

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**MEDICIÓN DE CAPA LÍMITE Y TURBULENCIA EN UN TÚNEL DE
VIENTO PARA CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
DE VELOCIDAD**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

P R E S E N T A

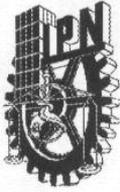
ING. RENÉ TOLENTINO ESLAVA

DIRECTOR DE TESIS: DR. MIGUEL TOLEDO VELÁZQUEZ



MÉXICO D.F.

Noviembre 2003



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 17:00 horas del día 4 del mes de Septiembre del 2003 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada Por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. Para examinar la tesis de grado titulada:

“MEDICION DE CAPA LIMITE Y TURBULENCIA EN UN TUNEL DE VIENTO PARA CALIBRACION DE INSTRUMENTOS DE MEDICION DE VELOCIDAD”

Presentada por el alumno:

TOLENTINO

Apellido paterno

ESLAVA

materno

RENE

nombre(s)

Con registro:

0	0	1	0	9	7
---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

DR. MIGUEL TOLEDO VELAZQUEZ

DR. FLORENCIO SANCHEZ SILVA

DR. IGNACIO HERNADEZ GUTIERREZ

DR. MIGUEL TUÑINO VELAZQUEZ

DR. PEDRO QUINTO DIEZ

DR. IGNACIO CARVAJAL MARISCAL

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. FLORENCIO SANCHEZ SILVA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



Este trabajo se realizó en el proyecto CGPI “Establecimiento del Patrón Primario de Velocidad de Gases en el LABINTHAP de la SEPI-ESIME Zacatenco” con clave 20010685.

ÍNDICE

RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS	<i>i</i>
NOMENCLATURA	<i>iv</i>
RESUMEN	<i>vi</i>
ABSTRACT	<i>vii</i>
INTRODUCCIÓN	<i>viii</i>
OBJETIVO	<i>x</i>
I. ESTADO DEL ARTE	1
1.1 TÚNEL DE VIENTO DE VELOCIDAD BAJA DEL NIST	2
1.2 TÚNEL DE VIENTO DE DOBLE SECCIÓN DE PRUEBAS DEL NIST	6
1.3 TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE TOHOKU	8
1.4 TÚNEL DE VIENTO DE VELOCIDAD BAJA DEL NRLM	10
II. TEORÍA DE CAPA LÍMITE Y TURBULENCIA	15
2.1 CAPA LÍMITE	16
2.1.1 Espesores de la Capa Límite	17
2.1.2 Crecimiento de la Capa Límite en Ductos de Succión	19
2.1.3 Ecuaciones de la Capa Límite	20
2.2 TURBULENCIA	21
2.2.1 Ecuaciones de Reynolds para Flujo Turbulento	22
2.2.2 Ecuaciones de la Capa Límite Turbulenta Bidimensional	23
III. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	25
3.1 TÚNEL DE VIENTO DE VELOCIDAD BAJA	26
3.1.1 Sección de Pruebas de Succión	27
3.1.2 Sección de Pruebas de Presión	28
3.2 INSTRUMENTACIÓN	29
3.2.1 Anemómetro de Hilo Caliente	29
3.2.1.1 Sistema de Calibración	30
3.2.1.2 Sondas	32
3.2.1.3 Sistema Posicionador	34

3.2.2	Tubo de Pitot y Manómetro	34
3.2.3	Termómetro, Barómetro e Higrómetro	35
3.3	MODIFICACIONES EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS DE SUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO	35
3.3.1	Mallas y Panal	36
3.3.2	Contracción y Entrada Acampanada	40
3.3.3	Modificaciones Propuestas	43
IV.	DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	45
4.1	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	46
4.2	PERFILES DE VELOCIDAD EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS	51
4.3	CAPA LÍMITE EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS	62
4.4	TURBULENCIA EN LA ZONA DE CALIBRACIÓN	70
V.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
5.1	PERFILES DE VELOCIDAD	73
5.2	CRECIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE	76
5.3	UBICACIÓN DE LA ZONA DE CALIBRACIÓN	81
5.4	TURBULENCIA EN LA ZONA DE CALIBRACIÓN	83
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	88
	REFERENCIAS	90
APÉNDICE A	ECUACIONES DE FLUJO DE FLUIDOS	93
APÉNDICE B	SOLUCIÓN DE BLASIUS DE LA CAPA LÍMITE	97
APÉNDICE C	ECUACIÓN INTEGRAL DE VON-KARMAN	100

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1.1	Túnel de viento de velocidad baja del NIST [17].	1
Figura 1.2	Perfiles de velocidad en la dirección horizontal (Y), para U_C de 5.37 m/s y 9.45 m/s [20].	4
Figura 1.3	Perfiles de velocidades en la dirección vertical (Z), para U_C de 5.37 m/s y 9.45 m/s [20].	4
Figura 1.4	Zona de calibración en $X = 500$ cm, y U_C de 5.37 m/s [20].	5
Figura 1.5	Variación de la turbulencia en el centro de la sección de pruebas en $X = 300$ cm [20].	5
Figura 1.6	Túnel de viento de doble sección de pruebas del NIST [17].	6
Figura 1.7	Turbulencia en el centro de la sección de pruebas cerrada [13].	8
Figura 1.8	Perfiles de velocidad en la sección de pruebas a 60 m/s [13].	9
Figura 1.9	Perfiles de turbulencia en la sección de pruebas a 30 m/s y 60 m/s [13].	9
Figura 1.10	Turbulencia en la capa límite en la sección de pruebas [13].	10
Figura 1.11	Túnel de viento de velocidad baja del NRLM [25].	11
Figura 1.12	Perfiles de velocidad en la sección de pruebas con el arreglo tipo A [26].	12
Figura 1.13	Perfiles de turbulencia en la sección de pruebas del arreglo A [26].	12
Figura 1.14	Turbulencia en la sección de pruebas [25].	13
Figura 2.1	Transición de la capa límite en una placa plana [22].	17
Figura 2.2	Espesores de la capa límite [28].	19
Figura 2.3	Comportamiento de la capa límite en ductos de entrada, a) zonas de crecimiento de la capa límite [6] y b) visualización del flujo [28].	20
Figura 3.1	Túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP.	26
Figura 3.2	Sección de pruebas de succión del túnel de viento del LABINTHAP.	27
Figura 3.3	Sección de pruebas de presión del túnel de viento de velocidad baja.	28
Figura 3.4	Diagrama del sistema de anemometría de hilo caliente [14].	30
Figura 3.5	Diagrama de la unidad de flujo para calibración de sondas [14].	30
Figura 3.6	Partes de las sondas miniatura y con recubrimiento de oro [14].	32
Figura 3.7	Dimensiones de las sondas tipo miniatura, a) sonda 55P11 y b) sonda 55P15.	33
Figura 3.8	Sistema de anemometría de hilo caliente.	33
Figura 3.9	Arreglo de cámara estabilizadora, contracción y sección de pruebas [3].	36
Figura 3.10	Flujo a través de una malla [3].	37
Figura 3.11	Geometrías típicas de los paneles: a) circular, b) cuadrada, c) hexagonal y d) trapezoidal [3].	39

Figura 3.12	Contorno de la contracción del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP.	42
Figura 3.13	Cámara estabilizadora, contracción y ubicación del panel y mallas.	43
Figura 3.14	Túnel de viento del LABINTHAP con la contracción de relación de áreas de 9:1.	44
Figura 4.1	Superficie de turbulencia en función de frecuencia y tiempo de muestreo para 5 m/s.	47
Figura 4.2	Superficie de turbulencia en función de frecuencia y tiempo de muestreo para 15 m/s.	47
Figura 4.3	Superficie de turbulencia en función de frecuencia y tiempo de muestreo para 30 m/s.	48
Figura 4.4	Turbulencia para diferentes frecuencias y tiempos de muestreo, $U = 5$ m/s.	48
Figura 4.5	Turbulencia para diferentes frecuencias y tiempos de muestreo, $U = 15$ m/s.	49
Figura 4.6	Turbulencia para diferentes frecuencias y tiempos de muestreo, $U = 30$ m/s.	49
Figura 4.7	Matriz experimental para establecer la zona de calibración.	50
Figura 4.8	Perfiles de velocidad en $X = 1.80$ m con tubo de Pitot y entrada acampanada.	51
Figura 4.9	Perfiles de velocidad en $X = 2.60$ m con tubo de Pitot y entrada acampanada.	52
Figura 4.10	Perfiles de velocidad en $X = 3.40$ m con tubo de Pitot y entrada acampanada.	52
Figura 4.11	Perfiles de velocidad en $X = 3.40$ con anemómetro de hilo caliente.	53
Figura 4.12	Curva de calibración de la sonda 55P11.	55
Figura 4.13	Errores de calibración de la sonda 55P11.	55
Figura 4.14	Perfiles de velocidad y turbulencia en $X = 1.80$ m, eje Y.	56
Figura 4.15	Perfiles de velocidad y turbulencia en $X = 1.80$ m, eje Z.	57
Figura 4.16	Perfiles de velocidad y turbulencia en $X = 2.60$ m, eje Y.	58
Figura 4.17	Perfiles de velocidad y turbulencia en el eje Z en $X = 2.60$ m.	59
Figura 4.18	Perfiles de velocidad y turbulencia en $X = 3.40$ m, eje Y.	60
Figura 4.19	Perfiles de velocidad y turbulencia en el eje Z en $X = 3.40$ m.	61
Figura 4.20	Curva típica de calibración de la sonda 55P15.	62
Figura 4.21	Errores de la curva de calibración de la sonda 55P15.	63
Figura 4.22	Capa límite en $X = 1.80$ m, eje Y.	65
Figura 4.23	Capa límite en $X = 1.80$ m, eje Z.	65
Figura 4.24	Capa límite en $X = 2.60$ m, eje Y.	67
Figura 4.25	Capa límite en $X = 2.60$, eje Z.	67
Figura 4.26	Capa límite en $X = 3.40$ m, eje Y.	69
Figura 4.27	Capa límite en $X = 3.40$ m, eje Z.	69
Figura 4.28	Turbulencia en la zona de calibración ($X = 2.40$ m).	71

Figura 5.1	Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Y y 5 m/s.	76
Figura 5.2	Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Y y 15 m/s.	77
Figura 5.3	Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Y para 30 m/s.	78
Figura 5.4	Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en Z para 5 m/s.	78
Figura 5.5	Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Z y 15 m/s.	79
Figura 5.6	Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en Z para 30 m/s.	80
Figura 5.7	Zona de calibración en $X = 1.80$ m para 30 m/s.	81
Figura 5.8	Zona de calibración en $X = 2.60$ m y una velocidad de 30 m/s.	82
Figura 5.9	Zona de calibración en $X = 3.40$ m para 30 m/s.	83
Figura B.1	Comparación de la solución de Blasius con datos experimentales [28].	99

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1.1	Caracterización de túneles de viento e instrumentación empelada por institución.	14
Tabla 3.1	Características de las toberas de la unidad de calibración [12].	31
Tabla 4.1	Frecuencia, tiempo de muestreo y número de muestras para 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s.	46
Tabla 4.2	Datos de calibración de la sonda 55P11	54
Tabla 4.3	Velocidad y turbulencia en $X = 1.80$ m, eje Y.	56
Tabla 4.4	Velocidad y turbulencia en $X = 1.80$ m, eje Z.	57
Tabla 4.5	Velocidad y turbulencia en $X = 2.60$ m, eje Y.	58
Tabla 4.6	Velocidad y turbulencia en $X = 2.60$ m, eje Z.	59
Tabla 4.7	Velocidad y turbulencia en $X = 3.40$ m, eje Y.	60
Tabla 4.8	Velocidad y turbulencia en $X = 3.40$ m, eje Z.	61
Tabla 4.9	Velocidad y turbulencia en la capa límite en $X = 1.80$ m, ejes Y y Z.	64
Tabla 4.10	Velocidad y turbulencia en la capa límite en $X = 2.60$ m, ejes Y y Z.	66
Tabla 4.11	Velocidad y turbulencia en la capa límite en $X = 3.40$ m, ejes Y y Z.	68
Tabla 4.12	Velocidad y turbulencia en el centro de la zona de calibración, $X = 2.60$ m.	70
Tabla 5.1	Dimensiones de la zona de calibración en función de los perfiles de velocidad.	75

NOMENCLATURA

A	Área, m ²
C _f	Coefficiente de fricción en la pared, adimensional
C _p	Calor específico a presión constante, J/(kg K)
C _{pi}	Coefficiente de presión en la entrada de la contracción, adimensional
C _{pe}	Coefficiente de presión en la salida de la contracción, adimensional
CR	Relación de contracción, adimensional
c	Velocidad del sonido, m/s
d	Diámetro, m
F	Fuerza, N
F _B	Fuerzas de cuerpo, N
F _S	Fuerzas de superficie, N
f	Frecuencia, Hz o kHz; variable de similitud, adimensional
g	Aceleración de la gravedad, m/s ²
H	Factor de forma δ^*/θ , adimensional
H ₁	Altura de entrada de la contracción, m
h	Entalpía por unidad de masa, J/kg; distancia perpendicular a una superficie, m
K	Coefficiente de caída de presión de la malla, adimensional
k	Conductividad térmica,
L	Distancia entre franjas, nm; longitud de la contracción, m
L ₂	Dimensión característica de un ducto, m
M	Número de Mach, adimensional; abertura de la malla, mm
M _h	Masa molar del aire húmedo, kg/kmol
N	Número de muestras
P ₀	Presión de estancamiento, Pa
P _S	Presión estática, Pa
p	Presión, Pa
p _t	Presión total, Pa
R	Constante universal de los gases, 8 313 J/(kg mol K)
Re	Número de Reynolds, adimensional
SC	Superficie de control
T ₀	Temperatura de estancamiento, K
T	Temperatura, K
Tu	Turbulencia u'/\bar{u} , %
t	Tiempo, s
U	Velocidad, m/s; velocidad de corriente libre, m/s
U _m	Velocidad promedio, m/s
u, v, w	Componentes cartesianas de la velocidad, m/s
\bar{u}_2	Variación de la velocidad en la salida de la contracción, adimensional
V	Velocidad del aire, m/s
\vec{V}	Vector de velocidad, m/s
VC	Volumen de control
w	Ancho, m

X	Longitud en la dirección del flujo, m; posición axial adimensional de la contracción
x, y, z	Posición en los ejes coordenados, m
x_m	Posición de unión de las curvas de la contracción, m
Y	Posición en el eje vertical, m
Z	Factor de compresibilidad, adimensional; posición en el eje horizontal, m

SÍMBOLOS GRIEGOS

α	Constante de la solución de Blasius de la capa límite, 1.32824; coeficiente de deflexión del flujo, adimensional
δ	Espesor de la capa límite, m
β	Porosidad de la malla, adimensional
δ^*	Espesor de desplazamiento, m
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ϕ	Ángulo del flujo corriente abajo de una malla. °
γ	Relación de calores específicos, adimensional
η	Variable de similitud, adimensional
λ	Longitud de onda, nm; segundo coeficiente de viscosidad, Pa·s
μ	Viscosidad dinámica, Pa·s
θ	Ángulo formado por dos haces, °; espesor de momento, m; ángulo del flujo corriente arriba de una malla, °
ρ	Densidad, kg/m ³
σ	Solidez de la malla, adimensional
τ	Esfuerzo cortante, Pa
τ_{ij}	Tensor de esfuerzos
ψ	Función de corriente
∇	Volumen, m ³

SUBÍNDICES

C	Centro
crít	Condiciones críticas
rms	Raíz cuadrática media
w	Pared, alambre
∞	Condiciones en corriente libre
1	Condiciones de entrada
2	Condiciones de salida

SUPERÍNDICES

—	Promedio temporal
'	Fluctuación

RESUMEN

Se realizó la caracterización de la sección de pruebas del túnel de viento de velocidad baja del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP), de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional (IPN), en función de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia, para determinar la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire en un intervalo de 5 m/s a 30 m/s, para establecer el patrón nacional de velocidad de aire en este laboratorio.

Para determinar la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire, se midieron primero los perfiles de velocidad con un tubo de Pitot tipo L de nariz elipsoidal, y posteriormente con un anemómetro de hilo caliente marca DANTEC con una sonda 55P11, en los ejes vertical y horizontal en los planos ubicados a 1.80 m, 2.60 m y 3.40 m corriente abajo de la entrada del flujo a la sección de pruebas para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s.

Otros parámetros que se midieron fueron los perfiles de turbulencia y la capa límite en las mismas posiciones, ejes y velocidades que los perfiles de velocidad, para lo cual se utilizó una sonda 55P15. Con estas mediciones se determinó la zona de calibración en toda la sección de pruebas del túnel de viento. Finalmente, se midió la turbulencia en el centro del plano ubicado en $X = 2.60$ m para el intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s.

Los resultados determinaron que la variación de velocidad en la zona de corriente libre fue menor a $\pm 1\%$ en toda la sección de pruebas para el intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s. El espesor de la capa límite a 3.40 m en los ejes vertical y horizontal fue $\delta_y = 0.055$ m, $\delta_y = 0.065$ m y $\delta_y = 0.075$ m en Y; en el eje Z fue $\delta_z = 0.045$ m, $\delta_z = 0.060$ m y $\delta_z = 0.070$ m para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s respectivamente.

La turbulencia para la velocidad de 13.3 m/s en el centro del plano ubicado en $X = 2.60$ m fue de 4.3%, para las demás velocidades el valor de turbulencia medido se encontró entre 3.2% y 3.9%. La turbulencia en toda la sección de pruebas fue menor a 4.3%. Las dimensiones de las zonas de calibración en los planos de medición ubicados en $X = 1.80$ m, 2.60 m y 3.40 m para 30 m/s fueron de 0.53 m por 0.71 m, 0.47 m por 0.68 m y 0.45 m por 0.66 m en las posiciones mencionadas. Con la caracterización de la sección de pruebas del túnel de viento del LABINTHAP, se determinó una zona de calibración para instrumentos de medición de velocidad, que permitirá establecer en este laboratorio el patrón nacional de velocidad de aire.

ABSTRACT

Low speed wind tunnel test section characterization was carried out, the wind tunnel is located at the Thermal Engineering and Applied Hydraulics Laboratory (LABINTHAP), from SEPI-ESIME Zacatenco of the National Polytechnic Institute (IPN), according to velocity profile, boundary layer and turbulence, to locate calibration zone of air speed measurement instruments for a range from 5 m/s to 30 m/s, to establish at this laboratory a national air speed standard in this range.

To locate calibration zone of air speed measurement instruments, next measurements were done: first velocity profiles at 5 m/s, 15 m/s and 30 m/s on horizontal and vertical axes were measure by means of type L Pitot tube with ellipsoidal nose and with a DANTEC hot wire anemometer and 55P11 probe, at 1.80 m, 2.60 m and 3.40 m downstream from in flow at test section.

After, turbulence profiles and boundary layer were measure too, at velocities, position and axes than velocity profiles, boundary layer measurement was done with a 55P15 probe. All measurements allow establishing the calibration zone in low speed wind tunnel test section. Finally turbulence was measure at center of plane measurement locate at $X = 2.60$ m for velocities from 5 m/s to 30 m/s.

Results showed a velocity variation of $\pm 1\%$ in free stream zone from test section for all velocities. At 3.40 m downstream from in flow to test section, boundary layer thickness on vertical and horizontal axes was $\delta_y = 0.055$ m, $\delta_x = 0.065$ m and $\delta_z = 0.075$ m; on Z axe was $\delta_x = 0.045$ m, $\delta_y = 0.060$ m and $\delta_z = 0.070$ m, for 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s velocities respectively.

Turbulence at 13.3 m/s in the center of plane measurement locates at $X = 2.60$ m was 4.3%, for other velocities turbulence values were about 3.25 to 3.9%. The turbulence in the low speed wind tunnel section was less to 4.3 %. Calibration zones dimension found at 1.80 m, 2.60 m and 3.40 m for 30 m/s were 0.53 m by 0.71 m, 0.47 m by 0.68 m and 0.45 m by 0.66 m at every position. The wind tunnel test section characterization, allowed to determinate an air speed calibration zone to establish a national air speed standard at this laboratory.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el país no cuenta con un laboratorio primario o secundario acreditado en la magnitud de velocidad de aire, por lo cual esta calibración se realiza en laboratorios del extranjero. Con base en lo anterior, aprovechando la infraestructura con que cuenta el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco, ha firmado el convenio específico no. CENAM-IPN-001-01 con el Centro Nacional de Metrología, para establecer el patrón nacional para la medición de velocidad de aire en un intervalo de 5 m/s a 30 m/s en sus instalaciones. La infraestructura del laboratorio consiste de un túnel de viento de velocidad baja, un Anemómetro Láser Doppler para una componente de velocidad y un Anemómetro de Hilo Caliente para tres componentes de velocidad.

En México el Centro Nacional de Metrología (CENAM) es la institución responsable de establecer y mantener los patrones nacionales correspondientes a las unidades del Sistema Internacional. En el área de Metrología Mecánica de este centro se encuentra la División de Flujo y Volumen, donde se tienen los patrones nacionales de flujo y volumen. Sin embargo, no cuenta con un patrón de velocidad de aire que permita calibrar instrumentos en esta magnitud. La velocidad de aire es importante en diversos procesos industriales como son, el diseño y monitoreo de sistemas de acondicionamiento de aire, chimeneas, industria farmacéutica, por mencionar algunos; en donde se emplean anemómetros mecánicos y térmicos, tubos Pitot tipo L y S, entre otros; para medir la velocidad de gases que frecuentemente se encuentra en un intervalo de 5 m/s a 30 m/s.

El tubo Pitot tipo L se emplea como instrumento de referencia en la calibración de otros instrumentos de medición de velocidad. Por lo cual este instrumento se calibra en túneles de viento de circuito abierto o cerrado, con secciones de pruebas caracterizadas en función de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia. En laboratorios que cuentan con instalaciones experimentales para calibrar instrumentos de medición de velocidad de aire, la turbulencia se encuentra en un intervalo de 0.07% a 2%.

El objetivo de este trabajo es determinar experimentalmente el comportamiento del flujo en la sección de pruebas de succión del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP, en función de los perfiles de velocidad, medición de capa límite y turbulencia, empleando un Anemómetro de Hilo Caliente y un tubo Pitot tipo L; para determinar la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de gases en un intervalo de 5 m/s a 30 m/s.

Este trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos que se describen a continuación:

En el Capítulo I se describen las investigaciones realizadas en laboratorios nacionales de metrología e instituciones educativas, sobre la caracterización de túneles de viento de circuito abierto o cerrado en función de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia, empleando anemómetros láser Doppler, anemómetro de hilo caliente y tubos de Pitot.

En el Capítulo II se presenta la teoría de la capa límite, los espesores que la caracterizan, el crecimiento de ésta en ductos de succión, así como las ecuaciones que describen el comportamiento de la capa límite bidimensional. También se muestran las ecuaciones de Reynolds para flujo turbulento y las ecuaciones de la capa límite turbulenta bidimensional.

En el Capítulo III se describe el túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP, y la instrumentación empleada en la etapa experimental de este trabajo. Además, se presentan las modificaciones propuestas para mejorar el comportamiento del flujo en la sección de pruebas de succión del túnel de viento.

En el Capítulo IV se presenta la metodología experimental para obtener los perfiles de velocidad y crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas del túnel de viento del LABINTHAP, para determinar la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire. También se muestran los resultados de la turbulencia en la zona de calibración en un intervalo de velocidades de 5.0 m/s a 30.0 m/s.

En el Capítulo V se analizan los resultados de los perfiles de velocidad y turbulencia, crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas del túnel de viento y la ubicación de la zona de calibración y turbulencia en ésta. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo y se proponen las recomendaciones para trabajos futuros.

OBJETIVO

Determinar la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de gases en el túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP mediante la medición de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia empleando un anemómetro de hilo caliente.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen las investigaciones realizadas en túneles de viento de circuito abierto o cerrado con velocidades desde 0.045 m/s hasta 75 m/s; los cuales son empleados para calibrar instrumentos de medición de velocidad de aire o realizar investigación de flujo de gases en instituciones educativas internacionales y en laboratorios nacionales de metrología. Estos túneles, han sido caracterizados mediante el comportamiento de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia en las secciones de pruebas, empleando anemometría de hilo caliente, anemometría láser Doppler y tubos de Pitot.

1.1 TÚNEL DE VIENTO DE VELOCIDAD BAJA DEL NIST

Purtell L. P. y Klebanoff P. S. (1979), diseñaron un túnel de viento en el Instituto Nacional de Normas y Tecnología de Estados Unidos (National Institute of Standards and Technology, NIST), para un intervalo de velocidades de 3 m/min a 1 000 m/min (0.05 m/s a 16.67 m/s) que permitiera calibrar instrumentos de medición de velocidad de aire y realizar investigaciones de capa límite, turbulencia y aerodinámica, entre otras. Para realizar la calibración de instrumentos a velocidades bajas, optaron por emplear un anemómetro láser Doppler como patrón de referencia.

Las características más importantes de este túnel son una turbulencia baja en la zona de corriente libre y una velocidad uniforme dentro de la sección de pruebas (zona de calibración). Esta instalación experimental está dividida en tres secciones: 1) sección acondicionadora de flujo, 2) sección de pruebas y 3) sección ventilador-difusor como se muestra en la figura 1.1.

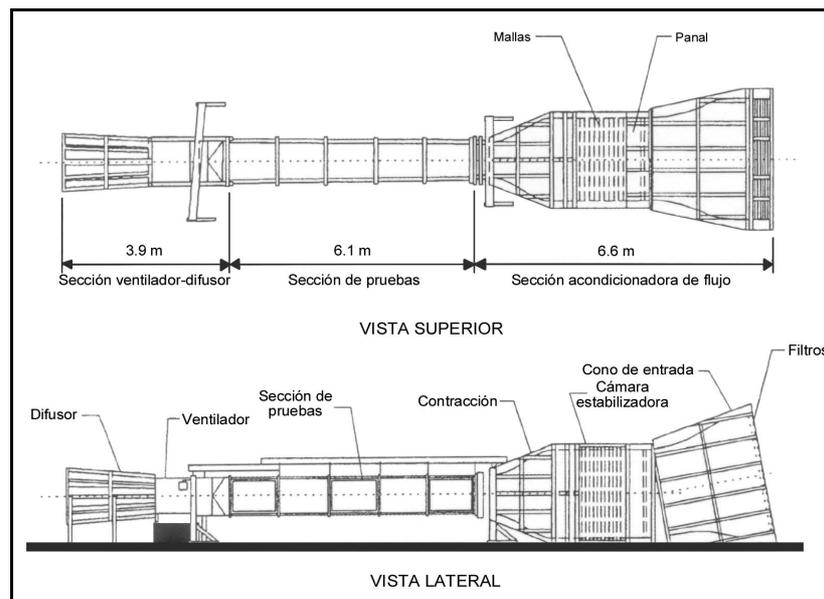


Figura 1.1 Túnel de viento de velocidad baja del NIST [17].

La sección acondicionadora fue la parte más importante para lograr las características del flujo mencionadas. Esta sección se divide en tres subsecciones: un cono de entrada, una cámara estabilizadora y una contracción. El cono de entrada es simétrico con una relación de áreas de 2.14:1; en la entrada del cono, se tienen instalados filtros que permiten el paso de las partículas del medio ambiente con el tamaño apropiado para realizar las mediciones con el anemómetro láser Doppler.

En la cámara estabilizadora se tiene un panel de sección hexagonal de 0.01 m (3/8 plg) por lado y 0.076 m (3 plg) de longitud a una distancia de 0.53 m (21 plg) de la primera malla. También se instalaron 10 mallas de 24 aberturas por pulgada, fabricadas de alambre de acero inoxidable de 0.19 mm (0.0075 plg) de diámetro y una porosidad (b) de 0.672, que cumple con la recomendación $b > 0.57$ [7]. La distancia entre cada malla es de 0.102 m (4 plg).

La contracción con relación de áreas de 5.36:1 fue el elemento más crítico en el diseño de este túnel. Las cuatro paredes de la contracción se construyeron con radios de curvatura de 1.02 m (3.33 ft) y 1.52 m (5 ft) en la entrada y salida respectivamente. Las paredes se ajustaron para modificar la geometría de la contracción mediante prueba y error, para evitar la separación de flujo en ésta. La sección de pruebas tiene un área transversal de 0.91 m por 0.91 m (3 ft por 3 ft) y una longitud de 6.10 m (20 ft), construida de acrílico de 0.01 m (3/8 plg). Las paredes laterales divergen de 0.91 m (3 ft) al inicio a 1.00 m (3 ft 3plg) al final de la sección de pruebas; las paredes superior e inferior permanecen paralelas.

El flujo de aire se genera por un ventilador axial de 12 álabes de paso variable de 0.91 m (3 ft) de diámetro acoplado directamente a un motor eléctrico de 22.38 kW (30 HP) de CD. Ambos, están montados en una base de concreto y se encuentran aislados de la sección de pruebas por una unión flexible para reducir las vibraciones en ésta. La salida del ventilador tiene un difusor de 2.03 m (6 ft 8 plg) de longitud y un ángulo de 5.8°.

Para caracterizar el comportamiento del flujo en la sección de pruebas emplearon un anemómetro de hilo caliente, un tubo estático de Pitot y el anemómetro láser Doppler. Este último, también se utiliza como patrón de referencia para calibrar instrumentos de medición de velocidad de aire a velocidades bajas.

La primera fase de la caracterización fue determinar la distribución de velocidad U , en las direcciones horizontal (Y) y vertical (Z) de la sección de pruebas, para velocidades en el centro (U_C) de 5.37 m/s (322 m/min) y 9.45 m/s (567 m/min) a distancias de 1.00 m, 3.00 m y 5.00 m (en la dirección X) desde el inicio de la sección de pruebas. En las figuras 1.2 y 1.3 se presentan los perfiles de velocidad en las direcciones y posiciones mencionadas en donde, O corresponde al perfil medido con el tubo de Pitot para una velocidad U_C de 5.37 m/s (322 m/min), Δ representa las mediciones realizadas con el anemómetro láser Doppler con una velocidad de U_C de 5.37 m/s y \dot{y} simboliza las mediciones efectuadas con el tubo de Pitot para una velocidad U_C de 9.45 m/s (567 m/min).

Posteriormente realizaron un mapeo detallado en la sección de pruebas a una velocidad de 5.37 m/s (322 m/min). La figura 1.4 presenta los resultados en la posición $X = 5.00$ m. En esta figura se muestran las dimensiones de la zona de calibración en la que se tiene una variación de velocidad de $\pm 1\%$. El contorno de la zona de calibración refleja la presencia de flujo secundario en las esquinas de la sección de pruebas y el crecimiento de la capa límite.

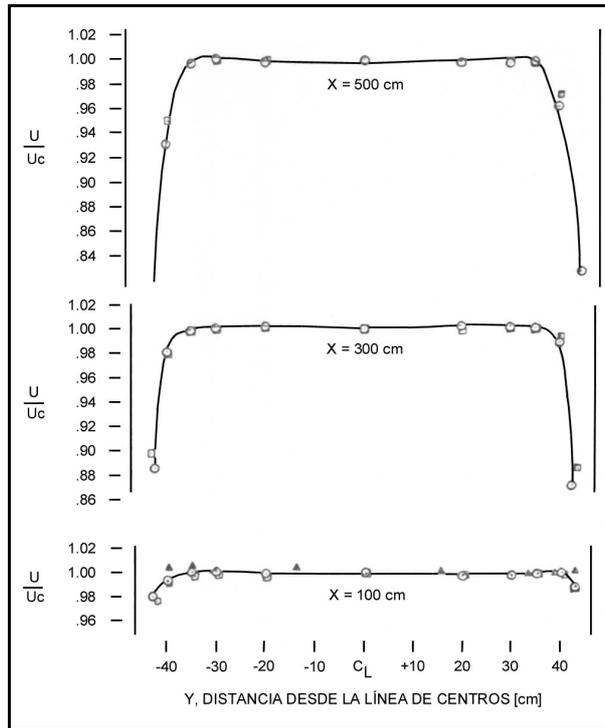


Figura 1.2 Perfiles de velocidad en la dirección horizontal (Y), para U_c de 5.37 m/s y 9.45 m/s [20].

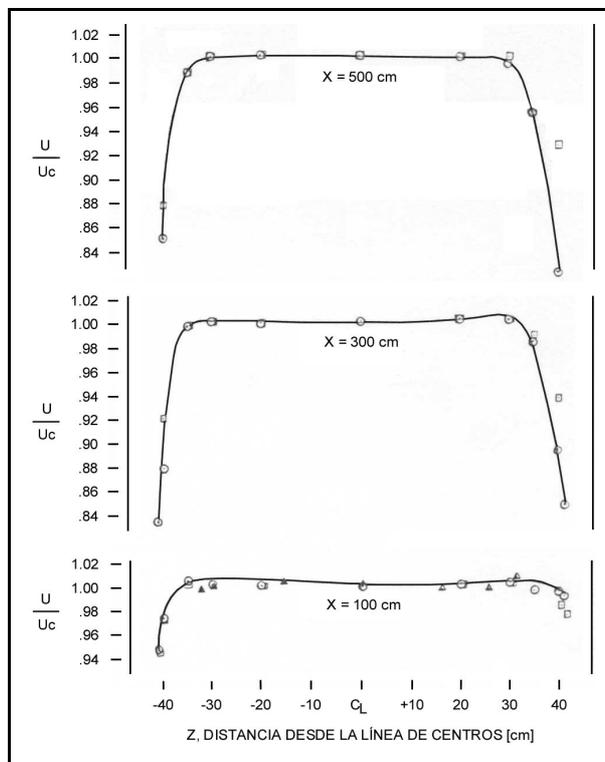


Figura 1.3 Perfiles de velocidades en la dirección vertical (Z), para U_c de 5.37 m/s y 9.45 m/s [20].

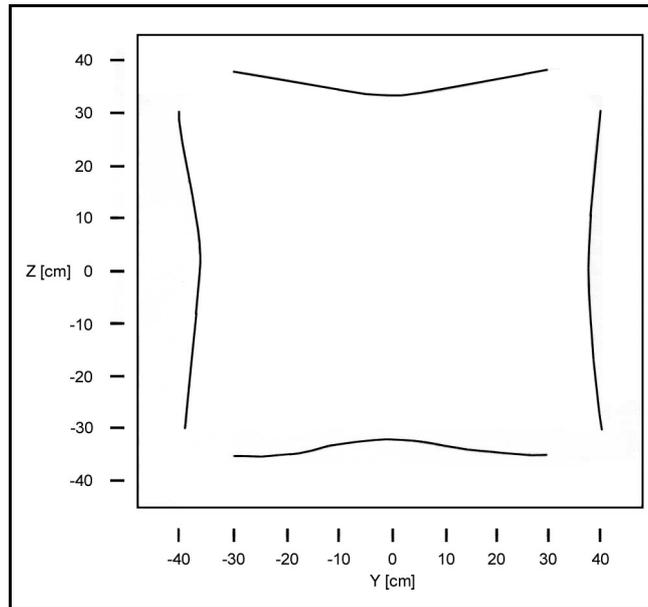


Figura 1.4 Zona de calibración en $X = 500$ cm, y U_C de 5.37 m/s [20].

Finalmente determinaron la turbulencia en el centro de la sección de pruebas con un anemómetro de hilo caliente en la posición $X = 3.00$ m. En la figura 1.5 se presenta la variación de turbulencia para velocidades de 0.05 m/s a 12 m/s en el centro de la posición mencionada, en donde se tiene un valor de turbulencia de 0.12% para la velocidad de 0.05 m/s, el cual disminuye hasta aproximadamente 0.04% para las velocidades de 1.2 m/s a 12 m/s.

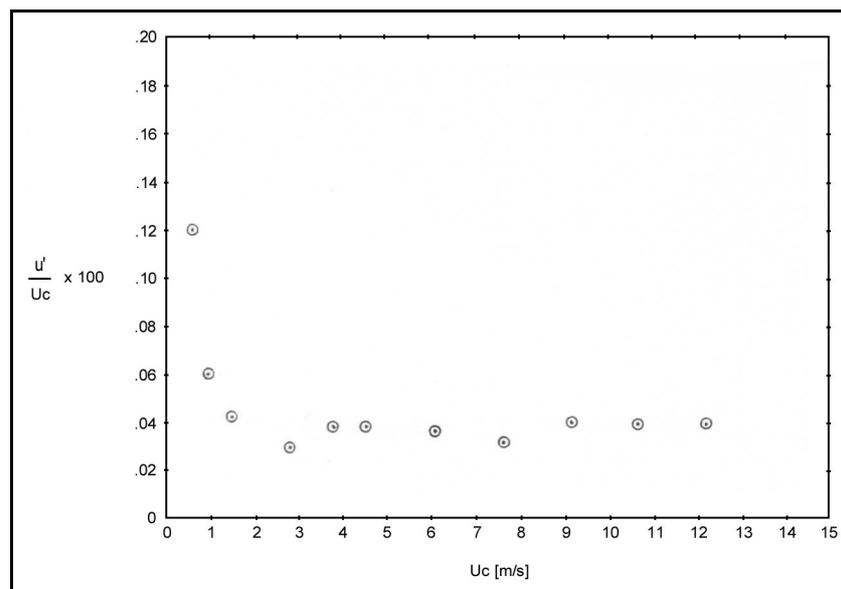


Figura 1.5 Variación de la turbulencia en el centro de la sección de pruebas en $X = 300$ cm [20].

1.2 TÚNEL DE VIENTO DE DOBLE SECCIÓN DE PRUEBAS DEL NIST

Mease N. E. et al (1992) describieron los túneles de viento y el equipo que se emplea para calibrar instrumentos de medición de velocidad de aire en el NIST; además, presentan la ecuación para calcular la velocidad de aire con un tubo de Pitot, en la que se incluyen los efectos de compresibilidad y humedad del aire. En este instituto, se calibran instrumentos de medición para velocidades altas en un intervalo de 3 m/s a 75 m/s en un túnel de viento de circuito cerrado e instrumentos de velocidad baja de 0.2 m/s a 10 m/s en un túnel de circuito abierto.

El Túnel de Viento de Doble Sección de Pruebas (Dual Test Section Wind Tunnel, DTSWT) es de circuito cerrado (figura 1.6). El flujo de aire es generado por un ventilador axial de dos etapas de 2.4 m (8 f) de diámetro con álabes ajustables, accionado por un motor eléctrico de 300 kW (400 HP) a 600 RPM y una variación de 0.1%. El flujo pasa por una transformación circular a rectangular y entra a un difusor de 5°; después pasa por dos codos cuadrados de 90° de 3.7 m (12 ft) con álabes directrices, en la salida de estos se tiene un panel de 0.01 m por 0.076 m (3/8 por 3 plg), seguido de un difusor con 6 mallas que descarga en una cámara estabilizadora de 6.2 m por 7.6 m (20 ft 2 plg por 25 ft) que contiene 9 mallas.

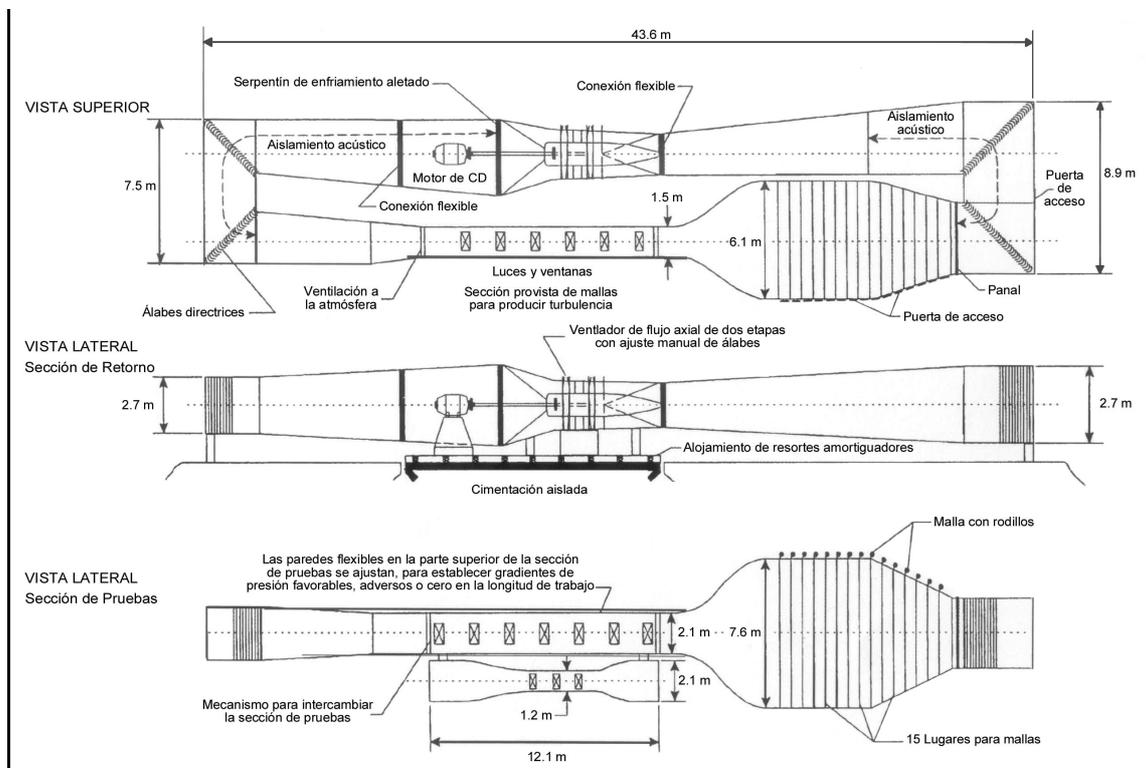


Figura 1.6 Túnel de viento de doble sección de pruebas del NIST [17].

Las mallas tienen 20 aberturas por pulgada, elaboradas con alambre de acero inoxidable de 0.23 mm (0.009 in) y se encuentran separadas por una distancia de 0.61 m (2 ft). Después de la cámara estabilizadora el flujo pasa a través de una contracción con una relación de áreas de 14.4 a 1 y una descarga de 1.5 m por 2.1 m (5 por 7 ft) que se acopla a la sección de pruebas. Con el panel, las mallas y la contracción se tiene una turbulencia de 0.07% en todo el intervalo de velocidad (3 m/s a 75 m/s).

Las secciones de pruebas del DTSWT son intercambiables y tienen las siguientes características, una sección de pruebas de 2.1 m (7 ft) de altura por 1.5 m (5 ft) de ancho y 12 m (37 ft 9 in) de longitud con una velocidad de 45 m/s. Otra sección de pruebas con reducción de altura de 2.1 m a 1.2 m (4 ft) que alcanza una velocidad de 67 m/s con una longitud de trabajo de 3 m (10 ft). En este túnel la velocidad se mide con un tubo de Pitot, el cual determina la diferencia entre la presión total y estática del flujo. La ecuación para calcular la velocidad con este instrumento es:

$$V = \left[\frac{2\gamma ZRT_0}{(\gamma-1)M_h} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{(P_0 - P_s)}{P_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

En donde V es la velocidad calculada con el Pitot, g es la relación de calores específicos, Z es el factor de compresibilidad, R es la constante universal de los gases, T_0 es la temperatura de estancamiento, M_h es la masa molar del aire húmedo, P_0 es la presión de estancamiento y P_s es la presión estática.

El túnel de viento de velocidad baja (figura 1.1) alcanza una velocidad máxima de 11.2 m/s. En esta instalación se emplea un anemómetro láser Doppler y un tubo de Pitot como sistema de medición. La velocidad (V) con el anemómetro, se determina de la medición de frecuencia (f) de la luz reflejada por partículas que pasan a través del patrón de franjas que genera la intersección de dos haces, mediante la siguiente relación:

$$V = \frac{L}{f} \quad (1.2)$$

Donde L es una longitud fija y que se determina de parámetros característicos del anemómetro láser y se expresa como:

$$L = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1.3)$$

En donde λ es la longitud de onda del láser y θ es el ángulo formado por los dos haces.

1.3 TÚNEL DE VIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE TOHOKU

Ito H. et al (1992) obtuvieron experimentalmente el comportamiento del flujo en un túnel de viento del Instituto de Ciencias de los Fluidos (The Institute of Fluid Science) de la Universidad de Tohoku de Japón, mediante perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia en diversas secciones del túnel. En este trabajo sólo se presentan los resultados de la sección de pruebas. Este túnel opera con una sección de pruebas cerrada y otra de chorro abierto, ambas de forma octagonal y una contracción de 12:1. La primera tiene 1 m de ancho y 3.5 m de longitud para velocidades de 5 m/s a 70 m/s, la segunda de 0.81 m de ancho y velocidad máxima de 80 m/s. El flujo de aire se genera con un ventilador axial accionado por un motor eléctrico de 95 kW de corriente directa, la velocidad puede variarse desde 1 RPM hasta 1100 RPM, con un incremento de 0.064 m/s por cada RPM.

Las mediciones de los perfiles de velocidad y turbulencia en la sección de pruebas se realizaron con un anemómetro de hilo caliente marca DISA modelo 55M y un tubo de Pitot de 6 mm de diámetro. La figura 1.7 muestra la variación de la componente longitudinal de turbulencia u'/U_0 en el centro de la sección de pruebas para velocidades de 10 m/s a 70 m/s, las mediciones se efectuaron a 1 m corriente abajo de la salida de la contracción.

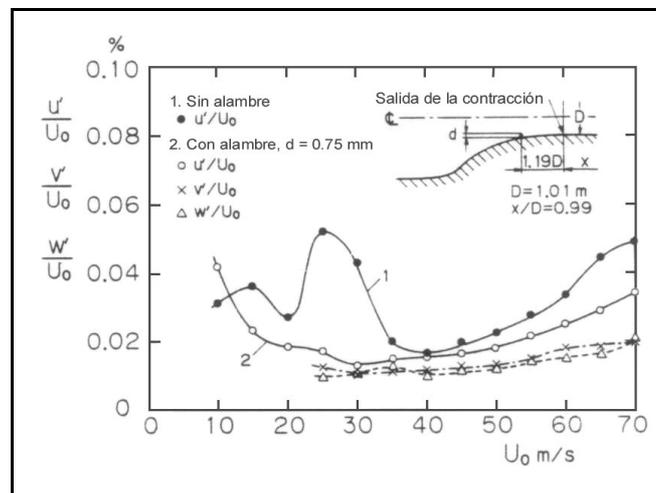


Figura 1.7 Turbulencia en el centro de la sección de pruebas cerrada [13].

La curva 1 muestra la turbulencia sin un alambre en las paredes de la contracción, en donde se tiene un aumento de turbulencia para 25 m/s, este incremento puede deberse a un punto de transición de la capa límite. Para mejorar el comportamiento del flujo se fijó un alambre de 0.75 mm de diámetro en la pared de la contracción. Con esta modificación se obtuvo la curva 2, en donde la turbulencia en el intervalo de 18 m/s a 53 m/s es menor que 0.02%.

En la figura 1.8 se presentan los perfiles de velocidad en la sección de pruebas en diferentes alturas para una velocidad de 60 m/s. En estos perfiles se tiene una variación de velocidad de $\pm 0.1\%$ en la zona central; además el flujo es simétrico respecto a la línea central de la sección de pruebas.

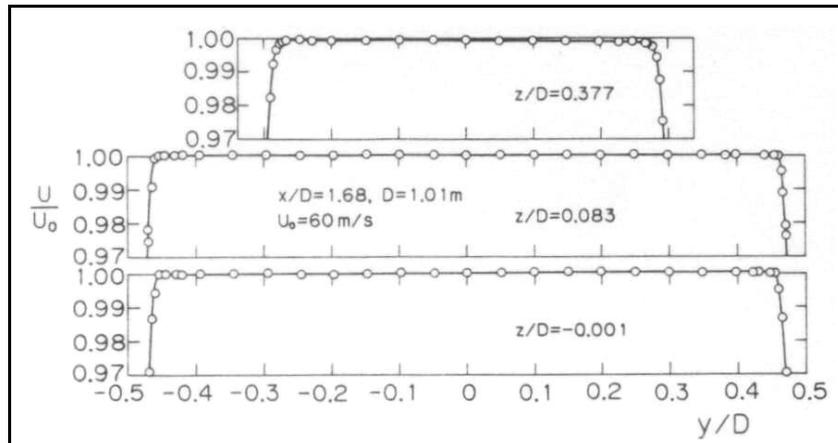


Figura 1.8 Perfiles de velocidad en la sección de pruebas a 60 m/s [13].

La figura 1.9 muestra las tres componentes de turbulencia para 30 m/s y 60 m/s en un plano horizontal en el centro de la sección de pruebas. En esta figura se observa una distribución de turbulencia uniforme en la parte central con un valor de 0.02% y 0.03% para 30 m/s y 60 m/s respectivamente; además, se observa un aumento de la turbulencia al acercarse a las paredes.

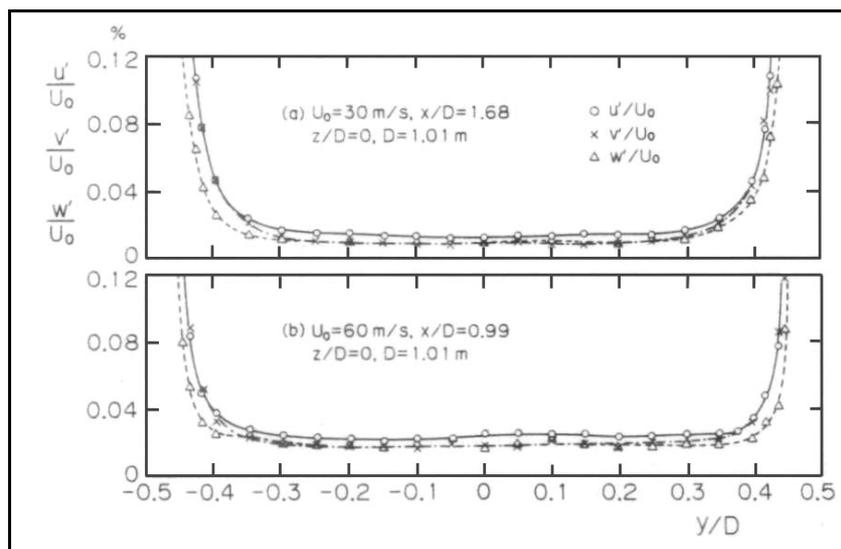


Figura 1.9 Perfiles de turbulencia en la sección de pruebas a 30 m/s y 60 m/s [13].

Por último, en la figura 1.10 se presenta la distribución de las tres componentes de turbulencia y el perfil de velocidad en la capa límite en la sección de pruebas para una velocidad de 30 m/s.

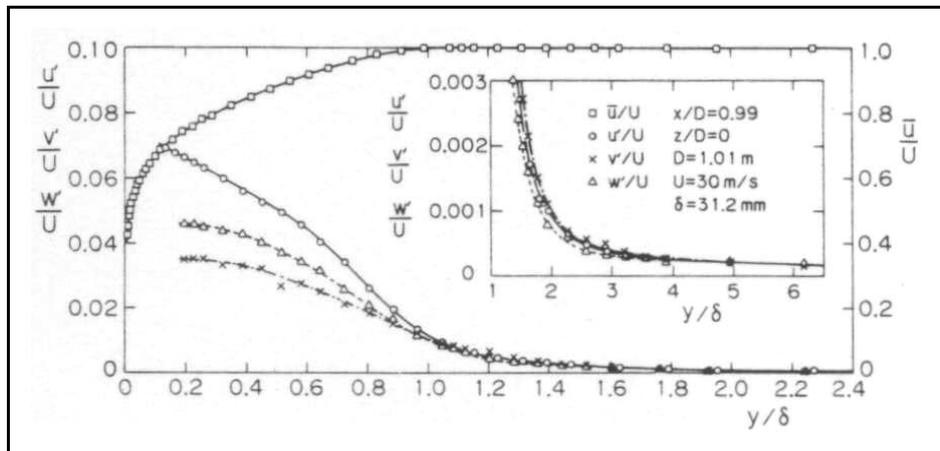


Figura 1.10 Turbulencia en la capa límite en la sección de pruebas [13].

1.4 TÚNEL DE VIENTO DE VELOCIDAD BAJA DEL NRLM

Terao Y. et al (1994) diseñaron y evaluaron tres arreglos de un túnel de viento en el Laboratorio Nacional de Investigación de Metrología de Japón (National Research Laboratory of Metrology, NRLM), para un intervalo de velocidades de 0.045 m/s a 1.4 m/s. La evaluación la realizaron mediante perfiles de velocidad y turbulencia.

El túnel de viento es de circuito abierto con una sección de pruebas de 300 mm de diámetro interno y 200 mm de longitud. Este se compone de un cuerpo principal, un banco de toberas sónicas y un soplador (figura 1.11). En el cuerpo principal se realizaron las modificaciones para evaluar los tres arreglos, el cual se compone de una sección estabilizadora, una sección de pruebas y una sección corriente abajo. El banco de toberas está formado por cinco toberas sónicas con una relación de flujo de 1:2, que permite generar 31 flujos en la sección de pruebas.

En los arreglos evaluados se modificó la sección estabilizadora y la longitud de la contracción. El arreglo A se integró de una entrada acampanada de 60 mm de longitud y una contracción de 300 mm de longitud. En este arreglo el flujo pasa de la contracción a la sección de pruebas como se observa en la figura 1.11. El arreglo B difiere del anterior en la longitud de la contracción, que fue de 550 mm. En el arreglo C se empleó la misma contracción que en el arreglo A con un ducto

de 600 mm de longitud ubicado entre la sección de pruebas y la contracción, en el que se instalaron 5 mallas. La contracción usada en todos los arreglos tiene una relación de áreas de 2.78:1.

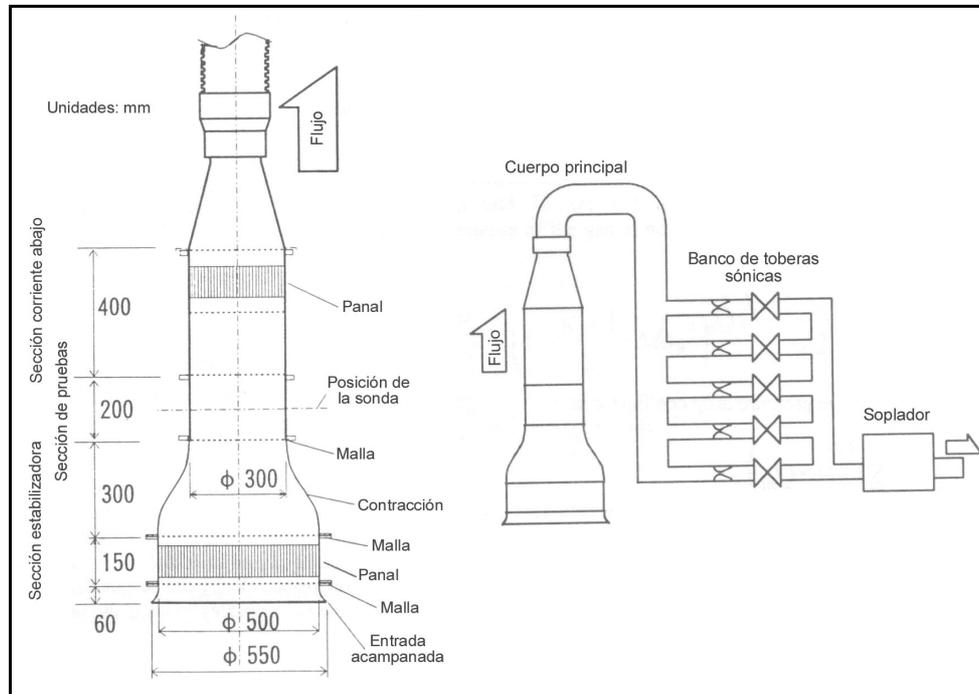


Figura 1.11 Túnel de viento de velocidad baja del NRLM [25].

Los perfiles de velocidad y turbulencia se determinaron a 100 mm de la salida del flujo de la contracción ("posición de la sonda", figura 1.11). Las mediciones se realizaron con un anemómetro láser Doppler de argón ionizado para una componente y un generador de humo para el sembrado de partículas. De los perfiles de velocidad de las tres configuraciones, el arreglo A presentó mayor uniformidad en la zona central ($r/R = \pm 0.33$) con una variación de velocidad de $\pm 2\%$, en la figura 1.12 se muestran los perfiles de velocidad obtenidos con este arreglo. En el arreglo B se obtuvo una variación de $\pm 2.5\%$ y en el arreglo C una variación de $\pm 4\%$.

En los arreglos A y C encontraron una región de velocidad alta cerca de las paredes, en esta zona la velocidad es mayor para las velocidades medias bajas, debido a que en estos arreglos se utilizó una contracción de 300 mm de longitud. En la figura 1.13 se presenta la turbulencia en el arreglo A, en donde se tiene un valor menor a 3.5% para velocidades arriba de 0.09 m/s y la turbulencia mayor (8%) para la velocidad de 0.045 m/s. En los arreglos B y C la turbulencia fue menor a 2%. La turbulencia mayor en los tres arreglos se presentó para la velocidad de 0.045 m/s.

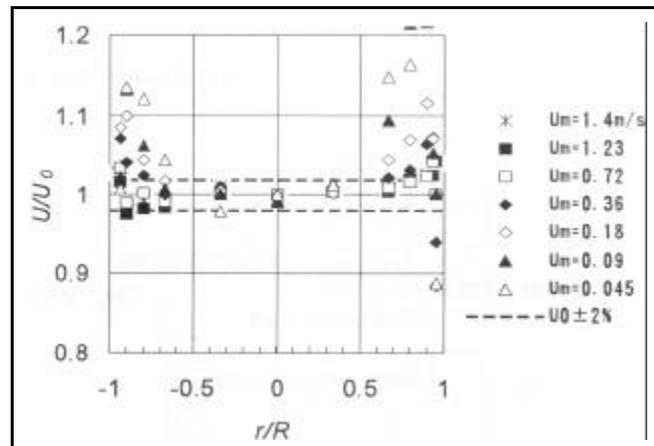


Figura 1.12 Perfiles de velocidad en la sección de pruebas con el arreglo tipo A [26].

La elección del arreglo A se debe a que presentó la mejor uniformidad de los perfiles de velocidad, que es una de las principales características que debe cumplir un túnel de viento, pero no se tiene una turbulencia baja como los arreglos B y C. La causa de la turbulencia alta pudo ser el uso del anemómetro láser Doppler para realizar estas mediciones, ya que para efectuar estas mediciones se emplea el anemómetro de hilo caliente debido a que presenta mayor sensibilidad, una señal continua y una respuesta rápida a las fluctuaciones de velocidad. Actualmente, esta instalación experimental se emplea para calibrar anemómetros en el intervalo de velocidad mencionado.

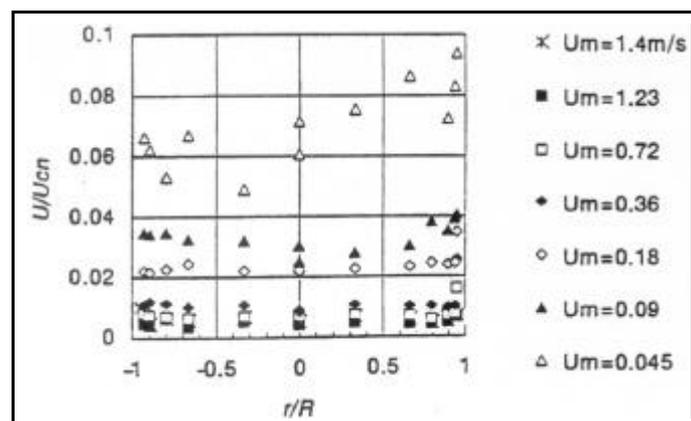


Figura 1.13 Perfiles de turbulencia en la sección de pruebas del arreglo A [26].

Terao Y. et al (1995) aportaron más resultados sobre el túnel de viento antes descrito como es la medición de turbulencia en la sección de pruebas con un anemómetro de hilo caliente de una componente. En este estudio se empleó el

arreglo elegido anteriormente (Terao, 1994) reubicándose el panel que se localizaba después de la sección de pruebas, al final de la sección corriente abajo (figura 1.11).

En la figura 1.14 se muestran los perfiles de turbulencia; en donde se observa que la turbulencia es mayor a 1% para la velocidad de 0.18 m/s en la región central ($r/R = \pm 0.33$), para las velocidades mayores a ésta la turbulencia fue menor a 1%.

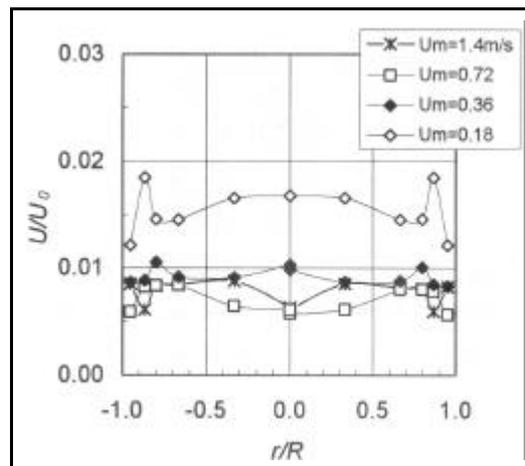


Figura 1.14 Turbulencia en la sección de pruebas [25].

Finalmente en la tabla 1.1 se presenta un resumen de los artículos analizados en este trabajo, relacionados con la caracterización de túneles de viento de circuito abierto o cerrado en función de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia. Estos túneles se encuentran en laboratorios nacionales de metrología e instituciones educativas del extranjero. Con el objeto de realizar una caracterización similar en el túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP de la SEPI-ESIME Zacatenco. También se presentan algunos datos que se tienen de otros laboratorios de metrología no mencionados en este capítulo como es el Instituto Federal de Física y Tecnología (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) de Alemania y el Centro Técnico de Industrias Aeronáuticas (Centre Technique des Industries Aerauliques eu Termiques, CETIAT) de Francia.

En la tabla 1.1 se muestra el tipo de túnel, así como el lugar de ubicación de las instalaciones experimentales. Otra característica que se presenta es la relación de áreas de la contracción (CR) del túnel de viento, además de la caracterización que realizaron en estas instalaciones. En esta tabla también se presenta el valor de turbulencia máximo que se tiene en los túneles de viento en todo el intervalo de velocidad que manejan estas instalaciones. La última columna presenta los instrumentos empleados para caracterizar los túneles de viento y se señalan que instrumento se emplea como patrón de referencia para calibrar instrumentos de medición de velocidad de aire.

Tabla 1.1 Caracterización de túneles de viento e instrumentación empelada por institución.

INSTITUCIÓN	TÚNEL DE VIENTO	CR	CARACTERIZACIÓN	Tu [%]	INSTRUMENTO EMPLEADO
NIST, EU	Túnel de viento de circuito abierto 0.2 m/s a 11.2 m/s	2.14 5.36	Perfiles de velocidad Capa límite Turbulencia	0.1	*Anemómetro láser Doppler Anemómetro de hilo caliente *Tubo de Pitot
	Túnel de viento de circuito cerrado 3 m/s a 45 m/s 3 m/s a 67 m/s	14.4		0.07	*Tubo de Pitot
Universidad de Tohoku, Japón	Túnel de viento de circuito cerrado 5 m/s a 70 m/s	12	Perfiles de velocidad Capa límite Turbulencia	0.04 a 0.01	Tubo de Pitot Anemómetro de hilo caliente
NRLM, Japón	Túnel de viento de circuito abierto 0.05 m/s a 1.4 m/s	2.78	Perfiles de velocidad Turbulencia	<2	*Anemómetro láser Doppler Anemómetro de hilo caliente
	Túnel de viento de circuito abierto 3 m/s a 30 m/s			0.05	*Anemómetro láser Doppler
PTB Alemania	Túnel de viento de circuito abierto 0.1 m/s a 50 m/s				*Anemómetro láser Doppler
CETIAT, Francia	Túnel de viento de circuito cerrado 0.15 m/s a 40 m/s				*Anemómetro láser Doppler

* Instrumento de referencia para efectuar las calibraciones

Después de analizar los artículos relacionados con laboratorios primarios en metrología de velocidad de gases e instituciones educativas, que han caracterizado sus túneles de viento en función de los perfiles de velocidad, capa límite y nivel de turbulencia, en el siguiente capítulo se presentan la teoría de capa límite, los espesores que la caracterizan y el crecimiento de esta en ductos de succión, también se presentan los aspectos teóricos de la turbulencia y la ecuaciones de Reynolds para flujo turbulento.

CAPÍTULO II

TEORÍA DE CAPA LÍMITE Y TURBULENCIA

En este capítulo se presenta la teoría de la capa límite, y los espesores que la caracterizan como es el espesor de la capa límite, espesor de desplazamiento y espesor de momento, así como el crecimiento de la capa límite en ductos de succión; además se presentan las ecuaciones de la capa límite bidimensional. También se muestra el aspecto teórico de la turbulencia, las ecuaciones de Reynolds para flujo turbulento y las ecuaciones de la capa límite turbulenta bidimensional.

2.1 CAPA LÍMITE

Todos los flujos viscosos como el agua o aire pueden dividirse para su estudio en dos zonas, una cercana a cualquier frontera sólida o líquida y la otra alejada de ésta, cubriendo el resto del flujo. En la región adyacente a la frontera sólida son importantes los efectos de la viscosidad, en las ecuaciones básicas del movimiento de los fluidos; a esta región se le denomina capa límite. En la zona exterior de la capa límite, el efecto de la viscosidad puede considerarse despreciable y el fluido puede tratarse como no viscoso, simplificándose así las ecuaciones del movimiento de los fluidos.

Cuando no existen fronteras sólidas, el fenómeno de la capa límite ocurre donde las corrientes de dos fluidos moviéndose con diferentes velocidades, se encuentran en contacto como por ejemplo en los chorros y las estelas. La capa límite puede dividirse en régimen laminar o turbulento, la capa límite es laminar para números de Reynolds de $1\,000 < Re < 10^6$, para números de Reynolds mayores a 10^6 la capa límite es turbulenta. La distancia característica para determinar el número de Reynolds en la capa límite puede ser la longitud en la dirección del flujo en la cual se ha desarrollado la capa límite como lo muestra la ecuación (2.1), otras longitudes características son algún espesor de la misma.

$$Re = \frac{U \cdot X}{\nu} \quad (2.1)$$

En régimen laminar las capas del fluido se deslizan unas sobre otras, por lo que el intercambio de momento entre las capas adyacentes del fluido se debe sólo al movimiento molecular. En régimen turbulento, las capas del fluido se mueven en forma desordenada, mezclándose entre sí; por lo que el intercambio de momento entre las capas del fluido es causado por el movimiento irregular del flujo.

La transición de la capa límite laminar a turbulenta no se da en un número de Reynolds fijo, si no que depende de muchos factores como son el gradiente de presión, la rugosidad de la superficie, la transferencia de calor y las perturbaciones en la corriente libre. Para flujo incompresible sobre una placa plana lisa sin transferencia de calor, el número de Reynolds crítico típico (ecuación 2.2) en el que ocurre la transición es de 5×10^5 , para algunos flujos este valor puede ser de 3×10^5 , para condiciones controladas la transición ocurre hasta $Re = 10^6$.

$$Re_{x_{crit}} = \left(\frac{U_{\infty} \cdot X}{\nu} \right)_{crit} = 3.5 \cdot 10^5 \quad \text{a} \quad 10^6 \quad (2.2)$$

En la figura 2.1 se muestra el crecimiento de la capa límite sobre una placa plana, cuando ésta se somete a un flujo con una velocidad corriente libre U_{∞} . La capa límite es laminar en una distancia corta corriente abajo desde el borde de ataque

de la placa; la transición ocurre sobre una región de la placa y se extiende corriente abajo, hasta que la capa límite es totalmente turbulenta.

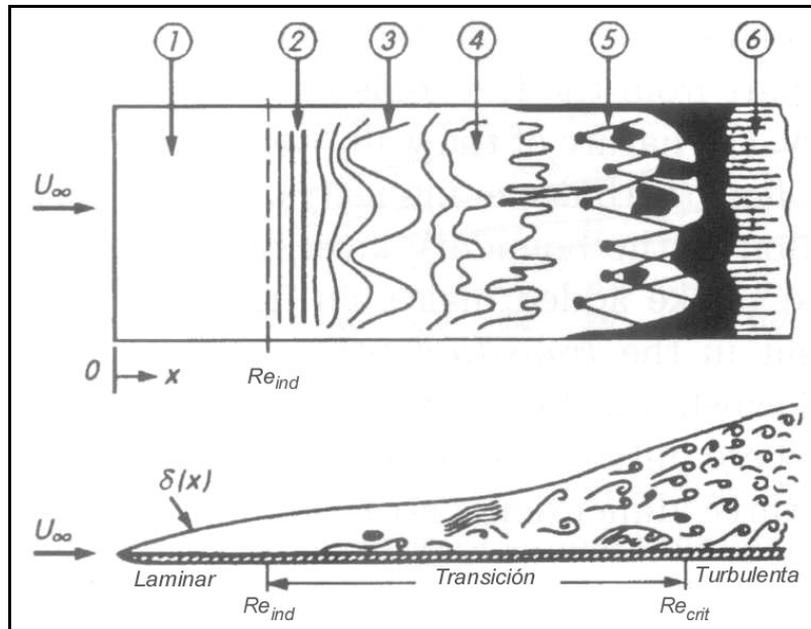


Figura 2.1 Transición de la capa límite en una placa plana [22].

En la figura 2.1 se observa la región donde se tiene una capa límite estable (1) desde el borde de entrada de la placa hasta la distancia en donde se tiene el Re_{crit} , después aparecen ondas inestables de Tollmien-Schlichting (2), posteriormente se tiene la formación de ondas inestables en tres dimensiones y vórtices (3), seguido de la zona donde se rompen los vórtices (4), las última región de la transición es la zona donde se tiene la formación de puntos turbulentos (5), finalmente se tiene la región de la capa límite completamente turbulenta (6).

2.1.1 ESPEORES DE LA CAPA LÍMITE

En la figura 2.1 también se muestra otro parámetro característico de la capa límite, este es el espesor de la capa límite, $\delta(x)$, dentro de éste, los esfuerzos de corte son importantes debido a que en esta zona se tiene una variación de velocidad desde cero en la superficie sólida hasta la velocidad de corriente libre (U_∞), en donde los esfuerzos de corte son cero. El espesor de la capa límite es cero en el borde de entrada de la placa y se incrementa a partir de este punto (figura 2.1); por lo tanto, este parámetro es mayor en la zona de la capa límite turbulenta que en la capa límite laminar. El espesor de la capa límite se considera hasta una distancia perpendicular a una superficie sólida donde la velocidad alcanza un valor del 99% de la velocidad de corriente libre (U_∞) [28].

El espesor de la capa límite (δ), es la distancia en la dirección normal a una superficie en la cual la presión total (p_t) difiere por una cantidad pequeña de la presión total del flujo en la corriente libre. Como el perfil de velocidad se incrementa continua y asintóticamente en la corriente libre, el espesor de la capa límite (δ) es difícil de medir [30].

Las fuerzas viscosas en la capa límite retardan el flujo, por lo que el flujo másico en la capa límite es menor que el flujo másico que pasaría por la misma región en ausencia de ésta. La disminución de flujo másico debido a las fuerzas viscosas es:

$$\int_0^{\infty} \rho(U-u)w dy \quad (2.3)$$

En donde U es la velocidad de corriente libre, u es la velocidad a cualquier distancia perpendicular desde la superficie sólida y w es el ancho de la superficie en la dirección perpendicular al flujo. El espesor de desplazamiento, δ^* , es la distancia que la frontera sólida tendría que desplazarse en un flujo sin fricción para producir el mismo déficit de flujo másico que existe en la capa límite. El desplazamiento de la frontera en una distancia δ^* , resultaría en una deficiencia de flujo másico de $\rho U \delta^* w$, igualando esta expresión con la ecuación (2.3), se tiene:

$$\rho U \delta^* w = \int_0^{\infty} \rho(U-u)w dy \quad (2.4)$$

Para el caso de flujo incompresible ($\rho = cte$), de la expresión anterior se tiene el espesor de desplazamiento de la capa límite.

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (2.5)$$

El retardo del flujo debido a las fuerzas viscosas, origina también una reducción en el flujo de momento. La deficiencia de momento del flujo másico real en la capa límite es:

$$\int_0^{\infty} \rho u(U-u)w dy \quad (2.6)$$

Si no existieran fuerzas viscosas, sería necesario mover la frontera sólida hacia fuera para obtener una deficiencia de momento; esta distancia sería el espesor de momento θ , por lo que la deficiencia de momento es $\rho U^2 \theta w$. El espesor de momento se define como el espesor de una capa de fluido de velocidad U , para la cual el flujo de momento es igual al déficit de flujo de momento a través de la capa límite. Para el caso de un flujo incompresible, el espesor de momento es:

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (2.7)$$

En la figura 2.2 se muestra el espesor de la capa límite δ , el espesor de desplazamiento δ^* y el espesor de momento θ .

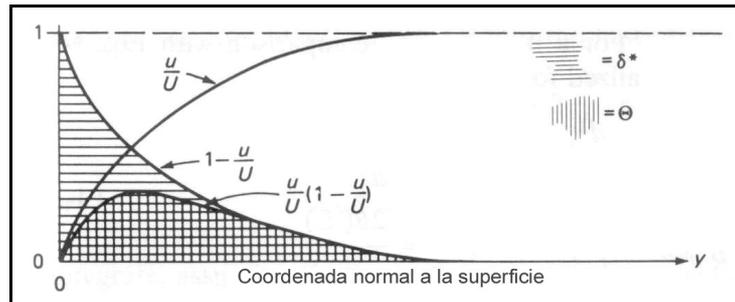


Figura 2.2 Espesores de la capa límite [28].

2.1.2 CRECIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE EN DUCTOS DE SUCCIÓN

En la figura 2.3 se muestra el crecimiento de la capa límite en las paredes de un ducto de entrada de área constante con una tobera al inicio de éste; además, se presentan las cuatro zonas que se tienen a lo largo del ducto. En la región de entrada (Zona I), la distancia x desde la tobera es menor que una dimensión transversal típica L_2 . En esta zona la capa límite es pequeña en ambas paredes del ducto y afectan el flujo en la zona no viscosa.

En casos prácticos, donde se tiene un número de Reynolds del orden 10^4 a 10^6 , basado en la dimensión L_2 y la velocidad promedio U_m , el flujo en la Zona II (x del orden de L_2 a $10 L_2$) aún presenta una región de flujo no viscoso, pero el espesor de la capa límite se ha incrementado, por lo que el espesor de desplazamiento δ^* , es de aproximadamente $L_2/10$. Esta región se conoce como zona de interacción de desplazamiento, debido a que el efecto de bloqueo por el crecimiento de la capa límite en las paredes afecta la velocidad del flujo en la zona no viscosa, incrementándose la velocidad en el centro del ducto (figura 2.3 b). Los efectos de la zona de interacción de desplazamiento causan variaciones de presión estática desde la entrada hasta donde termina la Zona II, las cuales pueden ser desde 0.1 a 1 veces la presión dinámica promedio ($1/2\rho U_m$) comparada con el flujo ideal.

La región más compleja en el ducto de entrada se tiene al inicio de la Zona III, en donde el espesor de la capa límite en la pared superior e inferior alcanza un valor de $1/2L_2$, uniéndose en esta sección. Al inicio de esta zona no se tiene una región de flujo ideal o una línea de corriente a través de la cual la presión total (p_t) permanece constante. A esta región se le conoce como zona de interacción de la capa límite.

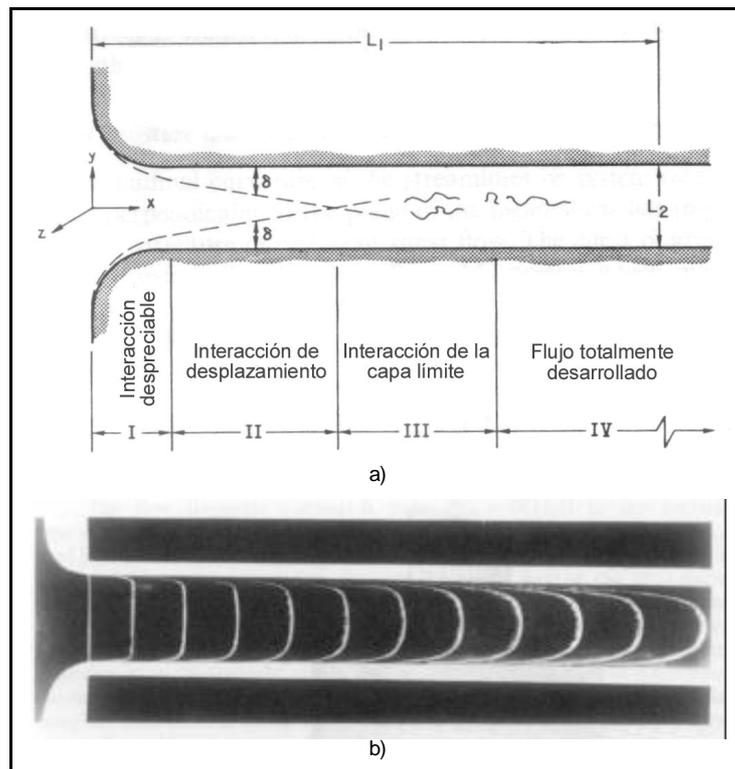


Figura 2.3 Comportamiento de la capa límite en ductos de entrada, a) zonas de crecimiento de la capa límite [6] y b) visualización del flujo [28].

La Zona IV es la región de flujo completamente desarrollado, el cual es independiente de las condiciones corriente arriba (entrada del flujo) y corriente abajo y sus características son idénticas en cada posición axial. Para números de Reynolds del orden mencionado anteriormente, la condición de flujo desarrollado se tiene a una distancia $x/L \geq 40$.

En la caracterización del túnel de viento en función de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia que comprende la etapa experimental de este trabajo, se realizarán las mediciones en la sección de pruebas del túnel de viento del LABINTHAP que correspondería con la Zona II (Interacción del desplazamiento). En esta zona se tiene la región donde el fluido se considera no viscoso como se muestra en la figura 2.3 b.

2.1.3 ECUACIONES DE LA CAPA LÍMITE

Las ecuaciones de la capa límite bidimensional para un fluido incompresible sobre una placa plana fueron establecidas por Prandtl en 1904. Estas ecuaciones se aplican cuando $Re_x > 1\,000$; además estas ecuaciones no son exactas cuando el flujo en la corriente libre se desacelera ($dU/dx < 0$, $dp/dx > 0$), en donde el

esfuerzo de corte en la pared es cero y se presenta el desprendimiento de la capa límite. Para números de Reynolds grandes ($Re_x = 10^6$), la solución de las ecuaciones es inestable, porque se presenta la transición de la capa límite laminar a turbulenta. Las ecuaciones de la capa límite laminar bidimensional (ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes) para un flujo incompresible y con fuerzas de cuerpo despreciables son:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.10)$$

2.2 TURBULENCIA

La mayoría de los flujos en la naturaleza y en aplicaciones de ingeniería son turbulentos. Un flujo turbulento se caracteriza por las fluctuaciones de las tres componentes de la velocidad, así como en la presión y temperatura; estas fluctuaciones se superponen al promedio de cada propiedad. Por lo tanto para el análisis de un flujo turbulento se separan las fluctuaciones de la propiedad de su valor promedio en el tiempo. Por lo que el promedio temporal de la componente u , se expresa como:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u \, dt \quad (2.11)$$

En donde el intervalo de integración T es más grande que cualquier periodo de fluctuación de la velocidad u . Por lo tanto se puede definir la fluctuación u' , como la diferencia entre un valor de velocidad dentro del intervalo de integración y la velocidad promedio temporal y se expresa con la siguiente ecuación:

$$u' = u - \bar{u} \quad u' = f(x, y, z, t) \quad (2.12)$$

Por definición se tiene que el promedio de la fluctuación es cero ($\bar{u}' = 0$). Por lo que para cuantificar la magnitud de las fluctuaciones se emplea el valor medio cuadrático (*rms*, por sus siglas en inglés):

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'^2 dt \quad (2.13)$$

La raíz cuadrática media de u' , se define como:

$$u'_{rms} = \sqrt{\overline{u'^2}}$$

Si las integrales de las ecuaciones 2.11 y 2.13 son independientes del tiempo de inicio t_0 , se tienen fluctuaciones estadísticamente estacionarias. Por lo tanto, la turbulencia en la componente a lo largo de la dirección del flujo se define como:

$$Tu = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} = \frac{u'_{rms}}{\bar{u}} \quad (2.14)$$

2.2.1 ECUACIONES DE REYNOLDS PARA FLUJO TURBULENTO

El promedio temporal se puede aplicar a las ecuaciones del movimiento de los fluidos, obteniéndose las ecuaciones de Reynolds, las cuales contienen tanto las cantidades promedio como las fluctuaciones. Estas ecuaciones se aplican para flujo turbulento incompresible con propiedades de transporte constantes y fluctuaciones de velocidad (en u , v y w), presión y temperatura (ecuación 2.15):

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' & p &= \bar{p} + p' \\ v &= \bar{v} + v' & T &= \bar{T} + T' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \quad (2.15)$$

Sustituyendo las tres componentes instantáneas de la velocidad en la ecuación de continuidad en forma diferencial (ecuación A.3) para un flujo incompresible, se obtiene esta ecuación con promedios de velocidad temporales:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

También se tiene la ecuación de continuidad para la parte fluctuante de la velocidad:

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

La componente promedio temporal y la fluctuante satisfacen la ecuación de continuidad para un flujo turbulento incompresible.

Al sustituir los valores instantáneos en las ecuaciones de Navier-Stokes, se obtienen estas ecuaciones en su forma promediada temporalmente:

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = \rho \bar{g} - \nabla \bar{p} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2.18)$$

En donde el término τ_{ij} se compone de una parte laminar y otra turbulenta, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij} = \underbrace{\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}_{\text{Laminar}} - \underbrace{\rho \overline{u'_i u'_j}}_{\text{Turbulento}} \quad (2.19)$$

El término $\overline{u'_i u'_j}$, llamado tensor turbulento de inercia no puede despreciarse en los flujos turbulentos [28].

2.2.2 ECUACIONES DE LA CAPA LÍMITE TURBULENTA BIDIMENSIONAL

La capa límite turbulenta bidimensional al igual que la capa límite laminar, posee las ecuaciones que se obtienen considerando $d(x) \ll x$, por lo que:

$$\bar{v} \ll \bar{u} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial y}$$

Además se consideran despreciables la componente w y las variaciones en z .

$$\bar{w} = 0 \quad \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

Por lo tanto las ecuaciones para la capa límite turbulenta bidimensional en un flujo incompresible se reducen a las ecuaciones 2.21 y 2.22.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (2.21)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (2.22)$$

En donde el esfuerzo de corte en la capa límite turbulenta (t) es:

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \bar{u}'v' \quad (2.23)$$

La componente en y de las ecuaciones de Navier-Stokes se reduce a la forma:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho \frac{\partial \bar{v}'^2}{\partial y} \quad (2.24)$$

De la integración de la componente de las ecuaciones de Navier-Stokes, perpendicular a la superficie (dirección y), a través de la capa límite se obtiene la ecuación de la presión:

$$p = p_{\infty}(x) - \rho \bar{v}'^2 \quad (2.25)$$

De la ecuación anterior se tiene una ligera variación de la presión a través de la capa límite, debido a las fluctuaciones de la velocidad normal a la superficie sólida.

En este capítulo se presentó, el fenómeno de la capa límite laminar y turbulenta, los espesores que la caracterizan, el crecimiento de ésta en ductos de entrada así como los aspectos teóricos de flujos turbulentos. En el siguiente capítulo se presenta la descripción de la instalación experimental y las modificaciones propuestas en la sección de pruebas del túnel de viento del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP).

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP, así como la instrumentación empleada en la etapa experimental de este trabajo como es el sistema de anemometría de hilo caliente, el tubo de Pitot, termómetro, barómetro e higrómetro. Se presentan las modificaciones propuestas en la sección de pruebas de succión del túnel de viento para mejorar el comportamiento del flujo como son la contracción de relación de áreas de 9:1, un panel y 5 mallas estabilizadoras.

3.1 TÚNEL DE VIENTO DE VELOCIDAD BAJA

El túnel de viento de velocidad baja del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) se muestra en la figura 3.1. Este túnel tiene dos secciones de pruebas rectangulares, una en la succión y otra en la descarga del ventilador, en las cuales las velocidades que se alcanzan son de 65 m/s y 36 m/s, respectivamente.



Figura 3.1 Túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP.

El flujo de aire en el túnel de viento se genera por medio de un ventilador centrífugo de presión media, marca VENTURI, modelo CIMO-9X-125 con un rodete de 9 álabes rectos inclinados hacia atrás con descarga a 0° , carcasa bipartida y transmisión de bandas en V con una relación de velocidades de 3:1, accionado por un motor trifásico jaula de ardilla, marca SIEMENS de 74.6 kW (100 HP) a 1775 RPM.

El motor eléctrico es controlado mediante un variador de velocidad marca EMERSON, modelo LASER 3 de 55.95 kW (75 HP) de potencia de salida a par variable, 74.6 kW (100 HP) de salida con par constante y frecuencia de salida de 60 Hz, la cual se puede variar con incrementos de 1 Hz. El variador permite generar diferentes velocidades en las secciones de pruebas del túnel de viento.

3.1.1 SECCIÓN DE PRUEBAS DE SUCCIÓN

La sección de pruebas de succión del túnel de viento del LABINTHAP se empleará como instalación experimental para establecer el patrón nacional de velocidad de gases en un intervalo de 5 m/s a 30 m/s. Este patrón permitirá calibrar diferentes instrumentos de medición de velocidad como son tubos Pitot tipo L, anemómetros de tipo propela, anemómetros térmicos de uso industrial, entre otros.

La sección de pruebas de succión se compone de una entrada acampanada, un ducto y un difusor. Esta tiene una sección transversal rectangular de 0.60 m por 0.80 m, de longitud variable (hasta 4.00 m). La velocidad máxima que se alcanza en la sección de pruebas de succión del túnel es de 65 m/s. En la figura 3.2 se muestra un diagrama de la sección de pruebas de succión del túnel de viento. Con esta configuración del túnel de viento (figura 3.2), se tiene una entrada acampanada de sección rectangular construida placa metálica de 1.585 mm de espesor, con un área de entrada de 1.20 m² y un área de salida de 0.48 m², con una longitud de 1.00 m.

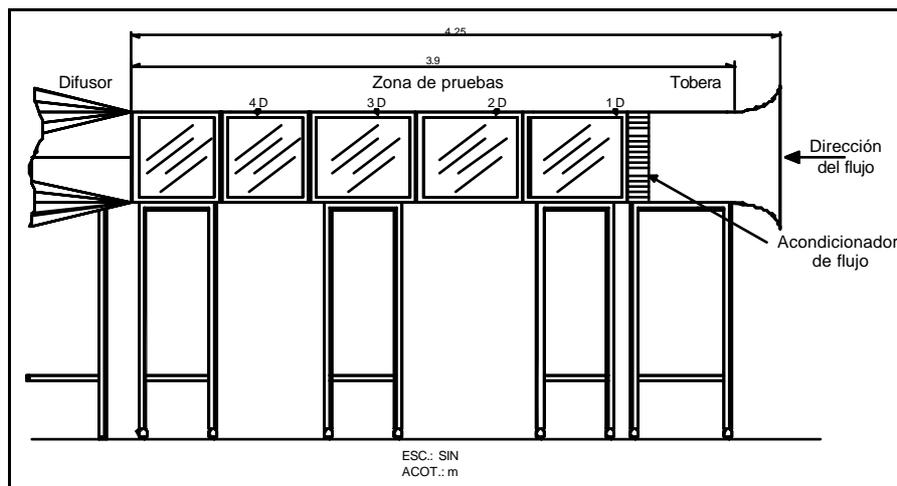


Figura 3.2 Sección de pruebas de succión del túnel de viento del LABINTHAP.

El ducto de la sección de pruebas se integra de cinco módulos construidos de acrílico de 10 mm de espesor, dos módulos de 0.58 m, dos módulos de 0.70 m y un módulo de 0.68 m de longitud. El difusor tiene un área de entrada rectangular de 0.48 m² y un área de salida de 1.31 m² de sección circular, construido de placa metálica de 1.585 mm de espesor. La conexión entre el ventilador y el difusor es una junta flexible para disminuir las vibraciones en la sección de pruebas. Todos los accesorios mencionados anteriormente están montados sobre mesas móviles con niveladores, para modificar la configuración de la sección de pruebas de acuerdo a los experimentos que se realicen en ésta.

Las modificaciones propuestas en este trabajo para mejorar el comportamiento del flujo se realizaron únicamente en la sección de pruebas de succión, debido a que esta zona del túnel de viento se empleará como instalación experimental para establecer el patrón nacional de velocidad de aire en un intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s.

3.1.2 SECCIÓN DE PRUEBAS DE PRESIÓN

La sección de pruebas de presión en la descarga del túnel de viento (figura 3.3), está construida de acrílico de 10 mm de espesor y lámina de 3 mm de espesor. Está sección se integra por un ducto vertical (silenciador) de 1.00 m por 1.25 m y una longitud de 1.00 m y un ducto horizontal de sección rectangular de 1.00 m por 1.25 m con una longitud de 5.20, ambos ductos están acoplados por medio de un codo de 90° que posee dos deflectores de flujo. En la unión del codo y el ducto horizontal, se tiene una junta flexible, para disminuir las vibraciones en esta sección de pruebas. La velocidad máxima en esta zona es de 36 m/s.

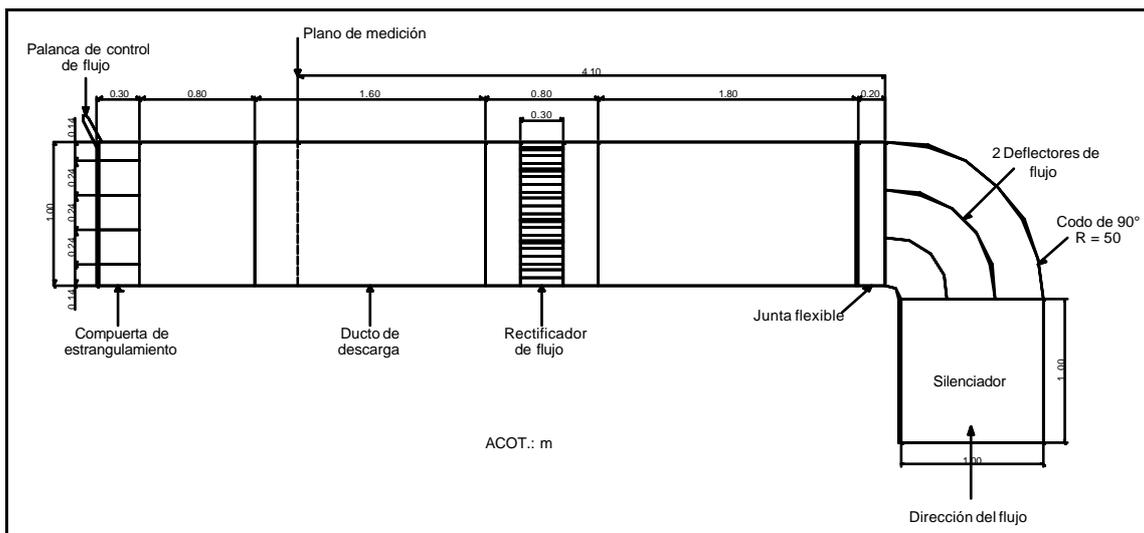


Figura 3.3 Sección de pruebas de presión del túnel de viento de velocidad baja.

Al final de la sección de pruebas de presión del túnel de viento del LABINTHAP, se tiene una compuerta metálica de 4 álabes horizontales opuestos con un mecanismo que permite variar el ángulo de estos de forma manual, variando el área de descarga y en consecuencia el flujo volumétrico manejado por el ventilador manteniendo las RPM del ventilador constantes. Esta sección de pruebas tiene un acondicionador de flujo de forma circular (figura 3.3) colocado a 2.20 m de la descarga del codo, para mejorar el comportamiento del flujo de aire en esta zona.

3.2 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación empleada para determinar los perfiles de velocidad, medir la capa límite y turbulencia en la etapa experimental de este trabajo fue un tubo estático de Pitot, un manómetro inclinado, un anemómetro de hilo caliente con las sondas 55P11 para los perfiles de velocidad y turbulencia y la sonda 55P15 para medir la capa límite. También fue necesario medir la presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa durante la realización de los experimentos, para calcular la densidad del flujo de aire manejado por el túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP. Estas mediciones se realizaron con un termómetro, un barómetro y un termohigrómetro respectivamente.

3.2.1 ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE

La medición de los perfiles de velocidad y turbulencia se realizaron con un anemómetro de hilo caliente, debido a que este instrumento de medición proporciona una respuesta instantánea a las fluctuaciones de velocidad que se presentan en los flujos turbulentos [Bruun H. H., 1995]. El anemómetro empleado en este trabajo opera a temperatura constante y se aplica principalmente, para medir fluctuaciones de velocidad en flujos subsónicos incompresibles; en donde los cambios de densidad se pueden despreciar y la variación de la temperatura es pequeña [Bradshaw P., 1971].

El sistema de medición es un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante marca DANTEC, modelo 90C10, el cual se compone de sondas para medir 1, 2 y 3 componentes de velocidad; un gabinete que contiene el circuito del anemómetro de temperatura constante y un acondicionador de señales; una caja de conexiones, una tarjeta de adquisición de datos A/D y una computadora con el software StreamWare, versión 3.0, para controlar todo el sistema de medición. En la figura 3.4 [Jorgensen F. E., 2002] se muestra un diagrama de los componentes principales del sistema de anemometría de hilo caliente de temperatura constante. El anemómetro de hilo caliente también cuenta con una unidad de flujo para calibrar las sondas y un sistema posicionador. Estos componentes se controlan desde la computadora que posee el software mencionado.

El gabinete del anemómetro tiene tres módulos de medición que permiten medir simultáneamente las tres componentes de velocidad y un módulo de calibración. Además posee una entrada para una sonda de temperatura para realizar mediciones de este parámetro dentro del flujo, lo que permite corregir los datos del anemómetro cuando ocurren cambios de temperatura en el fluido. Cada módulo de medición cuenta con un puente de Wheatstone que mantiene constante la resistencia del hilo y por consiguiente la temperatura del mismo, independientemente del enfriamiento producido por el flujo de aire [Dantec, 2000].

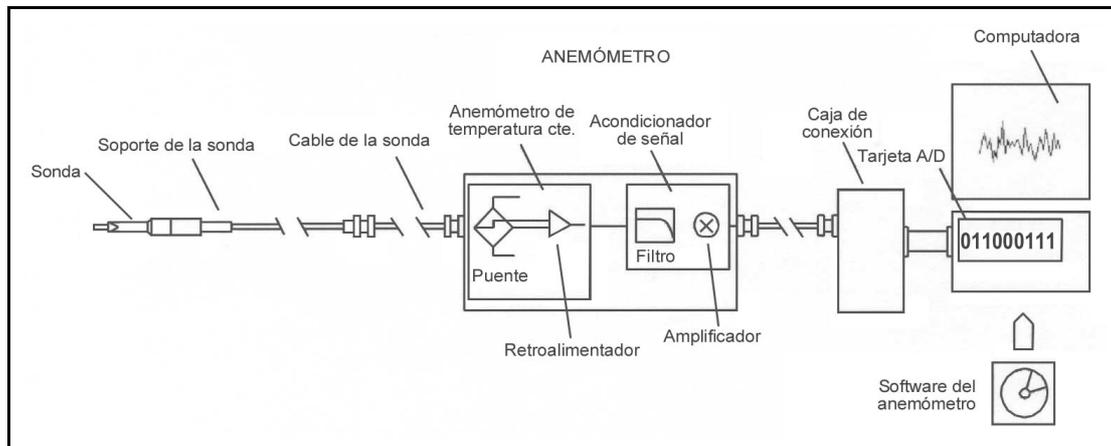


Figura 3.4 Diagrama del sistema de anemometría de hilo caliente [14].

3.2.1.1 Sistema de Calibración

El sistema de calibración se integra por una unidad de flujo (figura 3.5) y un módulo de calibración ubicado en el gabinete del sistema de anemometría de hilo caliente. La unidad de calibración está diseñada para calibrar las sondas en un intervalo de velocidad desde 0.02 m/s hasta 1 Mach, empleando aire u otro gas con propiedades físicas conocidas. La unidad de flujo se conecta al módulo de calibración que se encuentra en el gabinete del anemómetro, esta opera con aire suministrado por un compresor a una presión de 0.7 MPa a 0.9 MPa, el flujo de aire pasa a través de un filtro antes de entrar en la unidad de flujo.

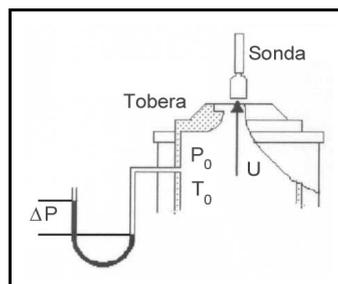


Figura 3.5 Diagrama de la unidad de flujo para calibración de sondas [14].

La unidad de flujo posee una válvula de control y una serie de toberas de Laval que suministran un flujo másico de aire estable; además posee una malla antes de que el flujo entre a la sección estabilizadora. El aire sale a través de una tobera colocada al final de la sección estabilizadora, formando un chorro libre uniforme con una turbulencia $\leq 0.3\%$ en todo el intervalo de velocidades.

La unidad de calibración cuenta con cuatro toberas intercambiables para reproducir las velocidades en el intervalo mencionado, las dimensiones de estas toberas se muestran en la tabla 3.1. Con la unidad de flujo y estas toberas se tiene una exactitud menor a $\pm 1\%$, en todo el intervalo de velocidad.

Tabla 3.1. Características de las toberas de la unidad de calibración [12].

TOBERA	DIÁMETRO [mm]	AREA [mm ²]	VELOCIDAD [m/s]
0	42	1400	0.02 a 0.5
I	12	120	0.5 a 60
II	8.7	60	5 a 120
III	5	20	5 a 1 Mach

Para calibrar las sondas para una componente se colocan en un mecanismo de sujeción colocado en la parte superior de la unidad de flujo. También se tiene un manipulador para realizar la calibración de sondas de dos y tres componentes. La velocidad en la salida de la tobera se calcula mediante las relaciones isentrópicas (ecuaciones 3.1 a 3.4) en base a la caída de presión a través de la tobera, presión de estancamiento, temperatura de estancamiento y la relación de calores específicos del gas.

$$\frac{P_o}{P} = \left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.1)$$

$$c_o = \sqrt{\gamma P T_o} \quad (3.2)$$

$$c = \frac{c_o}{\sqrt{\left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2 \right]}} \quad (3.3)$$

$$U = Mc \quad (3.4)$$

Para obtener las variables necesarias para calcular la velocidad, la unidad de calibración tiene los siguientes sensores: un transductor de presión diferencial con de 0 Pa a 5 000 Pa, un transductor de presión absoluta de 70 kPa a 200 kPa, un transductor de temperatura con un intervalo de 0 °C a 50 °C. Además la unidad está equipada a con un transductor de velocidad baja compuesto por una tobera de referencia y un transductor de presión diferencial para establecer las velocidades menores a 5 m/s [Dantec, 2000]. Todos estos instrumentos son calibrados por el fabricante (DANTEC) y son trazables a los patrones nacionales de Dinamarca.

3.2.1.2 Sondas

Las sondas utilizadas en la realización de las mediciones tienen las características siguientes: respuesta rápida, resolución espacial alta, intervalo de velocidades grande, proporcionan una señal continua y producen una mínima perturbación en el flujo. Las sondas de hilo caliente pueden ser sondas tipo miniatura y sondas con recubrimiento de oro. Las partes principales de los dos tipos de sondas son: sensor, soportes del sensor, cuerpo de la sonda y las puntas de conexión con recubrimiento de oro. En la figura 3.6 se muestran las partes principales de las sondas tipo miniatura y con recubrimiento de oro. Estas sondas pueden tener hasta tres sensores para medir las componentes de velocidad y turbulencia, cada sensor se conecta a uno de los módulos de medición del gabinete.

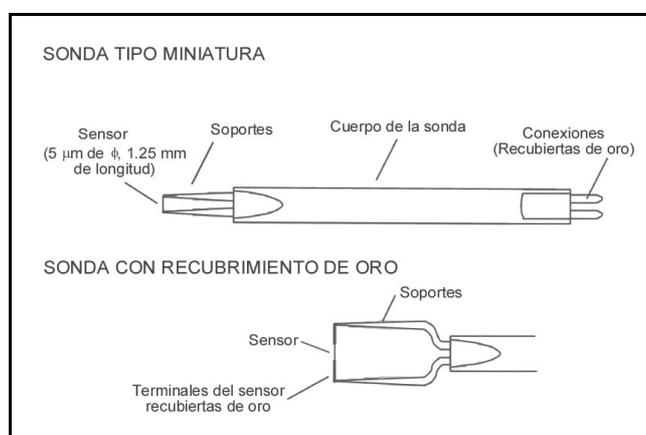


Figura 3.6 Partes de las sondas miniatura y con recubrimiento de oro [14].

Las sondas empleadas en el desarrollo de la etapa experimental de este trabajo fueron del tipo miniatura marca DANTEC y sus dimensiones se muestran en la figura 3.7. Las sondas tipo miniatura se emplean en flujos de aire o gases, el sensor de la sonda es de tungsteno con recubrimiento de platino con un diámetro de 5 µm y longitud de 1.25 mm. La resistencia típica de esta sonda es de 3.5 Ω a 20 °C con un coeficiente de temperatura (α_{20}) a 20 °C de 0.36%/°C. Estas sondas se emplean hasta una temperatura ambiente de 150 °C y la temperatura máxima del sensor es de 300 °C. El intervalo de velocidades en el que se emplea es desde 0.05 m/s hasta 500 m/s y su frecuencia máxima es de 400 kHz.

La sonda 55P11 (figura 3.7 a) es de propósito general y se utilizó para determinar los perfiles de velocidad y de turbulencia en la sección de pruebas de succión del túnel de viento, también se empleó para medir la turbulencia en la zona de calibración. Esta sonda se coloca con el cuerpo de la misma paralelo a la dirección del flujo. Su sensor es un alambre de tungsteno con recubrimiento de platino de 5 µm de diámetro y 1.25 mm de longitud, el cual está perpendicular al flujo.

La sonda 55P15 (figura 3.7 b) tiene el sensor perpendicular al eje de la misma y está diseñada para realizar mediciones en la capa límite, debido a la forma de los soportes del alambre. Esta sonda también se monta con su eje paralelo a la dirección del flujo y su sensor posee las mismas características que la sonda de propósito general.

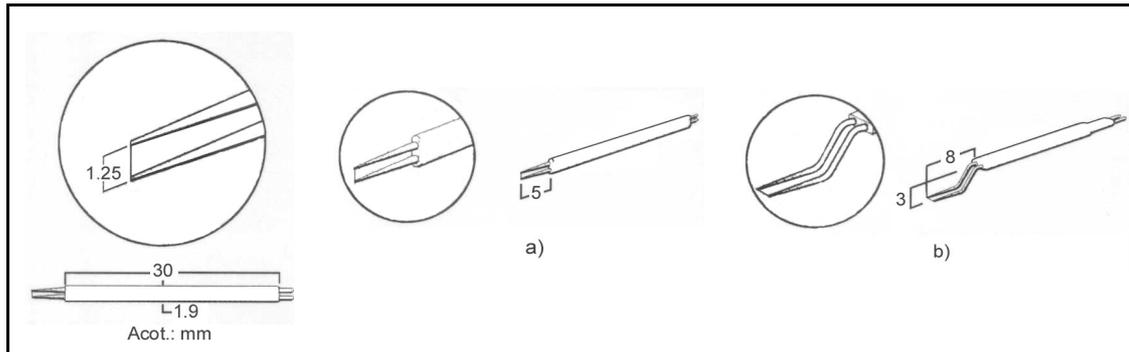


Figura 3.7 Dimensiones de las sondas tipo miniatura, a) sonda 55P11 y b) sonda 55P15.

En la figura 3.8 se muestran todos los componentes del sistema de anemometría de hilo caliente.

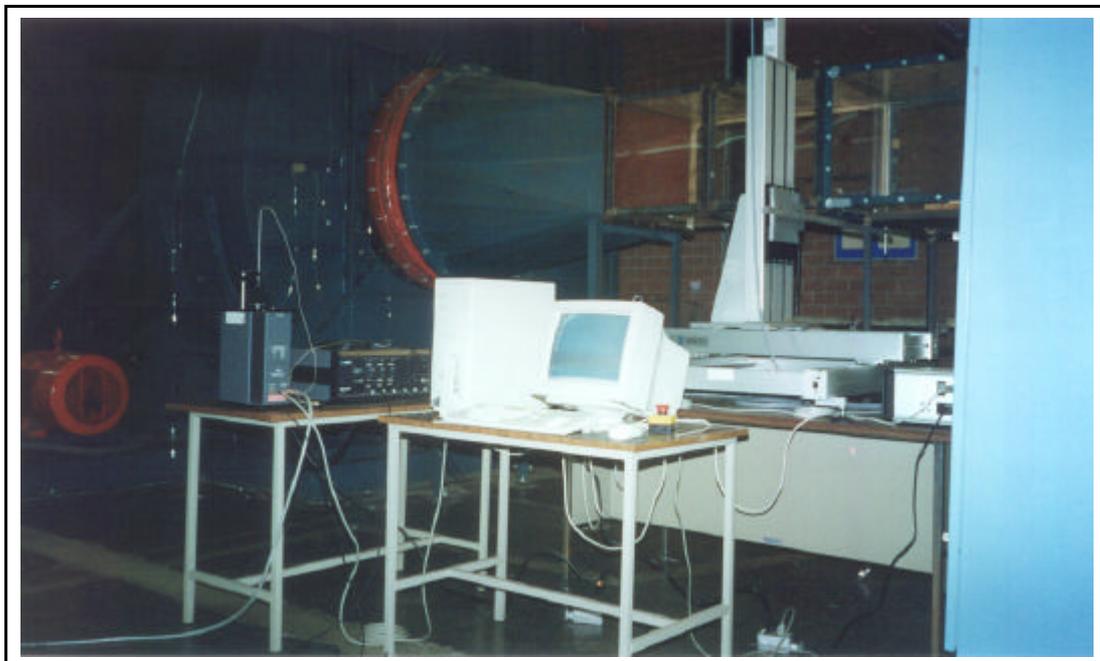


Figura 3.8 Sistema de anemometría de hilo caliente.

3.2.1.3 Sistema Posicionador

Para desplazar las sondas dentro de la sección de pruebas del túnel de viento y efectuar las mediciones se utilizó un sistema posicionador con movimiento en los tres ejes (figura 3.8). El desplazamiento en cada eje se realiza mediante un motor de paso, acoplado directamente a un tornillo de precisión de avance. Para asegurar la posición del sistema posicionador se tiene un freno en el eje vertical (Z). Este sistema es de la marca DANTEC, modelo 41T50, con las siguientes características: desplazamiento en los ejes X y Y de 590 mm, en el eje Z de 690 mm; resolución en X y Y de 12.5 μm y en Z de 6.25 μm ; velocidad de desplazamiento en X y Y es de 40 mm/s y en el eje Z de 25 mm/s. El posicionador tiene una capacidad de carga máxima de 30 kg, éste se controla con la computadora que contiene el software StreamWare 3.0.

3.2.2 TUBO DE PITOT Y MANÓMETRO

Además de la instrumentación antes mencionada, para desarrollar la etapa experimental de este trabajo, también se consideró la medición de la velocidad con sondas mecánicas, específicamente con un tubo de Pitot tipo L y un manómetro inclinado para medir la diferencia de presión total y estática (presión dinámica) proporcionada por este instrumento. Con el manómetro se midió la presión dinámica y la presión estática, la primera se emplea para calcular la velocidad y la otra para calcular la densidad del aire manejado por el túnel de viento. A continuación se describen las principales características de estos instrumentos.

El tubo estático de Pitot tipo L es un tubo con una perforación concéntrica para medir la presión total y siete perforaciones normales al tubo, para registrar la presión estática, obteniéndose por diferencia de presiones, la presión dinámica. El tubo de Pitot es de la marca AIRFLOW, tipo L de nariz elipsoidal construido de acuerdo a la norma BS1042 de 8 mm (5/16 plg) de diámetro y 0.80 m (31 plg) de longitud. El factor de calibración (K) de este instrumento fue de 0.997 proporcionado por el fabricante. Este instrumento se utilizó para determinar los perfiles de velocidad en la sección de pruebas.

Para medir las presiones estática y dinámica con el tubo de Pitot se emplearon dos manómetros inclinados. Estos manómetros son de la marca AIRFLOW tipo 4, el cual posee dos columnas para medir intervalos de presión desde 0 Pa a 2 500 Pa y de 0 Pa a 5 000 Pa respectivamente. La columna menor tiene las siguientes escalas: 0 Pa a 125 Pa, 0 Pa a 250 Pa, 0 Pa a 500 Pa y 0 Pa a 2500 Pa. La segunda columna posee las siguientes escalas 0 Pa a 500 Pa, 0 Pa a 1 000 Pa y 0 Pa a 5 000 Pa. En la etapa experimental se empleó la escala de 0 Pa a 1 000 Pa, en esta escala se tiene una resolución de 2 Pa. Este instrumento fue calibrado en un laboratorio secundario que forma parte del Sistema Nacional de Calibración (SNC).

3.2.3 TERMÓMETRO, BARÓMETRO E HIGRÓMETRO

Otras variables que se midieron durante el desarrollo de la etapa experimental de este trabajo fueron las condiciones ambientales como son la presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa. Estas variables se emplearon para calcular la densidad del aire manejado por el túnel de viento. Los instrumentos empleados para estas mediciones y sus características se describen a continuación.

La presión atmosférica se midió con un barómetro tipo aneroide marca THOMMEN, con un alcance de 650 mbar a 1 050 mbar, dividido en cuatro escalas 650 mbar a 735 mbar, 735 mbar a 830 mbar, 830 mbar a 935 mbar y de 935 mbar a 1 050 mbar. La resolución en todas las escalas es de 1 mbar. La temperatura ambiente se midió con un termómetro de líquido en vidrio de mercurio, marca KESSLER, con un intervalo de -1 °C a 51 °C y resolución de 0.1 °C.

Para medir la humedad relativa se empleó un termohigrómetro digital, marca HANNA, modelo HI 8564, con un alcance de 10% HR a 95% HR y una resolución de 0.1 %HR. Los instrumentos anteriores fueron calibrados en laboratorios secundarios que pertenecen al Sistema Nacional de Calibración (SNC).

3.3 MODIFICACIONES EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS DE SUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

Las modificaciones que se proponen en este trabajo para mejorar el flujo de aire en la sección de pruebas de succión del túnel de viento, se basan en las recomendaciones propuestas por Bradshaw P. y Pankhurst R. C., 1964 [7] y Metha R. D. y Bradshaw P., 1979 [18].

Estas modificaciones son la implementación de una cámara estabilizadora con una sección transversal de 1764 mm por 2388 mm, en la que se instalarán un panel de geometría hexagonal y cinco mallas estabilizadoras, una contracción de sección transversal rectangular con relación de áreas de 9:1 y una entrada acampanada que se colocará al inicio de la cámara estabilizadora para uniformizar el flujo a la entrada de la misma. Todas las modificaciones anteriores tienen como finalidad reducir la turbulencia en la sección de pruebas de succión del túnel de viento a los valores que se presentaron en la recopilación bibliográfica (0.07% a 2%). A continuación se presenta los cálculos y la descripción de las modificaciones propuestas para la sección de pruebas de succión del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP.

3.3.1 MALLAS Y PANAL

La reducción de las fluctuaciones de velocidad y consecuentemente de la turbulencia en la sección de pruebas de un túnel de viento, se realiza mediante la instalación de panales y mallas o una combinación de ambos, en una sección corriente arriba de la contracción llamada cámara estabilizadora. En la figura 3.9 se muestra la ubicación de las tres zonas antes mencionadas. Las mallas reducen en mayor grado la turbulencia en la dirección axial (u) que en la dirección lateral (v), de acuerdo a los coeficientes de las siguientes ecuaciones (Batchelor, 1993):

$$u'_2 = \left(\frac{1 + \alpha - \alpha K}{1 + \alpha + K} \right) u'_1 \quad (3.5)$$

$$v'_2 = \frac{1.1}{\sqrt{1 + K}} v'_1 \quad (3.6)$$

En donde u'_2 y u'_1 son las fluctuaciones en la dirección axial corriente arriba y corriente abajo de la malla respectivamente, α es el coeficiente de deflexión del flujo, K es el coeficiente de presión de la malla y v'_1 y v'_2 son las fluctuaciones laterales de la velocidad.

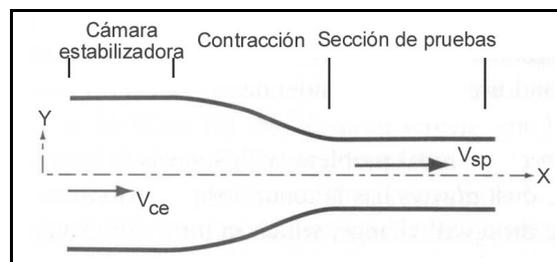


Figura 3.9 Arreglo de cámara estabilizadora, contracción y sección de pruebas [3].

Las mallas y los panales permiten obtener un perfil de velocidad uniforme en la dirección del flujo, como consecuencia de una caída de presión estática que le imponen al flujo en la dirección axial; esta caída de presión es proporcional al cuadrado de la velocidad por lo que estos accesorios deben colocarse en secciones donde se tenga las velocidades más bajas dentro de un túnel de viento, como es en la cámara estabilizadora (figura 3.9). Las mallas y los panales, además de reducir las fluctuaciones de la velocidad y en consecuencia la turbulencia en la dirección axial, también reducen la desviación del flujo. Ambos elementos reducen el ángulo de incidencia del flujo (α) cuando este pasa a través de ellos. El coeficiente de deflexión del flujo a es la relación entre el ángulo de salida del flujo f y el ángulo de entrada q [Barlow J. B., et al. 1999]. En la figura

3.10 se muestra que para ángulos pequeños la relación entre estos puede escribirse como:

$$\phi = \alpha\theta \quad (3.7)$$

El valor del coeficiente de deflexión α de la ecuación anterior se encuentra entre 0 y 1; por lo tanto, el ángulo del flujo a la salida de la malla se reducirá al pasar a través de una malla o un panel.

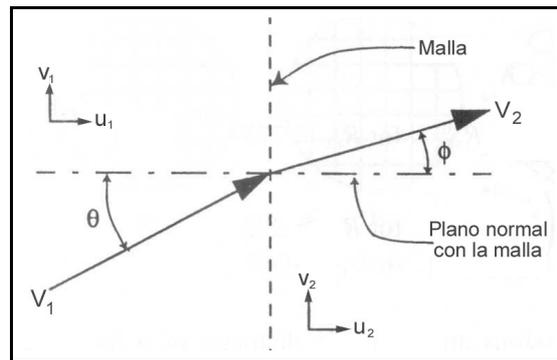


Figura 3.10 Flujo a través de una malla [3].

Schubauer G. B. et al (1950) determinaron una ecuación empírica para el ángulo de deflexión α , el cual depende del coeficiente de caída de presión K como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{1.1}{\sqrt{1+K}} \quad (3.8)$$

El coeficiente de caída de presión (K) [Barlow J. B., et al. 1999] depende de dos parámetros que caracterizan a cualquier malla. Estos son la porosidad β y el número de Reynolds (Re_w) que está en función del diámetro del alambre de la malla. La porosidad es función del diámetro del alambre (d_w) y de la longitud de abertura (M) de la malla y se define como la relación entre el área total abierta y el área total de la malla y se calcula con la ecuación (3.9). Otro parámetro complementario de la porosidad y que en ocasiones se emplea es la solidez (σ) de la malla, la cual se calcula con la expresión (3.10).

$$\beta = \left(1 - \frac{d_w}{M}\right)^2 \quad (3.9)$$

$$\sigma = 1 - \beta \quad (3.10)$$

Bradshaw P. y Pankhurst R. C. (1964) sugieren el empleo de mallas con una porosidad $b > 0.57$, debido a que las mallas con b menores producen inestabilidades ya que el flujo a través de las aberturas provoca la aparición de chorros que colisionan entre sí formando vórtices en la dirección del flujo, los cuales persisten a través de la contracción, teniendo como resultado fluctuaciones de la velocidad dentro de la sección de pruebas. Además sugieren que el número de Reynolds local (Re_{lw}) de los alambres sea mayor de 80, para que la estela de los alambres sea turbulenta para que no se presenten las variaciones de velocidad en la sección de pruebas. El número de Reynolds para este caso se calcula según la siguiente ecuación.

$$Re_{lw} = \frac{Ud_w}{\beta\nu} \quad (3.10)$$

El coeficiente de caída de presión (K) de la malla es función de b y del Re_{lw} , éste debe obtenerse de manera experimental bajo las mismas condiciones en las que se empleará la malla. Metha R. D. y Bradshaw P. (1979) proponen la ecuación de Wieghardt para obtener una aproximación del coeficiente de caída de presión, la cual es válida para un Re_{lw} , hasta de 600. La ecuación para calcular este coeficiente es:

$$K = 6.5 \cdot \left[\frac{1-\beta}{\beta^2} \right] \cdot Re_{lw}^{-\frac{1}{3}} \quad (3.11)$$

Además sugieren que la distancia óptima entre la última malla y la entrada a la contracción debe ser de 0.2 diámetros de la cámara estabilizadora, para que no se presenten variaciones de velocidad en la sección de pruebas del túnel de viento. Estos autores también recomiendan que se deben instalar por lo menos cuatro mallas en la cámara estabilizadora, separadas por una distancia de 500 diámetros del alambre (d_w).

De acuerdo a los criterios anteriores se sugiere para el túnel de viento del LABINTHAP una malla con las siguientes características: 20 aberturas por pulgada ($M = 1.27 \text{ mm}$), alambre calibre 30 ($d_w = 0.23 \text{ mm}$) con una porosidad $b = 0.67$ y solidez $s = 0.33$. Con las características anteriores se cumple con el criterio que $b > 0.57$ propuesto por Bradshaw P. y Pankhurst R. C. (1964), para que no se presenten inestabilidades del flujo en la sección de pruebas a causa de las mallas

En función de las dimensiones de la cámara estabilizadora para instalar una contracción con relación de áreas de 9 y con la velocidad máxima de 65 m/s en la sección de pruebas del túnel de viento. La velocidad en la cámara estabilizadora es de 7.44 m/s, para esta velocidad el número de Reynolds local para la malla es de 175 (ecuación 3.10), el coeficiente caída de presión para estas condiciones es de $K = 1.06$ (ecuación 3.11) y la distancia entre la última malla y la entrada de la contracción será de 500 mm, lo que cumple con el criterio de que esta distancia

debe ser de 0.2 el diámetro de la cámara estabilizadora. Por otro lado, se propone instalar cinco mallas en la cámara estabilizadora del túnel de viento del LABINTHAP, con las características antes descritas, separadas por una distancia de 120 mm ($521 d_w$), el cual también cumple con el criterio de que esta distancia debe ser igual a 500 diámetros del alambre de la malla.

Debido a su longitud los panales son efectivos para remover vórtices y variaciones de la componente lateral de la velocidad (v , ecuación 3.6), para lo cual el ángulo de incidencia del flujo debe ser menor a 10° [Metha R. D. y Bradshaw P., 1979]. Además los panales tienen un coeficiente de caída de presión menor que las mallas y en consecuencia una menor influencia en la velocidad axial del flujo. La sección transversal de las celdas de los panales normalmente es hexagonal, aunque en ocasiones se emplean secciones cuadradas, circulares o triangulares; las cuales son más fáciles de construir. En la figura 3.11 se muestran las geometrías clásicas empleadas en los panales.

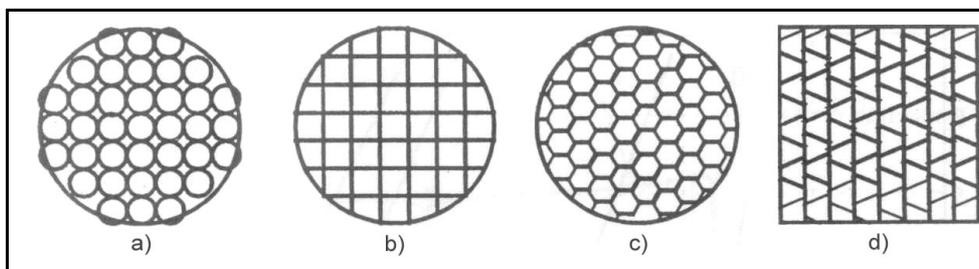


Figura 3.11 Geometrías típicas de los panales: a) circular, b) cuadrada, c) hexagonal y d) trapezoidal [3].

Los parámetros de diseño de un panel son la relación de longitud entre diámetro hidráulico de una celda y la porosidad o solidez, definidas de la misma forma que una malla. Para obtener un mejor comportamiento del panel, su longitud debe estar entre 6 y 8 veces su diámetro equivalente y se deben colocar por lo menos 25 000 celdas en la cámara estabilizadora, aunque en algunos túneles se colocan hasta 50 000 panales. Loehrke R. I. y Nagib H. M. (1976) sugieren que la distancia entre el panel y la primera malla debe ser de 5 veces el diámetro de la abertura del panel, aunque en los túneles de viento se tiene distancias de 56 diámetros de la celda [Purtell L. P. y Klebanoff P. S., 1979] y 47 diámetros de la celda [discusión de Loehrke R. I. y Nagib H. M., 1976].

Por lo tanto, el panel que se propone implementar en la cámara estabilizadora del túnel del LABINTHAP, es de sección hexagonal con un diámetro equivalente de 10.5 mm, espesor de 0.2 mm y longitud de 85 mm. La separación entre el panel y la primera malla será de 500 mm (0.2 diámetros de la sección estabilizadora) lo que equivale a una distancia de 48 diámetros de la celda del panel.

3.3.2 CONTRACCIÓN Y ENTRADA ACAMPANADA

La contracción es uno de los componentes más importantes en un túnel de viento. Este elemento une las zonas donde se presentan las velocidades más bajas (sección estabilizadora) y las velocidades más altas (sección de pruebas), como se mostró en la figura 3.9. La contracción tiene como finalidad: a) incrementar la velocidad promedio del flujo de aire, lo que permite colocar las mallas y el panel en una región de velocidad baja, reduciendo las pérdidas de presión y b) reduce tanto las variaciones de la velocidad promedio como las fluctuaciones de velocidad.

Metha R. D. y Bradshaw P. (1979) proponen que la relación de áreas de la contracción debe estar entre 6 y 9, para obtener un buen comportamiento del flujo en la sección de pruebas. En el diseño de la contracción se debe evitar la separación de la capa límite a lo largo de ésta, ya que se tienen dos regiones que son sensibles a este fenómeno; la primera es la región cóncava en el inicio de la contracción y la segunda es la parte convexa cercana a la salida de la contracción.

Por otro lado, en las secciones cuadradas y rectangulares se presenta un flujo secundario en las esquinas de la contracción, lo cual hace más propensa la separación del flujo en estas zonas. Finalmente se debe evitar una aceleración excesiva a lo largo de la contracción, para que no se presente una velocidad más alta cercana a la pared de la sección de pruebas [Purtell L. P. y Klebanoff P. S., 1979] como en el caso de la instalación experimental de Terao Y. et al (1994).

El método empleado para diseñar el cono de contracción es el sugerido por Morel T., 1977, considerando en su análisis un flujo incompresible y sin viscosidad. En este método, el contorno de la contracción se obtiene mediante dos curvas cúbicas con sus vértices en ambos lados de la contracción unidas en un punto x_m . Los cálculos obtenidos por Morel fueron para relaciones de contracción (CR) de 2 a 8 y presenta el procedimiento y las ecuaciones para relaciones de contracción de 8 a 10, relaciones longitud de contracción y altura de entrada de la contracción (L/H_1) de 0.85 a 1.5 y ubicación del punto de unión de las curvas ($X=x_m/L$) de 0.2 a 0.85.

Los dos criterios principales para diseñar la contracción por el método de Morel son: 1) uniformidad del flujo a la salida, 2) evitar la separación del flujo, 3) mínima longitud de la contracción y 4) un espesor mínimo de la capa límite en la salida de la misma. De los cuatro criterios anteriores, los dos primeros son los más importantes. Por lo cual, este método de diseño tiene como principales propósitos prevenir la separación del flujo y producir un perfil de velocidad en la salida de la contracción con una variación definida como:

$$\bar{U}_2 = \frac{U_{w,2} - U_{c,2}}{U_{2,\infty}} \quad (3.12)$$

En donde \bar{u}_2 es la variación de la velocidad en la salida, U_{w2} es la velocidad cercana a la pared, $U_{c,2}$ es la velocidad en la parte central y $U_{2,\infty}$ es la velocidad de corriente libre en la sección de pruebas. Los coeficientes de presión en la entrada (C_{pi}) y salida (C_{pe}) de la contracción se definen en las ecuaciones (3.13) y (3.14). En donde los subíndices i y e se refieren a los puntos de velocidad máxima y mínima en la pared, $U_{1,\infty}$ es la velocidad corriente libre en la entrada de la contracción.

$$C_{pi} = 1 - \left(\frac{u_i}{U_{1,\infty}} \right)^2 \quad (3.13)$$

$$C_{pe} = 1 - \left(\frac{U_{2,\infty}}{u_e} \right)^2 \quad (3.14)$$

En el plano de entrada, la velocidad máxima se presenta en la parte central y la velocidad menor en las esquinas (u_i); lo opuesto ocurre en el plano de descarga, en donde la velocidad mayor se tiene en las esquinas (u_e) y la velocidad menor en la zona central.

Las cartas de diseño presentadas por Morel grafican los coeficientes de presión de entrada (C_{pi}) y de salida (C_{pe}), contra la relación (X) punto de unión (x_{η})/longitud de la contracción (L) y la relación de longitud de la contracción/altura de entrada (L/H_1). Por tanto, para una relación de contracción y determinados los valores de C_{pi} y C_{pe} , se pueden obtener la ubicación del punto de unión de las curvas y la longitud de la contracción.

Morel T. (1977) recomienda un coeficiente de presión (C_{pi}) en la entrada de 0.42, para evitar la separación del flujo en esta zona y un coeficiente de presión en la salida (C_{pe}) de 0.1. Este coeficiente asegura que las irregularidades en los perfiles de velocidad en la descarga sean menores de 2%. Una vez determinados los parámetros X y L/H_1 , se obtiene el contorno del cono de contracción en los ejes Y y Z por medio de la siguiente ecuación:

$$y,z = \begin{cases} (H_1 - H_2) \cdot \left[1 - \frac{1}{X^2} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right] + H_2 & \frac{x}{L} \leq X \\ \frac{(H_1 - H_2)}{(1-X)^2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L} \right)^3 + H_2 & \frac{x}{L} > X \end{cases} \quad (3.15)$$

En donde; H_1 y H_2 son las alturas de entrada y salida de la contracción, X es el punto de unión de las curvas, y y z es la altura de la contracción a una distancia x desde la entrada de la contracción y L es la longitud del cono de contracción.

El método de Morel (1977) para diseñar contracciones bidimensionales se empleó en este trabajo, debido a que Batill S. M. y Nelson R. C. (1985) obtuvieron resultados satisfactorios al evaluar el comportamiento de las contracciones de sección cuadrada diseñadas por este método, con relación de áreas de 75:1 y 150:1, para lo cual extrapolaron los resultados obtenidos por Morel.

En el caso del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP se tiene una sección de pruebas de sección rectangular de 588mm por 796 mm, y por condiciones de espacio, se optó por una contracción con relación de áreas de 9:1 que cumple con la recomendación propuesta por Metha R. D. y Bradshaw P. (1979), con una longitud (L) de 1676 mm, y la ubicación del punto de unión de las curvas (X) de 0.531. En la figura 3.12 se presenta el contorno del cono de contracción en los ejes Y y Z propuesto en este trabajo.

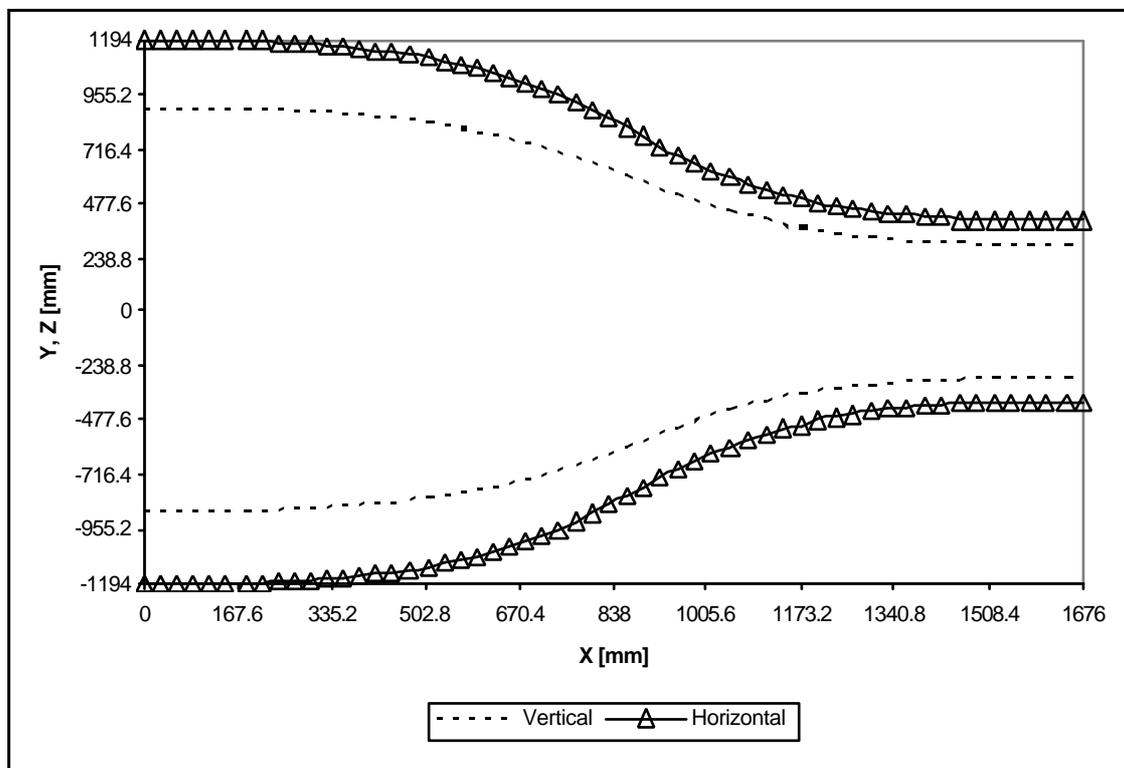


Figura 3.12 Contorno de la contracción del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP.

Para que se tenga la mínima perturbación del flujo antes de que éste entre en la cámara estabilizadora, se propone una entrada acampanada con un radio de curvatura de $1/8$ del diámetro equivalente ($D_{eq} = 2316 \text{ mm}$) de la cámara estabilizadora, es decir 289.5 mm. Esta entrada acampanada se diseñó conservando las proporciones que indica la norma BSI 848, por que debido a las condiciones de espacio, esta quedaría próxima al piso del laboratorio y se

la cual esta construida de 5 módulos con una longitud de 1 000 mm, de los cuales 2 están hechos de lámina de 1.6 mm y los restantes de acrílico de 10 mm de espesor. Todos los módulos tienen una estructura de acero de 38 mm por 6.35 mm de espesor.

En la figura 3.14 se muestra la configuración del túnel en la que se llevó a cabo la etapa experimental que se presenta en el siguiente capítulo. En esta figura se aprecia la contracción con relación de áreas de 9:1, colocada al inicio de la sección de pruebas de 5.00 m de longitud. Posteriormente se implementarán los otros accesorios calculados en este trabajo como son el panel y las 5 mallas, con lo que se mejorará el flujo en la sección de pruebas de este túnel.

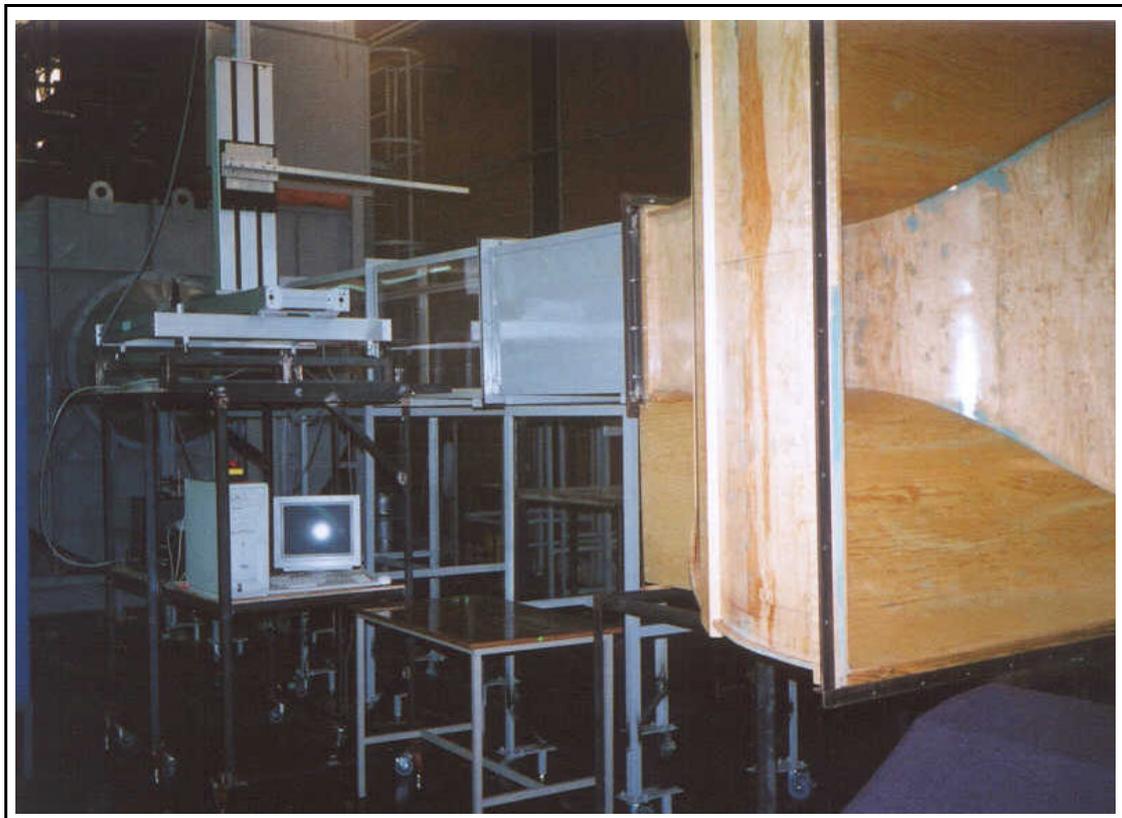


Figura 3.14 Túnel de viento del LABINTHAP con la contracción de relación de áreas de 9:1.

Después de describir la instalación experimental como es el túnel de viento de velocidad baja y la instrumentación empleada, así como las modificaciones propuestas para mejorar el flujo en la sección de pruebas de succión del túnel de viento, en el siguiente capítulo se presenta el desarrollo experimental de este trabajo.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta la metodología experimental empleada para obtener los perfiles de velocidad y crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas del túnel de viento del LABINTHAP. Los resultados de estos parámetros determinan la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire. También se muestran los resultados de la turbulencia en la zona de calibración en un intervalo de velocidades de 5.0 m/s a 30.0 m/s.

4.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el desarrollo experimental de este trabajo, que comprende la determinación de perfiles de velocidad y crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas del túnel de viento, para establecer la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad y finalmente medir la turbulencia en esta zona, se emplearon el anemómetro de hilo caliente y el tubo Pitot tipo L descritos en el capítulo III. El tubo Pitot se utilizó solamente en los perfiles de velocidad, con la entrada acampanada instalada al inicio de la sección de pruebas del túnel.

Para llevar a cabo la caracterización de la sección de pruebas de túnel de viento en función de los parámetros mencionados, se efectuaron una serie de mediciones con el anemómetro de hilo caliente para determinar la frecuencia f , tiempo de muestreo t y número de muestras N , para velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, como muestra la tabla 4.1. Este intervalo de velocidades se determinó por que en la mayoría de las aplicaciones industriales donde es necesario medir la velocidad de gases se tienen velocidades entre 5 m/s y 25 m/s.

Tabla 4.1 Frecuencia, tiempo de muestreo y número de muestras para 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s.

f [kHz]	t [s]						
	5	10	20	30	40	50	60
0.2	1000	2000	4000	6000	8000	10000	12000
0.5	2500	5000	10000	15000	20000	25000	30000
1.0	5000	10000	20000	30000	40000	50000	60000
2.5	12500	25000	50000	75000	100000	125000	150000
5.0	25000	50000	100000	150000	200000	250000	300000
10.0	50000	100000	200000	300000	400000	500000	600000
15.0	75000	150000	300000	450000	600000	750000	900000
20.0	100000	200000	400000	600000	800000	1000000	1200000
30.0	150000	300000	600000	900000	1200000	1500000	1800000
40.0	200000	400000	800000	1200000	1600000	2000000	2400000
50.0	250000	500000	1000000	1500000	2000000	2500000	3000000
60.0	300000	600000	1200000	1800000	2400000	3000000	3600000

Las mediciones de velocidad y turbulencia para obtener la frecuencia y tiempo de muestreo adecuados, se efectuaron en el centro de la sección de pruebas de túnel de viento a una distancia de 3.40 m del inicio de la sección de pruebas. Estas mediciones se realizaron para las velocidades mencionadas con una sonda 55P11, marca DANTEC de propósito general. En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se presentan las superficies de turbulencia para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s en función de la frecuencia y tiempo de muestreo.

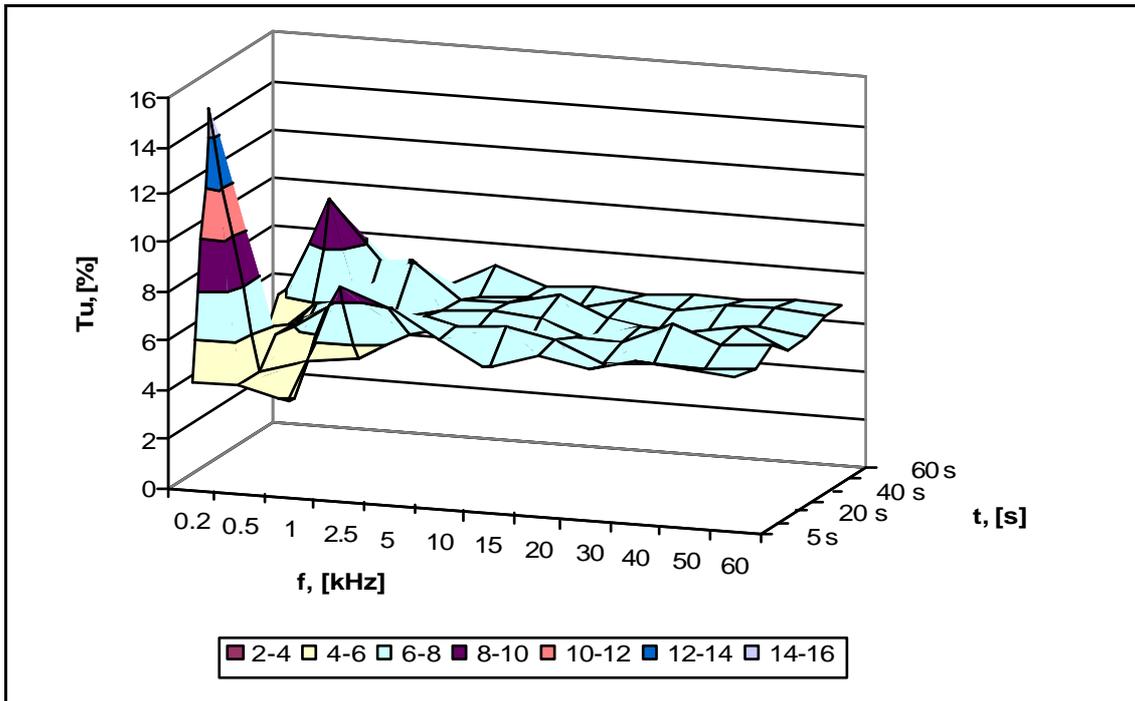


Figura 4.1 Superficie de turbulencia en función de frecuencia y tiempo de muestreo para 5 m/s.

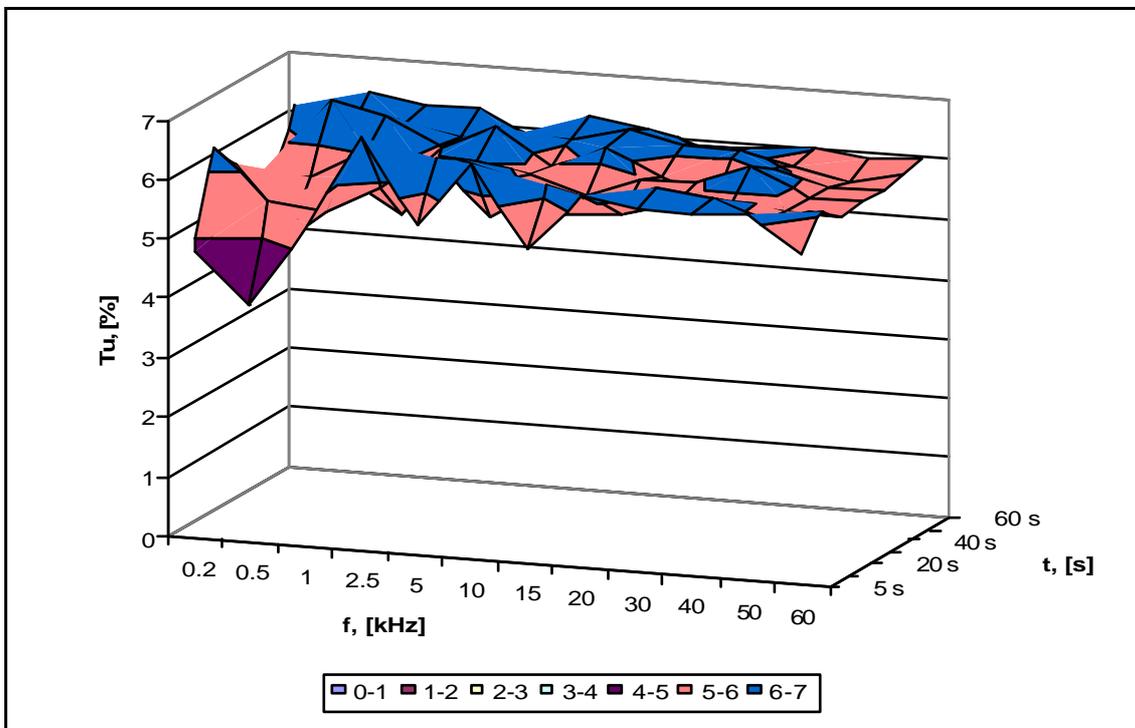


Figura 4.2 Superficie de turbulencia en función de frecuencia y tiempo de muestreo para 15 m/s.

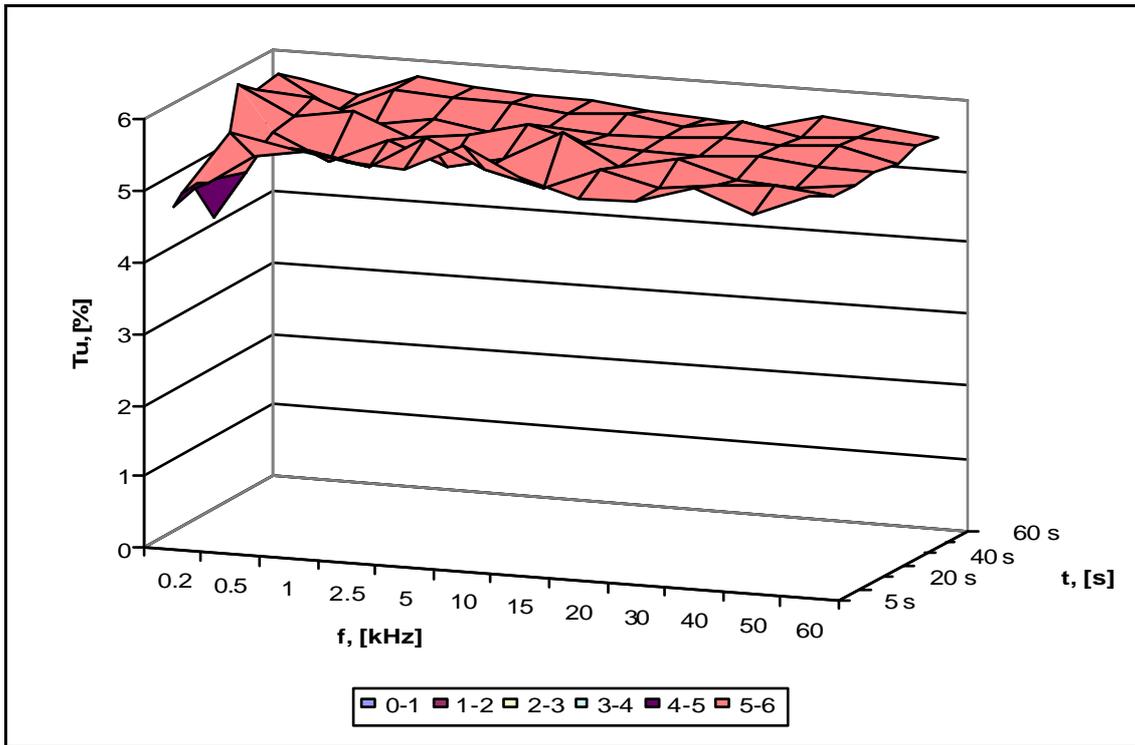


Figura 4.3 Superficie de turbulencia en función de frecuencia y tiempo de muestreo para 30 m/s.

En las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se presentan las gráficas de turbulencia para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s para las frecuencias y tiempos de muestreo mostrados en la tabla 4.1.

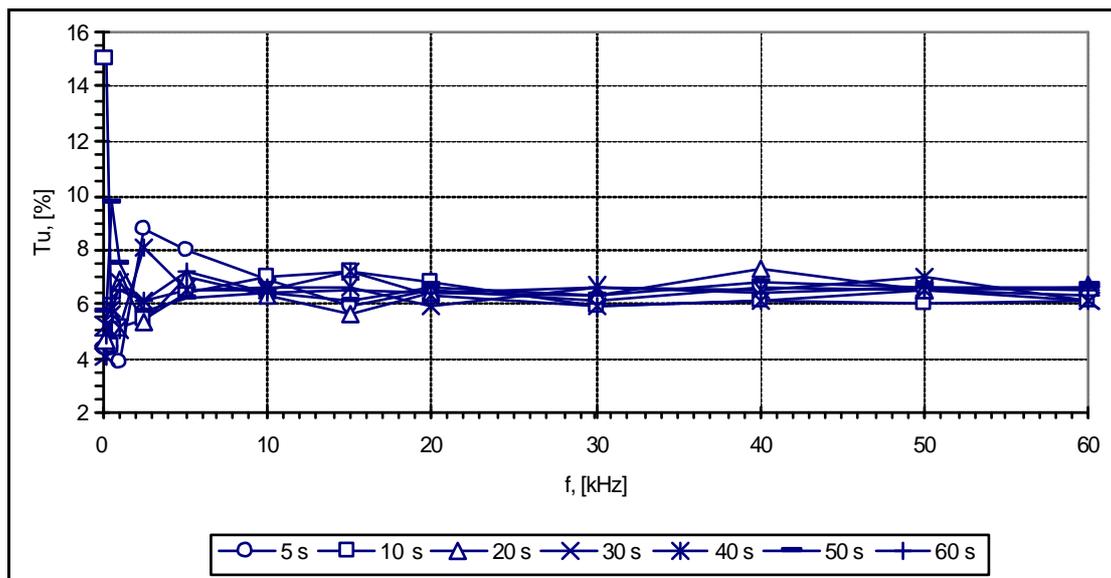


Figura 4.4 Turbulencia para diferentes frecuencias y tiempos de muestreo, $U = 5$ m/s.

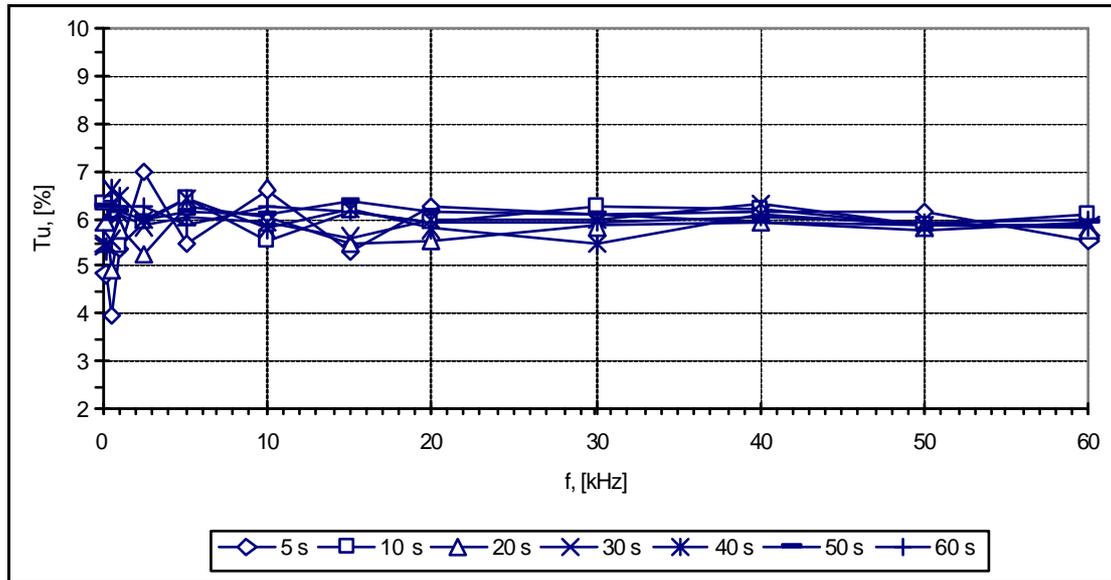


Figura 4.5 Turbulencia para diferentes frecuencias y tiempos de muestreo, $U = 15$ m/s.

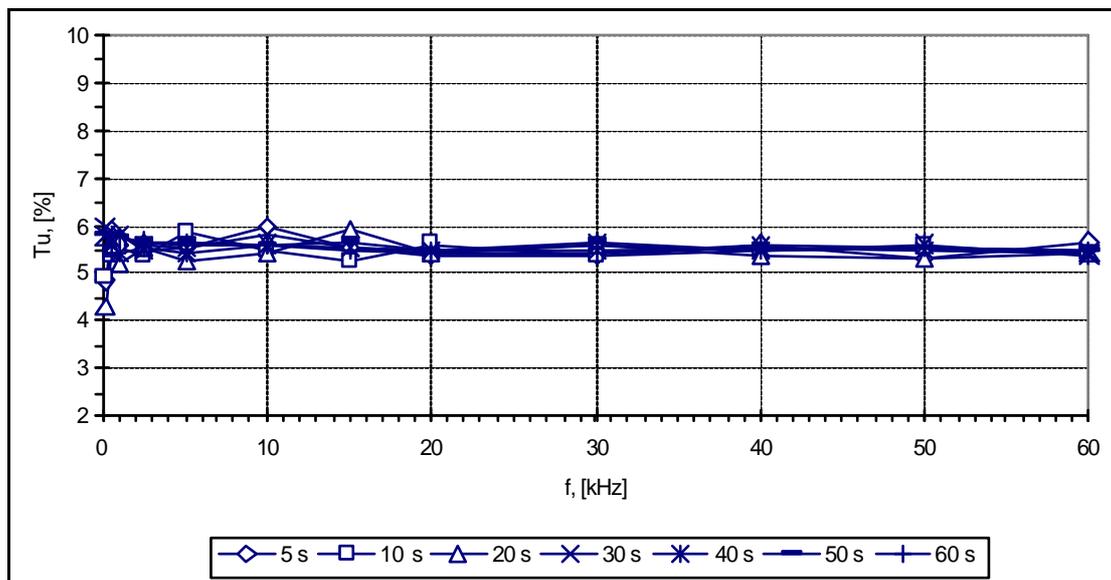


Figura 4.6 Turbulencia para diferentes frecuencias y tiempos de muestreo, $U = 30$ m/s.

De las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se observa que la turbulencia se estabiliza desde 20 kHz, para las tres velocidades (5 m/s, 15 m/s y 30 m/s). Por lo tanto la frecuencia de muestreo adecuada para el desarrollo de la etapa experimental de este trabajo fue de 30 kHz y un tiempo de muestreo de 30 s, por lo que se tendrá una muestra de 900 000 datos para cada medición puntual de velocidad que se realice.

Con los datos de frecuencia y tiempo de muestreo señalados se procedió a caracterizar la sección de pruebas del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP, para determinar la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire. Esta caracterización se efectuó para velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s de acuerdo a los parámetros que muestra la matriz experimental, de la figura 4.7.

	PARAMETRO		
	Perfil de Velocidad	Capa Límite	Turbulencia
POSICIÓN X, [m]	1.80 2.60 3.40	1.80 2.60 3.40	Zona de calibración X = 2.40 m
VELOCIDAD [m/s]	5 15 30	5 15 30	5 – 30 9 puntos intermedios
SONDA	Tubo de Pitot 55P11	55P15	55P11
EJES	Y Z	Y Z	Centro
ARREGLO	Entrada Acampanada (1) Contracción (2)	Contracción (2)	Contracción (2)

Figura 4.7 Matriz experimental para establecer la zona de calibración.

De acuerdo a la matriz experimental mostrada en la figura 4.7, se determinaron los perfiles de velocidad en las tres posiciones marcadas en los planos Y y Z, para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s. Para esto se empleó un tubo de Pitot tipo L y la entrada acampanada al inicio de la sección de pruebas, el anemómetro de hilo caliente con la sonda 55P11 y la tobera diseñada colocada al inicio de la sección de pruebas. Además, en esta etapa se determinaron también los perfiles de turbulencia en las posiciones y ejes mostrados en la matriz experimental.

Posteriormente se midió la capa límite en las mismas posiciones, ejes y velocidades, empleando una sonda 55P15, la cual tiene la geometría adecuada para esta aplicación. Con los perfiles de velocidad y capa límite, se determinó la zona de calibración en $X = 1.80$ m, $X = 2.60$ m y en $X = 3.40$ m para el intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s en la sección de pruebas del túnel de viento.

Una vez establecida la zona de calibración se midió la turbulencia en el centro de ésta en $X = 2.40$ m, con la sonda 55P11, en el intervalo de velocidades de 5 m/s a 30 m/s con 9 puntos intermedios entre estos valores, con lo cual se caracterizó completamente la zona de calibración. A continuación se presenta el desarrollo de cada una de las etapas antes mencionadas.

4.2 PERFILES DE VELOCIDAD EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS

La primera etapa de este trabajo de acuerdo a la metodología experimental, es determinar los perfiles de velocidad en $X = 1.80$ m, $X = 2.60$ m y $X = 3.40$ m, para las velocidades 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, en los ejes Y y Z, mediante un tubo de Pitot y anemómetro de hilo caliente.

En primer lugar se empleó el tubo Pitot para determinar los perfiles de velocidad en los ejes Y y Z, colocando la entrada acampanada descrita en el capítulo III (arreglo 1) al inicio de la sección de pruebas, realizándose un barrido cada 0.05 m en los ejes mencionados. En el eje Y, se cubrieron los 0.60 m y en el eje Z, solamente los 0.40 m centrales.

Además de las presiones total y estática, para calcular las velocidades puntuales y determinar los perfiles de velocidad; también se midió la presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad. La ubicación del tubo de Pitot se realizó con el sistema posicionador del anemómetro de hilo caliente, descrito en capítulos anteriores. En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran los perfiles de velocidad obtenidos con el tubo Pitot y la entrada acampanada colocada al inicio de la sección de pruebas.

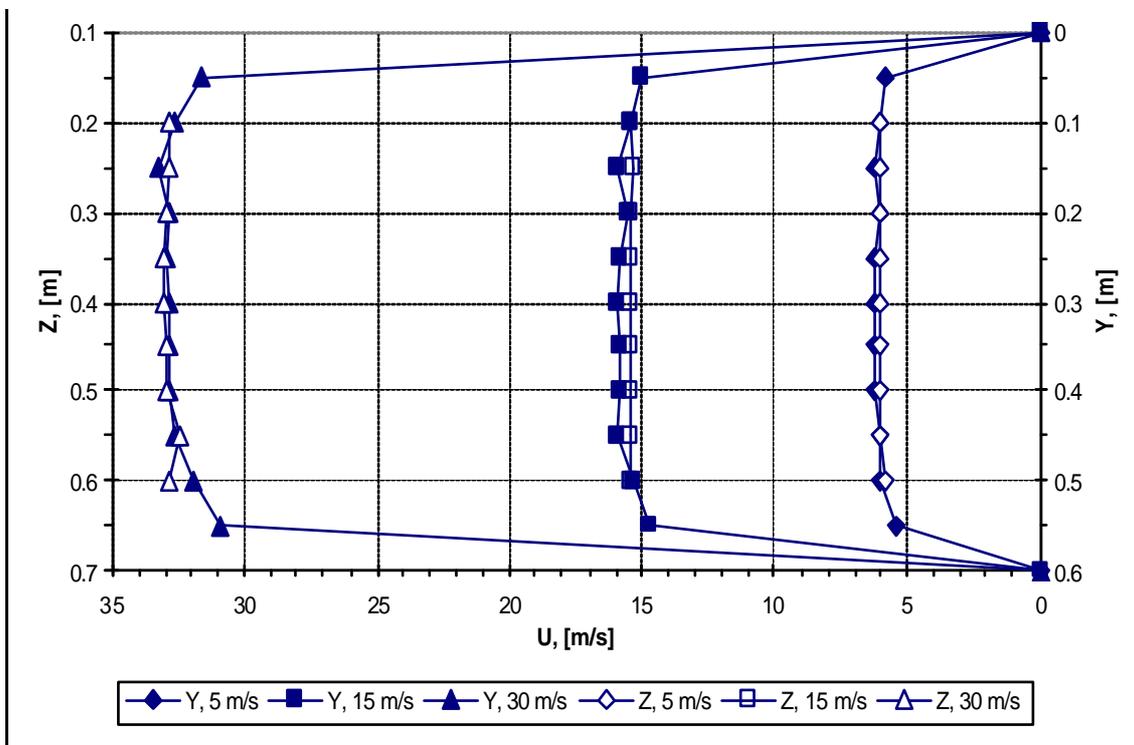


Figura 4.8 Perfiles de velocidad en $X = 1.80$ m con tubo de Pitot y entrada acampanada.

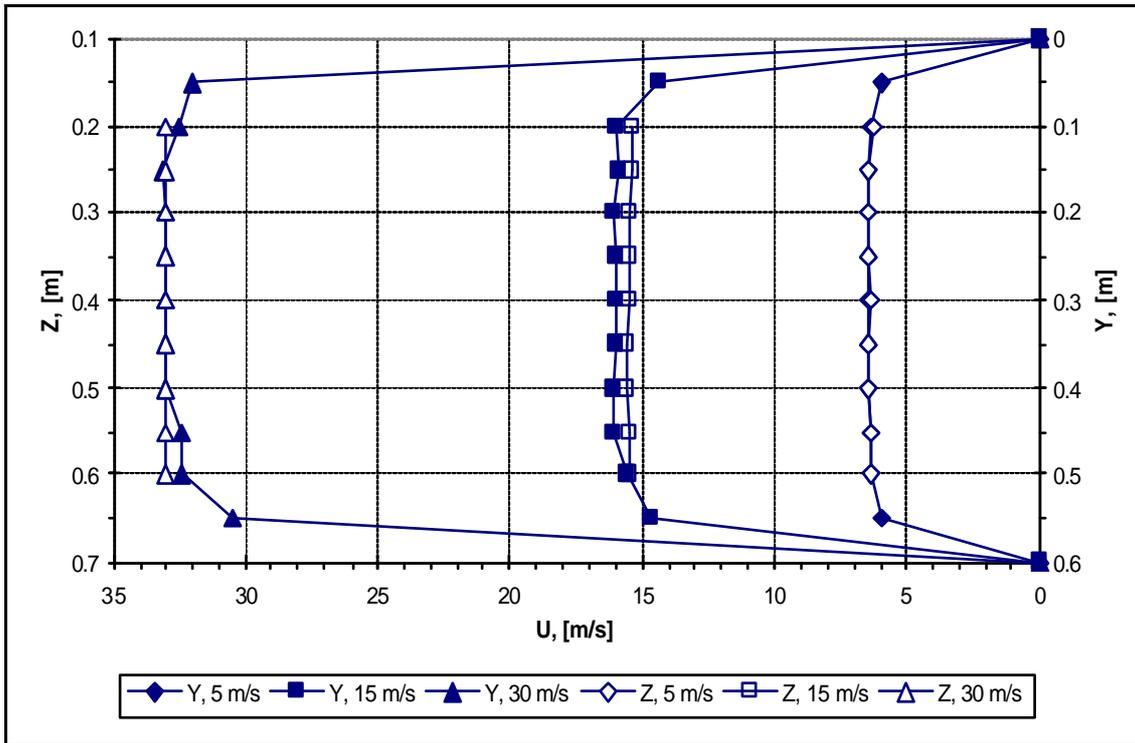


Figura 4.9 Perfiles de velocidad en $X = 2.60$ m con tubo de Pitot y entrada acampanada.

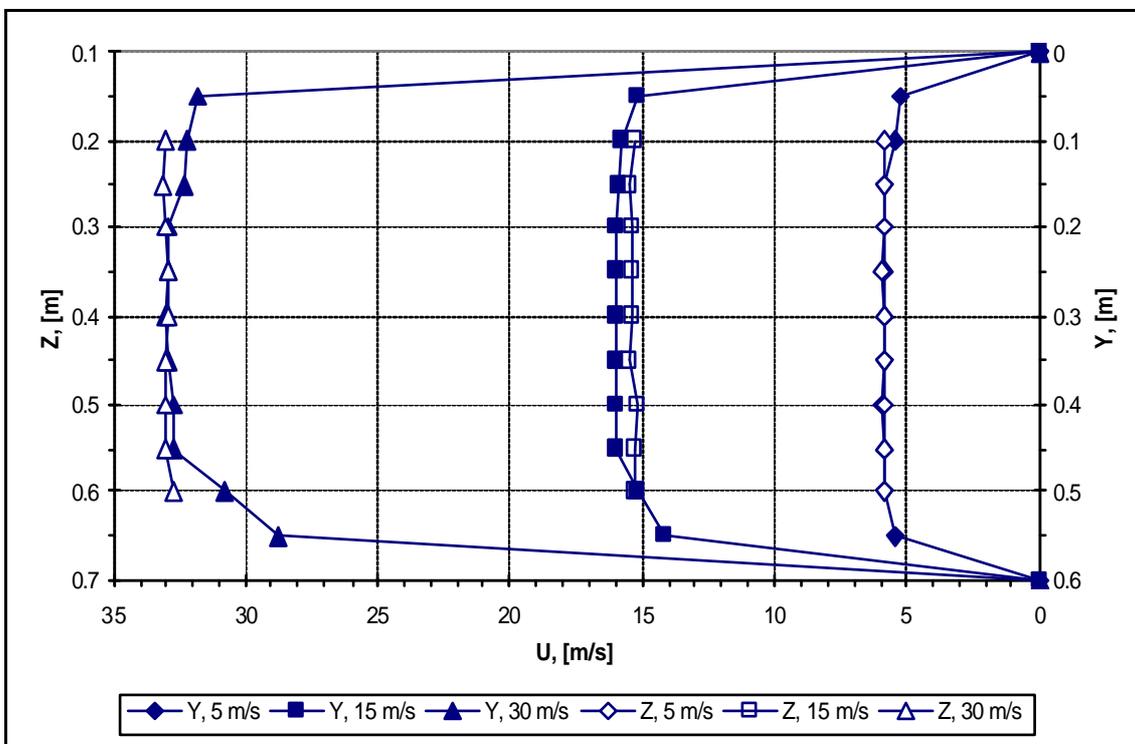


Figura 4.10 Perfiles de velocidad en $X = 3.40$ m con tubo de Pitot y entrada acampanada.

Una vez determinados los perfiles de velocidad con el tubo de Pitot, se instaló la contracción con relación de áreas de 9, para mejorar el comportamiento del flujo de aire en la sección de pruebas del túnel de viento, y se procedió a medir los perfiles de velocidad en $X = 3.40$ m, con el anemómetro de hilo caliente.

En la figura 4.11 se presentan los perfiles de velocidad en los ejes Y y Z, obtenidos con el anemómetro de hilo caliente, para lo cual se llevó a cabo un barrido con el sistema posicionador del anemómetro en los mismos puntos que las mediciones realizadas con el tubo Pitot.

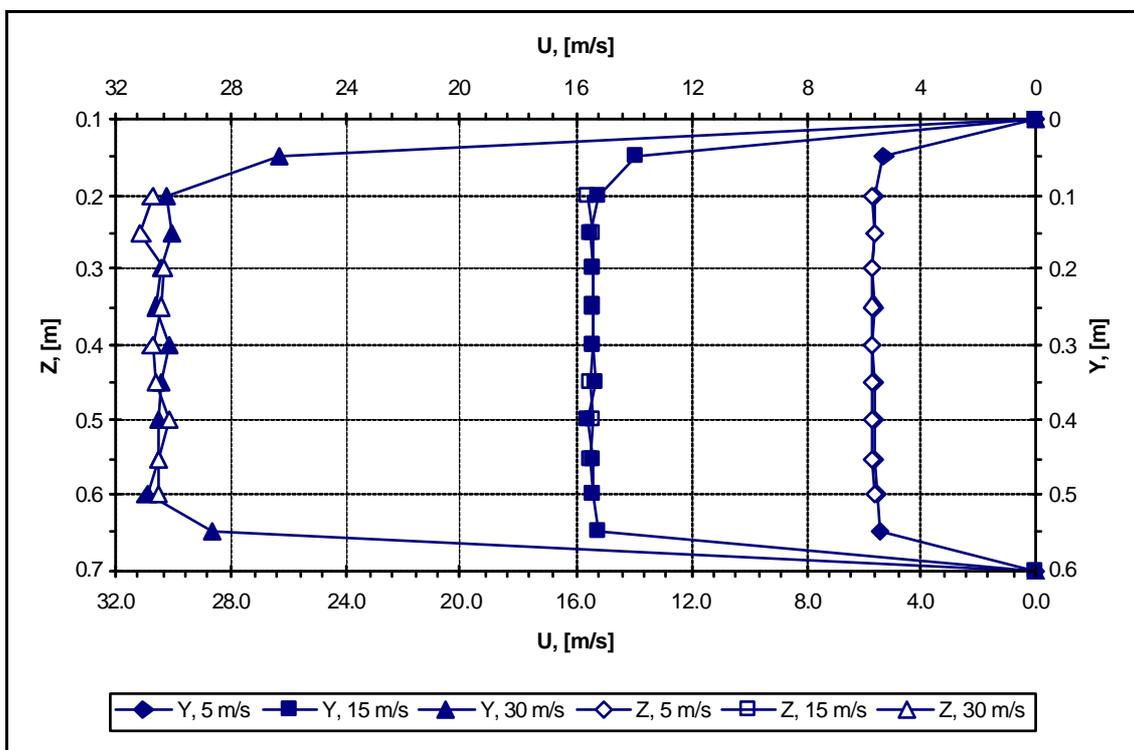


Figura 4.11 Perfiles de velocidad en $X = 3.40$ con anemómetro de hilo caliente.

Con la tobera instalada en la entrada de la sección de pruebas del túnel, se obtuvo un mejor comportamiento del flujo como se observa en la figura 4.11, donde se observa una simetría aceptable de los perfiles de velocidad en los ejes Y y Z. Por lo tanto, para medir las velocidades con el anemómetro en las posiciones mostradas en la metodología experimental, se realizó un barrido hasta 0.30 m y 0.40 m de los ejes Y y Z respectivamente. La sonda empleada para determinar los perfiles de velocidad y turbulencia en la sección de pruebas del túnel fue la 55P11, marca DANTEC, la cual se coloca con su soporte paralelo al flujo, quedando el sensor perpendicular al flujo principal.

Para obtener los perfiles de velocidad de acuerdo con la metodología experimental, se calibró la sonda 55P11 en 20 puntos en un intervalo de 0.50 m/s a 50 m/s, empleando la unidad de flujo del sistema de anemometría de hilo caliente, con esta calibración se cubrieron las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, para las que se midieron los perfiles de velocidad en la sección de pruebas. La tabla 4.2 se presenta los resultados de la calibración de la sonda mencionada.

Tabla 4.2 Datos de calibración de la sonda 55P11

U [m/s]	E [V]	T [°C]	P [kPa]	E _{cor} [V]	U _{cor} [m/s]	e [%]
0.492	1.472	18.449	79.043	1.472	0.495	0.6069
0.644	1.497	18.454	79.04	1.497	0.641	-0.5734
0.805	1.521	18.47	79.038	1.521	0.803	-0.2158
1.041	1.551	18.482	79.029	1.551	1.039	-0.1986
1.344	1.584	18.486	79.029	1.584	1.346	0.0989
1.709	1.617	18.492	79.027	1.617	1.708	-0.062
2.172	1.654	18.496	79.024	1.654	2.179	0.3471
2.744	1.692	18.501	79.018	1.692	2.748	0.1667
3.508	1.736	18.518	79.018	1.736	3.512	0.1209
4.488	1.784	18.525	79.018	1.784	4.49	0.0463
5.664	1.831	18.567	78.999	1.831	5.645	-0.357
7.326	1.89	18.576	78.988	1.89	7.311	-0.2063
9.089	1.943	18.582	78.991	1.943	9.101	0.1319
11.687	2.007	18.591	78.988	2.007	11.679	-0.0615
14.804	2.073	18.6	78.982	2.073	14.82	0.1096
19.171	2.148	18.604	78.98	2.148	19.188	0.0887
24.08	2.219	18.609	78.977	2.219	24.065	-0.061
30.214	2.295	18.613	78.974	2.295	30.21	-0.0145
38.933	2.384	18.625	78.96	2.384	38.932	-0.0045
49.405	2.472	18.585	78.955	2.472	49.408	0.0044

Con los datos de la tabla anterior y empleando el software del anemómetro, se ajustó un polinomio de cuarto orden obteniéndose la siguiente ecuación:

$$U = 49.271908 - 120.554314E_{\text{cor}} + 118.57772E_{\text{cor}}^2 - 57.844044E_{\text{cor}}^3 + 11.978719E_{\text{cor}}^4 \quad (4.1)$$

El polinomio anterior relaciona la velocidad U, con la caída de tensión corregida en la sonda para las diferentes velocidades, la diferencia entre la velocidad U y la velocidad corregida U_{cor}, es el error de la calibración. En las figuras 4.12 y 4.13 se presentan las curvas de calibración de la sonda 55P11 para el intervalo de velocidad de 0.50 m/s a 50 m/s, así como la distribución de errores respectivamente.

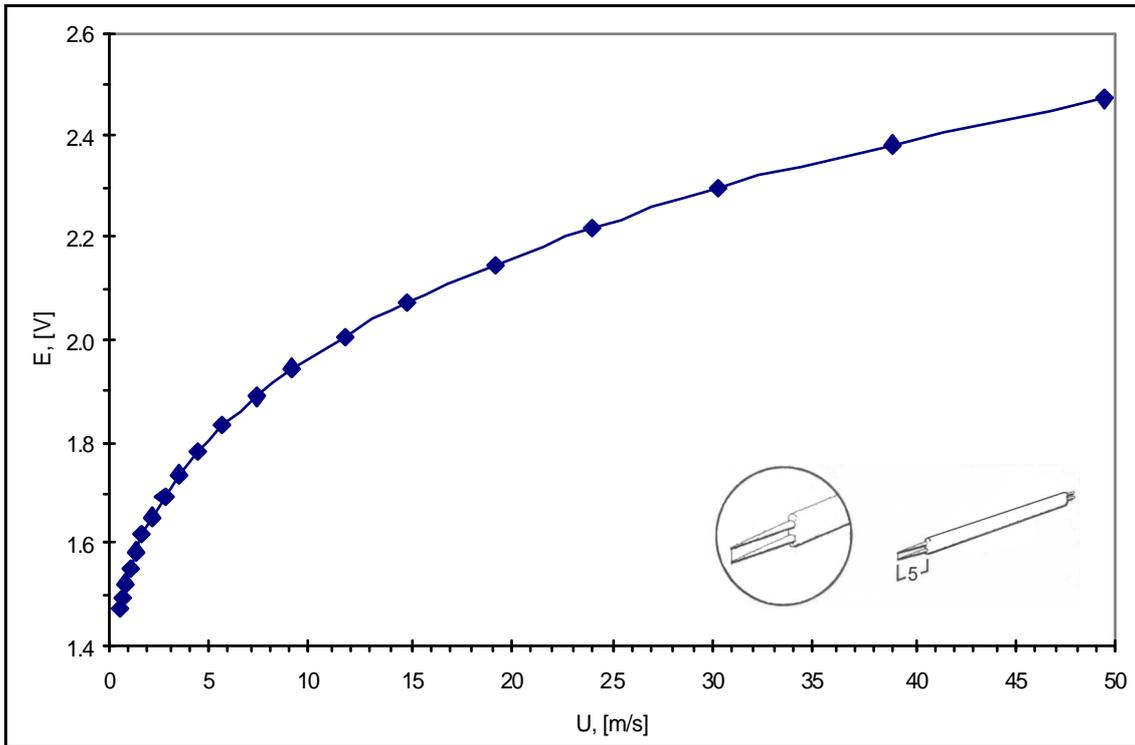


Figura 4.12 Curva de calibración de la sonda 55P11.

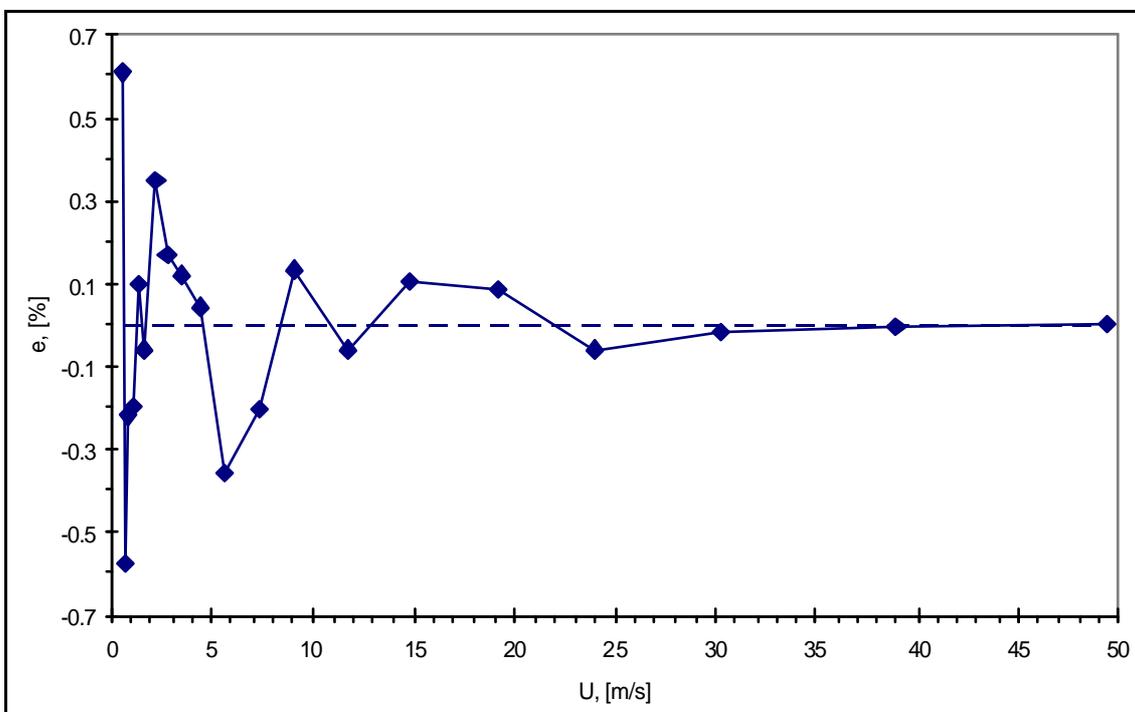


Figura 4.13 Errores de calibración de la sonda 55P11.

Una vez calibrada la sonda se colocó en el sistema posicionador programándose un mallado de 6 por 8 con el software del anemómetro para llevar a cabo un barrido de 6 y 8 puntos en los ejes Y y Z cada 0.05 m hasta el centro de la sección de pruebas.

La adquisición de datos en esta fase se efectuó con una frecuencia y tiempo de muestreo de 30 kHz y 30 s respectivamente. En las tablas 4.3 y 4.4 y las figuras 4.14 y 4.15 se muestran los datos y los perfiles de velocidad y turbulencia en la posición X = 1.80 m, en los ejes Y y Z.

Tabla 4.3 Velocidad y turbulencia en X = 1.80 m, eje Y.

POSICIÓN [m]	5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	5.5	4.3	14.8	4.6	30.2	2.6
0.10	5.7	1.6	15.2	2.0	30.5	2.2
0.15	5.6	3.1	15.2	2.2	30.4	2.1
0.20	5.6	3.2	15.1	3.1	30.2	3.4
0.25	5.7	2.8	15.1	3.3	30.4	3.3
0.30	5.6	4.2	15.1	3.2	30.2	3.2

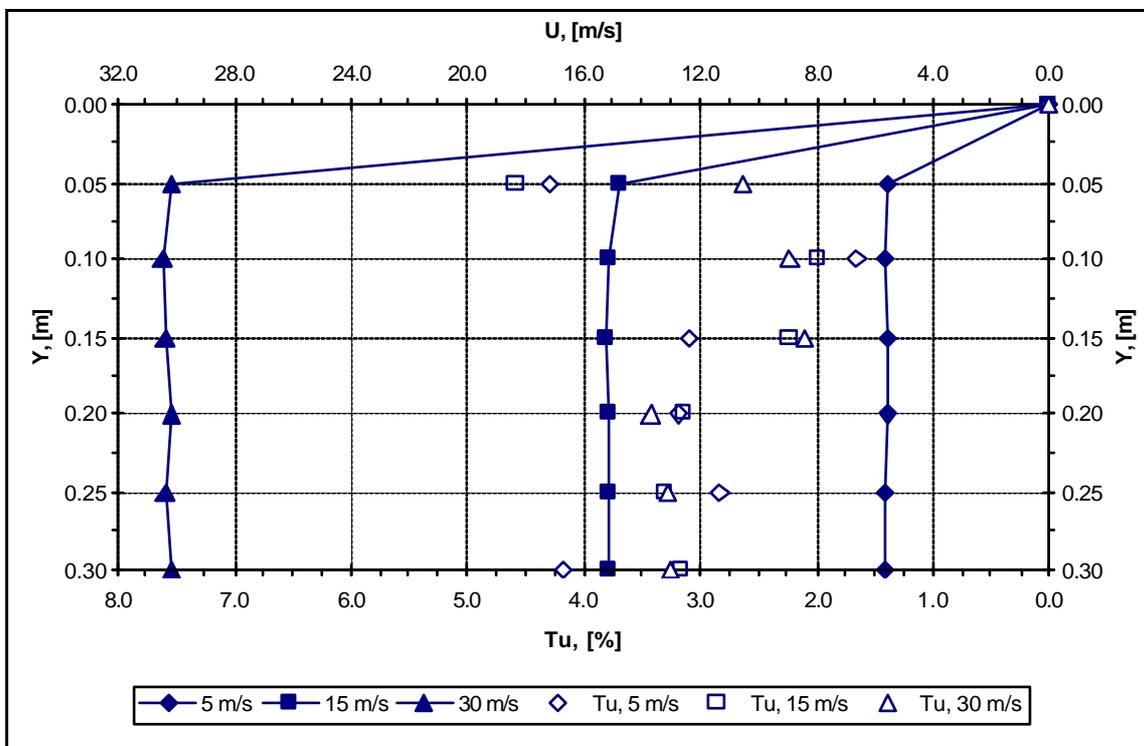
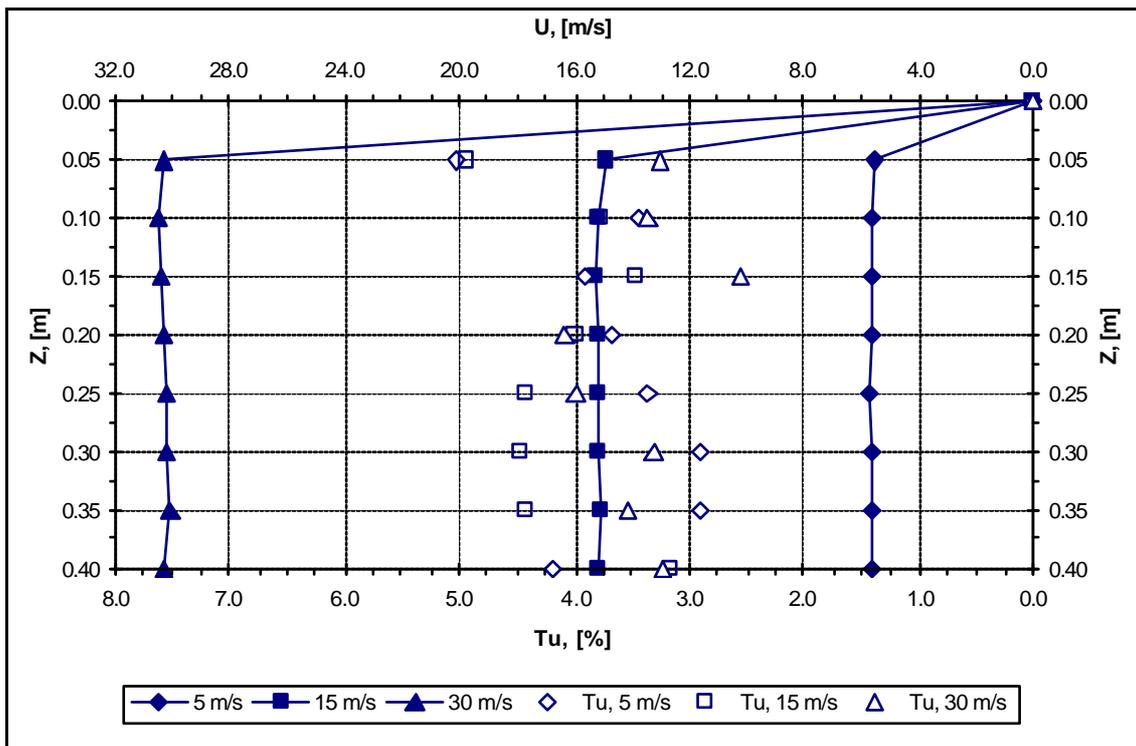


Figura 4.14 Perfiles de velocidad y turbulencia en X = 1.80 m, eje Y.

Tabla 4.4 Velocidad y turbulencia en $X = 1.80$ m, eje Z.

POSICIÓN [m]	5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	5.5	5.0	14.9	4.9	30.2	3.3
0.10	5.6	3.4	15.1	3.8	30.4	3.4
0.15	5.6	3.9	15.2	3.5	30.4	2.6
0.20	5.6	3.7	15.2	4.0	30.3	4.1
0.25	5.7	3.4	15.2	4.4	30.1	4.0
0.30	5.7	2.9	15.2	4.5	30.2	3.3
0.35	5.7	2.9	15.1	4.4	30.1	3.5
0.40	5.6	4.2	15.1	3.2	30.2	3.2

Figura 4.15 Perfiles de velocidad y turbulencia en $X = 1.80$ m, eje Z.

En la tabla 4.5 se muestran los datos de velocidad y turbulencia en el eje Y, para velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s y en la figura 4.16 se presentan los perfiles de velocidad y turbulencia en los ejes mencionados, en $X = 2.60$ m.

Tabla 4.5 Velocidad y turbulencia en X = 2.60 m, eje Y.

POSICIÓN [m]	5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	5.5	5.9	15.0	5.2	29.7	3.7
0.10	5.7	4.3	15.2	4.0	30.0	2.6
0.15	5.8	5.2	15.4	2.2	30.0	3.0
0.20	5.8	3.6	15.3	3.3	30.1	2.2
0.25	5.8	4.0	15.2	3.8	30.1	3.4
0.30	5.7	4.1	15.2	3.9	30.2	3.8

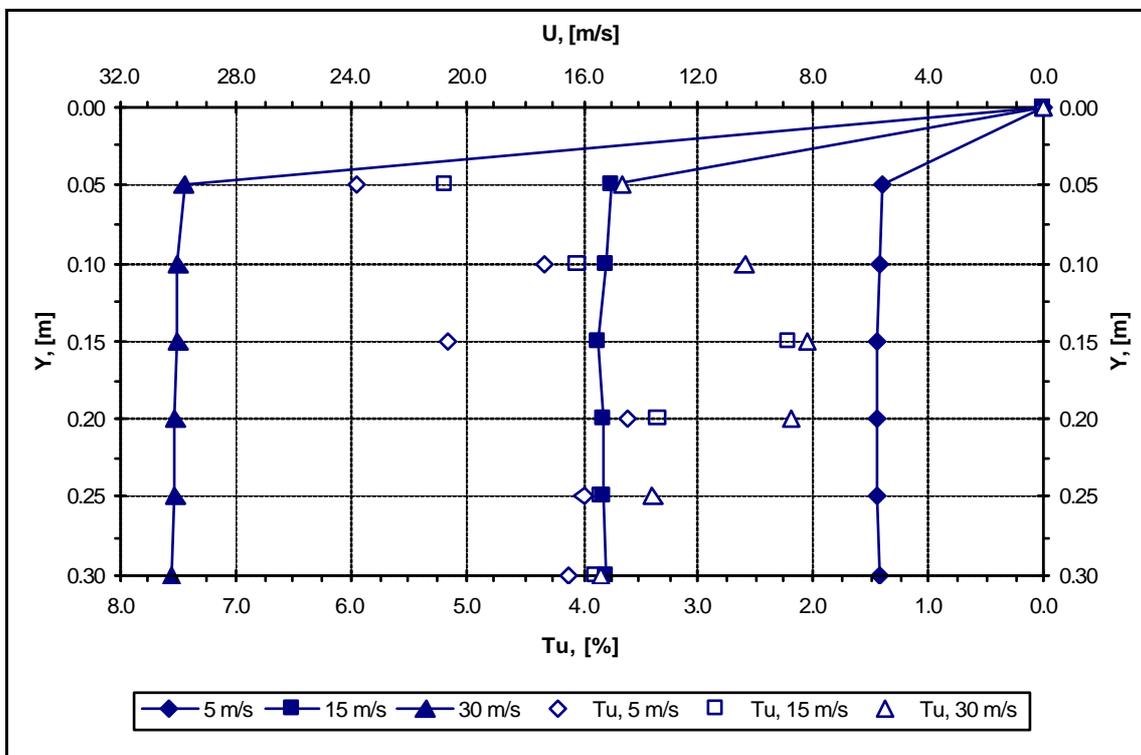


Figura 4.16 Perfiles de velocidad y turbulencia en X = 2.60 m, eje Y.

La tabla 4.6 presenta los datos de velocidad y turbulencia desde la pared lateral derecha (0.00 m) hasta el centro de la sección de pruebas (0.40 m) en el eje Z, para velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s. La figura 4.17 muestra los perfiles de velocidad y turbulencia a 2.60 m de la entrada del flujo a la sección de pruebas del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP.

Tabla 4.6 Velocidad y turbulencia en X = 2.60 m, eje Z.

POSICIÓN [m]	5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	5.6	4.5	14.9	5.1	29.2	6.3
0.10	5.7	2.8	15.2	3.1	30.1	4.4
0.15	5.7	3.6	15.3	2.5	30.2	3.6
0.20	5.8	3.8	15.3	3.1	30.2	4.6
0.25	5.7	4.1	15.3	3.1	30.1	4.0
0.30	5.8	3.6	15.2	3.9	30.1	4.0
0.35	5.8	3.0	15.3	3.0	30.1	4.1
0.40	5.7	4.1	15.2	3.9	30.2	3.8

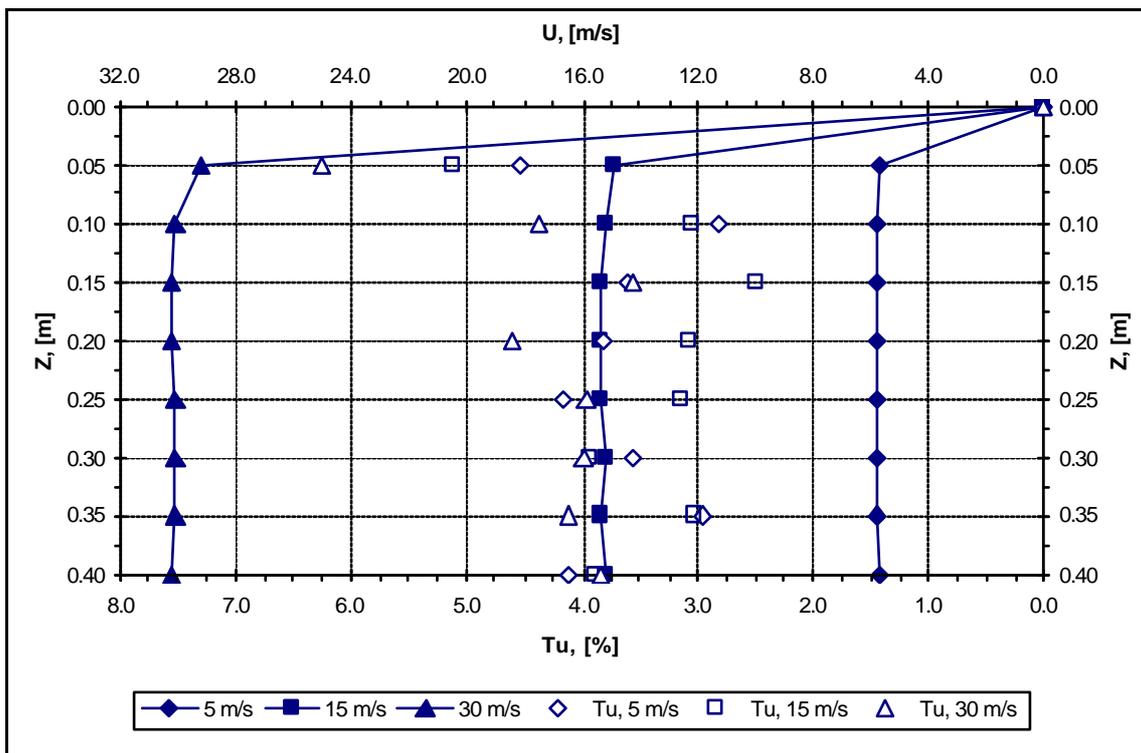


Figura 4.17 Perfiles de velocidad y turbulencia en el eje Z en X = 2.60 m.

En las tablas 4.7 y 4.8 se muestran los valores de velocidad y turbulencia, obtenidos con el anemómetro de hilo caliente en los ejes vertical y horizontal (Y y Z), para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s. Las figuras 4.18 y 4.19 presentan los perfiles de velocidad y turbulencia a 3.40 m de la entrada del flujo de aire a la sección de pruebas del túnel.

Tabla 4.7 Velocidad y turbulencia en $X = 3.40$ m, eje Y.

POSICIÓN [m]	5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	5.2	9.6	15.2	6.0	28.2	9.3
0.10	5.6	5.3	15.3	5.2	29.9	4.5
0.15	5.7	4.1	15.7	3.2	30.3	2.4
0.20	5.7	1.9	15.5	3.8	30.7	3.3
0.25	5.8	2.2	15.6	3.8	30.5	3.0
0.30	5.8	2.9	15.6	3.5	30.6	3.4

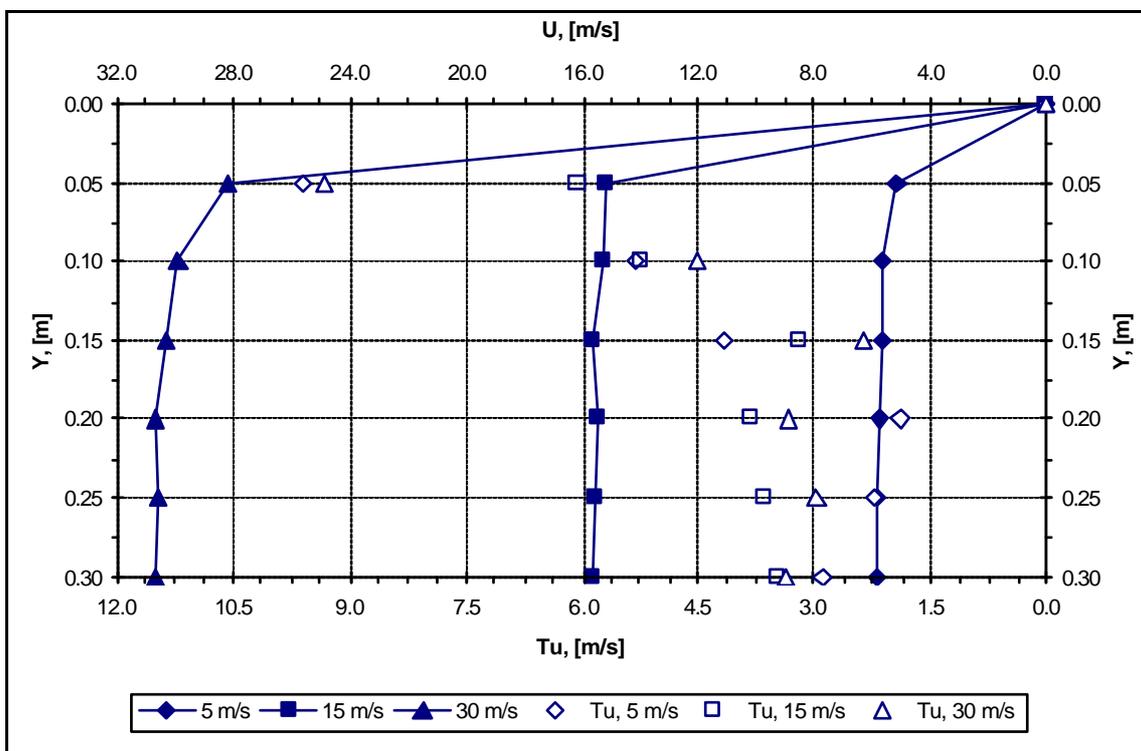
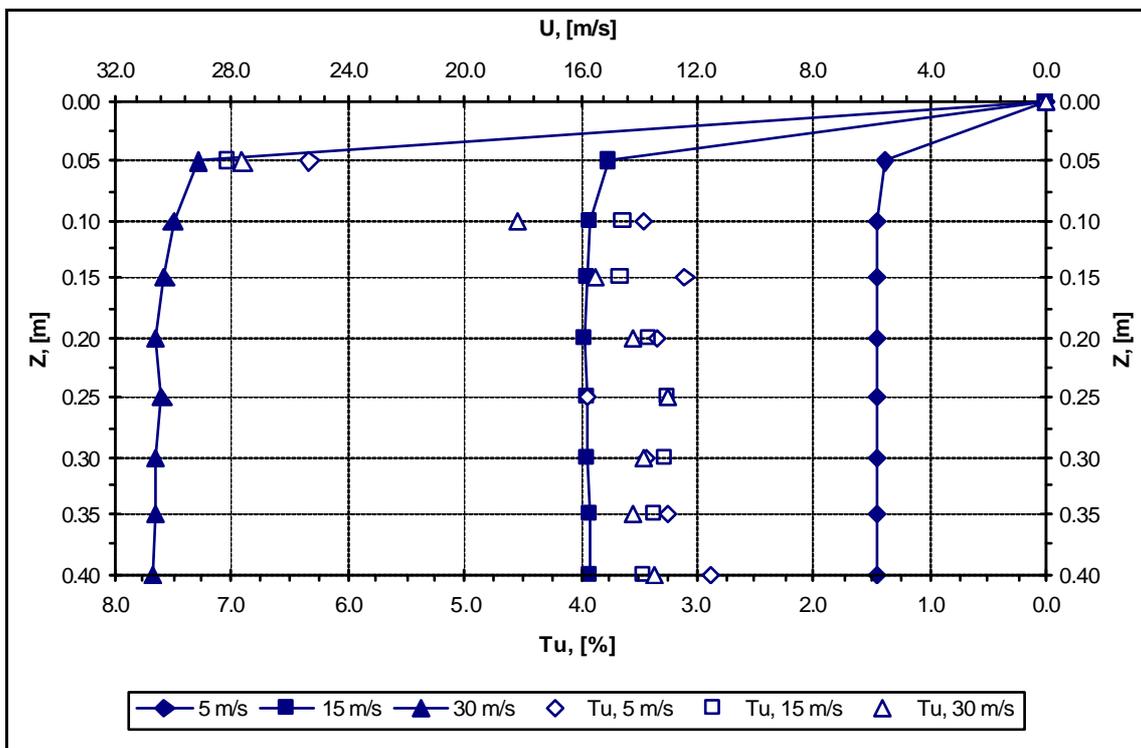


Figura 4.18 Perfiles de velocidad y turbulencia en $X = 3.40$ m, eje Y.

Tabla 4.8 Velocidad y turbulencia en $X = 3.40$ m, eje Z.

POSICIÓN [m]	5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]	U [m/s]	Tu [%]
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	5.6	6.3	15.0	7.0	29.1	6.9
0.10	5.8	3.5	15.7	3.6	29.9	4.5
0.15	5.8	3.1	15.7	3.7	30.3	3.9
0.20	5.8	3.3	15.8	3.4	30.6	3.6
0.25	5.8	3.9	15.7	3.3	30.4	3.3
0.30	5.8	3.4	15.8	3.3	30.6	3.5
0.35	5.8	3.2	15.7	3.4	30.6	3.5
0.40	5.8	2.9	15.6	3.5	30.6	3.4

Figura 4.19 Perfiles de velocidad y turbulencia en el eje Z en $X = 3.40$ m.

Determinados los perfiles de velocidad y turbulencia a lo largo de la sección de pruebas del túnel de viento para las posiciones, velocidades y ejes establecidos en la metodología experimental, se procedió a medir la capa límite a lo largo de la sección de pruebas, etapa que se presenta a continuación.

4.3 CAPA LÍMITE EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS

La segunda etapa experimental fue la medición de la capa límite en las mismas posiciones y ejes que los perfiles de velocidad. En esta etapa se realizaron las mediciones con la sonda 55P15, marca DANTEC, que permite acercarse a las paredes de la sección de pruebas.

La sonda 55P15 se calibró en la unidad de flujo del sistema de anemometría de hilo caliente en 20 puntos en un intervalo de velocidad de 0.50 m/s a 50 m/s. Los datos de calibración al igual que la sonda 55P11, se ajustaron a un polinomio de cuarto orden que relaciona la velocidad U con la caída de tensión a través del sensor, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$U = 31.830399 - 76.193344 E_{\text{cor}} + 76.848557 E_{\text{cor}}^2 - 40.877472 E_{\text{cor}}^3 + 9.547359 E_{\text{cor}}^4 \quad (4.2)$$

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestra la curva de calibración de la sonda 55P15 y la distribución de errores, para el intervalo de calibración de 0.50 m/s a 50 m/s, el cual cubre las velocidades propuestas en la metodología experimental.

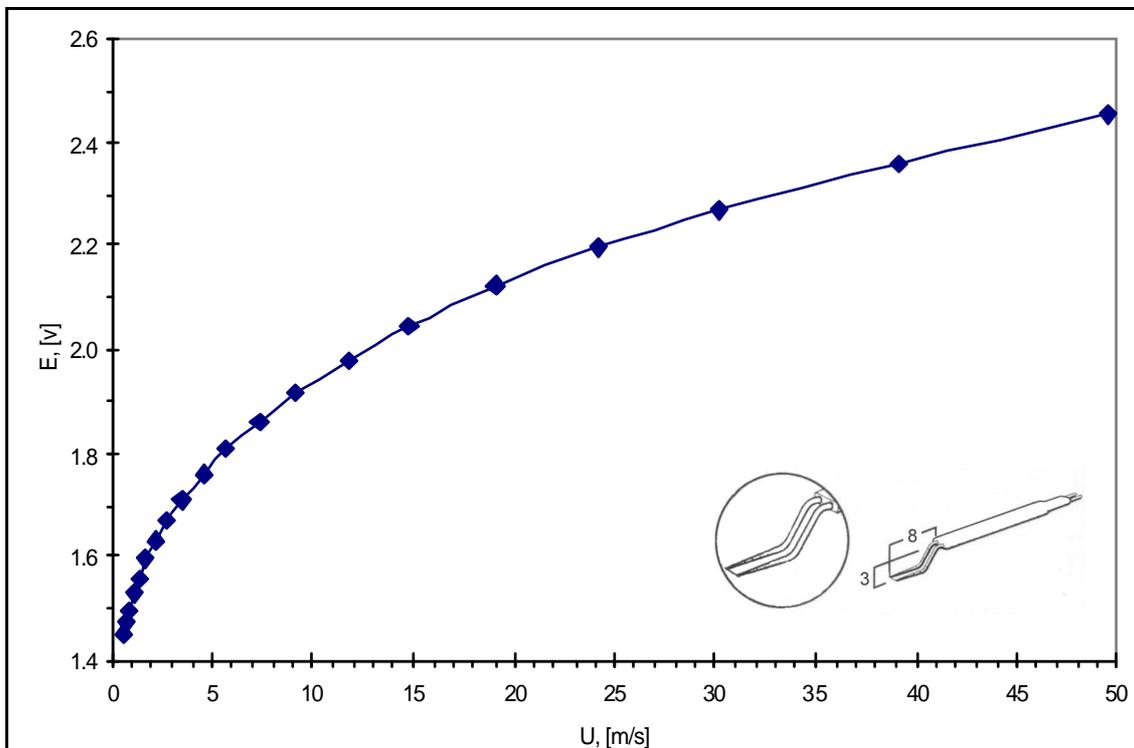


Figura 4.20 Curva típica de calibración de la sonda 55P15.

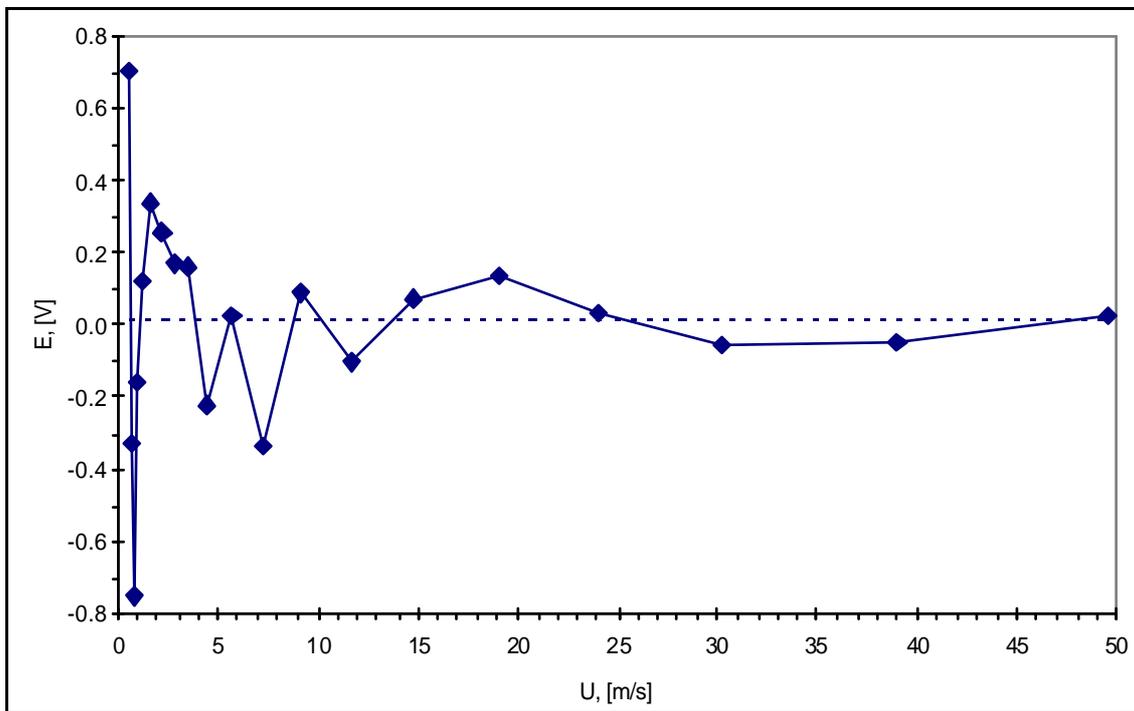


Figura 4.21 Errores de la curva de calibración de la sonda 55P15.

Realizada la calibración de la sonda 55P15 empleada para medir capa límite se instaló en el sistema posicionador y se programó un mallado con el software del sistema de anemometría caliente. El mallado se hizo para 40 puntos con incrementos de 0.005 m y la medición más próxima a la pared superior y lateral derecha se efectuó a 0.005 m, lo que permitió realizar un barrido en los 0.20 m próximos a las paredes de la sección de pruebas.

Las tablas 4.9, 4.10 y 4.11 presentan los datos de velocidad y turbulencia en las posiciones $X = 1.80$ m, $X = 2.60$ m y $X = 3.40$ respectivamente, para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, en los ejes Y y Z. La adquisición de datos en esta etapa se hizo con una frecuencia de muestreo de 30 kHz y un tiempo de muestreo de 30 s, como se determinó en la metodología experimental, por lo cual cada valor de velocidad es el promedio de 900 000 datos registrados.

Las figuras 4.22 y 4.23 presentan los perfiles de velocidad y turbulencia en la capa límite en los ejes Y y Z en la posición $X = 1.80$ m, para las velocidades mencionadas anteriormente. Las figuras 4.24 a 4.27 muestran los mismos parámetros en la capa límite en las posiciones $X = 2.60$ m y $X = 3.40$ m, en los ejes Y y Z, para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s.

Tabla 4.9 Velocidad y turbulencia en la capa límite en $X = 1.80$ m, ejes Y y Z.

Y, Z [m]	EJE Y						EJE Z					
	5 m/s		15 m/s		30 m/s		5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.005	4.1	15.3	11.9	12.0	20.6	13.4	4.0	14.7	11.4	12.8	22.5	13.0
0.010	4.6	12.4	13.9	9.7	25.3	11.7	4.6	13.0	13.3	11.1	26.5	10.4
0.015	4.8	11.5	15.2	6.8	27.6	8.4	4.9	10.4	14.0	10.0	27.4	9.4
0.020	5.1	8.1	15.3	6.4	28.4	9.3	4.9	9.1	14.1	8.8	29.0	8.1
0.025	5.3	6.8	15.6	4.3	30.5	4.2	5.0	9.5	14.7	7.2	30.1	6.3
0.030	5.3	5.6	15.7	3.6	30.0	6.3	5.4	6.3	14.8	6.9	30.6	4.9
0.035	5.2	6.3	15.8	1.9	30.6	3.9	5.5	3.9	15.0	5.1	30.4	5.8
0.040	5.3	4.7	15.7	2.5	31.0	1.8	5.5	2.0	15.0	5.5	30.7	4.8
0.045	5.3	4.1	16.0	1.3	30.9	2.0	5.5	4.2	15.3	3.3	30.9	3.8
0.050	5.3	4.6	15.9	1.0	30.6	4.0	5.5	4.4	15.4	2.8	30.9	3.7
0.055	5.4	4.3	15.8	1.8	30.6	3.3	5.6	2.8	15.4	3.0	31.5	2.4
0.060	5.2	4.5	15.9	2.2	30.9	2.2	5.5	2.2	15.3	3.2	31.4	2.8
0.065	5.3	4.6	15.8	2.0	31.0	2.4	5.5	3.4	15.3	2.8	31.0	4.2
0.070	5.4	3.2	15.5	2.9	31.0	2.4	5.5	3.0	15.5	3.3	31.3	3.4
0.075	5.5	3.5	15.9	2.5	31.0	1.2	5.5	3.5	15.4	3.7	31.2	3.6
0.080	5.4	3.3	15.9	2.5	30.9	1.9	5.5	3.8	15.3	3.8	31.2	3.5
0.085	5.5	3.0	15.9	2.8	30.8	2.2	5.5	1.7	15.3	3.9	31.3	3.8
0.090	5.4	3.8	15.9	1.8	31.1	1.4	5.5	3.0	15.2	4.2	31.4	4.2
0.095	5.4	3.9	15.8	1.6	31.0	1.4	5.5	3.1	15.2	4.3	31.3	3.8
0.100	5.5	3.0	15.8	1.3	31.1	2.2	5.5	3.2	15.2	4.6	31.3	4.3
0.105	5.5	2.6	15.9	1.8	30.9	2.3	5.6	1.8	15.3	3.9	31.2	3.5
0.110	5.4	3.0	15.9	1.7	30.9	3.2	5.6	1.8	15.5	3.2	31.3	2.6
0.115	5.3	3.4	15.7	3.8	31.0	1.7	5.6	1.7	15.2	3.4	31.0	2.3
0.120	5.4	3.8	15.8	2.5	31.0	1.3	5.5	2.5	15.2	4.2	31.4	2.1
0.125	5.4	3.0	15.7	2.8	31.1	1.5	5.6	3.4	15.3	3.8	30.8	4.2
0.130	5.4	2.9	15.7	2.1	30.9	1.8	5.5	2.8	15.4	2.9	31.1	4.3
0.135	5.4	3.5	15.8	3.5	31.0	2.6	5.5	1.7	15.5	3.4	31.1	3.8
0.140	5.4	3.6	15.6	4.7	30.9	2.0	5.5	1.4	15.3	3.5	31.2	3.6
0.145	5.4	3.0	15.7	3.1	30.9	1.9	5.5	2.2	15.5	2.6	31.1	4.3
0.150	5.4	3.8	15.7	3.2	30.9	3.8	5.6	2.9	15.5	1.8	31.1	4.5
0.155	5.4	3.3	15.5	4.1	30.8	3.7	5.6	2.4	15.5	2.6	31.2	3.1
0.160	5.4	2.7	15.6	3.2	30.9	2.3	5.6	2.6	15.5	2.0	31.0	1.9
0.165	5.4	3.7	15.7	2.8	30.8	2.5	5.6	2.6	15.3	3.9	31.3	3.0
0.170	5.4	3.1	15.7	3.4	30.8	2.6	5.5	2.6	15.2	3.7	31.3	4.5
0.175	5.4	2.7	15.8	2.3	31.0	2.7	5.6	2.8	15.2	3.7	31.0	4.0
0.180	5.5	1.9	15.7	1.7	30.9	2.0	5.5	4.9	15.3	3.9	31.1	3.8
0.185	5.5	2.4	15.8	2.4	30.9	2.6	5.5	3.3	15.4	3.0	31.0	4.5
0.190	5.4	2.1	15.8	3.4	30.8	2.7	5.6	2.7	15.3	3.6	31.0	4.4
0.195	5.4	3.2	15.7	2.5	30.6	4.1	5.5	4.2	15.4	3.6	31.0	4.1
0.200	5.4	3.0	15.8	3.4	30.8	2.7	5.5	3.7	15.4	3.7	30.8	4.7

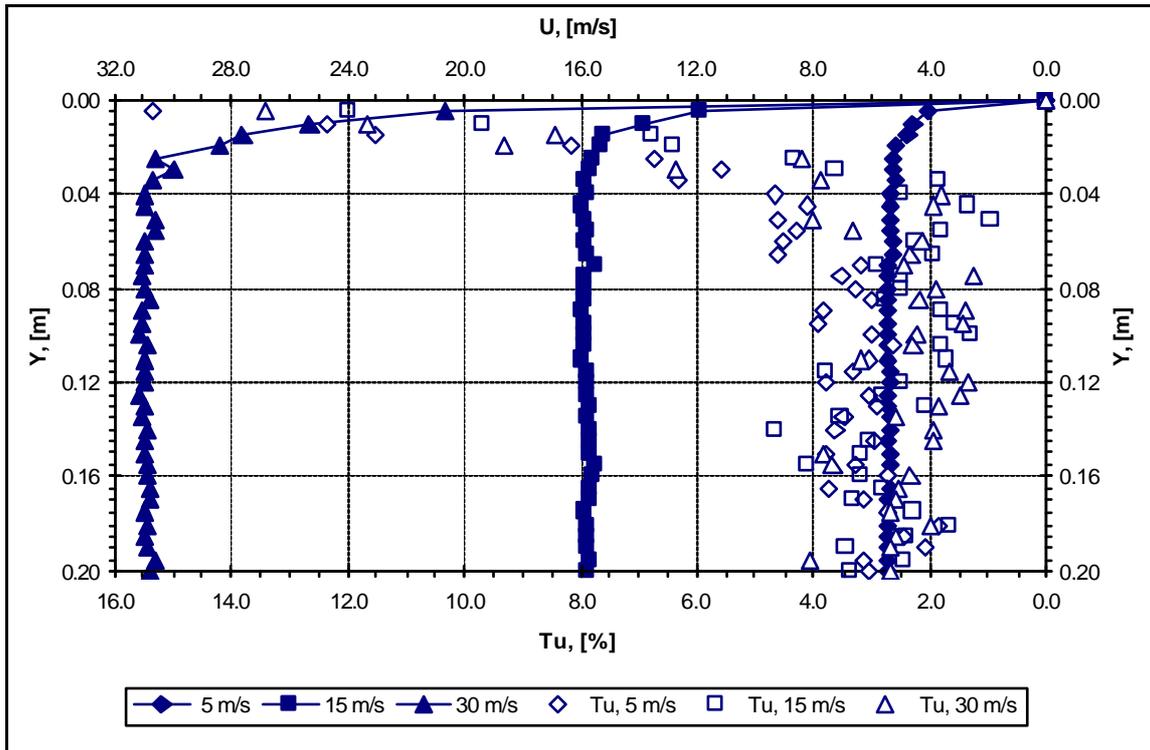


Figura 4.22 Capa límite en $X = 1.80$ m, eje Y.

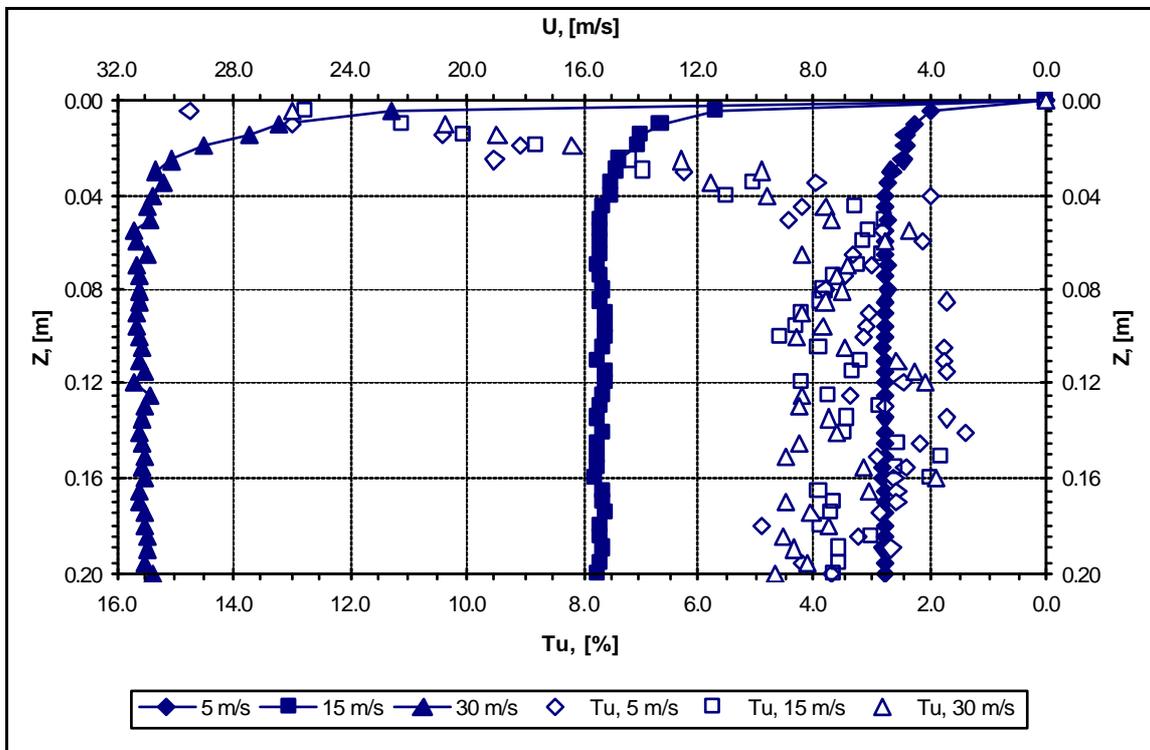


Figura 4.23 Capa límite en $X = 1.80$ m, eje Z.

Tabla 4.10 Velocidad y turbulencia en la capa límite en $X = 2.60$ m, ejes Y y Z.

Y, Z [m]	EJE Y						EJE Z					
	5 m/s		15 m/s		30 m/s		5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.005	4.0	15.2	10.5	14.6	19.2	15.6	4.7	13.5	11.4	13.4	23.2	12.1
0.010	4.5	13.1	12.1	13.4	23.7	12.2	5.0	12.0	13.5	10.8	23.9	12.4
0.015	4.7	12.1	12.3	12.9	25.3	12.0	4.9	12.4	14.0	10.1	26.7	9.6
0.020	5.1	11.1	14.0	8.7	26.5	11.2	5.4	7.6	14.5	8.3	27.7	9.7
0.025	5.1	10.5	14.3	8.9	25.7	11.5	5.3	9.0	14.7	6.8	28.3	8.1
0.030	5.5	6.7	14.1	9.2	28.2	9.1	5.1	11.1	14.6	7.3	29.0	7.4
0.035	5.1	9.3	14.2	9.6	29.3	7.5	5.3	7.7	14.9	6.5	29.3	6.4
0.040	5.5	7.4	14.8	6.0	29.6	6.3	5.2	7.3	15.1	4.5	29.9	5.0
0.045	5.3	7.7	15.0	5.3	29.5	7.5	5.6	4.1	15.3	4.5	29.8	5.1
0.050	5.3	7.9	14.7	6.1	30.0	5.5	5.6	3.7	15.4	4.1	29.8	4.4
0.055	5.3	7.2	15.2	4.4	30.0	5.0	5.6	2.5	15.4	3.5	30.0	4.3
0.060	5.4	5.9	14.6	6.3	29.9	4.5	5.6	2.9	15.4	3.1	30.4	4.1
0.065	5.6	4.1	14.7	5.4	30.5	3.5	5.5	3.9	15.4	3.7	30.3	3.9
0.070	5.6	3.1	14.9	5.9	30.6	3.8	5.6	3.5	15.3	3.2	30.3	4.2
0.075	5.6	2.4	14.9	4.2	30.3	4.2	5.5	4.5	15.3	3.3	30.4	2.9
0.080	5.6	4.3	15.1	3.8	30.6	3.7	5.6	3.7	15.4	2.8	30.3	2.1
0.085	5.6	4.4	15.3	2.1	30.6	3.7	5.6	4.2	15.1	3.4	30.2	2.5
0.090	5.7	2.5	15.5	2.1	30.8	3.2	5.6	4.4	15.1	3.4	30.1	4.0
0.095	5.6	4.4	15.3	3.5	30.8	2.3	5.6	4.4	15.4	2.8	30.2	3.7
0.100	5.6	4.6	15.3	2.6	30.9	2.2	5.7	3.6	15.4	2.4	30.2	3.7
0.105	5.5	4.5	15.3	4.1	30.5	3.2	5.7	3.6	15.4	3.0	30.4	3.5
0.110	5.7	4.2	15.3	3.1	30.3	4.0	5.6	2.4	15.4	3.6	30.3	2.7
0.115	5.7	3.4	15.3	3.2	30.4	3.4	5.6	2.0	15.4	3.9	30.3	4.0
0.120	5.6	3.6	15.3	3.2	30.7	2.7	5.6	2.8	15.4	3.7	30.4	3.4
0.125	5.7	2.8	15.3	3.6	30.5	3.1	5.6	4.2	15.2	3.6	30.4	4.1
0.130	5.7	2.3	15.4	3.0	30.6	2.5	5.6	4.1	15.3	3.2	30.4	3.9
0.135	5.7	2.2	15.2	3.9	30.5	3.1	5.5	4.6	15.2	3.2	30.5	3.6
0.140	5.6	3.4	15.4	3.0	30.6	2.8	5.7	2.6	15.3	3.1	30.3	4.0
0.145	5.6	1.9	15.4	2.7	30.7	2.9	5.7	2.7	15.4	2.9	30.3	3.6
0.150	5.7	2.6	15.5	1.7	30.3	4.0	5.7	2.8	15.4	2.8	30.0	3.9
0.155	5.7	2.9	15.5	2.0	30.6	3.5	5.6	3.3	15.2	3.3	30.2	3.8
0.160	5.6	3.6	15.3	3.2	30.5	3.3	5.6	2.4	15.4	3.0	29.9	3.9
0.165	5.6	3.4	15.3	3.1	30.5	3.3	5.7	2.5	15.4	3.3	30.0	4.4
0.170	5.6	3.9	15.3	4.1	30.5	2.9	5.7	2.9	15.3	2.8	29.9	4.4
0.175	5.7	3.6	15.4	4.0	30.5	2.8	5.7	3.3	15.3	3.0	30.2	4.2
0.180	5.7	3.8	15.6	1.5	30.3	3.9	5.7	3.6	15.3	2.6	30.0	4.1
0.185	5.5	3.2	15.4	3.0	30.5	2.8	5.7	3.1	15.3	2.2	30.1	4.0
0.190	5.6	3.4	15.4	2.5	30.6	2.7	5.6	4.0	15.3	3.0	30.1	3.9
0.195	5.6	3.7	15.6	2.0	30.5	3.8	5.7	3.5	15.3	3.0	30.1	3.3
0.200	5.6	3.6	15.5	1.7	30.5	3.2	5.7	3.6	15.2	3.3	30.1	3.5

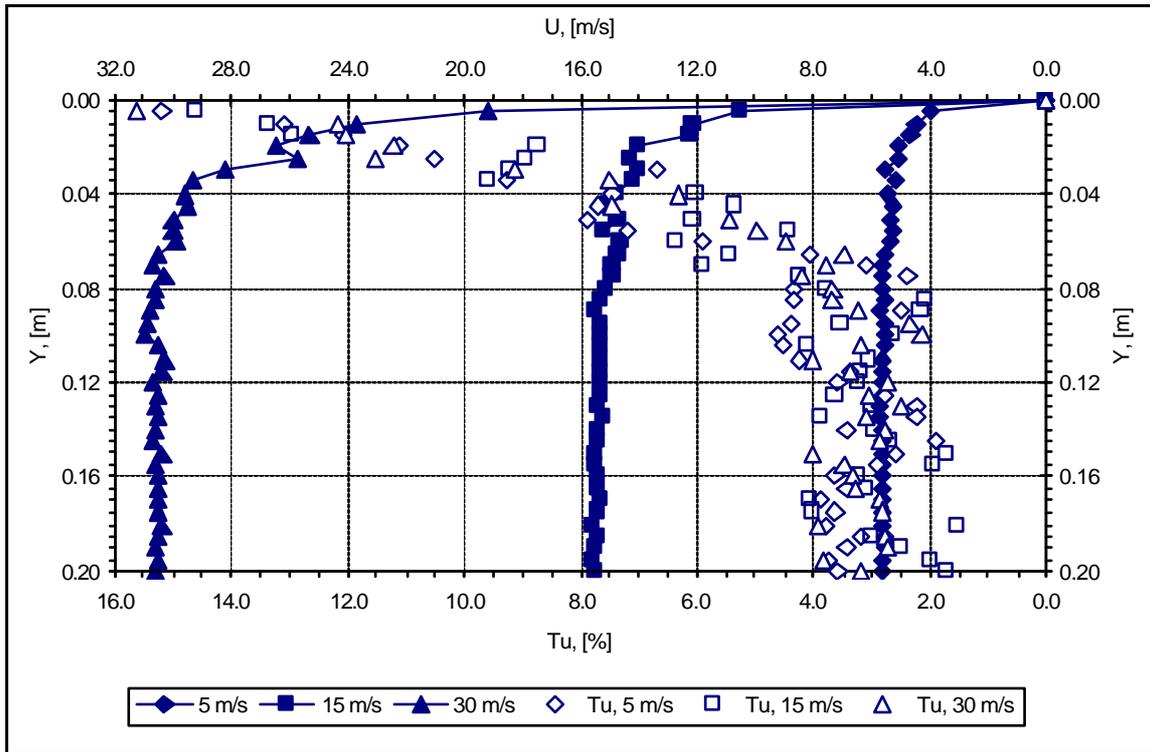


Figura 4.24 Capa límite en $X = 2.60$ m, eje Y.

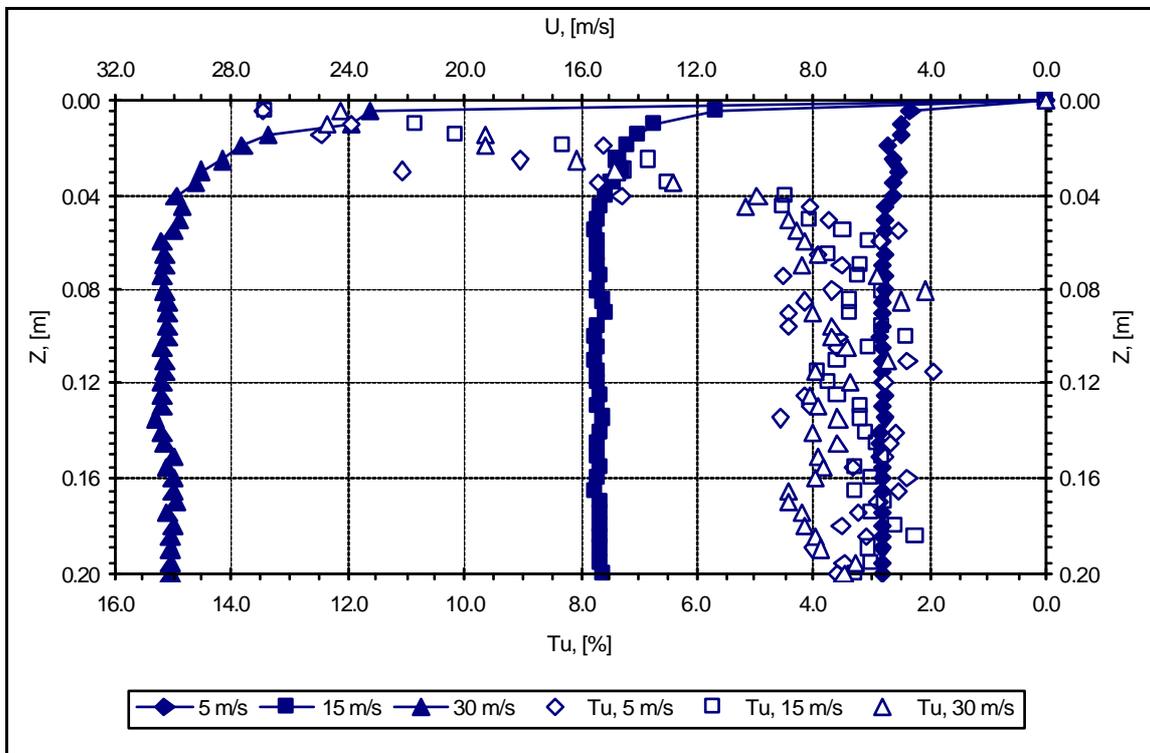


Figura 4.25 Capa límite en $X = 2.60$ m, eje Z.

Tabla 4.11 Velocidad y turbulencia en la capa límite en $X = 3.40$ m, ejes Y y Z.

Y, Z [m]	EJE Y						EJE Z					
	5 m/s		15 m/s		30 m/s		5 m/s		15 m/s		30 m/s	
	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu	U	Tu
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.005	4.5	12.4	12.2	13.0	22.9	13.8	4.0	16.1	10.3	15.8	19.8	14.8
0.010	4.8	14.1	13.6	10.4	23.9	14.1	4.7	13.6	12.0	12.5	24.1	12.3
0.015	4.8	11.9	14.4	9.1	26.4	11.7	4.7	12.9	13.7	9.8	25.9	12.1
0.020	4.8	12.7	13.0	12.5	26.3	11.6	5.0	12.7	13.9	10.1	26.6	11.4
0.025	5.3	9.7	15.0	8.1	27.1	11.1	5.4	10.0	14.8	6.1	27.2	10.3
0.030	5.4	9.4	15.2	5.7	28.2	10.3	5.3	11.0	14.0	9.5	27.9	9.0
0.035	5.5	8.3	15.5	4.5	29.0	8.4	5.5	10.6	14.5	8.6	28.9	7.5
0.040	5.3	8.2	15.6	3.6	29.4	7.3	5.3	9.6	15.0	5.4	29.1	7.3
0.045	5.5	7.2	15.4	3.4	29.6	7.3	5.7	7.1	15.3	4.3	28.8	7.5
0.050	5.5	6.8	15.2	5.2	29.5	7.3	5.7	6.5	15.2	5.1	29.6	6.1
0.055	5.7	5.9	15.5	2.6	29.0	7.9	5.7	5.9	14.9	6.1	29.4	6.6
0.060	5.6	4.8	15.2	4.5	29.7	6.4	5.6	7.8	15.4	4.1	29.9	5.4
0.065	5.6	5.6	15.5	4.3	30.3	5.1	5.8	5.3	15.2	4.6	30.0	5.5
0.070	5.7	4.0	15.5	3.0	30.1	5.7	5.8	5.4	15.3	3.0	30.2	4.1
0.075	5.6	6.2	15.5	3.1	30.8	4.4	5.8	5.2	15.1	4.0	30.1	4.7
0.080	5.5	6.5	15.6	2.7	30.6	5.6	5.9	4.1	15.2	2.8	30.3	4.6
0.085	5.6	4.1	15.6	2.4	30.7	4.4	5.9	4.1	15.3	2.8	30.1	4.7
0.090	5.7	2.8	15.4	2.8	30.2	4.3	5.9	4.0	15.5	2.3	30.5	3.8
0.095	5.7	3.1	15.5	2.9	30.8	3.2	5.9	2.8	15.2	4.1	30.5	3.5
0.100	5.7	4.9	15.5	2.3	30.5	4.0	5.9	3.6	15.2	4.1	30.1	4.6
0.105	5.6	5.0	15.5	2.4	31.1	2.3	5.9	3.8	15.3	3.2	30.4	4.4
0.110	5.7	2.8	15.5	2.2	30.9	2.8	5.9	3.8	15.4	2.8	30.3	4.3
0.115	5.8	2.7	15.5	2.9	30.6	3.8	5.8	3.2	15.4	2.8	30.4	3.7
0.120	5.8	3.3	15.5	2.5	30.2	4.3	5.9	4.0	15.3	3.6	30.4	2.8
0.125	5.8	2.2	15.4	3.7	30.7	3.5	5.8	3.4	15.3	3.2	30.5	3.6
0.130	5.7	2.8	15.6	2.9	30.8	3.9	5.9	3.0	15.3	2.8	30.4	3.8
0.135	5.6	5.3	15.5	2.8	30.8	3.2	5.9	3.5	15.3	3.7	30.5	3.4
0.140	5.6	4.0	15.5	2.9	30.7	3.8	5.8	3.1	15.4	3.2	30.2	4.7
0.145	5.7	4.7	15.5	2.8	30.9	2.7	5.9	3.0	15.3	2.7	30.4	3.4
0.150	5.6	4.4	15.5	2.9	31.0	3.0	5.9	3.0	15.4	2.6	30.4	3.3
0.155	5.7	4.0	15.4	2.6	30.9	3.1	5.9	3.3	15.4	2.3	30.1	3.8
0.160	5.6	4.7	15.4	2.8	30.9	3.1	5.9	2.3	15.4	3.0	30.2	4.7
0.165	5.6	4.5	15.4	3.5	30.9	2.7	5.8	2.5	15.3	3.0	30.3	4.1
0.170	5.7	3.5	15.4	3.1	30.8	3.2	5.8	2.9	15.3	3.2	30.2	4.0
0.175	5.6	4.2	15.6	2.9	31.0	3.3	5.9	3.1	15.3	2.8	30.3	4.1
0.180	5.7	4.2	15.4	3.5	31.0	2.8	5.8	3.3	15.4	2.7	30.5	4.0
0.185	5.6	4.5	15.4	3.1	31.0	2.9	5.8	3.5	15.4	3.3	30.4	4.2
0.190	5.7	3.7	15.6	3.7	31.0	3.2	5.8	3.4	15.4	3.6	30.2	4.2
0.195	5.5	5.0	15.5	2.7	31.0	3.0	5.8	2.6	15.3	4.1	30.1	3.5
0.200	5.7	2.6	15.5	3.0	30.9	2.9	5.8	3.3	15.2	3.1	30.4	3.5

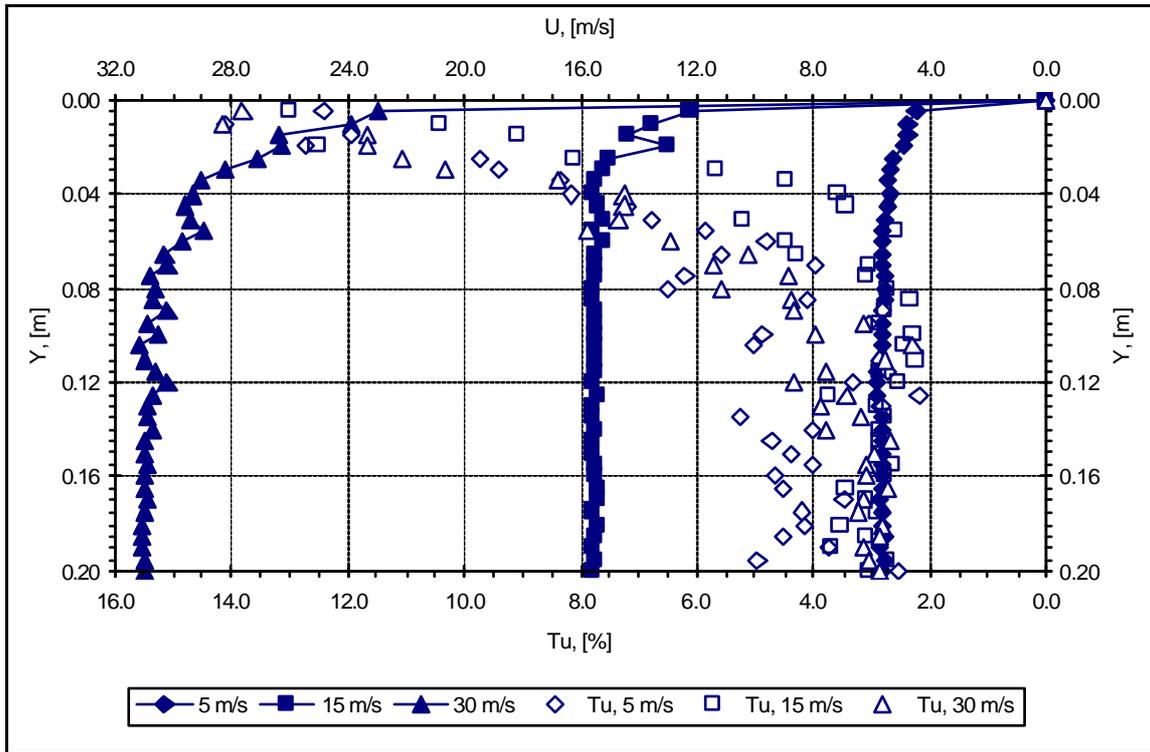


Figura 4.26 Capa límite en $X = 3.40$ m, eje Y.

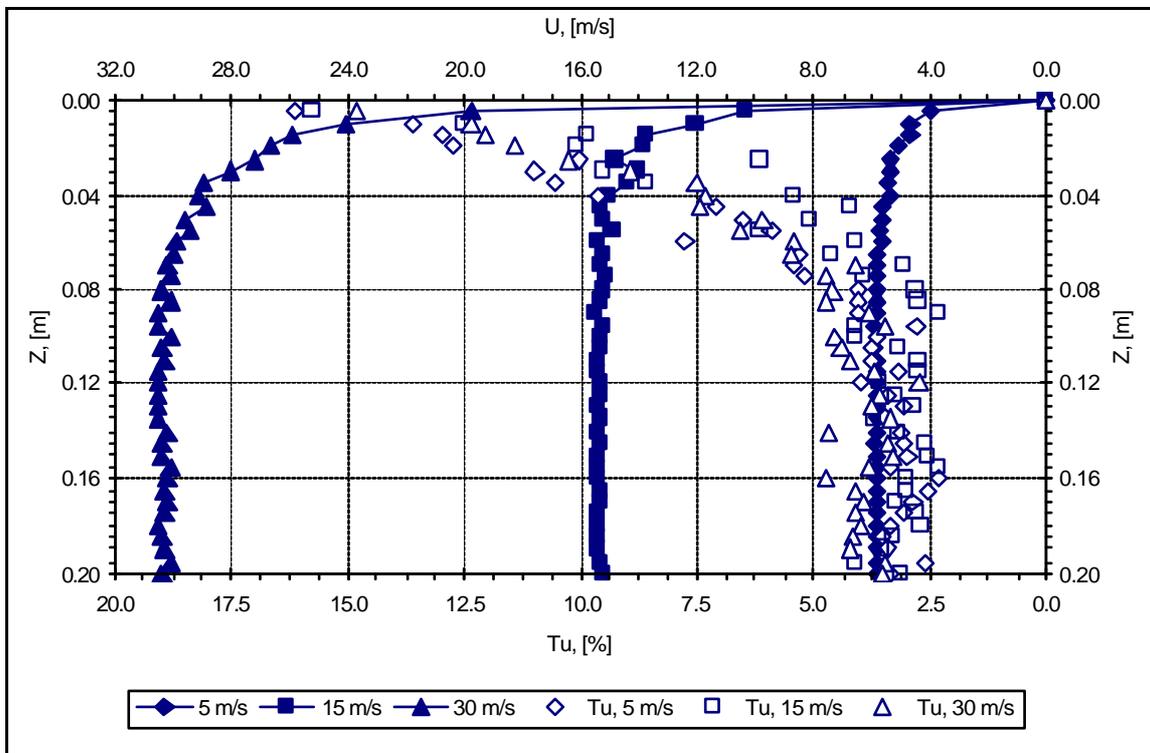


Figura 4.27 Capa límite en $X = 3.40$ m, eje Z.

Con la medición de la capa límite en las paredes superior y lateral derecha de la sección de pruebas y los perfiles de velocidad, se tienen los dos parámetros con los cuales, se establecerá la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad en un intervalo de 5 m/s a 30 m/s en el túnel de viento del LABINTHAP.

4.4 TURBULENCIA EN LA ZONA DE CALIBRACIÓN

De los perfiles de velocidad en los ejes Y y Z a lo largo de la sección de pruebas (figuras 4.14 a 4.19), se observa que el mejor comportamiento del flujo de aire en el túnel se tiene en las posiciones $X = 1.80$ m y $X = 2.60$ m. En el último plano de medición $X = 3.40$ m los perfiles de velocidad son aceptables, pero se reduce la zona no afectada por las paredes en ambos ejes, lo cual se hace más notable para las velocidades de 15 m/s y 30 m/s.

Por otra parte, las mediciones en la capa límite en los ejes Y y Z (figuras 4.22 a 4.27) en $X = 1.80$ m, $X = 2.60$ m y $X = 3.40$ m, confirman lo observado en los perfiles de velocidad. Por lo tanto la zona propuesta para la calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire en el intervalo de 5 m/s a 30 m/s, se ubicará desde $X = 1.80$ m hasta $X = 3.40$ m, en la región donde no se tenga el efecto de las paredes.

Ubicada la zona de calibración, se procedió a medir la turbulencia en el centro de esta, en la posición $X = 2.40$ m, en un intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s con nueve puntos intermedios. Esta medición se efectuó con la sonda 55P11, con una frecuencia y tiempo de muestreo de 30 kHz y 30 s respectivamente. En la Tabla 4.12, se muestran los datos de velocidad y turbulencia en el centro de la zona de calibración para el intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s.

Tabla 4.12 Velocidad y turbulencia en el centro de la zona de calibración, $X = 2.60$ m.

U [m/s]	Tu [%]
5.7	3.2
8.4	3.2
10.9	3.8
13.3	4.3
15.8	3.9
18.4	3.5
20.6	3.4
23.3	3.5
25.7	3.5
28.0	3.2
30.3	3.5

Los datos presentados en la tabla anterior se graficaron, obteniéndose el comportamiento de la turbulencia en el centro de la zona de calibración para las velocidades mencionadas, como se muestra en la figura 4.28. En esta figura se observa que la turbulencia en la zona de calibración es menor a 4.3 % en todo el intervalo de velocidades en el cual se calibrarán los instrumentos de medición de velocidad de aire.

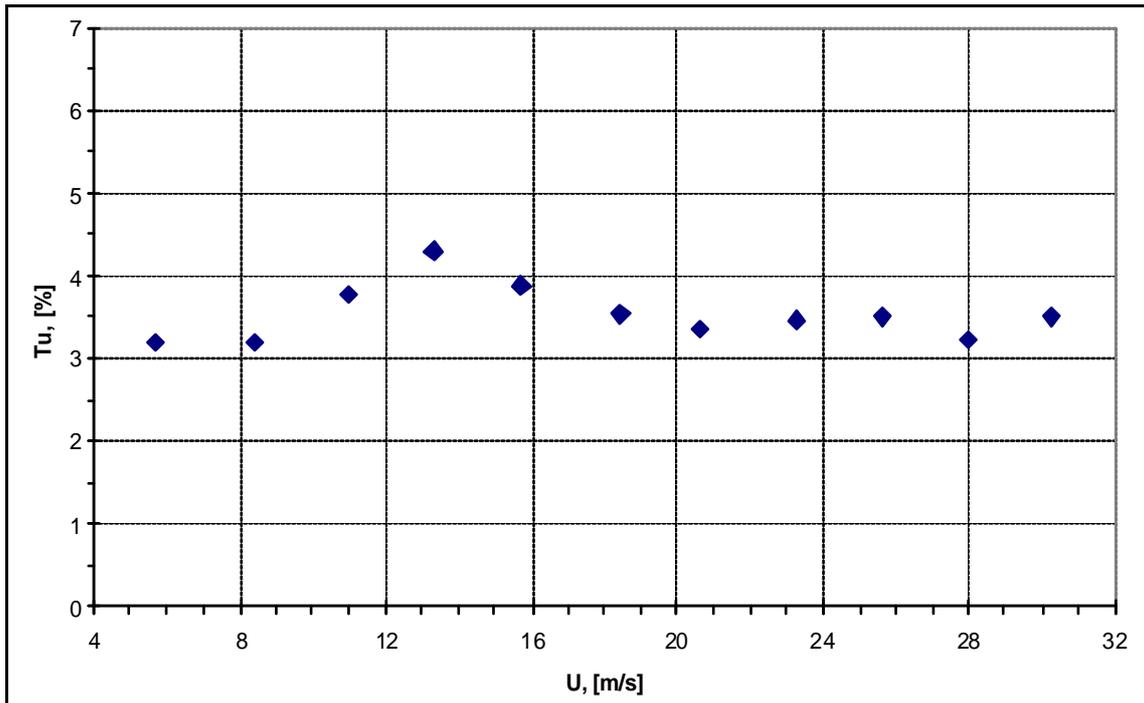


Figura 4.28 Turbulencia en la zona de calibración ($X = 2.40$ m).

Realizadas las mediciones de los perfiles de velocidad y turbulencia, y capa límite a lo largo de la sección de pruebas para 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, en los ejes Y y Z, para establecer la zona de calibración en el túnel de viento del LABINTHAP y efectuadas las mediciones de turbulencia en el centro de la misma en $X = 2.40$ m; en el siguiente capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos en la etapa experimental de este trabajo.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de los perfiles de velocidad, capa límite en la sección de pruebas del túnel de viento, determinación de la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire y turbulencia en ésta, para el intervalo de velocidad de 5.0 m/s a 30.0 m/s.

5.1 PERFILES DE VELOCIDAD

De los perfiles de velocidad en los ejes vertical y horizontal (X y Y), con el tubo Pitot y la entrada acampanada colocada al inicio de la sección de pruebas (figuras 4.8 a 4.10); en $X = 1.80$ m, $X = 2.60$ m y $X = 3.40$ m para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, se observa que en el eje Y se tiene un gradiente de velocidad mayor en la pared inferior que en la pared superior para las tres velocidades empleadas, siendo esto más notable para 30 m/s.

Para este caso, en $X = 1.80$ m, $X = 2.60$ m y $X = 3.40$ m, las velocidades obtenidas en $Y = 0.55$ m son 30.9 m/s, 30.5 m/s y 28.7 m/s respectivamente; teniéndose la velocidad de corriente libre ≈ 33.9 m/s en $Y = 0.45$ m, $Y = 0.40$ m y $Y = 0.35$ m para las posiciones mencionadas. En la pared superior la velocidad de corriente libre se obtuvo en $Y = 0.10$ m para $X = 1.80$ m, $Y = 0.15$ m en $X = 2.60$ m y en la posición $X = 3.40$ m en $Y = 0.20$ m.

Los perfiles de velocidad en Z (eje horizontal), sólo se obtuvieron en la zona central de este (de 0.20 m a 0.60 m). En donde se tiene la velocidad de corriente libre, la variación de velocidad en este eje es de $\pm 1\%$. Con este arreglo se tendría una zona de calibración en $X = 1.80$ m de 0.35 m por 0.40 m, para $X = 2.60$ m de 0.25 m por 0.40 m y en $X = 3.40$ se tendría una zona de 0.15 m por 0.35 m.

Esta configuración del túnel de viento no sería recomendable para realizar la calibración de instrumentos de medición de velocidad, debido a que una de las principales condiciones que se busca satisfacer es que los perfiles de velocidades tengan un comportamiento aceptable en el lugar donde se realizará la calibración, requerimiento que no se cumple aquí ya que los centros de las zonas de calibración estarían arriba del centro de la sección de pruebas del túnel, como resultado de los gradientes de velocidad mayores en la pared inferior de la sección de pruebas.

Con la instalación de la tobera con relación de áreas de 9, se mejoró el comportamiento del flujo de aire en el túnel de viento, como se aprecia en la figura 4.11, en la que se muestran los perfiles de velocidad obtenidos con el anemómetro de hilo caliente en $X = 3.40$ m, en los mismo ejes y posiciones que los perfiles obtenidos con el tubo Pitot. La elección de esta posición se debe a que en este plano se presentó el peor comportamiento de los perfiles de velocidad medidos con el tubo Pitot como se ve en la figura 4.10.

De los perfiles de velocidad obtenidos con el anemómetro de hilo caliente con la tobera en la entrada de la sección de pruebas, se observa un mejoramiento en los perfiles de velocidad, en donde los gradientes de velocidad en la pared superior e inferior (eje Y) se tienen hasta una distancia de 0.1 m de ambas paredes. En el eje Z (horizontal), en la parte central (0.20 m a 0.60 m) se tiene un comportamiento aceptable de los perfiles de velocidad.

En ambos ejes (Y y Z) para 30 m/s se tiene una variación de $\pm 2\%$ de la velocidad en la zona de corriente libre del flujo en esta posición. De los resultados anteriores, se puede ver que con la tobera colocada al inicio de la sección de pruebas mejoró el comportamiento del flujo en la misma como lo muestran los perfiles de velocidad, los cuales presentan una simetría aceptable para el intervalo de velocidad empleado en este trabajo.

Durante la medición de los perfiles se observó que el mecanismo para posicionar la sonda de hilo caliente y el tubo de Pitot, comenzaban a vibrar en las velocidades de 15 m/s y 30 m/s, durante el barrido en el eje vertical en las últimas cuatro posiciones ($Y = 0.40$ m a $Y = 0.55$ m), por lo cual se optó por realizar las mediciones de los perfiles de velocidad desde las paredes superior y lateral hasta $Y = 0.30$ m y $Z = 0.40$, es decir hasta el centro de la sección de pruebas. Lo cual se justifica con el comportamiento de los perfiles de velocidad en $X = 3.40$ m con este arreglo.

Los datos y perfiles de velocidad y turbulencia obtenidos con el anemómetro de hilo caliente se muestran en las tablas 4.3 a 4.8 y en las figuras 4.14 a 4.19. En la tabla 4.3 y 4.4 y figuras 4.14 y 4.15, se presentan los datos y perfiles de turbulencia en los ejes vertical y horizontal en $X = 1.80$. En estos perfiles se puede observar que para 5 m/s se tiene un perfil plano desde 0.05 m hasta el centro de la sección de pruebas y en las velocidades de 15 m/s y 30 m/s se tiene un perfil plano a partir de 0.10 m en los dos ejes.

En $X = 1.80$ m se tiene una variación de velocidad de $\pm 1\%$ en la región del perfil de velocidad plano para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s en los ejes vertical y horizontal. En estas velocidades se obtuvo una turbulencia en la zona de corriente libre menor a 4.2% en el eje Y, en el eje Z la turbulencia fue menor a 4% para las velocidades de 5 m/s y 30 m/s y para la velocidad de 15 m/s el valor de turbulencia máxima fue de 4.5 % para la velocidad de 15 m/s en la distancia de 0.25 m a 0.35 m, como se observa en la figura 4.15.

En $X = 2.60$ m se tiene un perfil de velocidad aceptable para las tres velocidades en los ejes vertical y horizontal, para 5 m/s se tiene el perfil plano desde 0.05 m para las paredes superior y lateral derecha hasta el centro de la sección de pruebas. Para 15 m/s la velocidad de corriente libre de acuerdo a las figuras 4.16 y 4.17 comienza desde 0.10 m en los dos ejes hasta el centro de la sección de pruebas. En el caso de la velocidad de 30 m/s, el efecto de las paredes se tiene hasta una distancia de 0.10 m de las mismas como se observa en las figuras 4.16 y 4.17. En esta posición, el valor de turbulencia en el centro de la sección de pruebas en ambos ejes fue menor a 4.1 % para las tres velocidades, como se aprecia en las tablas 4.5 y 4.6 y figuras 4.16 y 4.17. En este plano de medición, la variación de velocidad para 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, en la zona donde el perfil de velocidad es plano fue de $\pm 1\%$ en los ejes vertical y horizontal.

Los perfiles de velocidad obtenidos en $X = 3.40$ m, en los ejes vertical y horizontal (Y y Z), para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, se muestran en las figuras 4.18 y 4.19 y en las tablas 4.7 y 4.8 se proporcionan los datos obtenidos en esta posición. En el eje Y la velocidad de corriente libre se alcanza a partir de 0.10 m para 5 m/s y 15 m/s, en 30 m/s la velocidad de corriente libre se tiene desde $Y = 0.15$ m hasta el centro de la sección de pruebas. La variación de la velocidad en la zona de corriente libre es de $\pm 1\%$ y la turbulencia en el centro de la sección de pruebas fue menor a 3.5% para las tres velocidades.

La figura 4.19 presenta los perfiles de velocidad y turbulencia en el eje horizontal, en $X = 3.40$ m, en donde el efecto de la pared se tiene hasta 0.10 m para 5 m/s y 15 m/s, y hasta 0.15 m para la velocidad de 30 m/s. En este plano de medición se tiene un valor de turbulencia en el centro de la sección de pruebas menor a 3.5% en los dos ejes. La medición de los perfiles de velocidad a lo largo de la sección de pruebas del túnel de viento da una idea de las dimensiones que tendrá la zona de calibración para el intervalo de velocidad mencionado. En la tabla 5.1 se presentan las dimensiones de la zona de calibración en las diferentes posiciones en función de los perfiles de velocidad.

Tabla 5.1 Dimensiones de la zona de calibración en función de los perfiles de velocidad.

POSICIÓN X [m]	VELOCIDAD [m/s]	DIMENSIONES [m]	
		VERTICAL [Y]	HORIZONTAL [m]
1.80	5	0.50	0.70
	15	0.40	0.60
	30	0.40	0.60
2.60	5	0.50	0.70
	15	0.40	0.60
	30	0.40	0.60
3.40	5	0.40	0.60
	15	0.40	0.60
	30	0.30	0.50

Los resultados de la tabla anterior son aproximados, debido a que la distancia entre los puntos de medición (0.05 m), no permite observar en las figuras 4.14 a 4.19 donde se tiene la velocidad de corriente libre entre los puntos de medición para determinar las dimensiones reales del sitio de calibración, como en las posiciones $X = 1.80$ m y $X = 2.60$ m, que tienen las mismas dimensiones de la zona de calibración. La variación de las dimensiones de esta zona se aprecian comparando la primera y tercera posición, incluso comparando los planos de medición ubicados en $X = 2.60$ con $X = 3.40$ m. Para determinar las dimensiones reales del sitio de calibración se midió la capa límite en toda la sección de pruebas hasta una distancia de 0.20 m de las paredes con incrementos de 0.005 m.

5.2 CRECIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE

Para determinar las dimensiones de la zona de calibración a lo largo de la sección de pruebas del túnel de viento, se midió la capa límite en las posiciones, ejes y velocidades marcadas en la metodología experimental. Estas mediciones se efectuaron a una distancia de 0.005 m a partir de las paredes superior y lateral, con incrementos de 0.005 m hasta una distancia de 0.20 m en los dos ejes de medición. También se midió la turbulencia en la capa límite y estas mediciones se realizaron con la frecuencia y tiempo de muestreo determinados en la metodología experimental.

Para la velocidad de 5 m/s, la velocidad de corriente libre en el eje vertical se alcanza en $Y = 0.025$ m en $X = 1.80$ m, en $Y = 0.040$ m en $X = 2.60$ y en la última posición en $Y = 0.055$ m, siendo esta velocidad de $5.5 \text{ m/s} \pm 0.2 \text{ m/s}$, en las tres posiciones. Para esta velocidad se tiene un valor de turbulencia en el último punto de medición ($Y = 0.20$ m) menor a 3.6%. En la figura 5.1 se presenta el crecimiento de la capa límite a lo largo de la sección de pruebas del túnel de viento en el eje Y para la velocidad de 5 m/s.

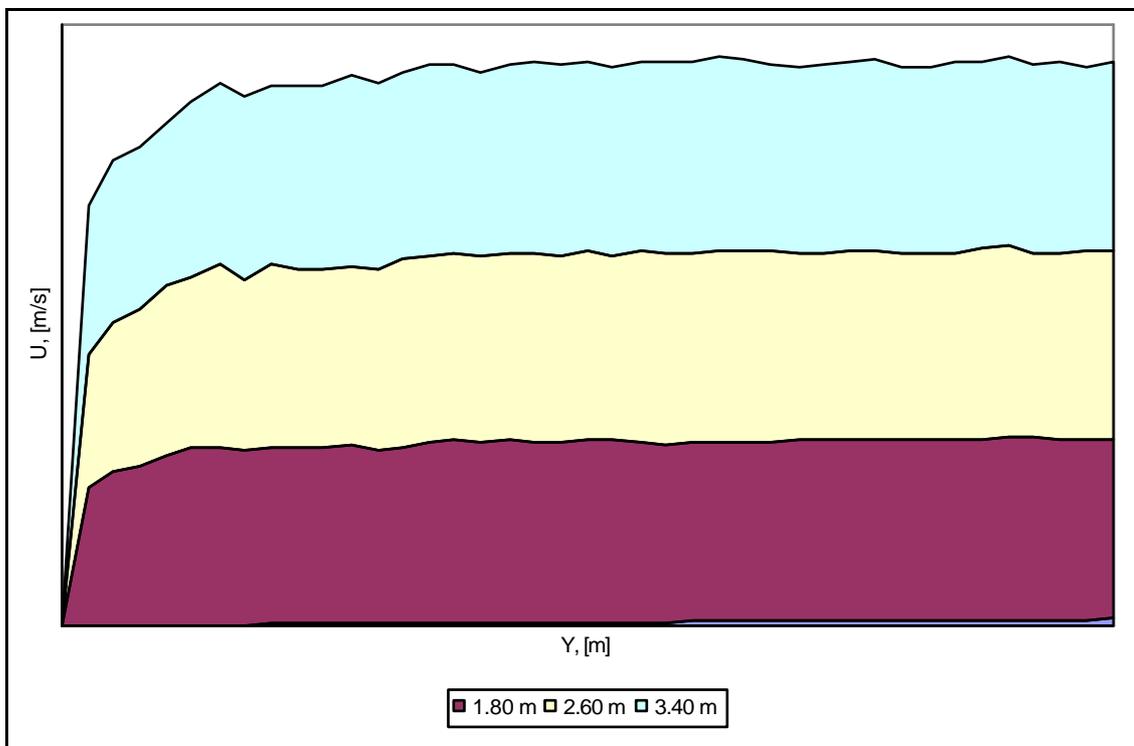


Figura 5.1 Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Y y 5 m/s.

En estas mismas posiciones para una velocidad de referencia de 15 m/s, la velocidad de corriente libre fue de $15.3 \text{ m/s} \pm 0.3 \text{ m/s}$ en este eje, alcanzándose en $Y = 0.035 \text{ m}$, $Y = 0.055 \text{ m}$ y en $Y = 0.065 \text{ m}$, en las posiciones de 1.80 m, 2.60 m y 3.40 m respectivamente, con un valor de turbulencia en $Y = 0.20 \text{ m}$ menor a 3.4%. En la figura 5.2 se presenta el crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas en el eje Y, para la velocidad 15 m/s.

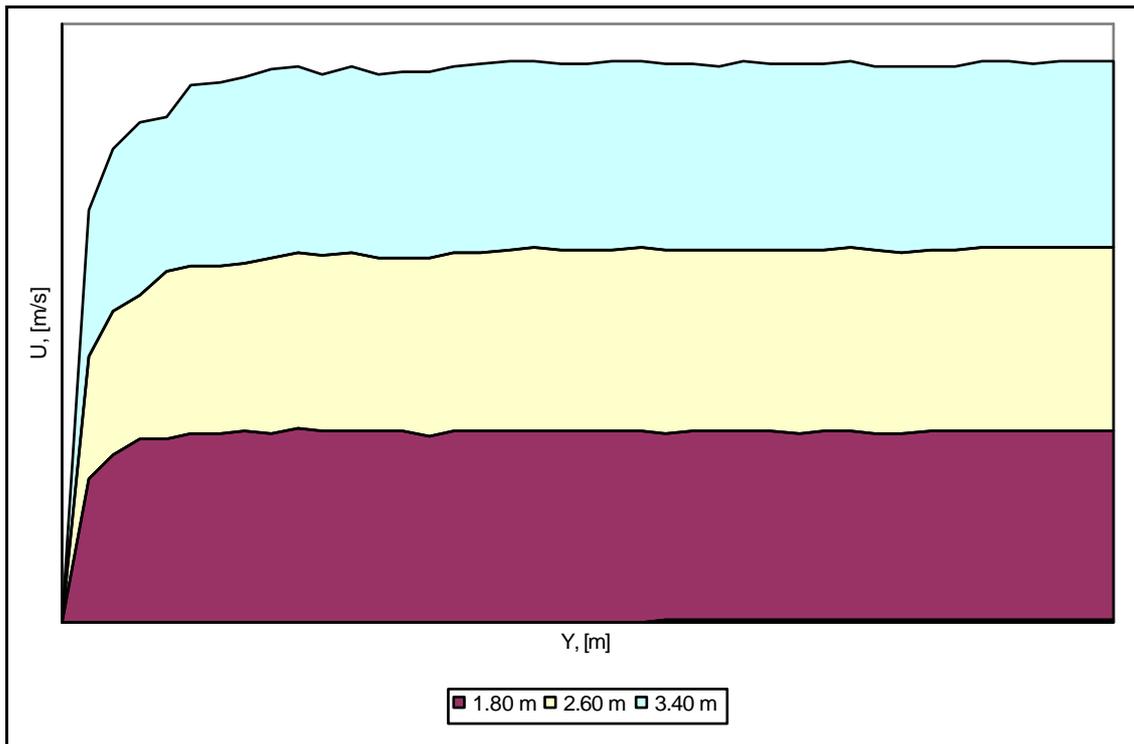


Figura 5.2 Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Y y 15 m/s.

Para 30 m/s en el eje vertical, la velocidad de corriente libre en la capa límite se tiene en $Y = 0.040 \text{ m}$ en $X = 1.80 \text{ m}$, en $Y = 0.065 \text{ m}$ a 2.60 m de la entrada del flujo en la sección de pruebas. En el último plano la velocidad de corriente libre se alcanza en $Y = 0.075 \text{ m}$. Para esta velocidad la turbulencia fue menor a 3.2 % en $Y = 0.20 \text{ m}$, y la velocidad de corriente libre de $30.7 \text{ m/s} \pm 0.2 \text{ m/s}$. En la figura 5.3 se muestra el crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas en el eje vertical para 30 m/s.

En el eje horizontal la velocidad de corriente libre, para 5 m/s en $X = 1.80 \text{ m}$, se tiene en $Z = 0.035 \text{ m}$, en $X = 2.60 \text{ m}$ en $Z = 0.045$ y en el último plano de medición en $Z = 0.045 \text{ m}$, siendo ésta de $5.7 \text{ m/s} \pm 0.2 \text{ m/s}$ para estas posiciones, con un valor de turbulencia en el último punto de medición de este eje ($Z = 0.20 \text{ m}$), menor a 3.7%. En la figura 5.4 se presenta el crecimiento de la capa límite en el eje horizontal para 5 m/s.

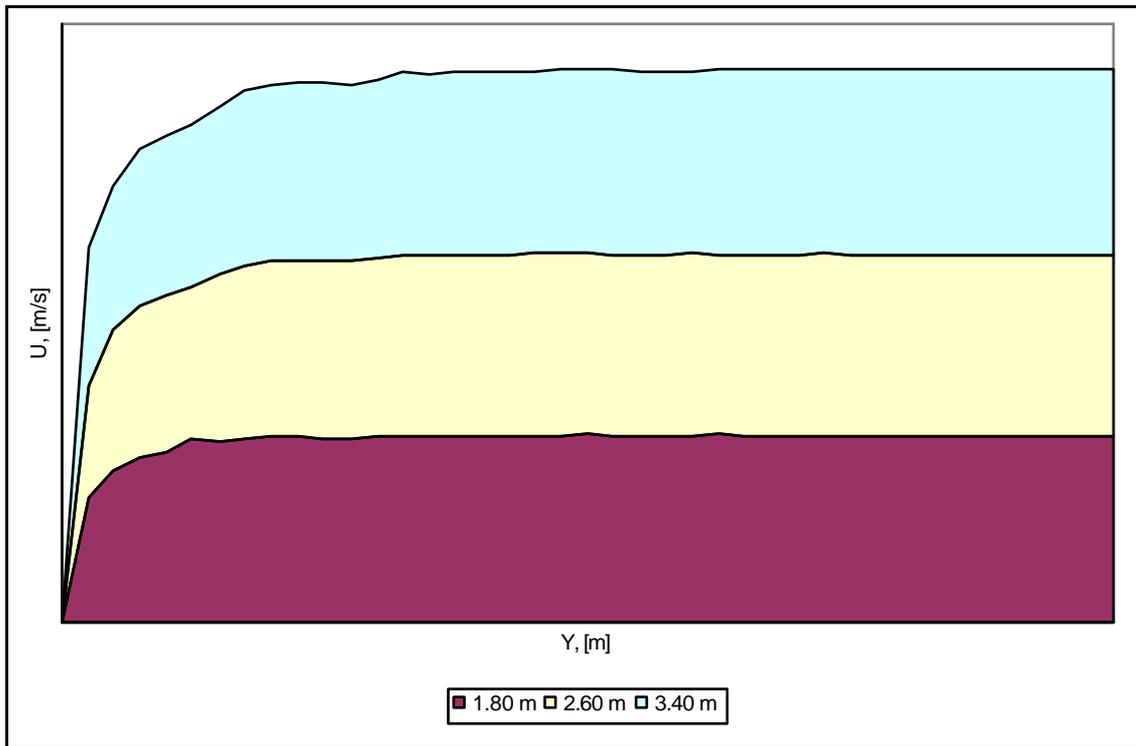


Figura 5.3 Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Y para 30 m/s.

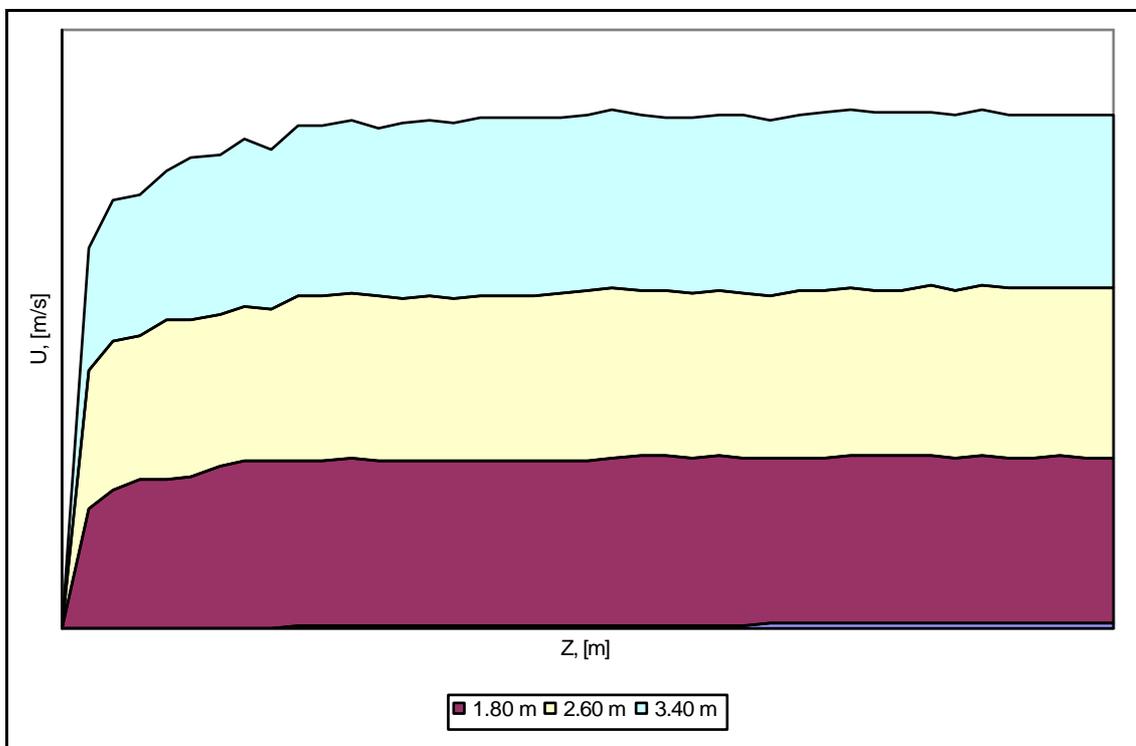


Figura 5.4 Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en Z para 5 m/s.

Para 15 m/s la velocidad de corriente libre en Z se tiene a 0.045 m, 0.050 m y 0.060 m de la pared lateral derecha en las posiciones de 1.80 m, 2.60 m y 3.40 m respectivamente. La velocidad de corriente libre que se tiene en esta condición es de $15.3 \text{ m/s} \pm 0.1 \text{ m/s}$, la turbulencia en $Z = 0.20$ fue menor a 3.7% en las tres posiciones. En la figura 5.5 se observa el crecimiento de la capa límite en el eje horizontal para esta velocidad.

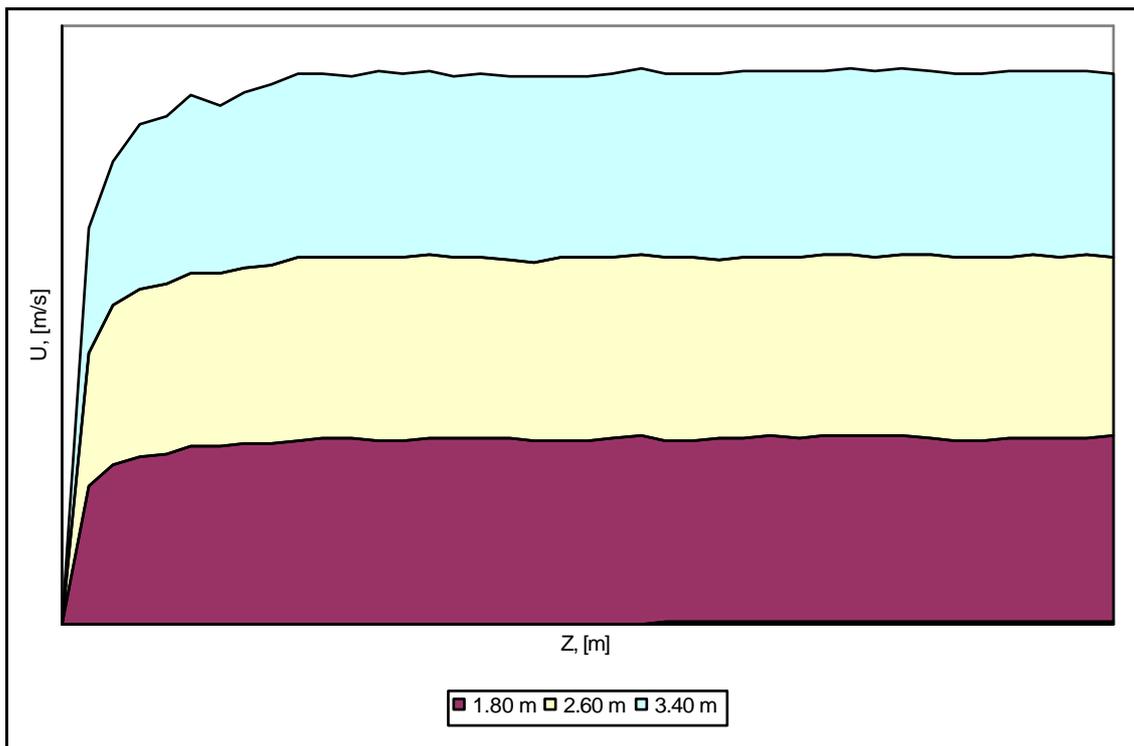


Figura 5.5 Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en el eje Z y 15 m/s.

Finalmente a 30 m/s la velocidad de corriente libre en el eje vertical, se obtuvo en $Z = 0.055 \text{ m}$ en la posición $X = 1.80 \text{ m}$, para $X = 2.60 \text{ m}$ en $Z = 0.060 \text{ m}$ y en la último plano de medición en $Z = 0.070 \text{ m}$. La velocidad de corriente libre fue de $30.5 \text{ m/s} \pm 0.4 \text{ m/s}$ con un valor de turbulencia menor a 4.7%. En la figura 5.6 se presenta el crecimiento de la capa límite en el eje Z, en 1.80m, 2.60 m y 3.40 m.

De las mediciones de la capa límite efectuadas, se observa que el perfil de turbulencia en esta zona es mayor en los primeros puntos de medición (0.00 m a 0.08 m) en los ejes vertical y horizontal como se muestra en las figuras 4.24 a 4.27, teniendo ésta un valor máximo entre 12.0% y 15.8% en todo el intervalo de velocidad en los dos ejes, además se observa como la turbulencia en todos los casos disminuye hacia la zona de corriente libre, teniendo en esta región un valor menor a 5% en todas las condiciones.

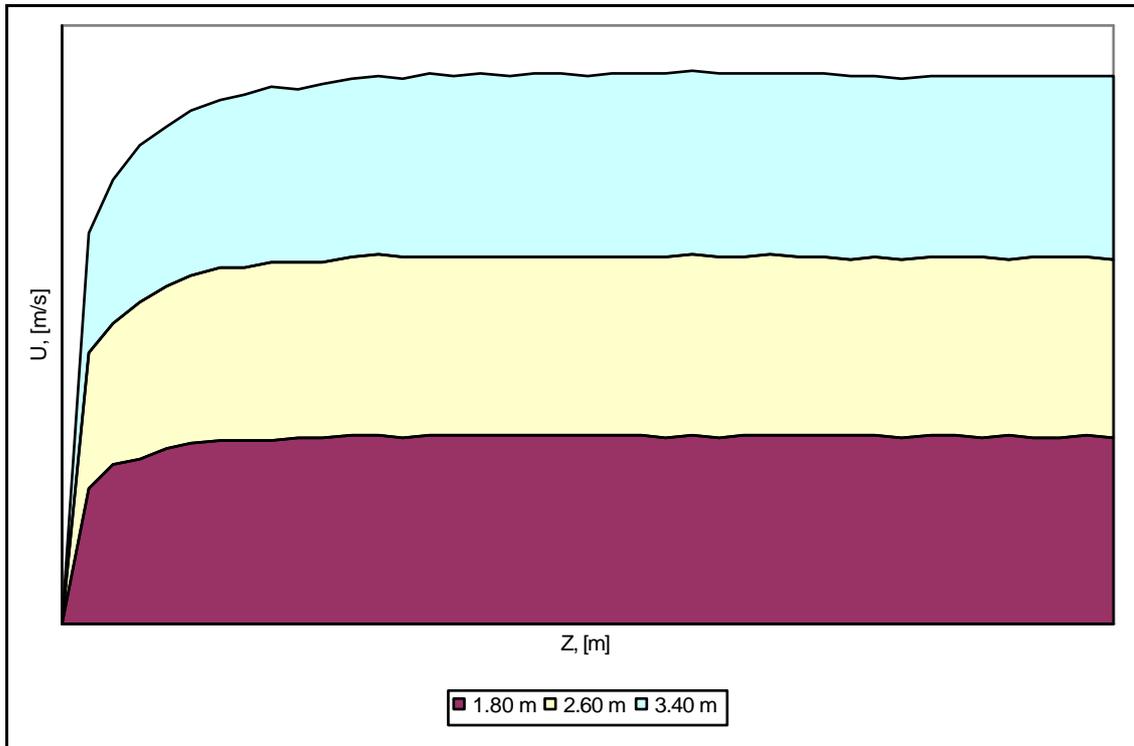


Figura 5.6 Crecimiento de la capa límite en la sección de pruebas, en Z para 30 m/s.

Las variaciones de la velocidad en la capa límite (figuras 4.22 a 4.27), en los ejes vertical y horizontal en las posiciones y velocidades indicadas en la metodología experimental, se deben a los escalones que se tienen a lo largo de la sección de pruebas del túnel viento. Como se comentó en la descripción de la instalación experimental, la sección de pruebas está compuesta por módulos de lámina y acrílico de 1.00 m de longitud, por lo que no se tiene una unión uniforme a lo largo de esta, teniéndose pequeños escalones o aberturas en estas uniones.

En las figuras correspondientes a la capa límite (4.22 a 4.27) se aprecia que las variaciones de velocidad se van incrementando conforme aumenta la distancia en el eje X . En el primer plano de medición, $X = 1.80$, se tiene un mejor comportamiento de la velocidad en las zonas de la capa límite y de corriente libre, debido a que esta medición se realizó a 0.80 m de la unión de un módulo metálico y un módulo de acrílico.

En la posición $X = 2.60$ m, se empiezan a observar más las variaciones de velocidad en la capa límite, en los dos ejes para las tres velocidades en las que se evaluó este parámetro. En esta condición la medición se efectuó a 0.60 m de la unión de dos módulos. En el último plano ($X = 3.40$) la medición se llevó a cabo a 0.40 m de la unión de los módulos, teniéndose en este punto las mayores variaciones de velocidad en las regiones de la capa límite y de corriente libre.

5.3 UBICACIÓN DE LA ZONA DE CALIBRACIÓN

En el primer plano de medición ($X = 1.80$ m), el espesor de la capa límite en la pared superior (eje Y) es $\delta_Y = 0.025$ m, $\delta_Y = 0.035$ m y $\delta_Y = 0.040$ m; en el eje Z (pared lateral derecha), el espesor de la capa límite es $\delta_Z = 0.035$ m, $\delta_Z = 0.045$ m y $\delta_Z = 0.055$ m, para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s respectivamente. Considerando el mismo espesor de la capa en las paredes inferior y lateral izquierda, las dimensiones de la zona de calibración es de 0.55 m por 0.73 m para 5 m/s, para 15 m/s es de 0.53 m por 0.71 m y para la velocidad máxima (30 m/s) es de 0.52 m por 0.69 m. En la figura 5.7 se muestra la zona de calibración en el primer plano de medición para 30 m/s.

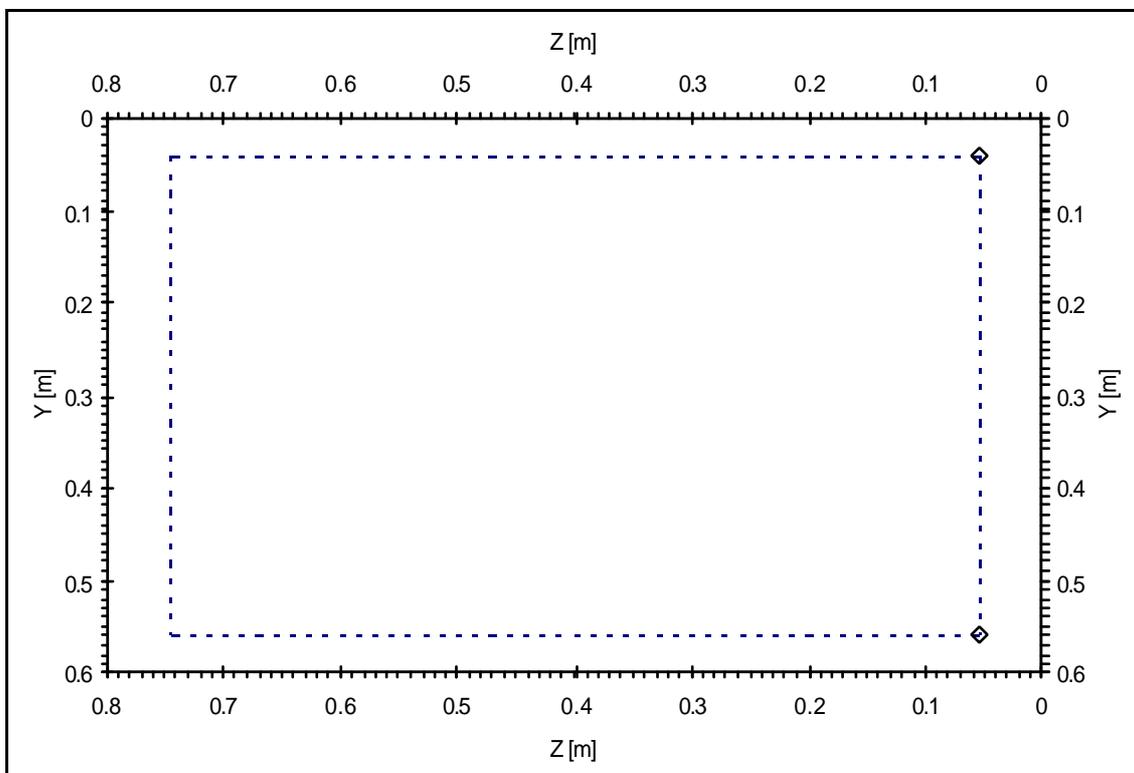


Figura 5.7 Zona de calibración en $X = 1.80$ m/s para 30 m/s.

En la segunda posición ($X = 2.60$ m) donde se realizó la medición de la capa límite en los ejes vertical y horizontal, los espesores fueron $\delta_Y = 0.040$ m, $\delta_Y = 0.055$ m y $\delta_Y = 0.065$ m en el eje Y ; para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, respectivamente. En Z los espesores de la capa límite para las velocidades anteriores fueron $\delta_Z = 0.045$ m, $\delta_Z = 0.050$ m y $\delta_Z = 0.060$ m. Por lo que la zona de calibración en este plano es de 0.52 m por 0.71 m en 5 m/s, 0.49 m por 0.70 m para 15 m/s y de 0.47 m por 0.68 m para la velocidad de 30 m/s. En la figura 5.8 se muestra la zona de calibración en $X = 2.60$ m y una velocidad de 30 m/s.

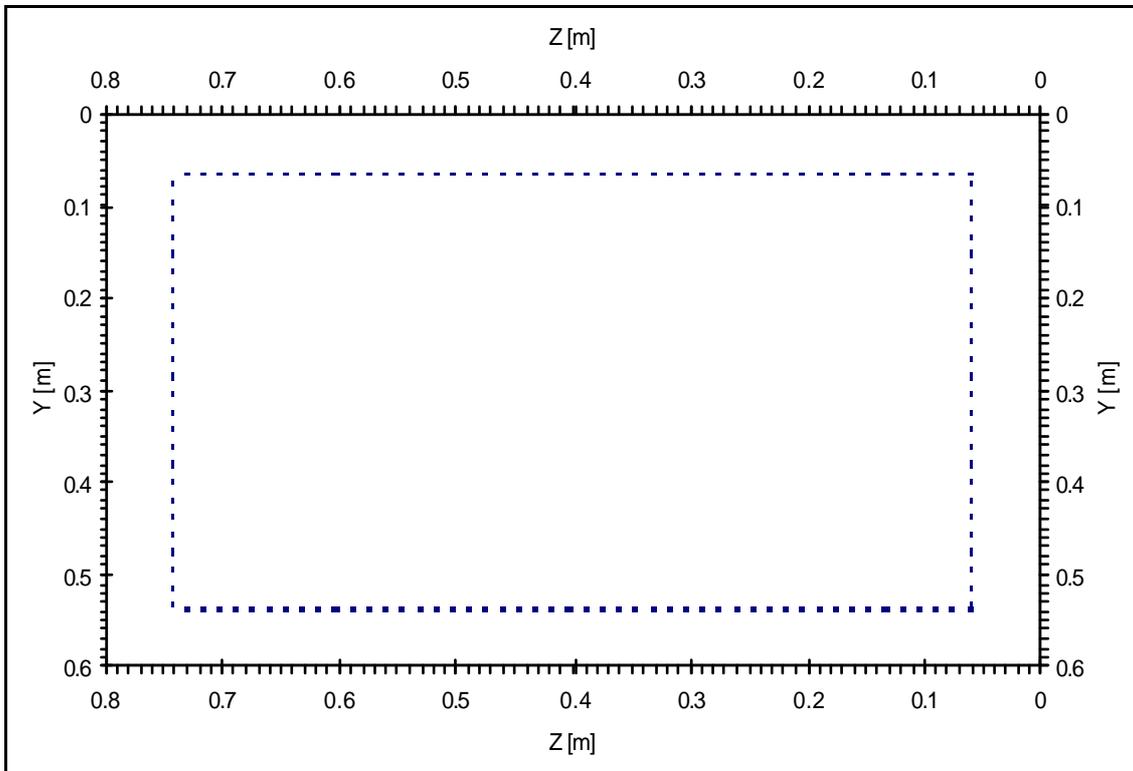


Figura 5.8 Zona de calibración en $X = 2.60$ m y una velocidad de 30 m/s.

En el último plano de medición ubicado a 3.40 m de la entrada del flujo a la sección de pruebas del túnel, el espesor de la capa límite en el eje vertical fue de $\delta_Y = 0.055$ m, $\delta_Y = 0.065$ m y $\delta_Y = 0.075$ m en el eje Y; para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s. En el eje Z los espesores de capa límite para las velocidades anteriores fueron $\delta_Z = 0.045$ m, $\delta_Z = 0.060$ m y $\delta_Z = 0.070$ m. Por lo que la zona de calibración en este plano es de 0.49 m por 0.71 m en 5 m/s, 0.47 m por 0.68 m para 15 m/s y de 0.45 m por 0.66 m para la velocidad de 30 m/s. En la figura 5.9 se presenta la zona de calibración en la posición $X = 3.40$ m para la velocidad de 30 m/s.

De las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se observa que conforme se incrementa la distancia desde la entrada del flujo en la sección de pruebas al plano de medición, el espesor de la capa límite se incrementa teniendo como resultado que la zona de calibración en $X = 1.80$ m sea la mayor en comparación con la zona de calibración en $X = 3.40$ m, como puede verse en las figuras 5.7 y 5.9, en donde se tiene una zona de calibración de 0.52 m por 0.69 m y de 0.45 m por 0.66 m para la velocidad de 30 m/s en las posiciones mencionadas anteriormente.

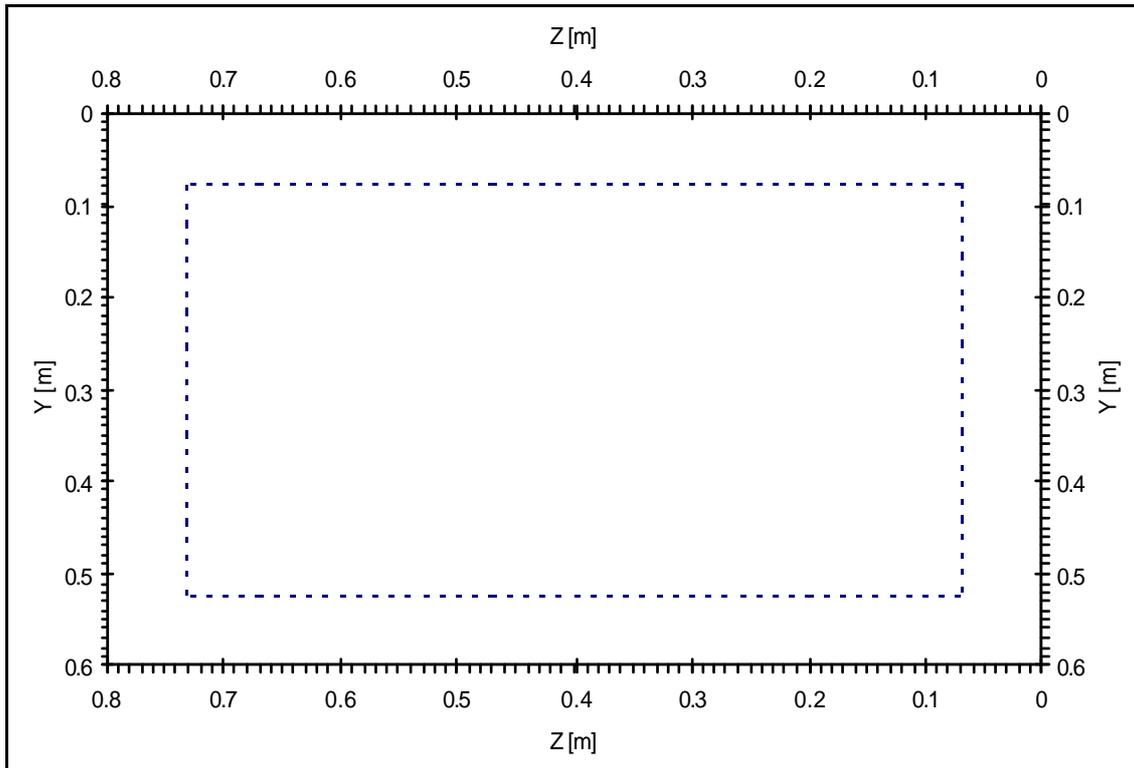


Figura 5.9 Zona de calibración en $X = 3.40$ m con una velocidad de 30 m/s.

En la posición intermedia ($X = 2.60$ m), las dimensiones de la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad para 30 m/s es de 0.47 m por 0.68 m como se muestra en la figura 5.8. Esta zona tiene un área menor a la determinada en $X = 1.80$ m para la misma velocidad.

Por lo tanto, la zona de calibración se puede ubicar en cualquiera de las tres posiciones en las cuales se determinaron los perfiles de velocidad y turbulencia y se midió la capa límite para las velocidades de 5 m/s, 15 m/s y 30 m/s, siempre que los instrumentos se coloquen en las zonas determinadas con estas mediciones, las cuales se muestran en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9.

5.4 TURBULENCIA EN LA ZONA DE CALIBRACIÓN

Establecida la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad en la sección de pruebas del túnel de viento, se procedió a medir la turbulencia en el centro del plano de medición que se ubica en $X = 2.60$ m, para el intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s con nueve puntos intermedios como se mostró en la tabla 4.12.

De las mediciones realizadas se observa que el valor de turbulencia mayor se tiene para la velocidad de 13.3 m/s con un valor de 4.3%, para las velocidades que se encuentran antes y después de esta velocidad se tiene un valor de turbulencia de 3.9% y 3.8% para 10.9 m/s y 15.8 m/s respectivamente. Para las velocidades de 18.4 m/s, 23.3 m/s, 25.7 m/s y 30.3 m/s el valor de turbulencia fue de 3.5%, para 20.6 m/s se tuvo una turbulencia de 3.4% y para las velocidades de 5.7 m/s, 8.4 m/s y 28.0 m/s, la turbulencia fue de 3.2%. El valor de turbulencia mayor en el centro de $X = 2.60$ m es ligeramente mayor al valor de turbulencia que se obtuvo durante las mediciones de los perfiles de velocidad y turbulencia donde se tuvo un valor máximo de 4.2%. Esto pudo deberse por que en estas mediciones la sonda permaneció fija en el entro de esta posición.

Las velocidades donde se tienen los valores de turbulencia más altos, pueden ser originadas por un punto de transición que se tiene en la tobera del túnel o por las discontinuidades que se tienen en las paredes de la sección de pruebas del túnel de viento, Además el incremento de la turbulencia para la velocidad de 15 m/s, también se presentó al momento de determinar la frecuencia y tiempo de muestreo adecuado, en donde la superficie de turbulencia para 15 m/s (figura 4.2) presenta las mayores variaciones de este parámetro en todas las frecuencias empleadas. Esto también se aprecia en la figura 4.5 donde se presenta los valores de turbulencia para diferentes tiempos y frecuencias de muestreo.

Por otro lado, los valores de turbulencia obtenidos a lo largo de la sección de pruebas son muy altos (2 % a 4.3 %) comparados con los valores de turbulencia que se tiene en los túneles de viento de los laboratorios nacionales de metrología (0.05% a 2%), debido a que aún falta la cámara estabilizadora enfrente de la contracción, la cual contendrá las mallas y el panel calculados en el capítulo III de este trabajo, y al inicio de la cámara estabilizadora se instalará una entrada acampanada lo que mejorará las condiciones del flujo en el túnel de viento, con lo que se espera tener una turbulencia menor a 0.5% para todas las velocidades aquí empleadas.

Una vez analizados los resultados obtenidos, en la etapa experimental de este trabajo, finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del mismo, así como las recomendaciones en trabajos futuros.

CONCLUSIONES

Se caracterizó la sección de pruebas del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP, para determinar la zona de calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire en un intervalo de 5 m/s a 30 m/s.

De la recopilación bibliográfica realizada, se concluye que las tres condiciones principales para caracterizar un túnel de viento son los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia en la sección de pruebas. La variación de velocidad típica en esta zona en laboratorios nacionales de metrología de velocidad de aire se encuentra en un intervalo de $\pm 1\%$ a $\pm 0.1\%$, y los valores de turbulencia se encuentran entre 0.02% a 2%.

De las modificaciones propuestas para mejorar el comportamiento del flujo en la sección de pruebas, el elemento crítico para el diseño de un túnel de viento es la contracción, en la cual se puede presentar el fenómeno de transición en la capa límite que se desarrolla a lo largo de ésta, teniendo como consecuencia un comportamiento pobre del flujo en la sección de pruebas. Por lo que en este trabajo, el diseño de este elemento se realizó mediante el método de Morel, el cual ha brindado buenos resultados en evaluaciones experimentales.

Con los accesorios calculados en este trabajo (mallas, panel y entrada acampanada) se espera tener variaciones de velocidad menores a $\pm 1\%$ y un valor de turbulencia menor a 0.5% para todo el intervalo de velocidad que se puede tener en este túnel (hasta 65 m/s). Con los resultados presentados en este trabajo teniendo solamente la contracción se obtuvo una variación de velocidad de $\pm 1\%$ en la zona de corriente libre en todo el intervalo de velocidad y un valor de turbulencia de 2% a 4.3%, parámetro que se disminuirá cuando se tengan todas las modificaciones propuestas en este trabajo.

La medición de turbulencia en cualquier aplicación es un parámetro que depende de factores tales como la frecuencia y tiempo de muestreo, en función de los cuales se encuentra el tamaño de la muestra o número de datos para una medición, por lo que en este trabajo se determinó la frecuencia y el tiempo de muestreo para el intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s, encontrándose una frecuencia de 30 kHz, un tiempo de muestreo de 30 s con lo que se obtiene una muestra para cada velocidad puntual de 900 000 datos.

Los perfiles de velocidad y turbulencia obtenidos en este trabajo son aceptables, en el caso de la velocidad se tiene una variación de $\pm 1\%$ a lo largo de la sección de pruebas para las velocidades empleadas en este trabajo. La turbulencia máxima obtenida en este trabajo es alta (4.3%) en comparación con los valores

típicos que se tienen en los túneles de viento para calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire. La causa de esto es que durante la realización de este trabajo no se contaba con la cámara estabilizadora y la entrada acampanada diseñadas en este trabajo, para mejorar el comportamiento del flujo en el túnel, principalmente en velocidad y turbulencia.

La medición de la capa límite en la sección de pruebas permitió determinar las dimensiones de las zonas de calibración a lo largo de la sección de pruebas, siendo estas de 0.53 m por 0.71 m en $X = 1.80$ m; 0.47 m por 0.68 m a 2.60 m de la entrada del flujo a la sección de pruebas y de 0.45 m por 0.66 m en el último plano de medición ($X = 3.40$ m), para la velocidad de 30 m/s. Estas dimensiones son aceptables para calibración de instrumentos de medición de velocidad de aire. Las variaciones de los perfiles de velocidad en la capa límite fueron provocadas por las imperfecciones que se tienen en la parte interna de las paredes de la sección de pruebas.

Finalmente con la caracterización realizada en este trabajo y las modificaciones propuestas, el túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP de la SEPI-ESIME Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional, se tendrá la posibilidad de establecer en nuestro País un patrón nacional de velocidad de gases en un intervalo de velocidad de 5 m/s a 30 m/s.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se hacen para trabajos futuros son:

- Los valores de frecuencia y tiempo de muestreo obtenidos en este trabajo, pueden emplearse en aplicaciones futuras en las que se use el túnel de viento del LABINTHAP.
- Determinar el ángulo del flujo de aire en toda la sección de pruebas, para caracterizar completamente el túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP, debido a que algunos instrumentos de medición son susceptibles a esta variable.
- Realizar un estudio sobre el flujo secundario que se presenta en las esquinas de la sección de pruebas del túnel de viento para caracterizar mejor las zonas de calibración determinadas en este trabajo.
- Efectuar las mediciones en la zona de calibración con anemometría láser Doppler, para determinar el efecto del bloqueo que se tiene al instalar alguna técnica de medición intrusiva.
- Determinar el efecto que se tiene debido a variaciones en las condiciones ambientales como son presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa.
- Realizar un estudio teórico experimental en la contracción, para determinar si los valores de turbulencia altos (4.3%) que se obtuvieron en el intervalo de velocidades de 5 m/s a 30 m/s se deben a un punto de transición en la capa límite que se presenta en este elemento.
- Validar los resultados experimentales obtenidos en este trabajo y en trabajos futuros mediante simulación numérica.
- Con las modificaciones propuestas para este túnel de viento; además de la aplicación en metrología de velocidad de gases, se podrá usar en la investigación de la dinámica del flujo en turbomaquinaria, específicamente en álabes de compresor axial y turbinas de gas; comportamiento de la capa límite laminar y turbulenta en placas planas, esferas, cilindros y otras geometrías.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Batchelor G. K., *The Theory of Homogeneous Turbulence*, Cambridge, 1993.
2. British Standard, *Fans for General Purposes, Part 1. Methods of Testing performance*, BSI 848, 1980.
3. Barlow J. B., Rae W. H. and Pope A., *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley and Sons, Third Edition, 1999.
4. Batill S. M. and Nelson R. C., *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.
5. Bradshaw P., *An Introduction to Turbulence and its Measurement*, Pergamon Press, 1971.
6. Bradshaw P., *Turbulence*, Topics in Applied Physics, Vol. 12, Springer-Verlag, Second Edition, 1978.
7. Bradshaw P. and Pankhurst R. C., *The Design of Low Speed Wind Tunnels*, Progress in Aeronautical Sciences, Volume 5, Pergamon Press, 1964.
8. Browne L. W. B. and Dinkelacker A., *Turbulent Pipe Flow, Pressures and Velocities*, Fluid Dynamics Research, Vol. 15, Elsevier Science, 1995.
9. Bruun H. H., *Hot-Wire Anemometry Principles and Signal Analysis*, Oxford University Press, 1995.
10. Castillo L. J., Johansson T. G. and Hangan H., *Experimental Investigation of the Effect of Upstream Conditions on Smooth and Rough Zero Pressure Gradient Turbulent Boundary Layer Flows at Very High Reynolds Number*, Proceedings of ASME FEDSSM 2002.
11. Curle N., *The Laminar Boundary Layer Equations*, Oxford University Press, 1962.
12. Dantec Measurement Technology, *StreamLine/Streamware Installation and User's Guide*, 2000.
13. Ito H, Kobayashi R. and Kohama Y., *The Low-Turbulence Wind Tunnel at Tohoku University*, Aeronautical Journal, Abril 1992.
14. Jorgensen F. E., *How to Measure Turbulence with HotWire Anemometers – A Practical Guide*, Dantec Dynamics, 2002.
15. Jorgensen F. E., *The Computer-Controlled Constant-Temperature Anemometer. Aspects of Set-Up, Probe Calibration, Data Acquisition and Data Conversion*, Meas. Sci. Technol., Vol. 7, 1996.

16. Loehrke R. I. and Nagib H. M., *Control of Free-Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 98, September 1976.
17. Mease N. E., Cleveland W.G., Mattingly G. E. and Hall J. M., *Air Speed Calibrations at the National Institute of Standards and Technology*, Proceedings of the Measurement Science Conference, Anaheim, California, 1992.
18. Metha R. D. and Bradshaw P., *Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels*, Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol. 83, November 1979.
19. Morel T., *Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions*, Journal of Fluid Engineering, June 1977.
20. Purtell L. P. and Klebanoff P. S., *A Low-Velocity Airflow Calibration and Research Facility*, National Bureau of Standards, Technical Note 989, 1979.
21. Rotta J. C., *Turbulent Boundary Layers in Incompressible Flow*, Pergamon Press, Vol. 2, Progress in Aeronautical Sciences, 1962.
22. Schlichting H. and Gersten K., *Boundary Layer Theory*, Springer-Verlag, 8th Revised and Enlarged Edition, 2000.
23. Tavoularis S., *Techniques for Turbulence Measurement*, Enciclopedia of Fluids Mechanics, Vol. 1, Gulf Publishing Company, 1986.
24. Tennekes H. and Lumley J. L., *A First Course in Turbulence*, MIT Press, 1972.
25. Terao Y., Takamoto M. and Katagiri T., *A Very Low Speed Tunnel for Anemometer Calibration*, Fluid Measurement and Instrumentation, FED Vol. 211, 1995.
26. Terao Y., Takamoto M. and Sugiyama T., *Velocity Distribution in a Very Low Speed Wind Tunnel*, Proceedings of FLUCOME '94, Vol. 1, 1994.
27. Tetervin Neal, *A Review of Boundary-Layer Literature*, NACA TN-1384, 1947.
28. White F.M., *Viscous Fluid Flow*, McGraw Hill, Second Edition, 1991.
29. Yeung C. P. and Squire L. C., *Numerical Calibration and Verification Test of an Orthogonal Triple-Hot-Wire*, Meas. Sci. Technol., Vol. 4, 1993.
30. Young A. D., *Boundary Layers*, AIAA Education Series, 1989.

APÉNDICE A

ECUACIONES DE FLUJO DE FLUIDOS

ECUACIONES DE FLUJO DE FLUIDOS

Para el estudio del flujo de fluidos es necesario conocer la descripción del campo de velocidad, el cual es función de las coordenadas espaciales x , y , z ; y del tiempo, por lo que la representación completa del campo de velocidad es:

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t) \quad (\text{A.1})$$

El vector de velocidad está integrado por sus tres componentes u , v y w , las cuales a su vez son función de la posición y el tiempo. En el caso de flujo estacionario, el campo de velocidad es sólo función de x , y , z . Además del campo de velocidades es necesario conocer también los campos de presión y temperatura que a su vez también son función de la posición y el tiempo. Para determinar las cinco variables anteriores, se tienen las siguientes ecuaciones fundamentales en la mecánica de fluidos que son: la ecuación de continuidad, la ecuación de momento con sus tres componentes y la ecuación de la energía, de las que se presentarán las dos primeras.

Las ecuaciones fundamentales se complementan con las ecuaciones constitutivas, como son la ecuación de estado $\rho(T, p)$, la relación entre los esfuerzos y la deformación de un fluido, el calor específico a presión constante $c_p(T, p)$ y la entalpía $h(T, p)$. En las ecuaciones fundamentales también se tienen dos propiedades de transporte que son la viscosidad $\mu(T, p)$ y la conductividad térmica $k(T, p)$. Tanto las propiedades de transporte como las propiedades térmicas se pueden obtener por ecuaciones o tablas para diferentes condiciones.

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad es un enunciado de la ecuación de conservación de la masa para un fluido. En forma integral se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho dV + \int_{S_c} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{A.2})$$

En donde el primer término representa la relación de cambio de masa dentro del volumen de control y el segundo término representa la relación de flujo másico que entra o sale de la superficie de control. En este caso si la relación de flujo másico que entra al volumen de control excede a la del flujo másico que sale, se acumulará la masa dentro del volumen de control. La forma diferencial de la ecuación de continuidad se presenta en la ecuación A.3.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (\text{A.3})$$

ECUACIÓN DE MOMENTO

La ecuación de momento, es la formulación de la segunda ley de Newton aplicada a un volumen de control. Esta establece que la suma de todas las fuerzas (de cuerpo y superficie) que actúan sobre un volumen de control es a la suma de relación de cambio de momento dentro del volumen de control, más la relación neta del flujo de momento que entra o sale a través de la superficie de control. Esta se expresa en forma integral como:

$$\vec{F} = \vec{F}_s + \vec{F}_B = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \bar{V} \rho dV + \int_{sc} \bar{V} \rho \bar{V} \cdot d\bar{A} \quad (A.4)$$

Las fuerzas de superficie (\vec{F}_s), se deben principalmente a los esfuerzos normales y cortantes que se aplican al volumen de control y cualquier otra fuerza externa; las fuerzas de cuerpo sobre el volumen de control se deben sólo a la fuerza provocada por el vector de la gravedad. La ecuación de momento expresada en forma diferencial es:

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = \rho \bar{g} + \nabla \tau_{ij} \quad (A.5)$$

En la ecuación anterior el término del lado izquierdo es el cambio de momento por unidad de volumen, el primer y segundo término del lado derecho de la igualdad son las fuerzas de cuerpo y superficie respectivamente. La ecuación de momento en forma integral y diferencial (ecuaciones A.4 y A.5) son ecuaciones vectoriales, por lo que poseen tres componentes, en este caso las componentes de la forma diferencial son:

$$\rho g_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (A.6 a)$$

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (A.6 b)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (A.6 c)$$

En las ecuaciones anteriores τ_{xx} , τ_{yy} y τ_{zz} , son los esfuerzos normales que actúan sobre las caras de un elemento diferencial de fluido; τ_{yx} , τ_{zx} , τ_{xy} , τ_{zy} , τ_{xz} y τ_{yz} son los esfuerzos de corte. Los esfuerzos anteriores se pueden expresar en términos de la velocidad y presión. En un fluido newtoniano, los esfuerzos de corte pueden expresarse en términos de los gradientes de velocidad y la viscosidad del fluido (propiedad de transporte). Por lo tanto expresando los esfuerzos en función de los gradientes de velocidad se tiene:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (\text{A.7 a})$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \quad (\text{A.7 b})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] \quad (\text{A.7 c})$$

Las ecuaciones anteriores, son las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido viscoso. Estas ecuaciones se pueden simplificar en la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \nabla \cdot \vec{V} \right] \quad (\text{A.8})$$

Si se considera un flujo un flujo incompresible ($\nabla \cdot \vec{V} = 0$) con viscosidad constante, las ecuaciones de Navier-Stokes se reducen a la siguiente expresión:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{A.9})$$

Las tres componentes de la ecuación anterior son:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{A.10 a})$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{A.10 b})$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{A.10 c})$$

Con las ecuaciones anteriores, se tienen los elementos para estudiar cualquier fenómeno de flujo de fluidos, tal es el caso de la capa límite que se presenta a continuación.

APÉNDICE B

SOLUCIÓN DE BLASIUS DE LA CAPA LÍMITE

Las ecuaciones de la capa límite fueron resueltas por H. Blasius para un flujo bidimensional estable e incompresible con gradiente de presión cero. Blasius consideró que la componente de velocidad normal a la placa es menor que la componente paralela, como consecuencia la variación de cualquier parámetro a través de la capa límite es mayor que en la dirección del flujo, por lo tanto:

$$v \ll u$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial y} \tag{B.1}$$

Con las condiciones anteriores, las ecuaciones de la capa límite (2.8, 2.9 y 2.10) se reducen a las ecuaciones B.2 y B.3 con las condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} \text{En } y=0 & \quad u = v = 0 \\ y = \infty & \quad u = U_{\infty} \quad du/dy = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{B.2}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{B.3}$$

Las ecuaciones anteriores (B.2 y B.3) se reducen a una ecuación diferencial ordinaria, introduciendo la función de corriente ψ :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{B.4}$$

En donde la función de corriente es:

$$\psi = (U_{\infty} \nu x)^{\frac{1}{2}} f(\eta) \tag{B.5}$$

La variable adimensional η , es:

$$\eta = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{\infty}}{\nu x} \right)^{\frac{1}{2}} y \tag{B.6}$$

Sustituyendo las ecuaciones B.5 y B.6 en la ecuación B.4, se tiene:

$$u = \frac{1}{2} U_{\infty} f'(\eta)$$

$$v = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{\infty} \nu}{x} \right)^{\frac{1}{2}} (\eta f' - f) \tag{B.7}$$

En donde f' , es una derivada respecto a h , sustituyendo la ecuación B.7 en las ecuaciones de la capa límite (B.2 y B.3), se obtiene:

$$f''' + f f'' = 0 \tag{B.8}$$

Las condiciones de frontera para la solución propuesta por Blasius para la capa límite laminar son:

$$\begin{aligned} \text{En } \eta = 0 & \quad f = \frac{df}{d\eta} = 0 \\ \eta \rightarrow \infty & \quad \frac{df}{d\eta} \rightarrow 2 \end{aligned}$$

La solución de la ecuación B.8 fue resuelta por Blasius en 1908, empleando una expansión de la serie de potencias de f en torno a $h = 0$, acoplada a una expansión asintótica para $h \rightarrow \infty$. La solución expandida de f (ecuación B.8) es:

$$f = \frac{\alpha \eta^2}{2!} - \frac{\alpha^2 \eta^5}{5!} + 11 \frac{\alpha^3 \eta^8}{8!} + \frac{\alpha^4 \eta^{11}}{11!} + \dots \tag{B.9}$$

Blasius determinó también el valor de la constante α , para la condición de frontera cuando $h \rightarrow \infty$ y $f' \rightarrow 2$, obteniendo el valor de:

$$\alpha = 1.32824 \tag{B.10}$$

En la figura B.1 se muestran la comparación de la solución de Blasius para la capa límite laminar con datos experimentales.

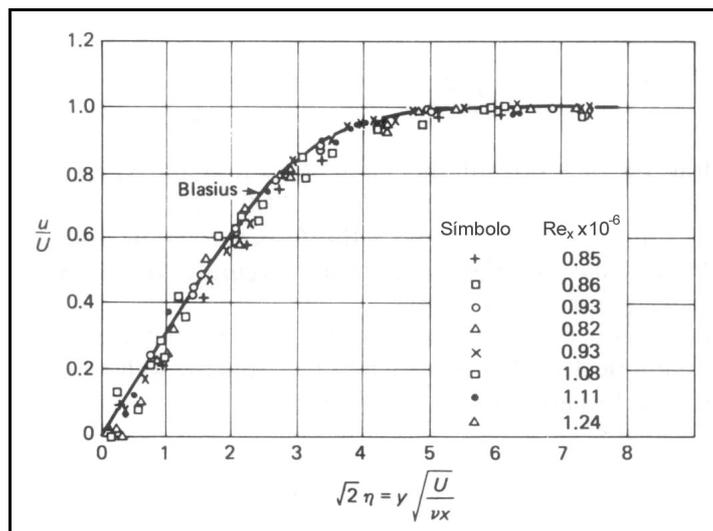


Figura B.1 Comparación de la solución de Blasius con datos experimentales [28].

APÉNDICE C

ECUACIÓN INTEGRAL DE VON-KARMAN

Si se integran las ecuaciones de la capa límite (ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10), con respecto a y , desde $y = 0$ (pared), hasta fuera de la capa límite para cualquier posición x , se obtiene una ecuación que relaciona el flujo total de momento a través de la sección transversal de la capa límite con el gradiente de presión y el esfuerzo de corte. Obteniéndose la ecuación integral de momento de Von-Karman, que proporciona soluciones aproximadas para capa límite laminar y turbulenta.

De las ecuaciones propuestas por Prandtl para la capa límite y las consideraciones realizadas por Blasius, se tiene que para este caso la ecuación de continuidad en la capa límite sigue conservando la forma de la ecuación 2.8 y la componente de la ecuación de Navier-Stokes en la dirección del flujo es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (\text{C.1})$$

Fuera de la capa límite (región de flujo no viscoso) se tiene:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{C.2})$$

Para flujo estable, el primer término de la ecuación anterior desaparece y sustituyendo la nueva expresión en la ecuación C.1 se tiene:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = U \frac{\partial U}{\partial x} + \nu \frac{\partial \tau_w}{\partial y} \quad (\text{C.3})$$

Integrando la ecuación C.3 desde $y = 0$ hasta $y = h$, donde h es cualquier punto fuera de la capa límite se tiene:

$$\int_0^h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - U \frac{\partial U}{\partial x} \right) dy = -\frac{\tau_w}{\rho} \quad (\text{C.4})$$

Integrando la ecuación de continuidad (2.8) la velocidad normal v , es:

$$v = -\int_0^y \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dy$$

Sustituyendo v , en la ecuación C.4, se tiene:

$$\int_{y=0}^y \left(u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy - U \frac{\partial U}{\partial x} \right) dy = -\frac{\tau_w}{\rho} \quad (\text{C.5})$$

Integrando el segundo término por partes:

$$\int_{y=0}^h \left(\frac{\partial u}{\partial y} \int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy \right) dy = U \int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy - \int_0^h u \frac{\partial u}{\partial x} dy \quad (\text{C.6})$$

Sustituyendo la ecuación C.6 en C.5, se obtiene:

$$\int_0^h \left(2u \frac{\partial u}{\partial x} - U \frac{\partial u}{\partial x} - U \frac{\partial U}{\partial x} \right) dy = -\frac{\tau_w}{\rho} \quad (\text{C.7})$$

La ecuación anterior se puede describir como:

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x} [u(U-u)] dy + \frac{dU}{dx} \int_0^h (U-u) dy = -\frac{\tau_w}{\rho} \quad (\text{C.8})$$

De la definición de los desplazamientos de la capa límite se tiene:

$$\delta^* U = \int_{y=0}^{\infty} (U-u) dy$$

$$\theta U^2 = \int_{y=0}^{\infty} u(U-u) dy$$

Por lo tanto, de la ecuación C.8 se obtiene:

$$\frac{d}{dx} (U^2 \theta) + \delta^* U \frac{dU}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho} \quad (\text{C.9})$$

La ecuación anterior, es la ecuación integral de momento para un flujo incompresible, la cual es válida para flujo laminar y turbulento. Otra forma de expresar la ecuación integral de momento, es derivando el primer término de esta ecuación, obteniéndose la siguiente expresión:

$$U^2 \frac{d\theta}{dx} + (\delta^* + 2\theta) U \frac{dU}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho}$$

$$\frac{d\theta}{dx} + (H+2) \frac{\theta}{U} \frac{dU}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho U^2} = \frac{C_f}{2} \quad (\text{C.10})$$

En la ecuación anterior $H = \delta^*/\theta$ es un factor de forma del perfil de velocidad. El factor de forma se incrementa en un gradiente de presión adverso. Para capa límite turbulenta, H aumenta desde 1.3, para un gradiente de presión cero, hasta aproximadamente 2.5 en la separación de la capa límite. En la capa límite laminar el factor de forma para un gradiente de presión cero es 2.6 y en el punto de separación es de 3.5.