperatura dada. Su unidad es kg/m².

1. Temperatura ambiente en grados Fahrenheit. Este dato se obtiene del termómetro; lectura tomada en el laboratorio, representada por T.
2. Constante 2,85.
3. Constante 3,537 x 10⁻³.

Ecuación:

$$Ps = 2,85 + 3,537 \times 10^{-3} (T^{2,245})$$

$$Ps = n \text{ lb/pie}^2 \longrightarrow Ps = n \text{ kg/m}^2$$

B. Valor de la Presión de vapor, representada por Pv; en kg/m².

- 1) Humedad relativa, es la que indica el higrómetro; representada por Hr; su unidad es en porcentaje.
- 2) Presión de saturación, su unidad es kg/m².

Ecuación:

$$Pv = Hr Ps$$

$$Pv = n \text{ kg/m}^2$$

C. Densidad del aire, cuya unidades pueden ser en Utm/m³ ó kg/m³.

- 1) Presión barométrica, representada por Pb. Este dato se obtiene de la lectura del barómetro, en mmHg. Se realiza posteriormente la conversión a kg/m².
- 2) Constante de 0,3779.

- 3) Presión de vapor, su unidad es kg/m^2 .
- 4) Aceleración de la gravedad, representado por g ; su unidad es m/s^2 , es un valor constante de $9,81 \text{ m/s}^2$.
- 5) Constante del aire = $29,256 \text{ m/}^\circ\text{K}$.
- 6) Temperatura ambiente en grados Kelvin. Este dato se obtiene del termómetro; lectura tomada en el laboratorio, representada por T .

Ecuación:

$$\rho = \frac{P_b - 0,3779 \times P_v}{9,81 \text{ m/s}^2 \times 29,256 \text{ m/}^\circ\text{K} \times T}$$

3.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para la obtención de las condiciones atmosféricas anteriormente descritas, se utilizó los siguientes instrumentos de medición:

Barómetro¹, se ilustra en la figura 56. Es un instrumento que mide la presión atmosférica. La presión atmosférica representa el peso por unidad de superficie terrestre ejercida por la atmósfera. Los barómetros son instrumentos fundamentales para medir el estado de la atmósfera y realizar predicciones meteorológicas. Las altas presiones corresponden a buen tiempo mientras que las bajas presiones son indicadores de regiones con tormentas.

¹ Los primeros barómetros estaban formados por una columna de líquido encerrada en un tubo cuya parte superior está cerrada. El peso de la columna de líquido compensa exactamente el peso de la atmósfera. Los primeros barómetros fueron realizados por el físico y matemático italiano Evangelista Torricelli en el siglo XVII. La presión atmosférica equivale a la altura de una columna de agua de unos 10mtr de altura. En los barómetros de mercurio, cuya densidad es 13.6 veces mayor que la del agua, la columna de mercurio sostenida por la presión atmosférica al nivel del mar en un día despejado es de aproximadamente unos 760 mm.



Figura 56: Barómetro. Marca: OTA Keikiseisakisho. Magnitud: presión barométrica. Tipo: Analógico. Rango de medición: 488 a 788 mmHg. Resolución mínima: 1 mbar = 0.75 m.

Termómetro-Higrómetro², este instrumento digital permite hacer 2 tipos de lecturas y variar sus unidades de medición, figura 57. La primera medición es el parámetro termodinámico del aire que caracteriza el calor, o transferencia de energía, se utilizó la unidad de Celsius. Y la segunda lectura corresponde a la humedad relativa; que es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental. Se expresa en tanto por ciento.

² El creador del primer termoscopio fue Galileo Galilei; éste podría considerarse el predecesor del termómetro. Consistía en un tubo de vidrio que terminaba con una esfera en su parte superior que se sumergía dentro de un líquido mezcla de alcohol y agua. Al calentar el agua, ésta comenzaba a subir por el tubo. Sanctorius incorporó una graduación numérica al instrumento de Galilei, con lo que surgió el termómetro.



Figura 57: Termo-Higrómetro. Marca: TES. Modelo 1360. Magnitud: Temperatura /Humedad. Tipo: Digital. Rango de medición: 10% a 95% humedad; 20 °C a +60 °C temperatura. Resolución mínima: 0.1% humedad. 0.1 °C temperatura.

La velocidad de cualquier flujo es uno de los parámetros más importantes en todos los problemas de dinámica de fluidos. Existen diferentes instrumentos para la medición de velocidad de gases, pero debido a su simplicidad y confiabilidad, el tubo estático de Pitot³ es aún el instrumento de medición de velocidad más usado.

Para la medición de la presión dinámica se utilizaron dos Tubos Pitot de diferentes características, un manómetro inclinado y un anemómetro de hilo caliente; con la finalidad de validar los datos obtenidos, mediante una comparación de resultados. A continuación una descripción de los instrumentos:

³ *Henri Pitot (1695-1771) fue un ingeniero y físico francés; inventó este instrumento que permite calcular la velocidad de un caudal; él lo utilizó para calcular la velocidad del Sena.*

Tubo Pitot Estático tipo L Extendible, consiste de dos tubos concéntricos. La imagen del instrumento se muestra en la figura 58.



Figura 58: Tubo Pitot Estático Tipo L. Marca: Air Flow. Material: Acero inoxidable. Diámetro:4mm. Nariz: Elipsoidal. Coeficiente de corrección: 0.85

El tubo interior tiene un orificio en el extremo que apunta directamente hacia la corriente de aire y registra la presión total del flujo, adicionalmente por medio de 8 orificios colocados alrededor del tubo se registra la presión estática, se ejemplifica en el figura 59. Opera según las bases de la mecánica de fluidos y es un ejemplo clásico de la aplicación práctica de las ecuaciones de Bernoulli. La parte posterior a la entrada del flujo se fija por medio de sondas al manómetro.

Metodología de uso: este aparato proporciona las presiones puntuales y consiste en dos tubos concéntricos. El tubo interior está perforado con un hueco perpendicular al flujo de aire para medir la presión total o de estancamiento, el tubo exterior cuenta con 8 orificios los cuales registran una presión estática, que es medida por el ramificador de presión estática.

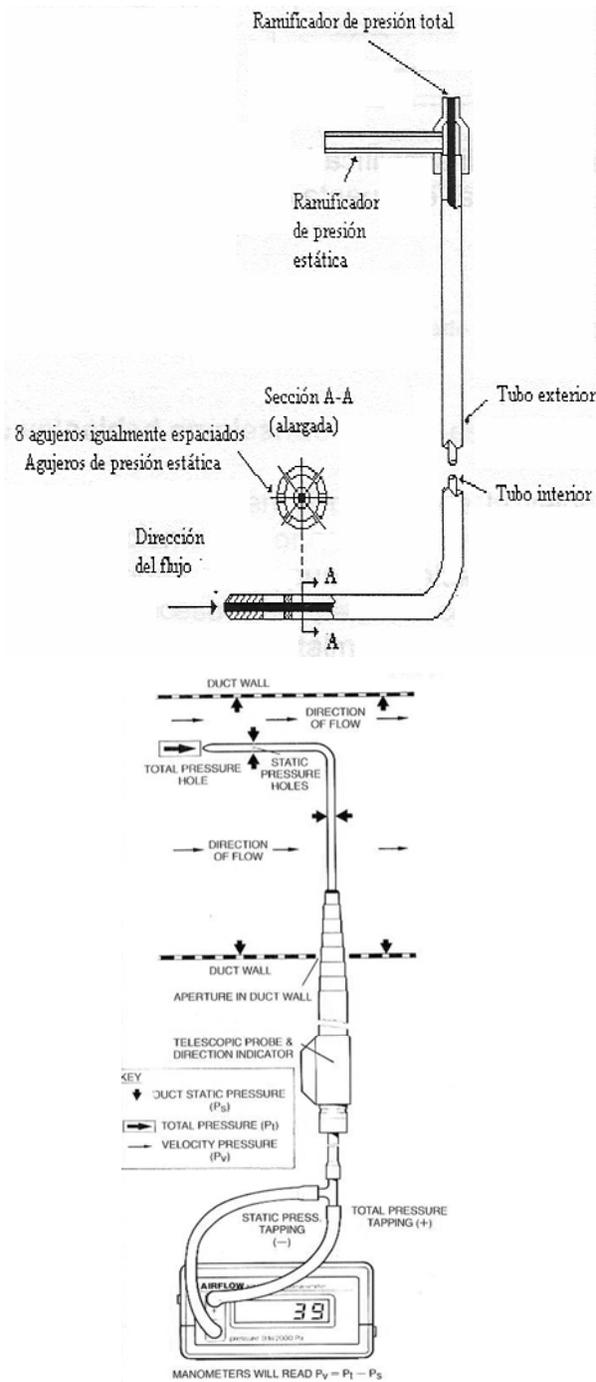


Figura 59: Esquemas de Tubo Pitot Estático Tipo L..

Tubo Pitot Estático, del laboratorio de Arquitectura Bioclimática. Este tubo requirió de equipo de apoyo, como flechas soportes para su

instalación dentro de la sección de prueba, como se muestra en la figura 60 y en la figura 61. Debido a su longitud se requirió de dos puntos de soporte para evitar flexiones y vibraciones del instrumento que afectarían las mediciones.

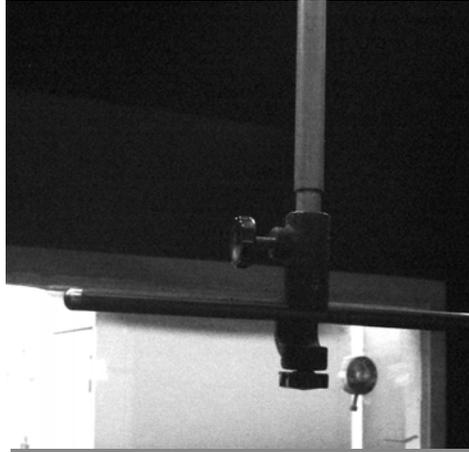


Figura 60: Nariz del Tubo y soporte



Figura 61: Salida de presión total y estática.

Descripción:

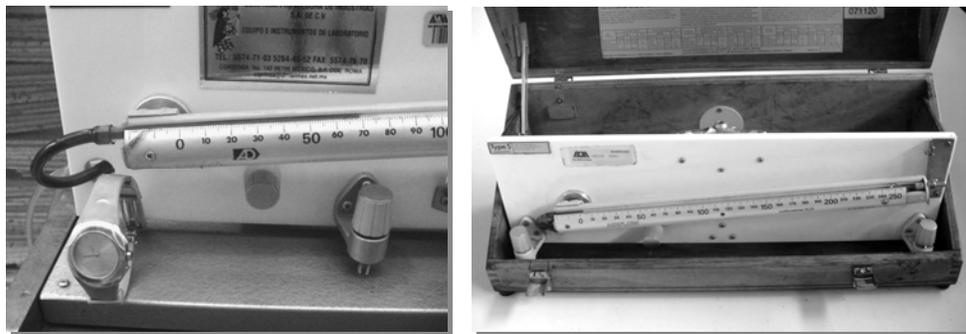
Posee una nariz cónica.

Un diámetro de 8mm.

Una longitud de 1.1mt .

Tomas de presión total y estática.

Manómetro Inclinado, es un instrumento que sirve para medir la presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados. El sentido del desplazamiento del líquido se expresa mediante el signo de la presión; si el líquido asciende se trata de una presión de succión y la lectura se acompañará de un signo negativo; si por el contrario el líquido desciende será una presión de impacto y tendrá un signo positivo. En las figuras 62 se muestra un manómetro diferencial conectado a un tubo estático de Pitot, la presión estática se lee de los orificios que están perpendiculares al flujo de aire. La presión total se mide directamente del instrumento debido a sus principios de operación, en el vástago de carga total se sitúa en la posición de medida para minimizar la perturbación del flujo local. Al utilizar dos sondas conectadas al manómetro y al tubo pitot, se logra obtener por diferencia de presiones (presión total menos la presión estática) la presión dinámica; misma que se emplea para despejar la ecuación de velocidad.



Figuras 62: Manómetro Inclinado. Se aprecia el líquido manométrico indicador de la lectura de la presión correspondiente.

Descripción:

Marca: Air Flow

Magnitud: presión

Rango de operación: 0 a 2.5 kPa

Resolución: 0.01kPa

El **Anemómetro de Hilo Caliente**, es un instrumento que mide la disipación de calor desde un conducto metálico, cuando es expuesto al viento. El conductor se integra a un circuito electrónico por el cual circula una corriente. Si se mantiene constante la temperatura del conductor, la corriente eléctrica es una función traducida a datos de velocidad del viento. Los anemómetros de hilo caliente se utilizan por ejemplo cuando se requiere una alta tasa de muestreo de la velocidad del viento. En estudios de flujos turbulentos se requiere de un instrumento que posea un tiempo del orden de 1 ms y que el campo de medición en donde se determina la velocidad media tenga al menos un volumen del orden de 1 mm³. El anemómetro de hilo caliente fue desarrollado para lograr esta resolución y ha sido por muchos años el instrumento común para el estudio de turbulencia, el cual en algunos casos ha sido desplazado por los métodos ópticos de medición de velocidad. A continuación se muestra en la figura 63 una descripción del instrumento. Este tipo de instrumento es de alto costo, y requieren de mantenimiento para conservar su relación en las mediciones.



Figura 63: Anemómetro. Marca Air Flow . Modelo TA5 Permite hacer lecturas de la velocidad y la temperatura, digitales y almacenaje de hasta 30 datos. El periodo de estabilización para cada punto fue de 1min.

3.3. PATRÓN DE FLUJO DE AIRE

El flujo de aire puede tener un patrón de flujo característico, el cual se puede establecer en 3 regímenes: régimen laminar, transitorio y turbulento, esta característica está relacionada según el patrón de comportamiento de las partículas que lo conforman.

El flujo laminar es aquel en el cual el patrón asemeja capas paralelas entre las partículas, formando de alguna manera suaves capas de viento. Esta calidad de flujo se encuentra en los rangos 300 a 10^5 en el número de Reynolds. Existe el régimen transitorio, este se encuentra dentro de los rangos 10^5 a $3,5 \times 10^6$ del número de Reynolds. No es conveniente realizar experimentos dentro de este régimen dado a la poca probabilidad de repetir los resultados obtenidos. Por otro lado está el flujo de viento con calidad turbulenta donde las partículas de viento se trasladan de manera aleatoria. Este régimen de flujo se encuentra en los rangos mayores a 3.6×10^6 del número de Reynolds.

Es importante mencionar que la turbulencia del flujo de viento, puede ser mecánica o térmica. La turbulencia mecánica es provocada por la rugosidad y morfología de la superficie de rozamiento, es decir depende de la forma y tamaño de los obstáculos. Por otro lado la turbulencia térmica está relacionada con la inestabilidad atmosférica, la cual se incrementa con la intensidad del calentamiento superficial; este fenómeno se presenta tanto en escala de conjunto arquitectónico como en el volumen específico de estudio. Por lo tanto estas condiciones provocan disminución o aumento de la velocidad, este comportamiento se define como gradientes de velocidad, y puede graficarse a través de perfiles de velocidad verticales como horizontales.

La zona terrestre donde se presenta mayor o menor turbulencia se llama capa límite atmosférica, la cual se ve afectada según la altura y rugosidad del entorno²².

²² Fuentes Víctor y Rodríguez Manuel. "Ventilación Natural: Cálculos Básicos para Arquitectura", Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México

Existe también otra zona que se denomina capa límite. Esta zona por lo general presenta altos gradientes de velocidad, que no son alterados por el flujo libre de viento. Esta región de aire en movimiento se adhiere a la superficie terrestre o a obstáculos de cualquier índole bajo la incidencia del flujo de viento, es una zona a “micro escala”. Tanto la velocidad de las partículas, como la distancia donde llega a desprenderse, dependen de la geometría y rugosidad de la superficie. Así como la superficie del terreno, la superficie del prototipo o del modelo a escala y la superficie de la sección de pruebas del túnel presentan capa límite²⁴. Este fenómeno se muestra en la figura 64, expone un modelo de ala tipo NACA para la visualización del desprendimiento de la capa límite.

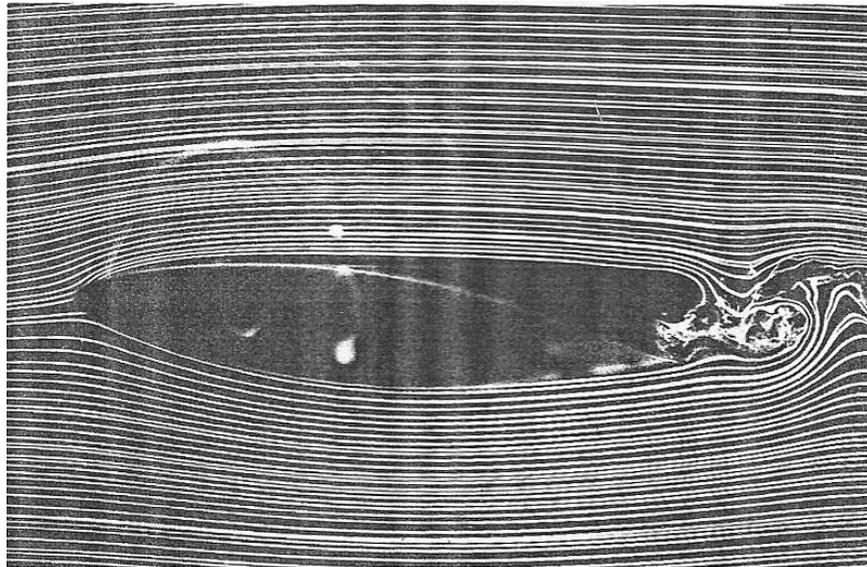


Figura 64: Capa límite sobre objeto en estudio en túnel aerodinámico, con técnica de visualización con humo²⁹.

²⁴ Irwin, H.P.A.H. “The design of spires for wind simulation”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1981.

²⁹ AIAA Journal, vol 20, No 4, Abril 1982, pag. 459. Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica.

Este fenómeno es susceptible a la variación de la mínima incidencia en una geometría. Este aspecto es considerado para la selección del área de estudio dentro de la sección de pruebas como el volumen de control y representa una variación aproximada al -10% del área total de la cámara de ensayos. Como se muestra en la figura 65. Tiene un orden de 2,8 cm de espesor alrededor de todas las paredes de la sección de pruebas.

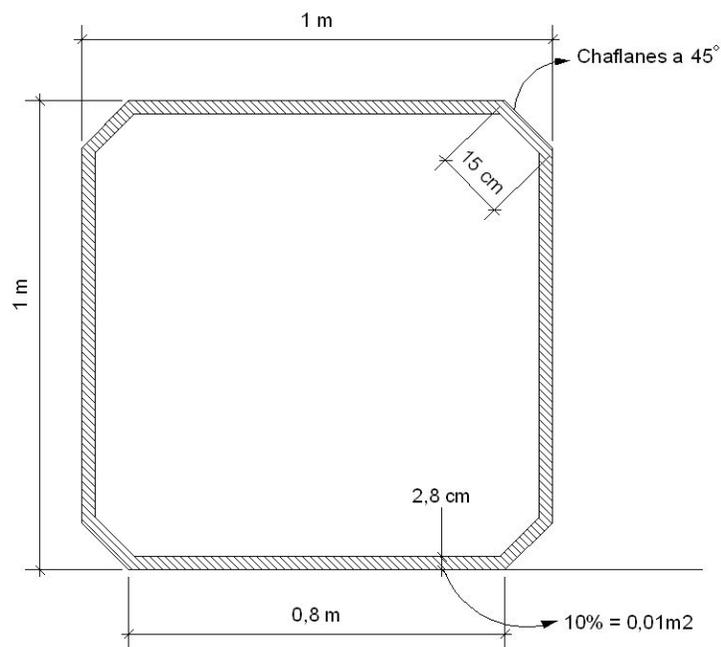


Figura 65: Espesor de la capa límite de la sección de pruebas del Túnel Laboratorio de Bioclimática.

CAPITULO 4

Caracterización del Flujo de Viento
en la sección de pruebas del
Túnel Aerodinámico del
Laboratorio de Bioclimática
UAM Azcapotzalco

CAPITULO 4

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para el análisis del flujo de viento, así como el desarrollo de los ensayos que permitieron realizar los perfiles característicos de velocidad, en el volumen establecido para ensayos dentro de la sección de pruebas.

4.1. PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN

A continuación se desarrolla la metodología para la caracterización de flujo de aire de la sección de pruebas; tiene como objetivo el llevar una serie de actividades de accesible comprensión tanto para estudiantes, profesores o profesionales dentro del área de la arquitectura, y que sea adaptable a las necesidades de futuros casos de estudio.

Procedimientos:

1. Actividades previas al proceso de medición:

Es importante procurar un contexto controlado. El flujo de aire es un elemento muy sensible a variaciones, tanto de obstáculos como condiciones físico-ambientales, por lo que es fundamental tratar de minimizar estas incidencias. Se aseguró que las puertas del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática se encontraran siempre cerradas; que los ocupantes del laboratorio fueran los mismos en número durante cada periodo de prueba; se realizó una limpieza profunda al túnel; con la intención de que los instrumentos no se obstruyeran con el polvo dañándolos o modificando el proceso de medición generando valores desvirtuados. Se procuró esta condición para cada periodo de medición y para cada ensayo.

2. Determinación de las condiciones ambientales:

Como se describió en el capítulo 4 tanto la temperatura, como la humedad relativa y la presión atmosférica son condiciones atmosféricas

que determinan la densidad del aire, la cual afecta la velocidad que el flujo de aire pueda tener.

Para la medición de las variables atmosféricas, se recomienda que los instrumentos de medición se encuentren lo más próximo a la sección de pruebas. No se recomienda su colocación dentro de la sección ya que puede perturbar el flujo de aire.

Al inicio y al final de cada prueba se registran las condiciones ambientales y durante la prueba se registra cualquier variación de los datos.

3. Instrumentación:

Los instrumentos de medición deben de estar calibrados previamente. Para la visualización de la dirección del flujo se empleó una malla de hilo 0,1m x 0,1m tejida en una estructura de aluminio. Para la obtención de la magnitud de velocidad se utilizó un anemómetro de hilo caliente. Para la medición de la presión dinámica se utilizaron dos Tubos Pitot de diferentes características y un manómetro inclinado. Fue necesario emplearse con equipo de apoyo debido a las condiciones físicas de cada instrumento.

Para iniciar con un flujo de aire completamente desarrollado es necesario el desarrollo a 10 diámetros equivalentes, sin embargo esta distancia por las condiciones físicas del túnel es de 2 diámetros equivalentes; por lo que al inicio de cada prueba es fundamental accionar el túnel por un periodo de estabilización de 20 minutos como mínimo.

4. Tiempo estimado de pruebas:

El tiempo de medición de cada prueba varía según el instrumento a emplearse y se realizó un reporte de incidencias. Sin embargo es importante recalcar que son procedimientos en los que se requiere del orden de 4 a 43 horas, considerando la malla de estudio en la sección de pruebas, el tiempo de estabilización de cada dato y el cuidado que se

debe tener para mantener el régimen controlado, más el desarrollo de cada ensayo.

5. Personal de apoyo:

Es necesario contar como mínimo con dos personas para la recopilación de datos. Una que se encargue de variar la frecuencia, controlar el tiempo de medición y recopilar los datos. La otra persona es responsable de sujetar el instrumento con las medidas necesarias para la fiabilidad de los datos obtenidos. Es importante como medida de seguridad, utilizar tapones para los oídos; ya que al accionar el variador de frecuencia a partir de los 20 Hertz, por ser un túnel de circuito abierto el ruido que este genera puede ser riesgoso para la salud auditiva, así como optar por una buena postura de trabajo cuando se toman valores desde el techo del túnel, para evitar mareos o caídas producidas por el cansancio y las vibraciones que el túnel genera en altas frecuencias.

6. Definición de los puntos de estudio:

Se estableció el volumen de estudio de la sección de pruebas, considerando el efecto de las paredes. Este aspecto es considerado para la selección del área de estudio dentro de la sección de pruebas y representa un rango aproximado del -10% del área total de la cámara de ensayos. Como se muestra en la figura 66, el volumen de estudio tiene un orden de 2,8 cm de espesor alrededor de todas las paredes de la sección de pruebas.

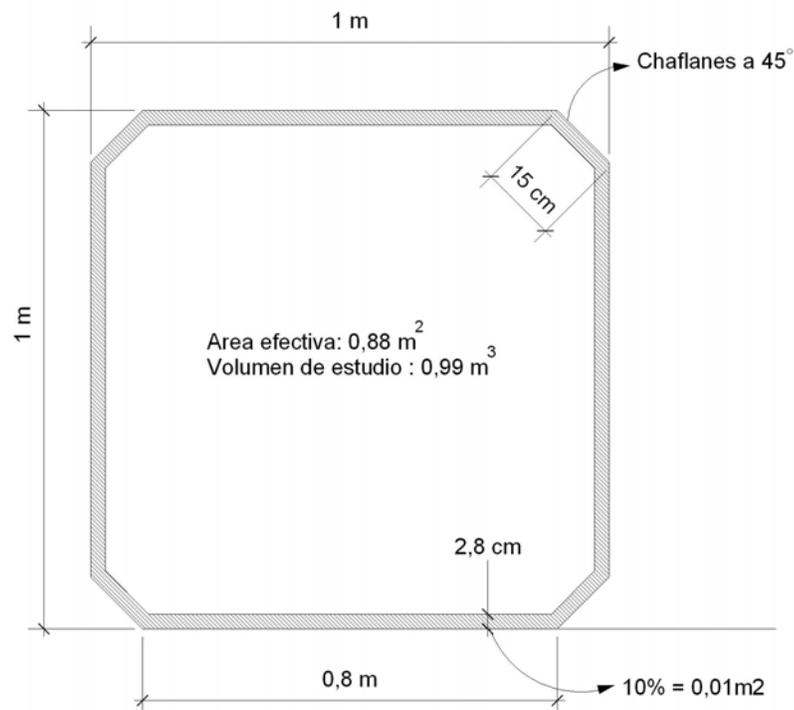


Figura 66: Imagen ilustrativa del área efectiva y el volumen de estudio para la sección de pruebas del Túnel del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Se consideró el estudio del flujo de viento en tres secciones, como se muestra en la figura 67; dentro del volumen de estudio las cuales se nombran con las letras mayúsculas siguientes:

- A. En la entrada de la sección de prueba.
- B. En desarrollo del flujo, es decir, en la zona central de la sección de prueba.
- C. A la salida de la sección de prueba.

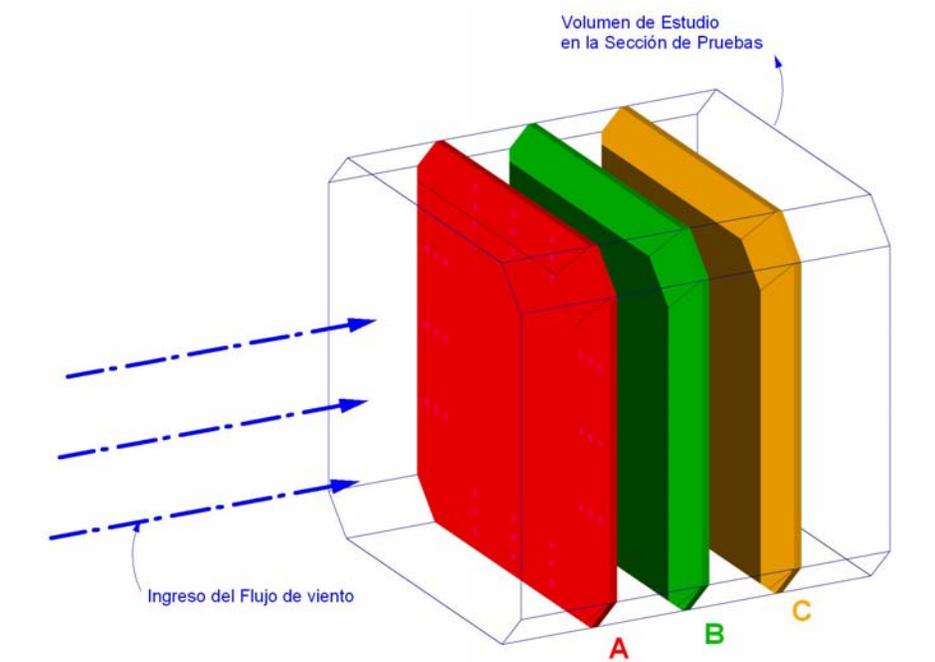


Figura 67: Imagen ilustrativa de las secciones A-B-C para estudio de la sección pruebas del Túnel del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Considerando estas secciones, se creó una malla principal para determinar lo puntos de medición. Con la intención de conocer la influencia de las caras de la zona de ensayos sobre el flujo, se creo otra malla de 108 puntos de estudio. El número de puntos de medición varía según las condiciones físicas de los instrumentos a utilizar, en la figura 68, se muestra la disposición de los puntos de medición.

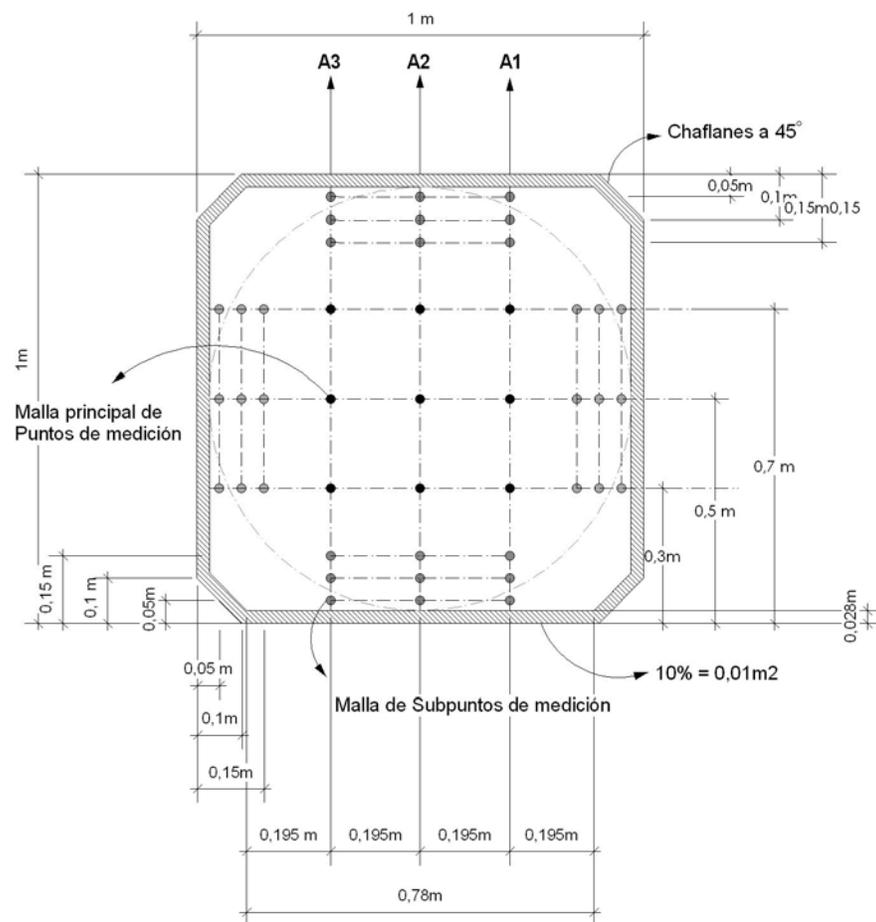


Figura 68: Imagen ilustrativa de la sección A y la malla de puntos de estudio de la sección pruebas del Túnel del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana.

7. Recopilación y procesamiento de los datos para la obtención de la velocidad en la sección de pruebas:

Se registraron los datos obtenidos a través de tablas en Excel, para cada instrumento y por cada sección de estudio es decir **A-B-C**. Como se muestra en la tabla 3, se consideró la sección, la frecuencia, el dato recopilado, la ubicación del punto, las condiciones atmosféricas y notas sobre incidencias durante la prueba que colaboraron con el diagnóstico.

A1	INSTRUMENTO				
Frecuencia Hertz	Medición unidad	Altura Metros	Condiciones Atmosféricas		
			Hora		
			Temperatura C°		
			Humedad Relativa %		
			Presión Atmosférica mmHg		
Notas:		Incidencias			

Tabla 2: Ejemplo de Tabla para recopilar la información.

- Diseño de las gráficas:

Una vez procesados los datos con la magnitudes para cada instrumento, se diseñaron gráficas que permitieron visualizar los perfiles de velocidad, estos exponen las magnitudes del flujo de aire. Se generan perfiles de velocidad, horizontal y verticalmente, se extrapolaron entre secciones y entre instrumentos.

- Diagnóstico:

Se formuló el diagnóstico, bajo los criterios de caracterización del flujo de viento de la sección de pruebas: Dirección, Tipo de Régimen y Magnitud. Se compararon los perfiles de velocidad y se consideraron las velocidades promedio.

Se estudió el comportamiento del flujo de viento de cada perfil y se apoyó con el ejercicio de visualización de la dirección del viento, considerando:

- Condiciones Ambientales durante las pruebas.
- Contexto físico del laboratorio.
- Estructura física del túnel.
- Incidencias.

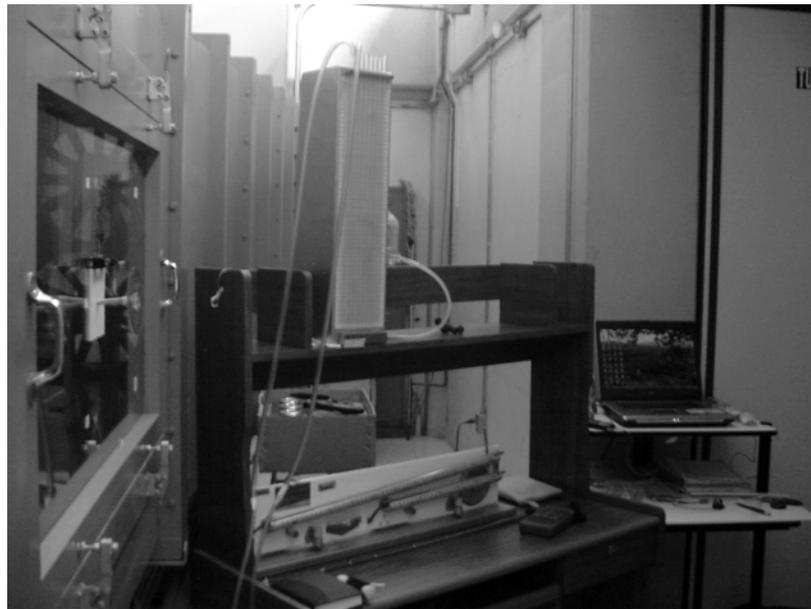


Figura 69: Imagen ilustrativa de la sección de pruebas y de la ubicación de los instrumentos y equipo de apoyo.

4.2. ESTUDIO 1

VISUALIZACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO DE VIENTO POR MEDIO DE HILOS

La visualización de flujo consiste en poder distinguir el camino o comportamiento que siguen las partículas en forma tal que se puedan conocer cualitativamente las propiedades vectoriales del campo de velocidad del flujo de aire¹⁷.

Existen diferentes técnicas de visualización o análisis cualitativo; estas técnicas permiten comprender mejor la física del comportamiento de un elemento invisible al ojo. Se seleccionó la técnica de visualización por medio de *Filamentos o hilos*, por las siguientes razones:

- Permite rápidamente visualizar la dirección de los vórtices, independientemente de la frecuencia utilizada y el tiempo de exposición.
- Se desconoce el grado de turbulencia del flujo, sin embargo esta técnica no es perturbada si este grado es mayor o menor; concretamente permite evidenciarlo. En el caso de utilizar otra técnica es necesario conocer este aspecto previamente.
- El estudio contempla 12 frecuencias, lo que provoca un largo periodo de observación. Esta técnica físicamente no se ve alterada, únicamente se debe cerciorar que los hilos o filamentos se mantengan en su lugar y no se enreden.
- Esta técnica es de una producción de bajo costo, por lo que representa una de las primeras opciones en las pruebas de visualización de flujo.

¹⁷ Rodríguez Fausto. " Aplicaciones de la Aerodinámica Experimental a la Arquitectura Bioclimática " Instituto Politécnico Escuela Superior de Ingeniería Aeronáutica. México 2005.

Instrumento:

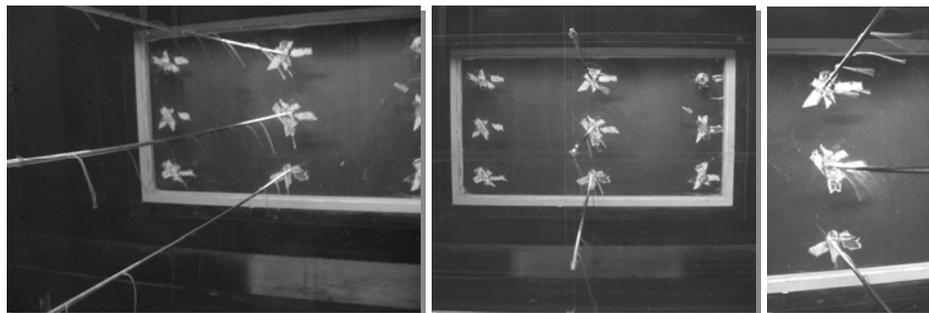
Como se muestra en las figura 69 se utilizó 3 varillas ranuradas en acero de $\frac{1}{2}$ pulgada. Estas varillas atravesaban la sección de pruebas a 0.30m, 0.50m y 0.70m de altura.

La intención de utilizar este material consideraba:

- El peso de la varilla, para preveer vibraciones en altas frecuencias.
- El método, que permitía poder introducir en 3 puntos las varillas, sin tener que abrir la sección de pruebas.
- La rápida colocación de los hilos.

Sin embargo al realizar el ejercicio, los resultados fueron opuestos:

- Por el peso, se dificultó la alineación de las varillas, para lograr ser insertadas hasta el otro extremo de la sección de pruebas.
- Los hilos tendían a tomar vórtices aleatorios, independientemente de la frecuencia en que se encontraba el estudio, se concluyó que el tipo de varilla ranurada generó turbulencia en su contorno, situación que confundía la visualización.
- El concepto de introducir las varillas restringía el estudio en toda la sección transversal.



Figuras 70: Imágenes ilustrativas de la Técnica de visualización por medio de varillas de acero e hilos de algodón, empleada para la definición de la dirección del flujo de viento en la sección de pruebas.

Por lo tanto se rediseñó el concepto del “instrumento”. Como se muestra en la figura 71 se fabricó un marco metálico con el perfil exacto de la sección de pruebas. La figura 72 muestra la retícula que se tejió de 0,1m x 0,1m, en hilo de algodón. En cada intersección se ató filamentos de 5cm de largo teñidos previamente de color fosforescente. La longitud seleccionada permite que independientemente del tipo de flujo que provoque el túnel, los hilos entre sí no se enreden.

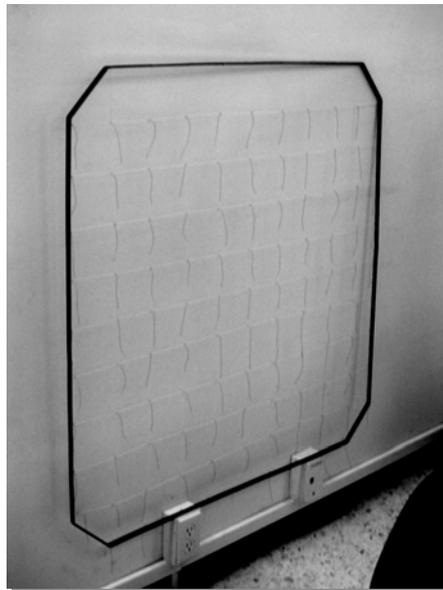


Figura 71: Imagen ilustrativa de Marco metálico y malla en hilo de algodón utilizado en la técnica de visualización.

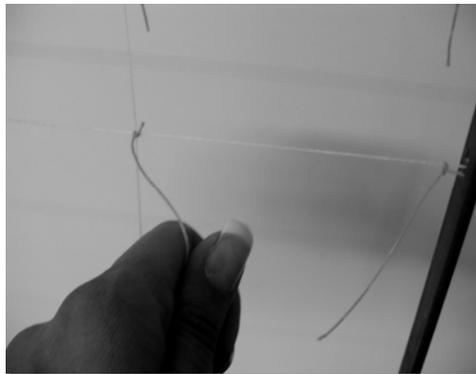
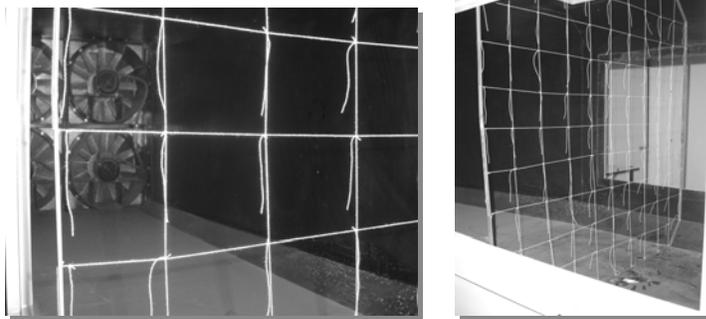


Figura 72: Imagen ilustrativa de la construcción de la malla de hilo de algodón.

Se colocó la malla de manera vertical, en el desarrollo del flujo, con una orientación perpendicular a la dirección del flujo de aire y se estudió cualitativamente el comportamiento del mismo. Se dispuso en la zona central de la sección de prueba, 0,5m del borde inicial de la sección, se muestra en la figura 73. En esta posición se accionó el túnel a 12 frecuencias, permitiendo visualizar el comportamiento del viento mediante la observación del movimiento de los hilos. El proceso de la visualización se recopiló mediante el procesamiento de imágenes digitales.

Las ventajas de la modificación se describen a continuación:

- La estructura fabricada para esta visualización posee el perfil de la sección de prueba por lo que permite ser colocada en cualquier zona de esta sección y visualizar el comportamiento del flujo en diferentes puntos.
- La estructura fabricada para esta prueba puede ser utilizada en futuros casos de estudio.



Figuras 73: Imágenes ilustrativas de la malla con hilo de algodón, sin accionar el túnel.

A continuación se describen los resultados de la visualización del flujo de aire por medio de la técnica de visualización con hilos de algodón con marco estructurado:

- En las frecuencias de 5hz a 20hz se presentó líneas de corriente, es decir que la línea que cada hilo traza es tangente al vector de velocidad. Todas uniformemente.
- En las frecuencias de 25hz a 60hz se presentó un comportamiento difícil de definir pero homogéneo entre los hilos, prácticamente horizontal, entre 0,3m y 0,7m de la base de la sección. Y del cielo a 0,3m y de la base a 0,3m se muestra un movimiento ascendente y descendente inconstante entre las líneas de los hilos.

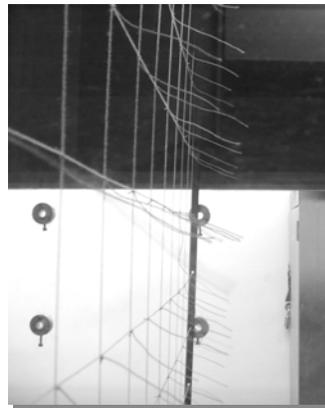


Figura 74: Imagen ilustrativa de la vista transversal de la Malla de hilos bajo la frecuencia de 5hz.



Figura 75: Imagen ilustrativa de la vista lateral de la Malla de hilos de algodón bajo la frecuencia de 25 hz.

Se interpreta el comportamiento direccional del flujo de viento de la sección de pruebas por medio de la técnica antes descrita:

- Se presenta un flujo laminar en las frecuencias de 5hz a 20hz es decir que el patrón de traslado de las partículas se puede definir como un flujo de capas paralelas de aire. Este patrón de flujo se encuentra en los rangos menores a 10^5 de números de Reynolds. Es decir que el patrón de flujo en esta etapa puede presentar perturbaciones.
- Se presenta un flujo turbulento de 25hz a 60hz es decir, las partículas de aire se trasladan con una trayectoria difícil de predecir. Este régimen de flujo se encuentra en los rangos mayores a 3.5×10^6 de números de Reynolds. Por lo tanto las fuerzas inerciales son mayores a las viscosas. Es importante mencionar que esta conclusión se basa en el concepto de una turbulencia mecánica, la cual es provocada por la rugosidad y morfología de la superficie de rozamiento, las irregularidades que presentan el cielo y la base del túnel. Este comportamiento provoca disminución o aumento de la velocidad, por eso el movimiento incomprensible de los hilos.

4.3 ESTUDIO 2

MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS CON ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE

1. Condiciones de contexto:

Al inicio de este estudio se cercioró que el túnel estuviera completamente libre de polvo. Se procuró que la puerta principal del Laboratorio de Bioclimática se encontrara cerrada, con la intención de minimizar cualquier variación de presión dentro del área de estudio.

2. Condiciones Ambientales:

Se tomó los valores correspondientes a la presión atmosférica, temperatura y humedad relativa; al inicio y al final de cada periodo de medición. Durante el desarrollo del estudio 2, se presentó un cielo nublado.

En este caso de prueba, no es necesario despejar el valor de la velocidad con estas variables, debido a las características del instrumento que muestra un registro de la magnitud de velocidades con una presión. Por lo tanto se toman los valores ambientales como un parámetro de referencia. A continuación se muestra los valores promedio de las condiciones atmosféricas en que se realizó la prueba:

PROMEDIOS CLIMATICOS

Anemómetro de Hilo Caliente

Temperatura C°	23,3
Humedad Relativa %	41,7
Presión Atmosférica mmHg	576,2

Tabla 3: Promedio de los datos climáticos obtenidos durante las mediciones con el Anemómetro de hilo caliente.

3. Instrumentación:

Para el inicio de cada prueba es fundamental accionar el túnel por un periodo de estabilización de 20 minutos como mínimo, con el fin de estabilizar el medio alrededor de la instalación.

Para la toma de los valores de velocidad en la sección de pruebas se utilizó un Anemómetro de Hilo caliente marca Air Flow, el cual se describió en el capítulo 3. Es importante verificar que cuando se realicen las mediciones el filamento del instrumento debe de estar alineado perpendicularmente a la corriente del flujo. Por otro lado, la ventaja de este instrumento es que posee un tiempo corto de despliegue de información, sin embargo es necesario considerar un tiempo aproximado de 30 segundos entre toma y toma de valor; para observar las oscilaciones que se presentan y obtener un valor promedio de las lecturas observadas. En caso de que estas variaciones sean de más del 5% de la magnitud promedio, es necesario verificar la posición del instrumento, posibles variaciones del ventilador y en caso necesario, reiniciar la prueba. Como se muestra en la figura 76 se le adhirió al brazo del anemómetro un nivel de burbuja, elemento que permitió visualizar y controlar la horizontalidad o verticalidad del anemómetro según el punto de medición.



Figura 76: Se aprecia nivel de burbuja y recopilador de datos digital.

4. Tiempo aproximado de prueba:

Considerando 30 segundos por 1620 puntos de medición a 12 frecuencias, nos da un tiempo promedio de 10.8 horas sin considerar el tiempo de estabilización del túnel, el tiempo para reubicar el instrumento, retoma de valores, periodos de descanso o interrupciones durante el periodo de pruebas.

5. Personal de apoyo:

Para esta prueba es necesario 2 personas. Una que se encargue de variar la frecuencia, controlar el tiempo de medición y recopilar los datos suministrados por el compañero de prueba. Como se muestra en la figura 77, la otra persona es responsable de sujetar el instrumento con las medidas necesarias para la fiabilidad de los datos obtenidos y suministrar los valores que el anemómetro facilita. Es importante como medida de seguridad, utilizar tapones para los oídos; ya que a partir de los 20 hz, por ser un túnel de circuito abierto el ruido que este genera es riesgoso, así como optar por una buena postura de trabajo cuando se toman valores desde el techo del túnel, para evitar mareos o caídas.

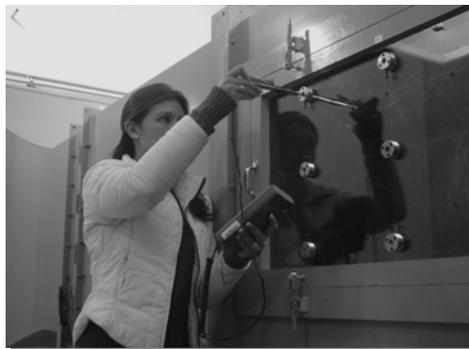


Figura 77: Toma de valores de velocidad en A1.

6. Puntos de medición:

Se establecen 135 puntos de medición para las secciones A, B y C; como se aprecia en la figura 78, estos serán estudiados bajo 12 frecuencias; permitiendo obtener una base de 1620 datos de magnitud de velocidad. El diseño físico del anemómetro de hilo caliente, al ser extendible y con un punto sensible de medición a 360°, permitió la medición de la totalidad de los puntos de la malla. Se inicia la prueba con una frecuencia en el variador de velocidad a 5hz con intervalos de 5hz hasta finalizar en 60hz.

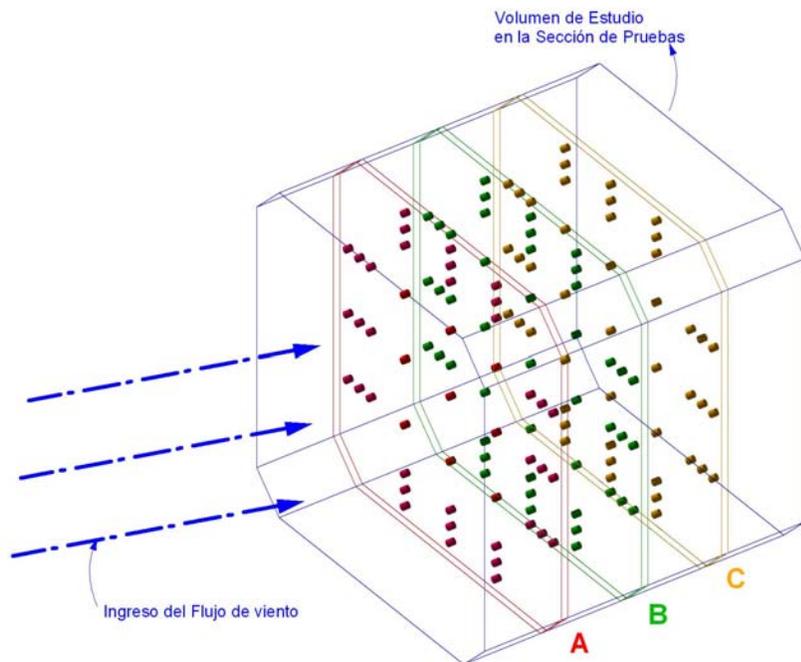


Figura 78: Imagen ilustrativa de los puntos de medición con el anemómetro de hilo caliente.

7. Recopilación y procesamiento de los datos:

Los datos obtenidos se recopilaron en tablas donde se registran las frecuencias y las magnitudes de velocidad puntual. Se procesaron a través de gráficas tanto de las secciones horizontales como verticales, en los planos A-B-C y sus datos entrelazados. Con los datos obtenidos se grafican los perfiles de velocidad, de esta manera se logra apreciar la magnitud y el tipo de régimen que el flujo de viento muestra en la sección de prueba. Se estudia los valores obtenidos para establecer rangos de velocidad en las 12 frecuencias.

- Perfiles de Velocidad:

En el estudio a los perfiles de velocidad, comparativo de frecuencias, muestra un flujo paralelamente desarrollado en los planos A-B-C. El flujo en cada frecuencia coincide en comportamiento, presenta una aceleración a 0.95 m y un descenso de magnitud a una altura de 0.90 m y posteriormente una desaceleración de la magnitud de la velocidad a 0.50m por encima de la base. Como se muestra en la figura 79.

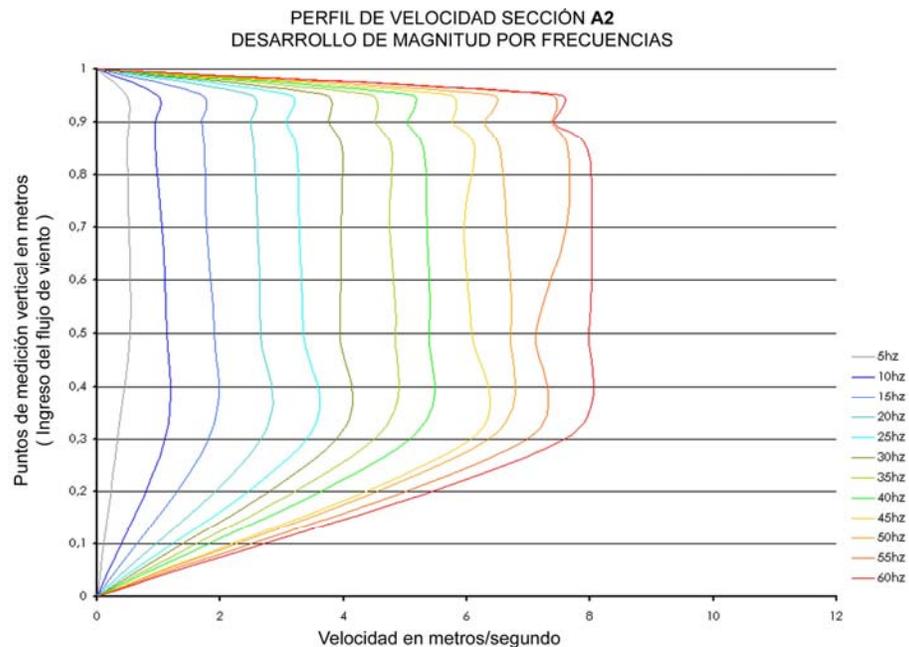


Figura 79: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Desarrollo de Magnitud en 12 frecuencias con el Anemómetro de Hilo Caliente.

Al realizar los estudios del comportamiento de los perfiles de velocidad a nivel horizontal se mostró un desarrollo de la magnitud irregular. Sin embargo coinciden en dos comportamientos: en las cercanías a las caras laterales presenta una aceleración, efecto posible de la capa límite de la sección de pruebas, un comportamiento de desaceleración a 0,10m de cada cara lateral y en su eje central desacelera, como se ejemplifica en la figura 80. Los perfiles horizontales de velocidad, de los datos capturados por el anemómetro de hilo caliente presumen un comportamiento de flujo turbulento.

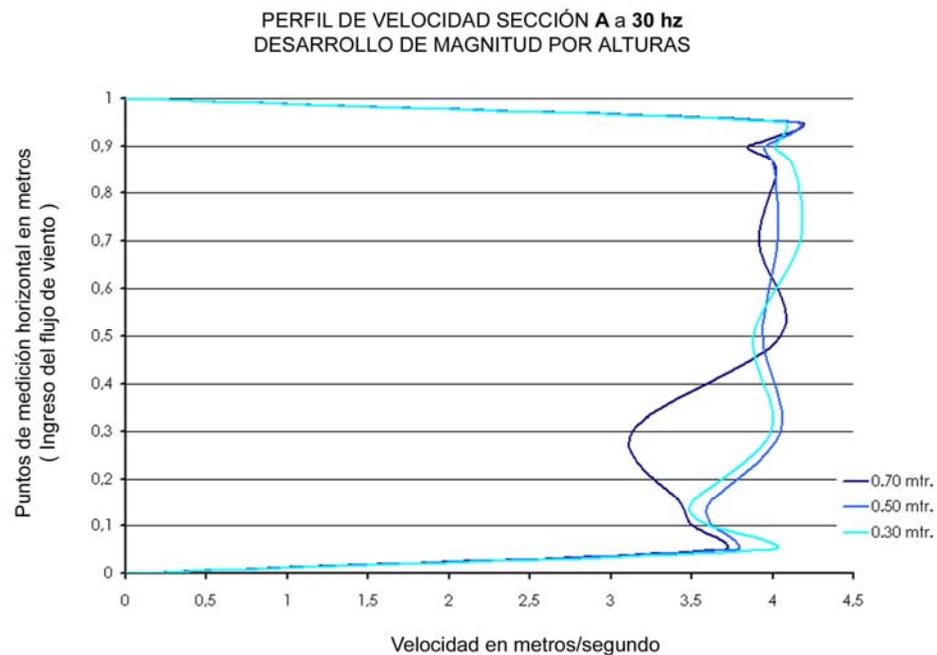


Figura 80: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Desarrollo de Magnitud por altura, con el Anemómetro de Hilo Caliente.

Al analizar verticalmente los perfiles de velocidad exponen un comportamiento dentro de las frecuencias 5hz a 25hz, el flujo de viento presenta mayores irregularidades de magnitud de velocidad, dentro de las frecuencias 30hz a 45hz comienza a observarse un flujo desarrollado tal como se muestra en la figura 81, hasta desarrollarse por completo y pasa a un régimen casi estacionario en el rango de frecuencias de magnitud de 50hz a 60hz. En la figura 81 se ejemplifica que a pesar de realizar el ensayo dentro de una sección simétrica el comportamiento entre las paredes laterales y superiores es considerablemente asimétrico. Coincide en comportamientos similares al análisis horizontal, del efecto de las caras: laterales y superior.

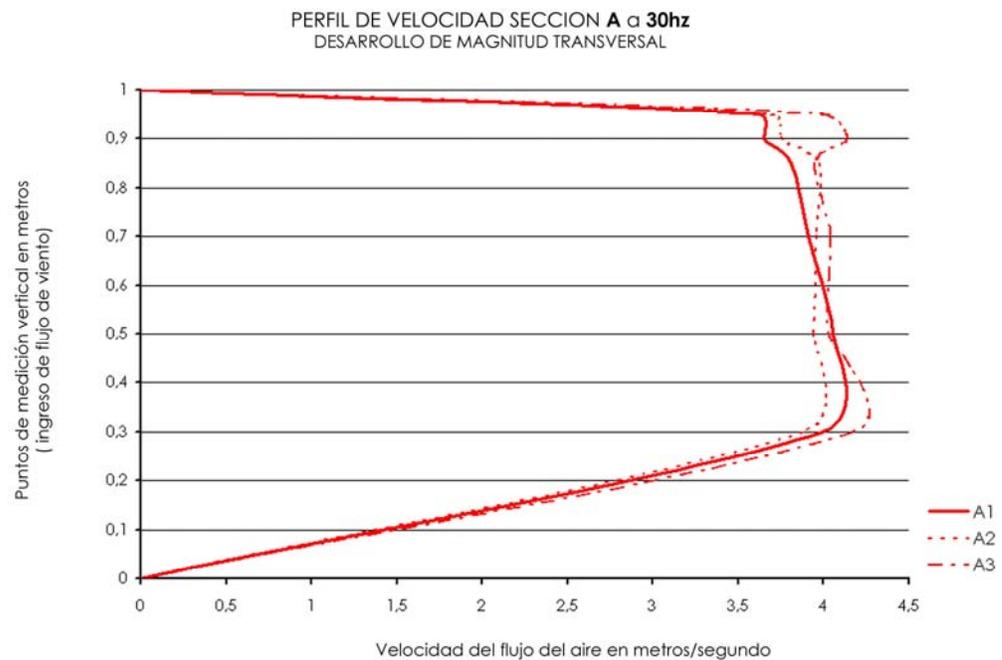


Figura 81: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Sección A Desarrollo de Magnitud Transversal a la Sección de Pruebas, con el Anemómetro de Hilo Caliente.

En el estudio comparativo de las secciones A-B-C, los perfiles de magnitud de velocidad muestran un desarrollo de flujo, a pesar de que cada sección presenta un comportamiento con fluctuaciones del orden e 5% a 10%, desigual en magnitud de velocidad. De la sección A á B, se observa que el flujo es desarrollado y se mantiene constante en la sección C. En cuanto a la región cercana a las paredes del túnel, el flujo acelera a 0.95m de la base de la sección de pruebas y desacelera a 0.90m de la base de la sección de pruebas. Se observa en la figura 82, una variación considerable en la sección central.

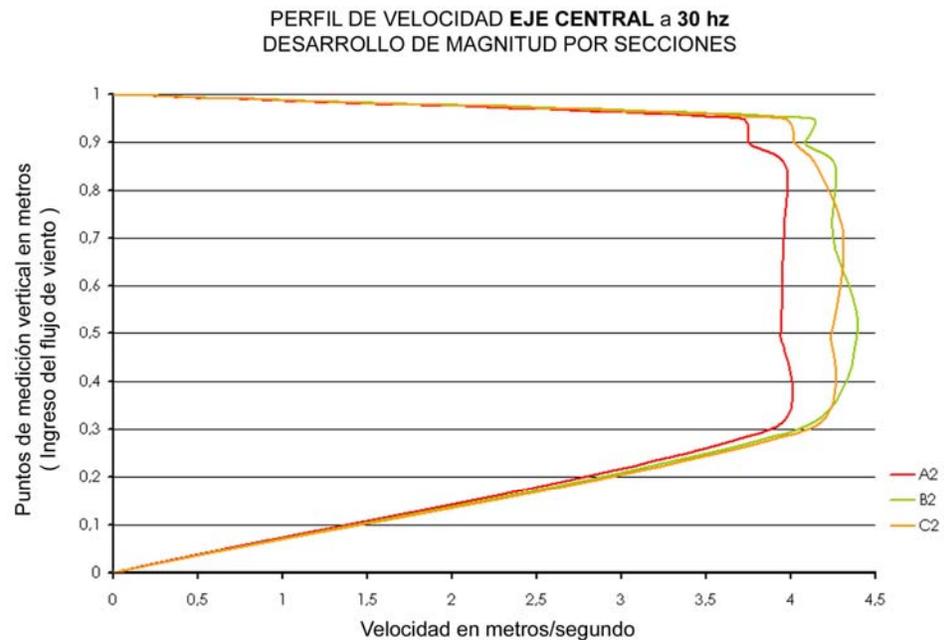


Figura 82: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Eje Central Desarrollo de Magnitud por secciones, con el Anemómetro de Hilo Caliente.

Promedio de Velocidad:

Se procesó 1620 datos de velocidad en el volumen de control como se aprecia en la tabla 4, al procesarlos se determinó una velocidad promedio para cada frecuencia, también se determinó la desviación estándar de los datos la cual registró variaciones de 5%, se estable 12 rangos de velocidad para cada frecuencia.

Instrumento	Frecuencia	Velocidad
	Hz	m/s
ANEMOMETRO	5	0,52
	10	1
	15	1,77
	20	2,6
	25	3,2
	30	3,9
	35	4,63
	40	5,3
	45	6
	50	6,49
	55	7,35
	60	7,7

Tabla 4: Rangos de frecuencia y velocidad para Anemómetro de Hilo Caliente

4.4 ESTUDIO 3

MEDICIÓN DE PRESIONES EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS CON TUBO PITOT EXTENDIBLE TIPO L

1. Condiciones de contexto:

Al inicio de este estudio se cercioró que el túnel estuviera completamente libre de polvo. Se procuró que la puerta principal del Laboratorio de Bioclimática se encontrara cerrada, con la intención de minimizar cualquier variación de presión dentro del área de estudio.

2. Condiciones Ambientales:

Se obtuvieron las mediciones de las magnitudes para las siguientes variables termodinámicas: presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, al inicio y al final de cada periodo de medición. Como se muestra en la tabla 5, se establecen los promedios climáticos. Considerando estos valores se establece la densidad del aire en $0,0853 \text{ utm/m}^3$. Valor a considerar en el procesamiento de los datos para la obtención de las velocidades.

PROMEDIOS CLIMATICOS

Tubo Pitot Tipo L Extendible

Temperatura C°	18,9
Humedad Relativa %	52,8
Presión Atmosférica mmHg	529,0

Tabla 5: Promedio de los datos climáticos obtenidos durante las mediciones con el Tubo Pitot Tipo L Extendible.

3. Instrumentación:

Para el inicio de cada prueba es fundamental accionar el túnel por un periodo de estabilización de 20 minutos en promedio con el fin de estabilizar las condiciones de operación de la instalación.

Para la toma de los valores de presión total, en la sección de pruebas se utilizó un Tubo Pitot Estático tipo L Extendible, marca Air Flow en conjunto con un manómetro diferencial marca Air Flow, estos instrumentos se describieron ampliamente en el capítulo 3. Es necesario mencionar que al procesar la información se consideró el factor de corrección de la curva de calibración del instrumento equivalente a 0,1. Con el fin de asegurar una posición horizontal o vertical del instrumento se instaló un nivel. Las sondas se fijaron con silicón para prevenir fugas que alteraran las mediciones. Por el tipo de instrumentos, el periodo de estabilización entre toma y toma de dato se dio cada 2 minutos. La persona que hizo la lectura de los valores de presión siempre fue la misma, de esta forma se mantuvo una misma visualización y percepción de la medición. A los valores obtenidos se les aplicó un factor de corrección de 0,85 tomando como referencia la curva de calibración correspondiente.

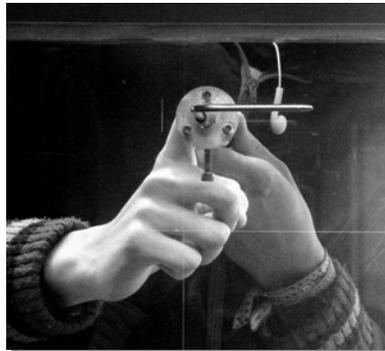


Figura 83: Imagen ilustrativa del tubo Pitot Tipo L Extendible, dentro de la sección de pruebas

Tiempo aproximado de prueba:

Considerando 2 minutos por 108 puntos de medición a 12 frecuencias, nos da un tiempo promedio de 43.2 horas sin considerar el tiempo de estabilización del túnel, el tiempo para la reubicación del instrumento y su nivelación, proceso de medición, periodos de descanso o interrupciones durante el periodo de pruebas.

Personal de apoyo:

Para esta prueba fue necesario 2 personas. Una que se encargue de variar la frecuencia, controlar el tiempo de medición y registrar los datos suministrados por el manómetro diferencial. La otra persona es responsable de sujetar el instrumento con las medidas necesarias para la fiabilidad de los datos obtenidos. Es importante como medida de seguridad, utilizar tapones para los oídos; ya que a partir de los 20 hz, por ser un túnel de circuito abierto el ruido que este genera es riesgoso, así como optar por una buena postura de trabajo cuando se toman valores desde el techo del túnel, para evitar mareos o caídas.

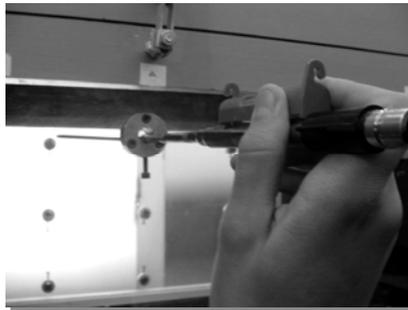


Figura 84: Imagen ilustrativa de la medición con tubo Pitot Tipo L Extendible, en el punto A1, con nivel de burbuja, que verifica su correcta colocación.

6. Puntos de medición:

Se establecen 108 puntos de medición para las secciones A, B y C, a 12 frecuencias., como se expone en la figura 85. El diseño físico del Tubo Pitot Estático tipo L, a pesar de ser extendible no permitió la

medición de los subpuntos en la base de la sección de pruebas, debido a la limitante de su longitud. Se inicia el ensayo con una frecuencia de 5hz en el variador de velocidad, e intervalos de medición a cada 5hz hasta finalizar en 60hz.

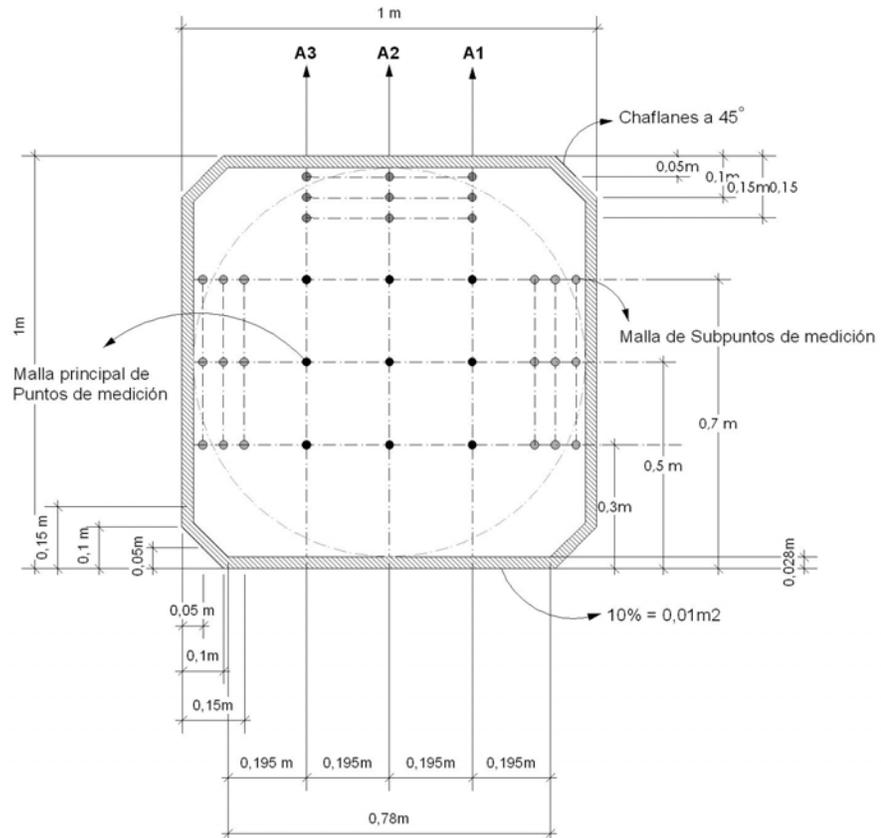


Figura 85: Imagen ilustrativa de los puntos de medición con el Tubo Pitot Estático tipo L, ejemplo de la sección A.

7. Recopilación y procesamiento de los datos:

Los datos obtenidos se capturan en tablas donde se registraron las frecuencias, la magnitud de presiones para llevar a cabo los cálculos correspondientes para la determinación de la magnitud de velocidad. Se procesaron a través de gráficas tanto de las secciones horizontales como verticales, en A-B-C y entrelazan los datos. Con los datos obtenidos se

grafican los perfiles de velocidad, de esta manera se logra apreciar la magnitud y el régimen que el flujo de aire en la sección de pruebas. Se estudia los valores obtenidos para establecer rangos de velocidad en las 12 frecuencias, previamente establecidas en la metodología.

- Perfiles de Velocidad:

En el estudio a los perfiles de velocidad, comparativo de frecuencias, muestra un flujo desarrollado. El flujo en cada frecuencia coincide en comportamiento, presenta una aceleración a 0.95m de y un descenso de magnitud a 0.90m de la base y desaceleración de la magnitud a 0.50m de la base. Como se muestra en la figura 86.

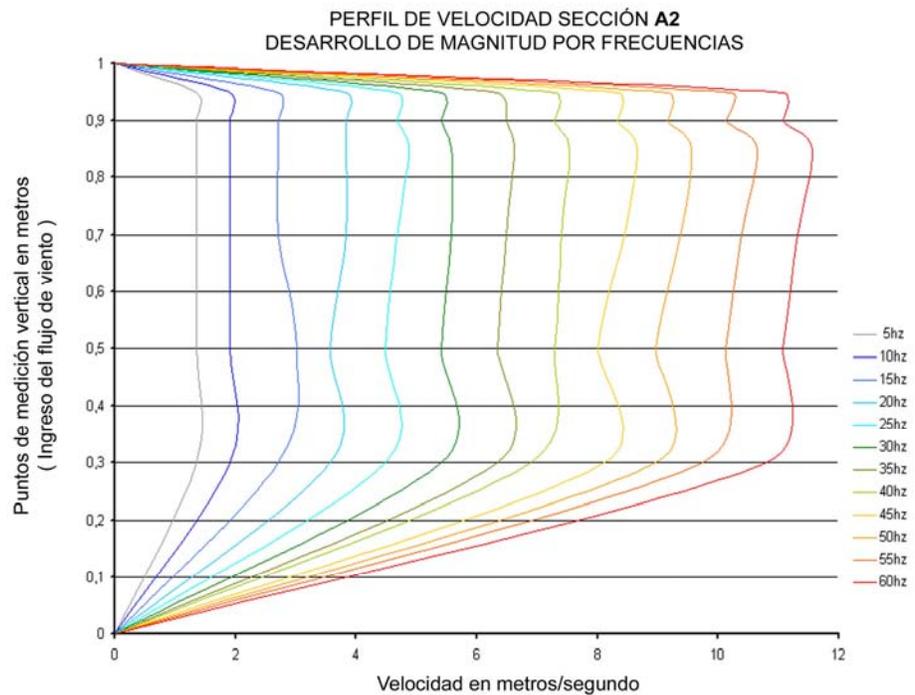


Figura 86: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Eje Central Desarrollo de Magnitud por secciones obtenidas con el Tubo Pitot Tipo L Extendible.

Al realizar los estudios del comportamiento de los perfiles de velocidad a nivel horizontal se mostró un desarrollo de la magnitud constante en velocidades, sin embargo con un comportamiento con

fluctuaciones considerables, desorden de 5% a 9%. Sin embargo existe una simetría con respecto a su eje longitudinal central: en la cercanía a la cara lateral, presenta una aceleración a 0,05m, luego un comportamiento de desaceleración a 0,10m de cada cara lateral ver gráfico 6. Los perfiles horizontales de velocidad, de los datos capturados por Tubo Pitot Tipo L Extendible, muestran un comportamiento de flujo turbulento, debido a que prácticamente se presenta un perfil de velocidad con una magnitud constante.

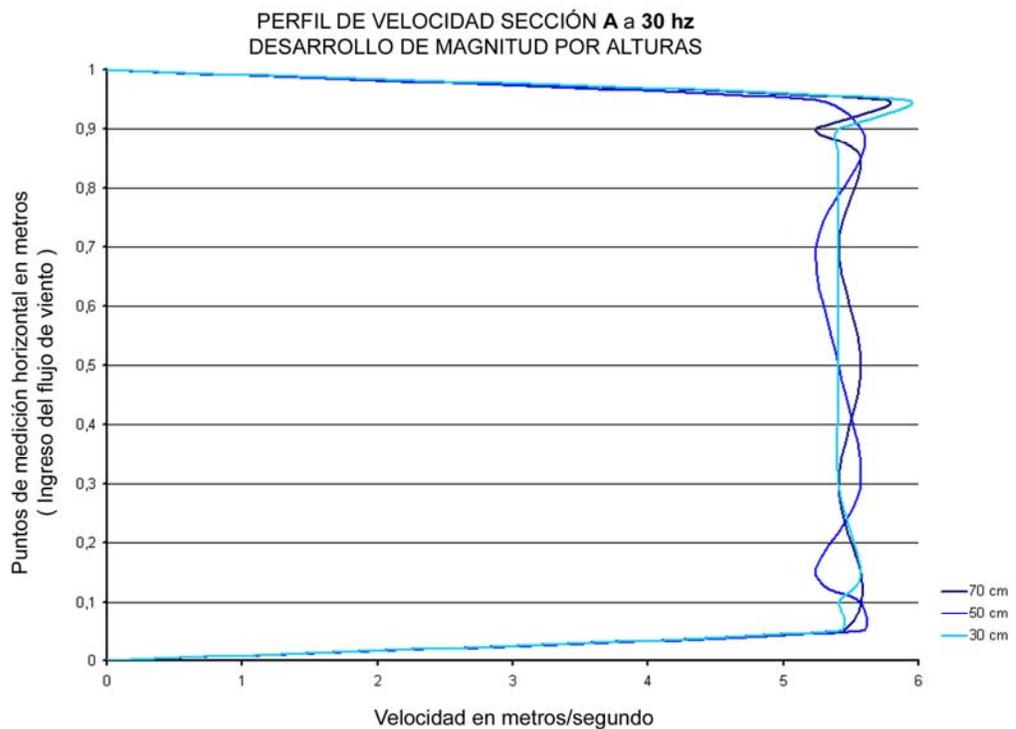


Figura 87: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad en la sección A. Desarrollo de Magnitud por altura, obtenida con el Tubo Pitot Tipo L Extendible.

Al analizar verticalmente los perfiles de velocidad exponen un comportamiento dentro de las frecuencias 5hz a 25hz, el flujo de viento presenta mayores irregularidades de magnitud de velocidad, dentro de

las frecuencias 30hz a 45hz comienza a presumir un flujo desarrollado, hasta desarrollarse por completo y posteriormente se observa un comportamiento casi estacionario en un rango de frecuencias entre 50hz a 60hz. En la figura 88 se ejemplifica que a pesar de realizar el ensayo dentro de una sección simétrica el comportamiento entre las secciones no es simétrico. Los datos capturados por Tubo Pitot Tipo L Extendible, muestran un comportamiento de flujo turbulento.

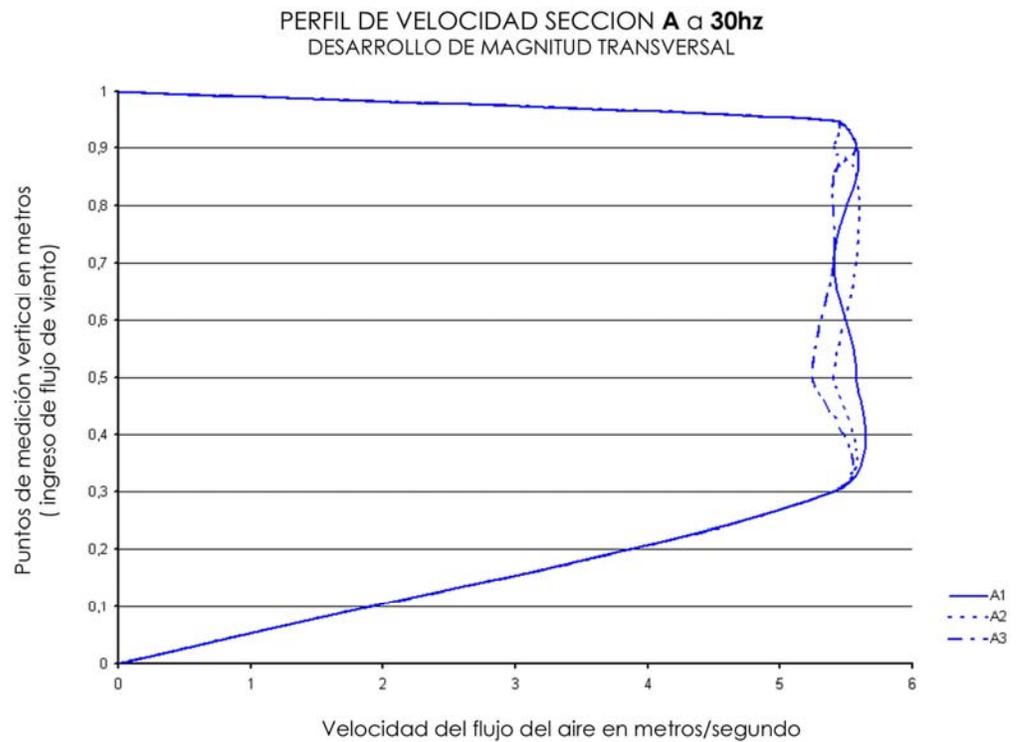


Figura 88: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad en la sección A Desarrollo de Magnitud Transversal a la Sección de Pruebas, obtenidas con el Tubo Pitot Tipo L Extendible.

En el estudio comparativo de las secciones A-B-C, los perfiles de velocidad muestran un desarrollo uniforme entre si, a pesar de que cada sección presenta un comportamiento desigual en magnitud. De la sección A a B, se da un desarrollo del flujo de aire y se mantiene constante en la sección C. En cuanto a la influencia de las caras, el flujo acelera a 0.95 m de la base de la sección de pruebas y desacelera a 0.90 m de la base de la sección de pruebas. Muestra fluctuaciones considerables a una distancia promedio de 0,5m por encima de la base de la sección de pruebas como se muestra en el gráfico 89.

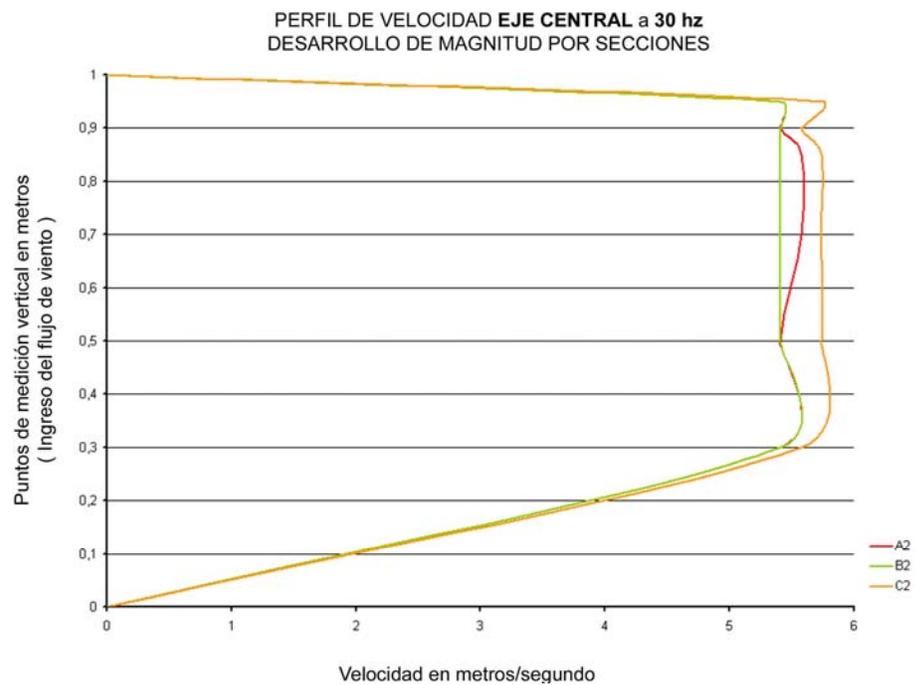


Figura 89: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad en el Eje Central. Desarrollo de Magnitud por secciones, obtenidas con el Tubo Pitot Tipo L Extendible.

Promedio de Velocidad:

Se procesó 1296 datos de magnitud de velocidad en la sección de pruebas como se aprecia en la tabla 6, al procesarlos se obtienen 12 rangos de velocidad promedio para cada frecuencia, con un margen variación del 0,93m/s aproximadamente.

Instrumento	Frecuencia	Velocidad
	Hz	m/s
TUBO PITOT TIPO L - EXTENDIBLE	5	1,35
	10	1,9
	15	2,75
	20	3,74
	25	4,71
	30	5,46
	35	6,4
	40	7,28
	45	8,3
	50	9,2
	55	10,2
	60	11,15

Tabla 6: Rangos de frecuencia y velocidad para el Tubo Pitot Extendible Tipo L.

4.5 ESTUDIO 4

MEDICIÓN DE PRESIONES EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS CON EL TUBO PITOT TIPO L DEL LABORATORIO DE BIOCLIMÁTICA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD AZCAPOTZALCO.

1. Condiciones de contexto:

Al inicio de este estudio se cercioró que el túnel estuviera completamente libre de polvo. Se procuró que la puerta principal del Laboratorio de Bioclimática se encontrara cerrada, con la intención de minorizar cualquier variación de presión dentro del área de estudio.

2. Condiciones Climáticas:

Se tomó los valores correspondientes a presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, al inicio y al final de cada periodo de medición. Como se muestra en la tabla 7, se establecen los promedios climáticos. Considerando estos valores se despeja la densidad del aire a $0,093 \text{ utm/m}^3$. Valor a considerar en el procesamiento de los datos para la obtención de las velocidades.

PROMEDIOS CLIMATICOS

Tubo Pitot Tipo L - LAB UAM

Temperatura C°	19,6 C°
Humedad Relativa %	60 %
Presión Atmosférica mmHg	577 mmHg

Tabla 7: Promedio de los datos climáticos obtenidos durante las mediciones con el Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

3. Instrumentación:

Para el inicio de cada prueba fue fundamental accionar el túnel por un período de estabilización de 20 minutos como mínimo.

Para la toma de los valores de presión total, en la sección de pruebas se utilizó Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco; en conjunto con un manómetro diferencial marca Air Flow, estos instrumentos se describieron ampliamente en el capítulo 3. Fue importante la correcta nivelación y la consideración de las lecturas con un coeficiente de 0,1. Las sondas se fijaron con silicón para prevenir fugas que alteraran las mediciones. Por el tipo de instrumentos, el periodo de estabilización entre toma y toma de dato se dio cada 2 minutos. La persona que hizo la lectura de los valores de presión siempre fue la misma, de esta forma se mantuvo una misma visualización y percepción de la medición. A los valores obtenidos se les aplicó un coeficiente de corrección de 0.8 de acuerdo a la curva de calibración del instrumento.

Como se muestra en las figura 90, fue necesario colocar sondas con un diámetro de 1mm para la salida de las tomas de presión. Así como colocarle niples que ajustaran el diámetro de la sonda a la sonda del manómetro inclinado, cuidando que no se dañara el cuerpo del instrumento. Como se observa en la figura 91, por la longitud del Tubo el uso de flechas soporte y sujetadores para su colocación en el interior del túnel, fue indispensable. La figura 92, ejemplifica como para cada punto fue necesario tomar las precauciones necesarias de alineamiento y nivelación.



Figura 90: Imagen ilustrativa del tubo Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, donde se aprecia la salida de la toma de presión total y salida de la presión estática.

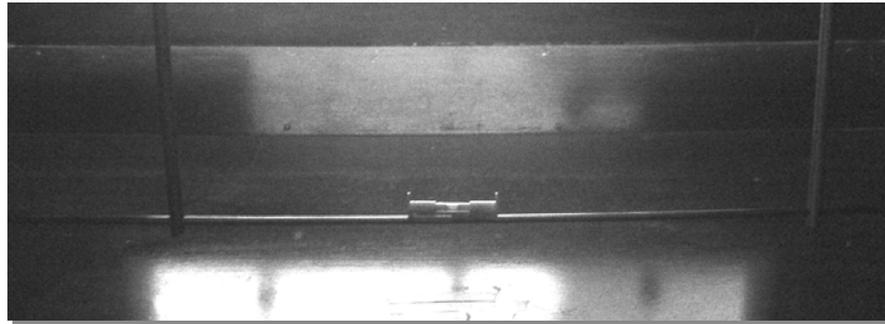


Figura 91: Imagen ilustrativa del tubo Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, donde se aprecia su colocación dentro de la sección de pruebas, con el equipo de apoyo de flechas soporte, así como el nivel de burbuja.

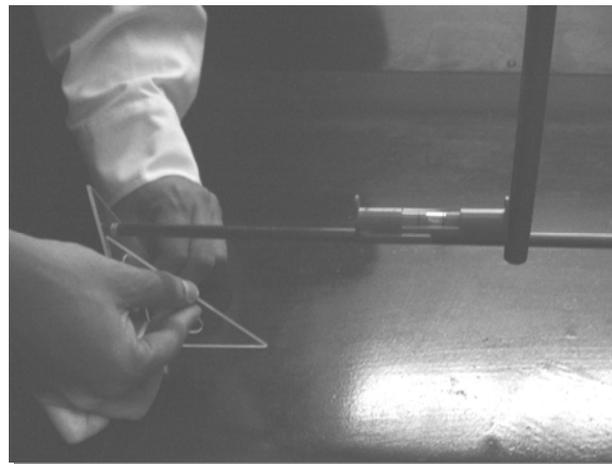


Figura 92: Imagen ilustrativa del tubo Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, donde se aprecia la nivelación y el alineamiento de la nariz con el flujo de aire, así como el nivel de burbuja.

4. Tiempo aproximado de prueba:

Considerando 2 minutos para cada punto de medición, se realizó la medición en 9 puntos utilizando las 12 frecuencias, nos da un tiempo promedio de 3,6 horas sin considerar el tiempo de estabilización del túnel, el tiempo de cambio de posiciones, retoma de valores, periodos de descanso o interrupciones durante el periodo de pruebas.

5. Personal de apoyo:

Para esta prueba fue necesario 3 personas. Debido a las condiciones físicas del tubo; fue necesario implementarse de equipo de apoyo, como las flechas soporte. La instalación del tubo, para cada punto requirió de 2 personas para la colocación y nivelación del tubo y de una tercera persona que supervisara visualmente y con el nivel de burbuja la correcta nivelación del instrumento.

Una vez colocado el tubo, se requirió de una persona que se encargue de variar la frecuencia, controlar el tiempo de medición y de otra persona que registrar los datos suministrados por el manómetro diferencial. Es importante como medida de seguridad, utilizar tapones para los oídos, ya que a partir de los 20hz, por ser un túnel de circuito abierto el ruido que este genera es riesgoso, es necesario a su vez optar por una buena postura ergonómica de trabajo para evitar un cansancio excesivo por parte del personal de apoyo.

6. Puntos de medición:

Debido a la complejidad de la instalación del equipo y la sensibilidad del mismo, que provocaba constantes desniveles por la vibración generada a partir de 30hz de frecuencia, se tomó la decisión de ensayar únicamente en el eje central a la entrada del flujo es decir en A2.

Se establecen 9 puntos de medición para la sección A2 a 12 frecuencias, como se expone en la figura 93. Se inicia el ensayo con una frecuencia de 5hz en el variador de velocidad, a intervalos de medición a cada 5hz hasta finalizar en 60hz.

- Perfiles de Velocidad:

En el estudio a los perfiles de velocidad, comparativo de frecuencias, muestra un flujo paralelamente desarrollado. El flujo en cada frecuencia coincide en comportamiento, presenta una aceleración a 0.95 m de y un descenso de magnitud a 0.90 m de la base y desaceleración de la magnitud a 0.30m de la base. Al analizar los perfiles de velocidad se observa un comportamiento dentro de las frecuencias 5hz a 10hz donde el flujo de viento presenta mayores fluctuaciones de magnitud de presión, a partir de las frecuencias 15hz hasta 60hz el flujo se desarrolla constante y paralelamente, como se muestra en la figura 94.

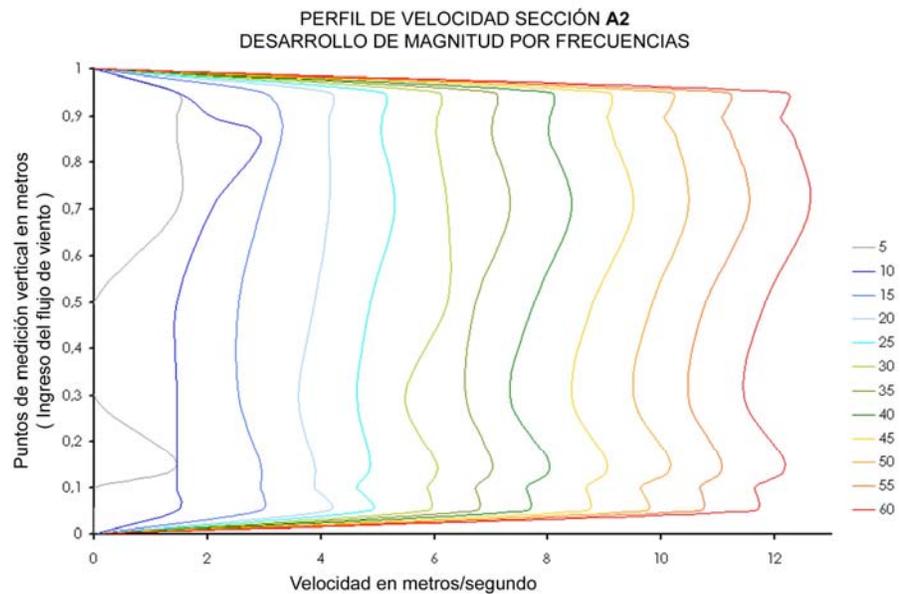


Figura 94: Gráfico de muestra: Perfil de Velocidad, Eje Central Desarrollo de Magnitud con el Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana.

Promedio de Velocidad:

Se procesó 108 datos de magnitud velocidad en la sección de pruebas como se aprecia en la tabla 8, al procesarlos se obtienen 12 rangos de velocidad para cada frecuencia, con un margen variación del 0,89m/s aproximadamente.

Instrumento	Frecuencia	Velocidad
	Hz	m/s
TUBO PITOT TIPO L - LabBio	5	0,73
	10	1,58
	15	2,61
	20	3,57
	25	4,41
	30	5,35
	35	6,18
	40	7,04
	45	7,99
	50	8,92
	55	9,81
	60	10,73

Tabla 8: Rangos de frecuencia y velocidad para el Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana.

CAPITULO 5
Conclusiones,
Recomendaciones
y Aportes

CAPITULO 5

Finalmente el capítulo a continuación expone conclusiones, recomendaciones y aportes, que surgen del conocimiento y la experiencia adquirida; del desarrollo de los ensayos y del procesamiento de la información, tomando en consideración constates mecánicas para los hallazgos de los ensayos.

5.1. CONCLUSIONES

Considerando los objetivos específicos para el desarrollo de esta investigación se concluye:

La metodología propuesta para el análisis del flujo de aire fue de accesible comprensión. Permitió hacer un vínculo entre los conceptos de ingeniería y arquitectura, y presentó la flexibilidad de adaptarse a modificaciones importantes a lo largo del desarrollo de la caracterización del túnel en el proceso de ensayos.

Después de establecer el volumen de estudio, fue necesario concretar los puntos de medición para cada instrumento; al analizar los perfiles de velocidad, se concluye que el flujo de viento en la sección de pruebas del Túnel Aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana, bajo los criterios de semejanza es un flujo de aire con una dirección paralela al flujo de ingreso del viento, con fluctuaciones de un promedio de 5%; presenta zonas de recirculación, provocando un régimen turbulento, con un desarrollo de magnitudes desiguales pero paralelo en desarrollo.

Estas conclusiones nacen bajo los fundamentos del estudio aerodinámico de los perfiles de velocidad, y en detalle se describen a continuación:

Comportamiento del flujo por efectos de obstrucciones externas y un volumen de aire de ingreso desigual:

A pesar de contar con una área de pruebas de sección “cuadrada”, simétrica, el comportamiento del flujo de viento no es necesariamente desarrollado. El flujo inmediato a la cara lateral de la sección de pruebas, presentó mayor aceleración en las partículas inmediatas en la sección inferior. Este comportamiento es similar pero con una variante de menos 0,5ms a 1ms de magnitud de velocidad en la cara frontal. Se concluye que este comportamiento se debe a dos posibles situaciones, la primera a un contexto de succión en donde las obstrucciones pueden tener un efecto negativo sobre las mediciones, como se observa en la figura 95; el muro adyacente al túnel se encuentra a 0,90m de la cara lateral de la sección de pruebas. En la cara frontal del área de ensayos, el espacio se amplía a 2,80m; se consideró que el contexto inmediato al túnel genera influencia sobre un volumen de aire desigual. Como segunda observación una incidencia de la capa límite del túnel, con un comportamiento desigual generado por las rugosidades de las superficies internas del túnel.

Se mostró un flujo acelerado a 0,05m con un descenso de 0,2ms en 0,05m de distancia vertical de la cara superior, posteriormente trata de estabilizarse y a 0,50m, desciende en magnitud. Independientemente del desarrollo del flujo, de la frecuencia, de la sección en estudio y del instrumento; este comportamiento es constante. Se concluye que el contexto nuevamente influyó en el desarrollo del flujo. Justo a una altura total de 1,37m y con una distancia de 1,84m de la campana se encuentra un mueble con computadoras de desecho. Que se convierten en obstrucción al flujo de aire. Como se observa en la figura 96, es importante mencionar que como

mínimo se debe de tener una distancia del 100% de la dimensión de la campana de entrada, a un obstáculo, en este caso debería de ser 2,3m.

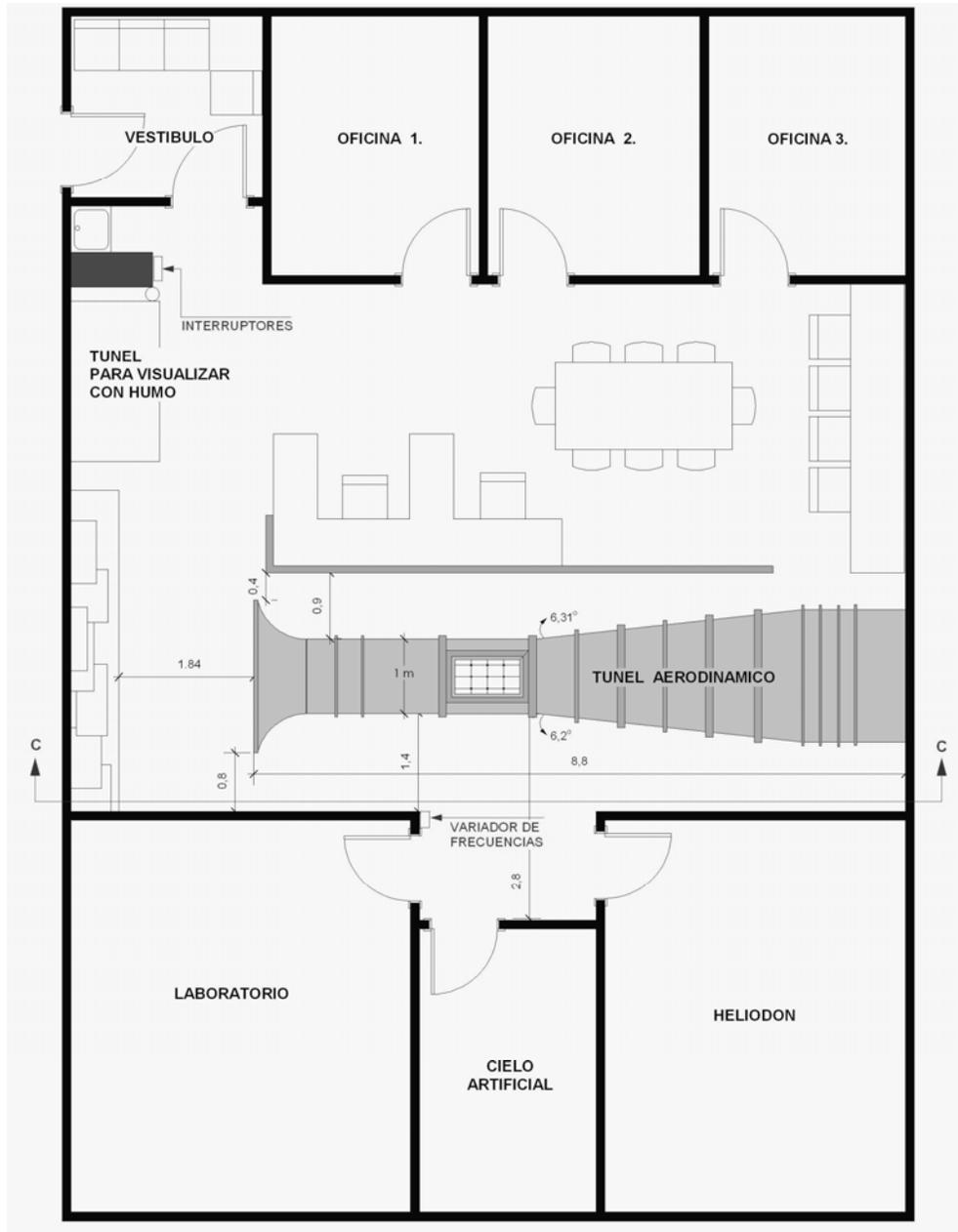


Figura 95: Planta esquemática del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana.

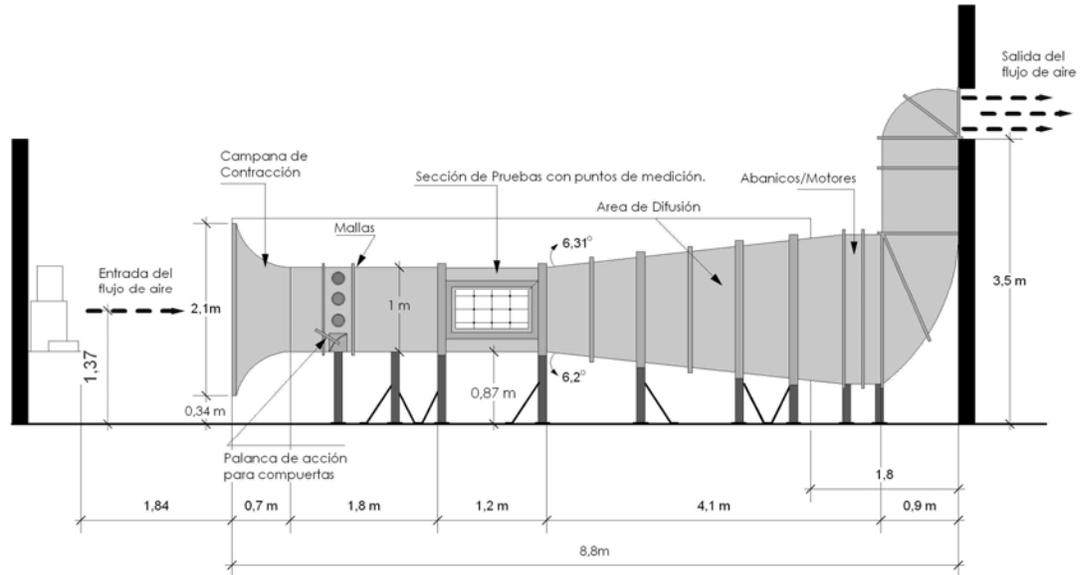


Figura 96: Corte longitudinal del Laboratorio de Bioclimática Universidad Autónoma Metropolitana; donde se aprecia en detalle la composición y ubicación del túnel aerodinámico.

Comportamiento del flujo por efectos de la estructura soportante de los ventiladores:

Como se mostró en los gráficos de los perfiles de velocidad, el comportamiento descendente de velocidad en el eje central de la sección de pruebas se debe a una recirculación del flujo generada por la disposición de los ventiladores, así mismo la estructura que soporta el peso de los mismos presenta un ligero desgaste y por una posible variación de la potencia suministrada por los motores eléctricos. Como se muestra en la figura 97, la estructura soportante y el juego de ventiladores coinciden con las irregularidades en los perfiles de velocidad.

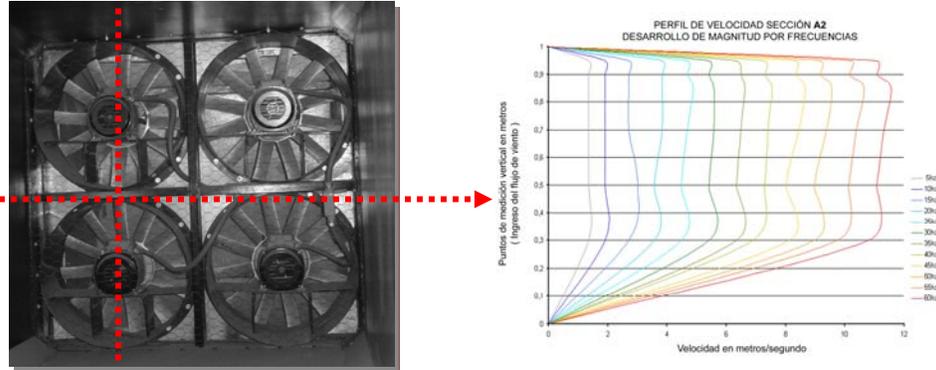


Figura 97: Imágenes ilustrativas de la incidencia de la estructura sobre el comportamiento del flujo de aire.

Comportamiento del flujo por efectos de irregularidad en la matriz de los enderezadores de flujo:

Los panales, o matriz, tienen como finalidad uniformizar el flujo de viento para obtener en la zona de pruebas las características deseadas²¹. Debido a la finalidad de la matriz, este no debe tener irregularidades, tanto en los bordes como en la disposición de los tubos PVC. Como se muestra en la figura 98, se considera que la irregularidad de la matriz conformada por tubos PVC (policloruro de vinilo), incide en el comportamiento del flujo de aire, coincidiendo a la desaceleración a 0,1m de la cara superior de la sección de pruebas.

²¹ Barlow, Rae & Pope. "Low Speed Wind Tunnel-Testing". 3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA 1999.

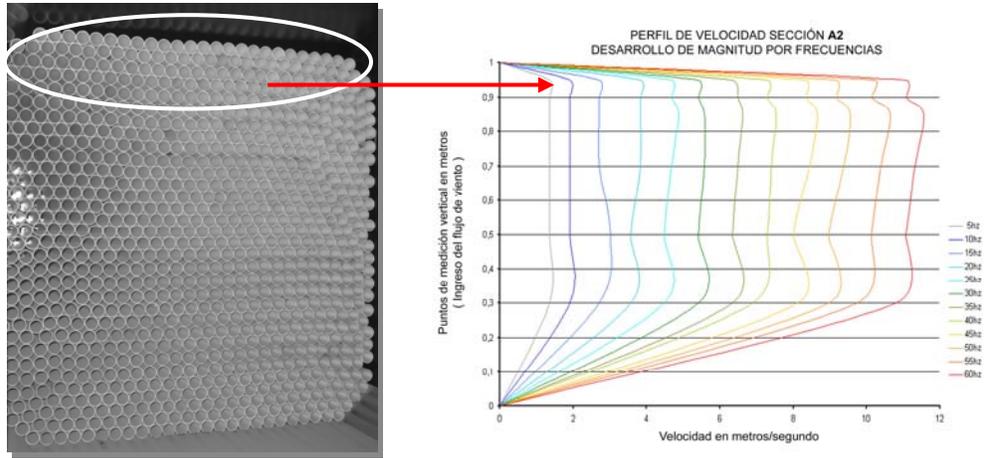


Figura 98: Imágenes ilustrativas de la matriz con irregularidades formales y como inciden en el comportamiento del flujo de viento.

El comportamiento descendente de velocidad en el eje central de la sección de pruebas, puede deberse a una recirculación del flujo generada por la disposición de los ventiladores y la estructura soportante de los mismos.

Comportamiento del flujo por efectos de impacto de la presión de salida:

Se mostró un comportamiento irregular en tres secciones claramente definidas: cara superior, central e inferior, en cuanto al desarrollo de las magnitudes. A bajas velocidades, es decir de 5hz a 25hz el flujo de aire presenta inestabilidad, es decir fluctuaciones del orden de 5% a 7%. De 25hz a 30hz inicia un desarrollo, a 40hz presenta inestabilidad respecto al eje central con una variación de 1m/s aproximadamente, de 45hz a 60hz el flujo en magnitudes variables pero ascendentes, se desarrolla. Se estima que el impacto de la presión de salida del flujo de viento puede colaborar con el comportamiento poco predecible del aire.

Comportamiento del flujo por efectos de vibraciones:

A pesar de contar con un material sólido y pesado como la madera, la estructura soportante, no logra contra restar las vibraciones que se perciben a partir de 30hz. Esta vibración es producida por el conjunto de ventiladores que se encuentra inmerso dentro de la estructura del túnel aerodinámico.

Instrumentación:

Se utilizó como instrumento de referencia al Tubo Pitot Tipo L Extendible, considerando su calibración y grado de acertividad en las mediciones. Al hacer un cuadro comparativo en la tabla 9, se muestra los porcentaje de variación del Anemómetro de Hilo Caliente respecto al Tubo Pitot Tipo L Extendible; y del porcentaje de variación del Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática respecto al Tubo Pitot Tipo L Extendible. Es importante considerar que el Anemómetro permite un grado de sensibilidad a bajas velocidades mayor que el Tubo Pitot. La utilización de un instrumento u otro se decide dependiendo del tipo de análisis a realizar. Las ventajas que presenta el anemómetro es la rápida obtención de los valores de velocidad. Única diferencia con el Tubo Pitot Tipo L Extendible, en donde se debe despejar los valores de presión. No se recomienda utilizar el Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática, por las limitantes de colocación y el grado de obstrucción que genera dentro de la sección de pruebas. Como se muestra en el gráfico 9, se emplearon estos tres instrumentos con la intención de conocer los rangos de velocidad por medio de diferentes instrumentos y así validar los resultados obtenidos.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

RANGOS DE VELOCIDAD Y FRECUENCIA											
Instrumento	Frecuencia Hz	Velocidad m/s	% Variación	Instrumento	Frecuencia Hz	Velocidad m/s	Instrumento	Frecuencia Hz	Velocidad m/s	% Variación	
ANEMOMETRO	5	0,52	0,83	TUBO PITOT TIPO L - EXTENDIBLE	5	1,35	TUBO PITOT TIPO L del LAB	5	0,73	0,62	
	10	1	0,90		10	1,9		10	1,58	0,32	
	15	1,77	0,96		15	2,75		15	2,61	0,14	
	20	2,6	1,14		20	3,74		20	3,57	0,17	
	25	3,2	1,51		25	4,71		25	4,41	0,30	
	30	3,9	1,56		30	5,46		30	5,35	0,11	
	35	4,63	1,77		35	6,4		35	6,18	0,22	
	40	5,3	1,98		40	7,28		40	7,04	0,24	
	45	6	2,30		45	8,3		45	7,99	0,31	
	50	6,49	2,71		50	9,2		50	8,92	0,28	
	55	7,35	2,85		55	10,2		55	9,81	0,39	
60	7,7	3,45	60	11,15	60	10,73	0,42				
Resolución	0,64m/s			Resolución	0,93m/s			Resolución	0,89m/s		

Tabla 9: Se muestra los rangos de velocidad por instrumento, el porcentaje de variación con respecto al Tubo Pitot Tipo L Extendible y la resolución aproximada de cada instrumento.

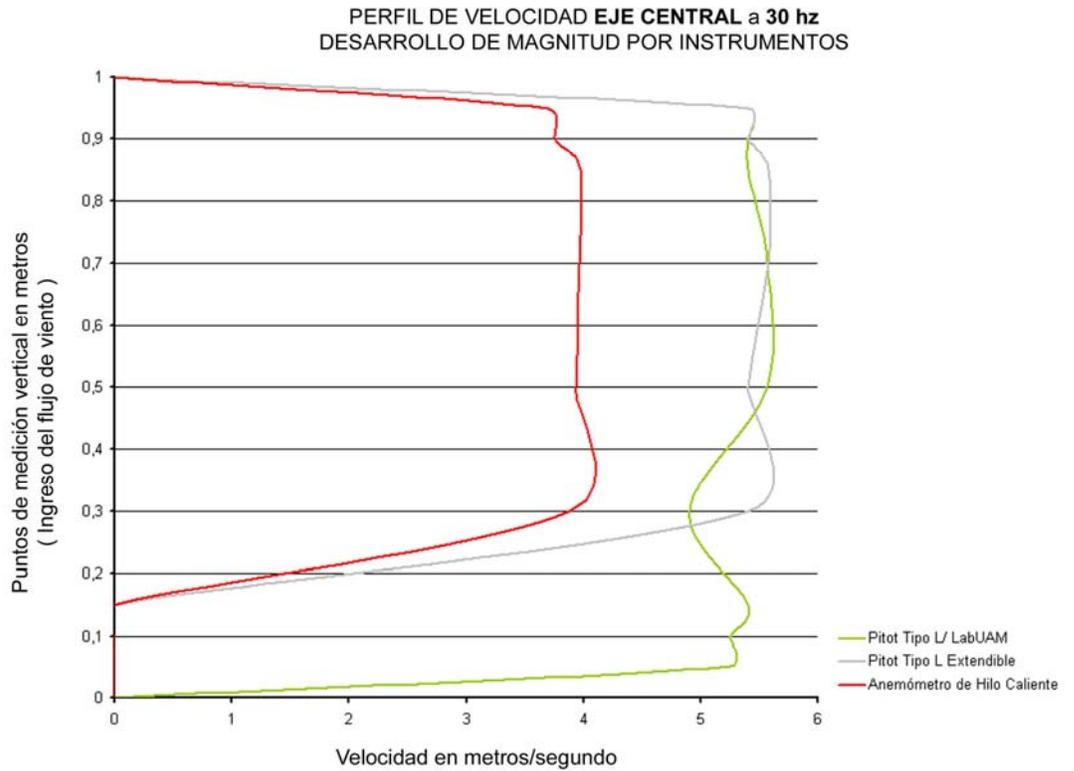


Figura 99: Gráfico que ilustra los perfiles de velocidad en el eje central, comprando el desarrollo de velocidad entre los tres instrumentos de medición.

En síntesis se describe que el flujo de viento de la sección de pruebas del túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana de la Unidad Azcapotzalco:

- Presentó un comportamiento de flujo con una dirección paralela al flujo de ingreso pero poco predecible, es decir que se generan zonas de recirculación, provocando un régimen turbulento, con un desarrollo de magnitudes homogéneo.
- Se logró establecer rangos de frecuencia relativos a la velocidad que serán complemento para estudios dentro del área de la arquitectura.
- Se establece que el desprendimiento de la capa límite de la sección de pruebas, en donde presenta un régimen de viento turbulento apoyaría los ensayos de modelos a escala, considerando que se pretende asemejar las condiciones del prototipo real con el modelo; tomando en cuenta que el flujo de viento atmosférico presenta gradientes de velocidad y grados de turbulencia.
- El túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, bajo determinadas modificaciones, representa una herramienta didáctica y un medio para la investigación dentro del área de la docencia para estudios de modelos arquitectónicos.

5.2. RECOMENDACIONES

Con la intención de implementar y mejorar las condiciones actuales del túnel aerodinámico para estudios de modelos arquitectónicos, se describen las siguientes recomendaciones:

Modificaciones Físicas al Túnel:

Con la intención de considerar un volumen de aire controlado, eliminar perturbaciones externas a futuros ensayos; así como minimizar las molestias que este tipo de túnel provoca (ruido), para el resto de usuarios del laboratorio: se sugiere realizar una remodelación física del área del laboratorio. Como se muestra en la figura 100, se pretende individualizar cada área del laboratorio, con paredes con material aislante dentro de los muros colindantes, y accesos controlados e individualizados. De esta manera se da privacidad de estudio, mejores condiciones de trabajo, y mayor control de las variables termodinámicas. Así como áreas ordenadas y controladas que independientemente de la actividad que se realice en su colindancia puedan funcionar sin afectarse una a la otra.

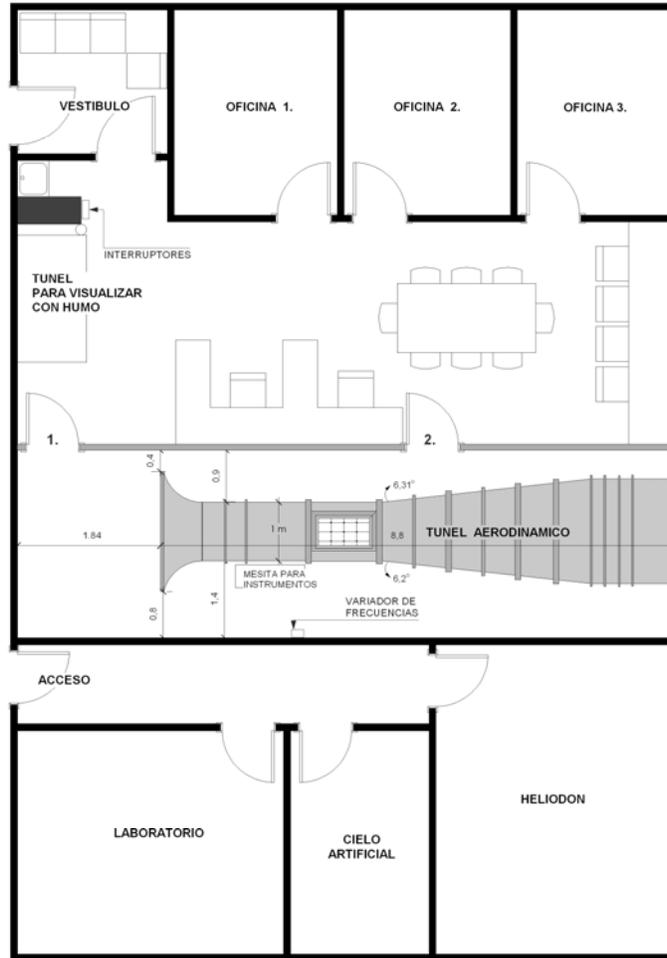


Figura 100: Planta del Laboratorio de Bioclimática con sugerencias de remodelación.

Es importante considerar que la longitud del túnel condiciona el grado de validez de los ensayos para modelos arquitectónicos. Para poder simular el entorno de un proyecto arquitectónico, con simuladores de gradiente de velocidad, se debería contar con una sección de prueba de 10m de longitud. Y para una mejor visualización de los ensayos se recomienda que la sección de pruebas tenga mayor área transparente.

Instrumentación:

Estableciendo los alcances del túnel y definiendo los temas de investigación que se deseen abordar en el túnel aerodinámico, se recomienda implementar al Laboratorio con instrumentos que permitan una adecuada colocación de los instrumentos, ya sea dentro de la sección de pruebas o adaptados a los modelos arquitectónicos; mismos instrumentos que agilicen la toma de datos y suministren mayor información, de esta manera complementar en un periodo corto la experimentación y mejoras a los modelos a escala en estudio.

5.3. APORTES

Rangos de Velocidad y Frecuencias:

Después de procesar 3024 datos de velocidad, surge la Tabla de Rangos, como aporte para futuros casos de estudio. Esta tabla, establece los rangos de velocidad en relación a los valores de frecuencia que genera el variador de frecuencia, y se subdivide por instrumento: Anemómetro de Hilo Caliente, Tubo Pitot Tipo L Extendible y Tubo Pitot Tipo L del Laboratorio de Bioclimática. Esta tabla permite visualizar la velocidad que se requiere para determinado caso de estudio y seleccionar la frecuencia en la que el variador debe ser accionado, como se observa en las tablas 10, 11, 12 siguientes:

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

Instrumento	Frecuencia Hz	Velocidad m/s	% Variación
ANEMOMETRO	5	0,52	0,83
	10	1	0,90
	15	1,77	0,98
	20	2,6	1,14
	25	3,2	1,51
	30	3,9	1,56
	35	4,63	1,77
	40	5,3	1,98
	45	6	2,30
	50	6,49	2,71
	55	7,35	2,85
60	7,7	3,45	
Resolución	0,64m/s		

Tablas 10: Tabla de rangos de velocidad en relación a los valores de frecuencia que genera el variador de potencia, para el Anemómetro de Hilo Caliente.

Instrumento	Frecuencia Hz	Velocidad m/s
TUBO PITOT TIPO L - EXTENDIBLE	5	1,35
	10	1,9
	15	2,75
	20	3,74
	25	4,71
	30	5,46
	35	6,4
	40	7,28
	45	8,3
	50	9,2
	55	10,2
60	11,15	
Resolución	0,93m/s	

Tablas 11: Tabla de rangos de velocidad en relación a los valores de frecuencia que genera el variador de potencia, para el Tubo Pitot tipo L Extendible.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

Instrumento	Frecuencia Hz	Velocidad m/s	% Variación
TUBO PITOT TIPO L del LAB	5	0,73	0,62
	10	1,58	0,32
	15	2,61	0,14
	20	3,57	0,17
	25	4,41	0,30
	30	5,35	0,11
	35	6,18	0,22
	40	7,04	0,24
	45	7,99	0,31
	50	8,92	0,28
	55	9,81	0,39
60	10,73	0,42	
Resolución	0,89m/s		

Tablas 12: Tabla de rangos de velocidad en relación a los valores de frecuencia que genera el variador de potencia, para el Tubo Pitot tipo L del Laboratorio de Bioclimática.

Escala de Beaufort Y Tabla de Rangos: Cuando no se dispone de instrumentos de medición, la intensidad del viento es medida cualitativamente en función a sus efectos y a su percepción. Para hacer esta estimación, se utiliza la escala de Beaufort, como se muestra en la tabla 13.

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Efecto en el hombre	Efectos en tierra
0	0 a 1	< 1	Calma	Ninguno	Calma, el humo asciende verticalmente

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

1	2 a 5	1 a 3	Aire ligero	Movimientos apenas percibidos debido al efecto de enfriamiento	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	4 a 6	Brisa Ligera	El aire fresco se siente sobre la cara	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	7 a 10	Brisa suave	El cabello se mueve, ligero golpeteo de la ropa; empieza la incomodidad	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	11 a 16	Brisa moderada	El cabello se desarregla; medianamente incómodo	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	17 a 21	Viento fuerte	La fuerza del viento se siente incómodamente sobre el cuerpo	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

6	39 a 49	22 a 27	Viento muy fuerte	Se escucha el viento, el cabello se extiende de frente y es difícil caminar firmemente	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas
7	50 a 61	28 a 33	Vendaval	Caminar contra el viento equivale a subir una inclinación de 1/7	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento
8	62 a 74	34 a 40	Ventarrón	Generalmente se impide el paso, lo que equivale a subir una cuesta de 1/5	Se quiebran las copas de los árboles, circulación dificultosa para los peatones.
9	75 a 88	41 a 47	Ventarrón Fuerte	Las ráfagas empujan, lo que equivale a subir una cuesta de 1/5	Daños en árboles, imposible andar contra el viento

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

10	89 a 102	48 a 55	Borrasca	Caminar contra el viento equivale subir una cuesta de 1/3, pero las ráfagas hacen prácticamente imposible moverse	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	56 a 63	Borrasca fuerte	Hombres y animales arrastrados o elevados	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles
12	118 y más	64 a 71>	Borrasca muy fuerte	Más fuerte que el anterior	Destrucción total

Tabla 13: Escala de Beaufort, tomada de la enciclopedia Wikipedia y modificada con referencias de Fuentes Víctor y Rodríguez Manuel. “Ventilación Natural, Cálculos Básicos para la Arquitectura”

Con la intención de acercar los conceptos de ingeniería de mecánica de fluidos a la arquitectura, se aporta la tabla 14 que sintetiza los valores obtenidos en relación con la escala de Beaufort.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

Escala de Beaufort	Anemómetro de Hilo Caliente	
	Frecuencia	Velocidad
	Hz	m/s
0	5	0,52
1	10	1
2	15	1,77
	20	2,6
	25	3,2
3	30	3,9
	35	4,63
	40	5,3
4	45	6
	50	6,49
	55	7,35
	60	7,7
Tubo Pitot Tipo L Extendible		
	Frecuencia	Velocidad
	Hz	m/s
1	5	1,35
2	10	1,9
	15	2,75
3	20	3,74
	25	4,71
	30	5,46
4	35	6,4
	40	7,28
5	45	8,3
	50	9,2
	55	10,2
6	60	11,15
Tubo Pitot Tipo L LAB		
	Frecuencia	Velocidad
	Hz	m/s
1	5	0,73
	10	1,58
2	15	2,61
3	20	3,57
	25	4,41
	30	5,35
4	35	6,18
	40	7,04
5	45	7,99
	50	8,92
	55	9,81
	60	10,73

Tabla 14: Tabla comparativa de la Escala de Beaufort y Rangos de Velocidad generados por el Túnel de Viento del Laboratorio de Bioclimática de la la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Como aporte final de esta investigación se diseñó la *Tabla de Parámetros de Similitud*, para estudios de modelos arquitectónicos a escala dentro del túnel aerodinámico del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la UAM – Azcapotzalco. Se consideró la situación física actual del túnel, contemplando la dimensión de la sección de pruebas y su longitud; es importante mencionar que por estas condiciones no se considera el número de Jensen dentro de la tabla 15. Sin embargo como se mencionó en capítulos anteriores, es fundamental poder lograr la mayor similitud de parámetros entre el modelo a escala y el prototipo real, para una validez del estudio.

Para el diseño de la tabla 15 se consideraron las características del flujo de aire y las condiciones físicas del túnel del Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la UAM – Azcapotzalco. Bajo los criterios de semejanza entre prototipos arquitectónicos reales y modelos a escala, el programa permite inscribir cualquier valor relevante para la definición:

1. La Escala del Modelo.
2. El Instrumento a utilizar.
3. La frecuencia a seleccionar según la velocidad deseada para cada instrumento a utilizar.

Procedimiento:

- Columna 1: Se debe de establecer la longitud característica del prototipo real.

Según el ejemplo se considera la altura del prototipo real L:

$$L = 2,5\text{m}$$

- Columna 2: Como constante se tiene un área efectiva de la sección de pruebas de $0,88\text{m}^2$, este valor no se debe modificar.
- Columna 3: Como constante se establecen las escalas que se utilizan comúnmente en arquitectura.
- Columna 4: Se debe de establecer el área frontal del prototipo real. Como ejemplo ilustrativo se considera el área frontal del prototipo como L^2 :

$$2,5\text{m} \times 2,5\text{m} = 6,25\text{m}^2 \quad (6,3\text{m})$$

- Columna 5: El programa automáticamente establece el área transversal del modelo, proporcional al área del prototipo real.
- Columna 6: El programa automáticamente establece el porcentaje de bloqueo que el modelo generaría en la sección de pruebas del túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. A partir de esta información el diseñador visualiza cual sería la posible escala a utilizar. Es importante recordar que el bloqueo no debe exceder al 10% del área frontal de la sección de pruebas. En el caso de ejemplo, se traza una línea roja, la cual indica a partir de cual escala se podría realizar el estudio.
- Columna 7: Se debe de establecer el promedio de velocidad promedio que incide sobre el prototipo real. En el caso de ejemplo se agregan los promedios de velocidad máximos para la columna 7 y mínimos para la columna 12.
- Columna 8 y 9: El programa automáticamente establece la velocidad equivalente al modelo a escala, a estudiar.

- Columnas 9 a la 11 y 14 a la 16: Establece las frecuencias equivalentes según la velocidad de flujo de viento a estudiar para cada instrumento a utilizar.
- Esta información permite concluir el alcance de estudios dentro del túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

TABLA DE PARAMETROS DE SEMEJANZA

Prototipo H Real mfr	Area Transversal de la Sección de de Pruebas	Escala 1:n	Area Transversal del Prototipo m ²	Area Frontal de Modelo m ²	Bloqueo % Requiendo 10% max	Prototipo Velocidad Máxima V=m/s	Velocidad Equivalente modelo V/escala	Anemómetro de Hilo Coliente Hz	Tubo Pilot Tipo L Extendible Hz	Prototipo Velocidad Mínima V=m/s	Velocidad Equivalente modelo V/escala	Anemómetro de Hilo Coliente Hz	Tubo Pilot Tipo L Extendible Hz	Tubo Pilot Tipo L del LAB Hz
2.5	0.88	2	6.3	3.125	355.11	8	4.000	30	>25	20 a 25	0.25	>5	>5	>5
2.5	0.88	3	6.3	2.083	236.74	8	2.667	20	>15	15	0.50	>5	>5	>5
2.5	0.88	4	6.3	1.563	177.56	8	2.000	15 a 20	10	10 a 15	0.17	>5	>5	>5
2.5	0.88	5	6.3	1.250	142.05	8	1.600	10 a 15	>10	10	0.50	>5	>5	>5
2.5	0.88	7.5	6.3	0.833	94.70	8	1.067	10	>5	5 a 10	0.07	>5	>5	>5
2.5	0.88	10	6.3	0.625	71.02	8	0.800	5 a 10	>5	5	0.50	>5	>5	>5
2.5	0.88	15	6.3	0.417	47.35	8	0.533	5	>5	>5	0.03	>5	>5	>5
2.5	0.88	20	6.3	0.313	35.51	8	0.400	>5	>5	>5	0.03	>5	>5	>5
2.5	0.88	25	6.3	0.250	28.41	8	0.320	>5	>5	>5	0.02	>5	>5	>5
2.5	0.88	30	6.3	0.208	23.67	8	0.267	>5	>5	>5	0.02	>5	>5	>5
2.5	0.88	40	6.3	0.156	17.76	8	0.200	>5	>5	>5	0.01	>5	>5	>5
2.5	0.88	50	6.3	0.125	14.20	8	0.160	>5	>5	>5	0.01	>5	>5	>5
2.5	0.88	75	6.3	0.083	9.47	8	0.107	>5	>5	>5	0.01	>5	>5	>5
2.5	0.88	100	6.3	0.063	7.10	8	0.080	>5	>5	>5	0.01	>5	>5	>5
2.5	0.88	125	6.3	0.050	5.68	8	0.064	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	150	6.3	0.042	4.73	8	0.053	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	200	6.3	0.031	3.55	8	0.040	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	250	6.3	0.025	2.84	8	0.032	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	300	6.3	0.021	2.37	8	0.027	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	400	6.3	0.016	1.78	8	0.020	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	500	6.3	0.013	1.42	8	0.016	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	750	6.3	0.008	0.95	8	0.011	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5
2.5	0.88	1250	6.3	0.005	0.57	8	0.006	>5	>5	>5	0.00	>5	>5	>5

Después de realizar todo el proceso de investigación con el Túnel Aerodinámico, ingresar a un mundo de conceptos no inmediatos a la arquitectura y con la intención de poder generar un vínculo entre ingeniería y la arquitectura, en favor a estudios diseños bioclimáticos, me siento muy identificada con las palabras de los Hermanos Wright:

“Hemos tomado la aeronáutica (...), muchas veces renuentes a profundizar en el lado científico. Sin embargo encontramos el trabajo con el túnel de viento tan fascinante que fue imposible no profundizar en él.”
Hermanos Wright, 1901.

No me cabe duda que este tema es un gran universo de estudios y gran motivador para futuras investigaciones. Es mi deseo que esta valiosa herramienta no quede nuevamente abandonada, sino que se le tome con el respeto necesario y se mejore sus condiciones para ofrecer a los estudiantes, profesores y profesionales del área de la arquitectura, la *posibilidad de enriquecer sus diseños después de experimentar con el*

Túnel Aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

Muchas gracias,

Bibliografía

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SMN. Glosario de Términos. Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua-México. Gobierno de México. <http://smn.cna.gob.mx>
2. Fuentes Víctor. Clima y Arquitectura. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.
3. Rodríguez Humberto y Sandoval María. Una Alternativa de Enseñanza. pag. B-C. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México, 1988.
4. García José y Fuentes Víctor. Arquitectura y medio ambiente en la ciudad de México. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México, 2000.
5. Palladio. De la selección de un sitio para la construcción de una casa de campo. 1518 – 1580.
6. Viqueira Manuel. Estudios de Arquitectura Bioclimática. 1er Libro de Vitruvio, cap 4; volumen VII, pag 25-26. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.
7. Ruiz José, Sanz Ángel, Perales José y Pindado Santiago. Aerodinámica Civil, cargas de viento en edificaciones. Ed. McGraw -Hill. Madrid 2001.
8. Real Cesar. Acreditación del LABINTHAP como laboratorio secundario en velocidad de aire. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 2002. y sus asesorías profesionales.
9. Rodríguez Fausto, Aplicaciones de la Aerodinámica Experimental a la arquitectura Bioclimática. Instituto Politécnico Facultad de Ingeniería Aerodinámica. Agosto 2005.
10. Heron de Alejandría, Abril 1999.
<http://www.history.mcs.standrews.ac.uk/Mathematicians/Heron.html>
11. Bases Científicas del Barroco al Siglo XX. 1980-2005.
http://www.aero.upm.es/es/alumnos/historia_aviacion/tema2.html
12. Santamaría Alejandra. Mecánica de Vuelo. Número 98-11.
<http://www.cvlmallorca.com/teoria2-e.php>

-
13. Pineda Andrés. República Dominicana. <http://www.arqhys.com>
14. Primer Centenario de Aviación en el Mundo. Fundación Aeronáutica Guadalquivir. www.fag.es/aviacion/historia/centenario.htm
15. First Flights. Part I –Part II. <http://www.fi.edu/flights/first/before2.html>
16. Ruiz José, Sanz Ángel, Perales José y Pindado Santiago. Aerodinámica Civil: Cargas de viento en las edificaciones. Cap.7. pag 199. Madrid 2001.
17. Rodríguez Fausto. Aplicaciones de la Aerodinámica Experimental a la Arquitectura Bioclimática. Instituto Politécnico Escuela Superior de Ingeniería Aeronáutica. México 2005.
18. Tópicos Avanzados en Aerodinámica.
<http://www.aerodyn.org/WindTunnel/ttunnels.html>
19. [http://www.Reynolds - Wikipedia, la enciclopedia libre.htm](http://www.Reynolds-Wikipedia-la-enciclopedia-libre.htm)
20. Melaragno Michele. Wind in Architectural and Environmental Design. Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA,1982.
21. Jewel Barlow, Wiley John and Sons. Low Speed Wind Tunnel-Testing. 3rd Ed. John Wiley and Sons. Inc. USA 1999.
22. Fuentes Víctor y Rodríguez Manuel. Ventilación Natural: Cálculos Básicos para Arquitectura, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México
23. Campbel y Standen. Progress report ii on simulation of earth's surface winds by artificial thickened wind tunnel boundary layers. 1969.
24. Irwin, H.P.A.H. The design of spires for wind simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1981.
25. Cermak Jeffrey. Applications of wind tunnels to investigation of wind engineering problems.A1AA Journal, vol.17.1979.

-
- ²⁶. Dyrbye & Hansen. Wind Effects on Buildings and Structures. Technical Committee T12: Wind Effects, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Brussels. 1978.
- ²⁷. García José. Túnel de viento para pruebas experimentales en modelos físicos tridimensionales del laboratorio de arquitectura bioclimática. Pag 131. Departamento de Medio Ambiente para el Diseño. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.
- ²⁸. Medrano Mejía Antonio. Optimización Aerodinámica de un Automóvil mediante deflectores de Viento: Proyecto Tarasko I. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Unidad Adolfo López Mateos México. D.F. 1998.
- ²⁹. AIAA Journal, vol 20, n° 4, Abril 1982, pag. 459. Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica.

BIBLIOGRAFIA

- Álvarez Gisela, Wittwer Adrián y Natalini Mario. Reproducción de Flujos de Capa Límite Atmosférica en el túnel de viento TV2 de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Chaco, Argentina. 2004.
- Aguirre Cesar, Martínez José, Brisuela Armando y Moyano Marcelo. Simulación de las Grandes Escalas del Flujo Turbulento Sobre una Colindancia de Suave Pendiente. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Córdoba, Argentina. 2007.
- AIAA Journal, volumen 20, n° 4, Abril 1982. Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica.
- Anderson, John. Fundamentals of Aerodynamics. Ed.Mc Graw- Hill; Singapore 1991.
- Batill and Nelson. Low Speed, Indraft Wind Tunnels, Lectures Notes in Engineering, Edited by Brebbia C. A. and Orszag S. A. Frontiers in Experimental Fluid Mechanics. Springer-Verlag, 1985.
- Bradshaw and Pankhurst. The Desing of Low Speed Wind Tunnels, Progress in Aeronautical Sciences, volume 5, Pergamon Press, 1964.
- Campbel and Standen. Progress Report ii on Simulation of Earth's Surface Winds by Artificial Thickened Wind Tunnel Boundary Layers. 1969.
- Cermark Jeffrey Applications of wind tunnels to investigation of wind engineering problems. A1AA Journal, volume 17.1979.
- Cermark, Davenport, During, Irwin, Isyumov, and others. Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures. Ed.ASCE. Virginia.USA.1999.
- Dyrbye and Hansen. Wind Effects on Buildings and Structures. Technical Committee T12: Wind Effects, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Brussels. 1978.
- Eslava Tolentino. Medición de la Capa Límite en Alabes de Compresores de Flujo Axial en un Túnel de Viento de Velocidad Media. Tesis Ingeniería Mecánica, México D.F. 1993

Fuentes Víctor. Clima y Arquitectura. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México D.F.

Fuentes Víctor y Rodríguez Manuel. Ventilación Natural: Cálculos Básicos para Arquitectura, 1era Edición. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco. México, D.F.2004.

García José. Simulador del Movimiento del Aire en el Interior de las Edificaciones y en su entorno Circundante: Túnel del Viento. Hacia una Arquitectura Ecológica y Sustentable. Seminario Internacional. 1era Edición. Mayo 2000.México, D.F.

García José y Fuentes Víctor. Arquitectura y medio ambiente en la ciudad de México Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México, 2000.

Irwin, H.P.A.H. The design of spires for wind simulation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1981.

Jewel Barlow and Wiley John. Low Speed Wind Tunnel-Testing. 3rd Ed. John Wiley and Sons, Inc. USA 1999.

Medrano Mejía Antonio. Optimización Aerodinámica de un Automóvil mediante deflectores de Viento: Proyecto Tarasko I. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Unidad Adolfo López Mateos México. D.F. 1998.

Melaragno Michele. Wind in Architectural and Environmental Design. University of North Carolina at Charlotte. Ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA,1982.

Meseguer José, Sanz Ángel, Perales José y Pindado Santiago. Aerodinámica Civil, cargas de viento en edificaciones. Ed.McGraw-Hill. Madrid 2001.

Metha and Bradshaw, Desing Rules forSmall Low Speed Wind Tunnels, Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, volumen 83, November 1979.

Mota Jesús. Comportamiento de la Presión Atmosférica en el Campus de la UAM Azcapotzalco. Departamento de Electrónica. Área de Instrumentación. Universidad Autónoma Metropolitana. México. D.F. 1997.

Loehrke and Nagib. Control of Free- Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation. Journal of Fluids Engineering, volumen 98, September 1976.

Palladio. De la selección de un sitio para la construcción de una casa de campo. 1518 – 1580.

Pope Alan y Harper John. "Low Speed Wind Tunnels Testing". New York, Ed. John Willey and Sons 1966.

Purtell and Klebanoff. A Low-Velocity Airflow Calibration and Research Facility, National Bureau of Standards, Technical Note 1989-1979.

Real Cesar. Acreditación del LABINTHAP como laboratorio secundario en velocidad de aire. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 2002. y sus asesorías profesionales.

Rodríguez Fausto. Aplicaciones de la Aerodinámica Experimental a la arquitectura Bioclimática. Instituto Politécnico Facultad de Ingeniería Aerodinámica. Agosto 2005.

Rodríguez Humberto y Sandoval María. Una Alternativa de Enseñanza. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México, 1988.

Schlichting Herrman and Gersten Klaus. Boundary Layer Theory. 8th Edition. Germany, 2000.

Tulapurkara and Bhalla. Experimental Investigation of Morel's Methods for Wind Tunnel Contractions. Journal of Fluid Engineering, March 1988.

Viqueira Manuel. Estudios de Arquitectura Bioclimática. volumen VII. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

White Frank. Mecánica de Fluidos. Ed. Mc Graw-Hill; España 1979.

REFERENCIAS DE INTERNET

- <http://www.aerodyn.org/WindTunnel/ttunnels.html>
Tópicos Avanzados en Aerodinámica.
- http://www.aero.upm.es/es/alumnos/historia_aviacion/tema2.html
Bases Científicas del Barroco al Siglo XX. 1980-2005.
- <http://www.arqhys.com>
Pineda Andrés. Republica Dominicana.
- <http://www.AHFsaI Servicios.htm>
- <http://www.Capa límite - Wikipedia, la enciclopedia libre.htm>
- <http://www.cenam.mx/simposio2004/memorias/TA-141.pdf>
- <http://www.cvlmallorca.com/teoria2-e.php>
Mecánica de Vuelo.
- <http://www.domotica.net>
- <http://www.energianas KSNN™.htm>
- <http://www.energianatural.com.ar>
- http://www.energia.gob.mx/wb2/Sener/Sene_219_eolica
- <http://www.fag.es/aviacion/historia/centenario.htm>
Primer Centenario de Aviación en el Mundo. Fundación Aeronáutica Guadalquivir.
- <http://www.fi.edu/flights/first/before2.html>
First Flights. Part I –Part II.
- <http://www.greenbuilder.com>

-
- [http:// www.history.mcs.standrews.ac.uk/Mathematicians/Heron.html](http://www.history.mcs.standrews.ac.uk/Mathematicians/Heron.html)
 - <http://www.iberica2000.org>
 - [http://www.IDEA_S_A_Todo en Diseño!.htm](http://www.IDEA_S_A_Todo_en_Diseño!.htm)
 - [http://www.Ingenieros Ilustres Juan de la Cierva.htm](http://www.Ingenieros_Ilustres_Juan_de_la_Cierva.htm)
 - [http://www.mecánica de fluidos - monografias_com.htm](http://www.mecánica_de_fluidos_monografias_com.htm)
 - [http://www.NASA's KSNN"ehtm](http://www.NASA's_KSNN.ehtm)
 - http://www.navier_stanford_edu-bradshaw-tunnel-fig-fig5b_jpg.htm
 - [http://www.número de reynolds - wikipedia, la enciclopedia libre.htm](http://www.número_de_reynolds_wikipedia_la_enciclopedia_libre.htm)
 - <http://www.rpmaquinarias.com.ar>
 - [http://www.SIMPPLE __.htm](http://www.SIMPPLE_.htm)
 - <http://smn.cna.gob.mx/SMN>
Glosario de Términos. Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua-México.
 - <http://www.Sustainableabc.com>
 - [http://www.túnel de viento - IMFIA.htm](http://www.túnel_de_viento_IMFIA.htm)
 - [http://www.túnel de viento - wikipedia, la enciclopedia libre.htm](http://www.túnel_de_viento_wikipedia_la_enciclopedia_libre.htm)
 - <http://www.windenergy.com>
 - http://www.wings_avkids_com-Tennis-Images-ten_wt_jpg.htm

Curriculum Vitae

Nombre: Andrea Elena Fernández Meza.
Fecha de Nacimiento: 17 de Abril de 1979.
Nivel Académico: Licenciada en Arquitectura.
Especialista en Arq. Bioclimática.
Cedula Profesional: A-14650
Nacionalidad: Costarricense.
Correo Electrónico: arq_afernandez@hotmail.com
arq.afernandez@gmail.com
Teléfonos: (521) 044 55 14 25 50 27
(52) 11 07 66 88
(52)55 54 70 59
(506) 88 74 17 36
(506) 22 85 07 70

Estudios Universitarios:

Universidad Veritas Facultad de Arquitectura, San José, Costa Rica.
1997 – 2003.

Tesis para optar por el Grado de Licenciatura en Arquitectura:
“Transformación Urbana de la Ciudad de San José:
Centro Popular de Regeneración Los Mercados”

Educación Arquitectónica continua:

- Seminario Representar e Intervenir, realizado por la Universidad Veritas Facultad de Arquitectura. San José , Costa Rica, 29 junio de 1999.
- Seminario Diseño de Jardines, Inspiración en el paisaje costarricense, realizado por La Asociación Costarricense de Paisajismo. San José, Costa Rica, 20 al 25 de setiembre de 1999.
- Certamen Anual Salvemos nuestro Patrimonio Arquitectónico, realizado por el Ministerio de Cultura Juventud y Deportes, Centro de Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural.
Proyecto:” Casa de la Familia Vargas, Barrio México”. San José, Costa Rica, 27 de abril del 2000.
- Curso de Innovación Gráfica en Arquitectura y Paisajismo, realizado por la Asociación Costarricense de Paisajismo y la Universidad Veritas Facultad de Arquitectura. San José, Costa Rica, 22 al 26 de mayo del 2000.
- Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Arquitectura. Los Ángeles, California, 25 de octubre al 1 diciembre del 2000.
- Seminarios Arquitectura Internacional Tropical, realizados el Museo de Arte Contemporáneo y el Instituto de Arquitectura Tropical, San José, Costa Rica, mayo 2001.

- Seminario Historia de la Arquitectura Contemporánea, impartido por la Dra. Ma. Antonia Frías, Profesora de Estética y Composición Arquitectónica de la Universidad de Navarra, España. San José, Costa Rica, 18 al 20 de setiembre del 2001.
- Segundo Congreso Nacional de Arquitectura, MUNDANEUM, realizado por La Facultad de Arquitectura y Urbanismo. San José, Costa Rica, 27 al 30 de junio del 2001.
- VI Bienal de Arquitectura y Urbanismo, Arquitectura Sustentable, realizado por el Colegio Federado de Ingeniería y Arquitectura. San José, Costa Rica, 2 al 7 de octubre del 2002.
- Seminario de Urbanismo Internacional, realizado por la Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F, del 14 al 18 de marzo 2005.
- IV Congreso Latinoamericano sobre Confort y Comportamiento Térmico de las Edificaciones, realizado por la Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F, del 23 al 27 de mayo 2005.
- Séptimo Congreso Internacional de Arquitectura y Diseño: CajaBox. Realizado por Arquine. Distrito Federal, México, del 27 al 29 de marzo del 2006.
- Congreso ANES, XXX Semana Nacional de Energía Solar, realizado en Veracruz, México, del 3 al 6 de octubre del 2006.
- Congreso ANES, XXXI Semana Nacional de Energía Solar, Ponente del tema: "Túnel de Viento: Herramienta para Estudios de Modelos en la Arquitectura Bioclimática". Realizado en Zacatecas, México. Octubre del 2007.
- Congreso ANES, XXXII Semana Nacional de Energía Solar, Coautor del tema: "Técnicas de Visualización del Flujo en el Túnel de Viento UAM Azc". Realizado en Mérida, Yucatán, México. Octubre del 2008.

Estudios de Postgrado:

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México D.F. Especialización en Arquitectura Bioclimática, Setiembre 2005 a Julio del 2006.

Tesis para optar por el Grado de Especialista en Arquitectura Bioclimática:
 " Escuela Rural: Las Piedritas de san Cristóbal de las Casas."

Estudios de Enseñanza Secundaria:

Saint Clare College, San José, Costa Rica. 1992 – 1996.

Estudios de Enseñanza Primaria:

Saint Joseph's Primary School, San José, Costa Rica. 1984 – 1991.