

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO
Y DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL AIRE
PARA GEOMETRIAS A ESCALA**

RAÚL ANTONIO SAGREDO ROJAS

Profesor Guía:

Dr. Juan Pablo Hurtado Cruz

Tesis presentada para optar al Título
Profesional de Ingeniero Físico

SANTIAGO-CHILE
2015

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO
Y DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL AIRE
PARA GEOMETRIAS A ESCALA**

RAÚL ANTONIO SAGREDO ROJAS

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO
Y DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL AIRE
PARA GEOMETRIAS A ESCALA

“Trabajo de Graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en
cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para optar
al Título Profesional de Ingeniero Físico”

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
SANTIAGO-CHILE
2015

“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO
Y DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL AIRE
PARA GEOMETRIAS A ESCALA”

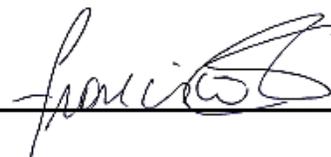
RAÚL ANTONIO SAGREDO ROJAS

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Juan Pablo Hurtado Cruz del departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora del candidato.

Sr. Omar Gallardo Gallardo

Dr. Luis Eugenio Hamm Hahn

Dr. Francisco Santibáñez Calderón



Dr. Juan Pablo Hurtado Cruz
Profesor Guía

Dr. Raúl Labbé Morales
Profesor Patrocinante

Dra. Yolanda Vargas Hernández
Directora del Departamento de Física

© Raúl Antonio Sagredo Rojas

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Dedicatoria

“Vivimos en el mundo cuando amamos. Sólo una vida vivida para los demás merece la pena ser vivida”

Albert Einstein

*Dedicado a Claudia por recorrer
a mi lado este hermoso camino
y a mis padres Raúl y Miriam
por todo su esfuerzo y dedicación.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera aprovechar esta instancia de agradecer a los profesores que me ayudaron en esta ardua tarea. A Juan Pablo Hurtado por su gran ayuda, consejos, paciencia y principalmente por darme la oportunidad de trabajar bajo su tutela siendo un estudiante de otro departamento. A Raúl Labbé Morales junto con Francisco Sepúlveda Palma por todo su conocimiento, experiencia y asesoramiento que me otorgaron para la elaboración de esta tesis.

A todos los profesores del departamento de Física, sin cuyos conocimientos no hubiera logrado tener la capacidad necesaria para desarrollarme como un profesional en Ingeniería y a mis compañeros y amigos por tantos momentos alegres, especialmente a Samuel Gutiérrez por su ayuda.

También quisiera agradecer a mis padres, hermanos y familia en general, por su apoyo incondicionalmente durante todo este periodo. Gracias por ayudar a sacar adelante este desafío.

Agradezco a ti, Claudia, por tu paciencia, ayuda, amistad, cariño y amor incondicional durante este último periodo de elaboración de esta tesis y espero que por el resto de mi vida.

3.8.4 Fuente de alimentación DC	44
3.8.5 Sensores de Presión diferencial MPXV7002DP	44
3.8.5.1 Filtro del ruido.....	46
3.8.5.2 Chip MC78L05.....	47
3.8.6 Compresor.....	49
3.8.7 Tobera y soporte de la sonda de tres agujeros	50
3.8.8 Manómetro de presión diferencial Modelo 406800.....	53
4 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	55
4.1 Soporte del sistema de posicionamiento	55
4.2 Actuador	55
4.3 Características de los actuadores tipo LEL y LEF	57
4.3.1 Actuador LEL.....	58
4.3.2 Actuador LEF	59
4.4 Control del movimiento	63
4.4.1 Secuencia de inicio del actuador.....	64
4.5 Estación de medida	66
5 RESULTADOS	68
5.1 Resultados de la calibración.....	68
5.2 Resultados del cálculo de la velocidad media.....	73
5.3 Simulación CFD.....	75
6 CONCLUSIONES	82
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS.....	87
A.1 Modelos de turbulencia	87
A.2 Fundamentos del método de volúmenes finitos	89
A.3 Curvas de calibración Transductores de presión MPXV7002	94
A.4 Conector E/S.....	96

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Longitudes de tramo recto en aguas arriba Norma ISO 5167-1.....	12
Tabla 2.2. Características del motor del ventilador.	16
Tabla 3.1. Características del motor de paso utilizado.....	41
Tabla 3.2. Secuencia de bits para mover el motor de paso.....	42
Tabla 3.3. Características principales del sensor utilizado.....	46
Tabla 3.4. Características eléctricas del chip MC 78L05.	48
Tabla 4.1. Características del Actuador LEL de motor de paso.....	59
Tabla 4.2. Características del Actuador LEF de motor de paso.....	60
Tabla 4.3. Terminales del conector alimentador.	63
Tabla 5.1. Resultados para calcular la curva característica	73
Tabla 5.2. Resumen de la discretización 2D.....	59
Tabla A1.1. Valor de las constantes de modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ Standard..	88
Tabla A4.1. Descripción de los pines de entrada.....	96
Tabla A4.2. Descripción de los pines de salida.....	96

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Sistema para medir la velocidad media.	2
Figura 1-2. Sonda de tres agujeros montado en el laboratorio.	3
Figura 1-3. Diagrama orgánico de esta Tesis.	3
Figura 2-1. Velocidad promedio, para flujo laminar totalmente desarrollado.	7
Figura 2-2a. Flujo Laminar. Figura 2-2b. Flujo turbulento.....	7
Figura 2-3. Fluctuaciones de la componente v con respecto al tiempo.....	8
Figura 2-4. Pieza de transformación, norma ASHRAE.	9
Figura 2-5. Enderezador de flujo, norma ASHRAE.....	10
Figura 2-6. Dimensiones tubo medidor Venturi, Norma ISO 5167-1.....	11
Figura 2-7, Tubo de Venturi, montado en el laboratorio.....	13
Figura 2-8 Diagrama de flujo estacionario a través de un ducto con distintas secciones.	13
Figura 2-9. Coeficiente de descarga vs N° de Reynolds	15
Figura 2-10. Ventilador Centrífugo.....	15
Figura 2.11. Componentes ventilador Centrífugo.	16
Figura 2-12. Esquema de la curva característica de un ventilador.	17
Figura 2-13. Sistema para al cálculo de la curva característica del ventilador..	17
Figura 2-14. Curva característica del ventilador dada por el fabricante.	18
Figura 2-15. Posición Pitot.....	19
Figura 2-16 Pitot y sus orificios.....	19
Figura 2-17. Manómetro digital.	21
Figura 2-18. Tipos de Instalaciones sugeridas por la Norma ASHARE.	24
Figura 2-19. Ensayo en ducto, Norma AMCA-ASHRAE.	24
Figura 2-20. Dimensiones del ducto de salida, Ventilador.	25
Figura 2-21. Pieza de transformación divergente.	25
Figura 2-22. Acople ducto de salida con pieza de transformación.....	26
Figura 2-23. Dimensión tubería	26
Figura 2-24. Tubería montada en el Laboratorio.....	26
Figura 2-25. Dimensiones tubo de Venturi.....	27
Figura 2-26. Pieza de transformación de sección circular a sección cuadrada	27
Figura 2-27. Pieza de transformación, montada en el laboratorio.....	27
Figura 2-28. Esquema del enderezador de flujo.	28
Figura 2-29. Dimensiones de la estación de medida	28
Figura 2-30. Túnel de viento	29
Figura 3-1. Geometría de las sonda tipo: Cilíndrica, Trapezoidal y Cobra.....	31
Figura 3-2. Flujo no viscoso a lo largo de un tubo de corriente.....	34
Figura 3-3. Numeración de los agujeros de la sonda.....	36
Figura 3-4. Dibujo de la geometría en base a la sonda tipo cobra SVUSS/3.....	37

Figura 3-5. Geometría sonda SVUSS/3.....	39
Figura 3-6. Motor de paso bipolar de 200 pasos.....	41
Figura 3-7. Componentes del PaperStepper.	42
Figura 3-8. Tarjeta de adquisición de datos Personal Daq/ 3000 series.....	43
Figura 3-9. Conexión tarjeta de adquisición con PaperStepper.	44
Figura 3-10. Fuente de poder DC.	44
Figura 3-11. Sensor de presión MPXV7002DP.....	45
Figura 3-12. Circuito interno del chip del sensor.....	45
Figura 3-13. Nomenclatura de las patas del sensor.....	45
Figura 3-14. Conexión sensor y filtro pasa baja.....	47
Figura 3-15. Esquema del regulador de voltaje.	47
Figura 3-16. Circuito estándar para el Chip MC78L05.....	48
Figura 3-17. Conexiones entre el sensor, filtro y tarjeta de adquisición.....	48
Figura 3-18. Compresor ARILET, montado en el laboratorio.	49
Figura 3-19. Tobera en fibra de vidrio.....	50
Figura 3-20. Tobera con sus componentes.	50
Figura 3-21. Localización de la sonda.	51
Figura 3-22. Soporte de la sonda.....	51
Figura 3-23. Medición de P y PS, con tubo de Pitot.....	52
Figura 3-24. Tubo de Pitot empleado en la medición de P y PS.....	52
Figura 3-25. Manómetro utilizado para el control de presión en la tobera.	53
Figura 3-26. Interfaz para controlar la adquisición de datos y generación de bits.	54
Figura 3-27. Cadena de medida, para la calibración de la Sonda.	54
Figura 4-1. Dimensiones del soporte de los actuadores.	55
Figura 4-2. Actuador LEL de SMC, con motor de paso.	56
Figura 4-3. Actuador LEF de SMC, con motor de paso.	57
Figura 4-4. Planos de medición.	57
Figura 4-5. Puntos de medición en un plano.	58
Figura 4-6. Características físicas actuador LEL.	58
Figura 4-7. Características físicas actuador LEF.	59
Figura 4-8. Soporte tubería.....	60
Figura 4-9. Rodamiento lineal.....	60
Figura 4-10. Pieza de adaptación de actuadores.....	61
Figura 4-11. Los actuadores montados en el laboratorio.....	61
Figura 4-12. Cadena de control de los actuadores.	61
Figura 4-13. Señal de pulso para la activación de los pines.	62
Figura 4-14. Driver SN754410.	62
Figura 4-15. Conector de alimentación CN1.	63
Figura 4-16. Fuente de 24 V DC.....	64
Figura 4-17. Señal de salida al desactivar la alarma.	64
Figura 4-18. Terminales de salida al momento de activar el pin SETUP.	65
Figura 4-19. Secuencia de operación de posicionamiento.	65
Figura 4-20. Cadena de medida para el sistema de posicionamiento.	66

Figura 4-21. Obstáculo vista 1.	66
Figura 4-22. Obstáculo vista 2.	66
Figura 4-23. Dirección del flujo.	67
Figura 4-24. Distribución del flujo.....	67
Figura 4-25. Offset de la posición angular de la sonda.....	67
Figura 5-1. Curva teórica del coeficiente K_{β}	68
Figura 5-2. Curva teórica del coeficiente K_t	68
Figura 5-3. Curva teóricas del coeficiente K_s	69
Figura 5-4. Coeficiente experimental de presión total K_{β}	69
Figura 5-5. Coeficiente experimental del coeficiente K_t	70
Figura 5-6. Coeficiente experimental de presión estática K_s	70
Figura 5-7. Curva de ajuste para K_{β}	72
Figura 5-8. Curva característica del ventilador.....	73
Figura 5-9. Componentes medios de la velocidad medido con la sonda	74
Figura 5-10. Componente Y de la velocidad media.	74
Figura 5-11. Componente X de la velocidad media.	75
Figura 5-12. Geometría 2D.	76
Figura 5-13a. Mallado Geometría 2D, Figura 5-13b. Mallado Completo.....	77
Figura 5-14. Vectores de Velocidad en estado permanente.	78
Figura 5-15. Componente Y en estado permanente.....	78
Figura 5-16. Componente X en estado permanente.....	79
Figura 5-17. Campo de velocidad en estado transiente.....	79
Figura 5-18. Componente Y en estado transiente.	80
Figura 5-19. Componente X en estado transiente.	80
Figura A2-1. Discretización mediante volúmenes de control del dominio físico.....	90
Figura A3-1. Señal de salida vs Presión diferencial.....	94
Figura A3-2. Señal de salida Sensor 1 vs Presión diferencial.	94
Figura A3-3. Señal de salida Sensor 2 vs Presión diferencial.	95
Figura A3-4. Señal de salida Sensor 3 vs Presión diferencial.	95
Figura A4-1. Terminales del conector E/S, de tipo PNP	96

RESUMEN

El presente trabajo se realiza en el área de ventilación del Departamento de Ingeniería en Minas gracias al financiamiento del Proyecto Dicyt 051215HC y su propósito es generar un sistema de medición de experiencias de laboratorio que permita obtener la velocidad media del flujo del aire en un túnel de viento. La velocidad media se mide con una sonda de tres agujeros, la cual mide las componentes escalares y vectoriales del campo de flujo en 2D a través de ecuaciones adimensionales provenientes de una calibración previa.

Para realizar la calibración de la sonda se construye un montaje, el cual contempla un sistema de orientación angular de la sonda con la utilización de un motor de paso controlado desde el computador, un sistema de generación de flujo constante con la ayuda de un compresor y un contenedor, finalmente un sistema de adquisición de datos analógicos que provienen de la sonda.

Con la calibración realizada se procede con la construcción del túnel de viento bajo las normas existentes. El túnel de viento está compuesto por una tubería circular, un tubo de Venturi, piezas de transformación, un enderezador de flujo y una estación de medida.

El sistema de posicionamiento automático de la sonda se realiza en dos dimensiones con dos actuadores eléctricos para trasladar la sonda en dos ejes en la zona de medición y un sistema de adquisición de datos analógicos. La adquisición de datos analógicos y la generación de pulsos para el control del motor de paso y los actuadores se realizan a través de una tarjeta de adquisición de datos (Personal Daq/3000 Series) controlados mediante el software Labview 2011. El procesamiento y visualización de datos se realiza con la ayuda del software MATLAB.

Los resultados de la calibración de la sonda de tres agujeros contienen dispersión en los datos experimentales para los coeficientes k_s y k_t provenientes de imperfecciones de construcción de la sonda y a considerables fluctuaciones del flujo provenientes del compresor. Sin embargo, el coeficiente k_β resultó muy similar a los resultados teóricos utilizando el método de proyección de línea de corriente. Con la utilización del ajuste de este último coeficiente se calcula la dirección del flujo incidente.

Los resultados de la velocidad media son contrastados con los resultados obtenidos con el software comercial Fluent de ANSYS, para una simulación CFD transiente y otra permanente. Se comparan resultados experimentales con los numéricos obteniendo bastante similitud, dentro de las limitaciones de este sistema de medición para flujo permanente. Con este trabajo se logran obtener las primeras mediciones de velocidad media bidimensional del flujo en el estudio de una geometría sencilla. De esta manera, se puede proyectar un desarrollo posterior y mejoras al implementar una sonda de 5 (3D) agujeros con un sistema de calibración adecuado y un sistema de rotación para evaluar las componentes espaciales en cualquier dirección del plano de medición.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción.

En campos de Flujos complejos, como es el caso de las turbomáquinas y geometrías complejas, se requiere a menudo determinar experimentalmente las componentes tridimensionales del flujo en estado estacionario.

En contraste con el estudio del chorro libre, el campo de flujo de las turbomáquinas y geometrías complejas exhiben fuertes gradientes de velocidad. Los gradientes son inducidos por las estelas provocadas por los álabes y los cambios en la geometría. Existen métodos numéricos que estudian el comportamiento de estos campos de flujos complejos, los que pueden ser contrastados experimentalmente para su validación.

Las muchas aplicaciones en mediciones de flujo de fluido cubren un amplio espectro de actividades. Por ejemplo, estudios relacionados con un túnel de viento están presentes en fenómenos de sustentación, resistencia, vibraciones y como diagnóstico de transferencia de calor y de masa.

Las mediciones principales son la dirección del flujo y las presiones estáticas y totales. Otra medición importante es la temperatura estática y total la cual no será objeto de estudio durante este trabajo.

1.2 Motivo o justificación del Estudio

El sistema de medición que se desarrolla en este trabajo, proporciona valores empíricos de las componentes espaciales medias de la velocidad en estado estacionario del aire. Estos componentes demuestran el comportamiento aerodinámico del flujo. Los datos obtenidos experimentalmente validarán simulaciones numéricas con técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics) con la utilización de Fluent de ANSYS.

1.3 Descripción del trabajo

Este trabajo consiste en el desarrollo de un sistema de posicionamiento y de medición de la velocidad media del flujo de aire mediante una sonda de tres agujeros. Para ello se implementa un túnel de viento donde el flujo de aire es alimentado por un ventilador centrífugo. El sistema incorpora un tubo de Venturi, una zona de medición y dos actuadores para posicionar la sonda en dos ejes (ver figura 1-1). Un computador equipado con una interfaz que controla una tarjeta de adquisición de datos para la captura de la señal analógica proveniente de los transductores de presión y la generación de señales digitales para el control de los actuadores, los sistemas electrónicos y los programas creados para este propósito: El software que posibilita la generación de pulsos y la adquisición de datos es Labview 2011, mientras que para la interpretación y visualización de datos se utiliza Matlab.

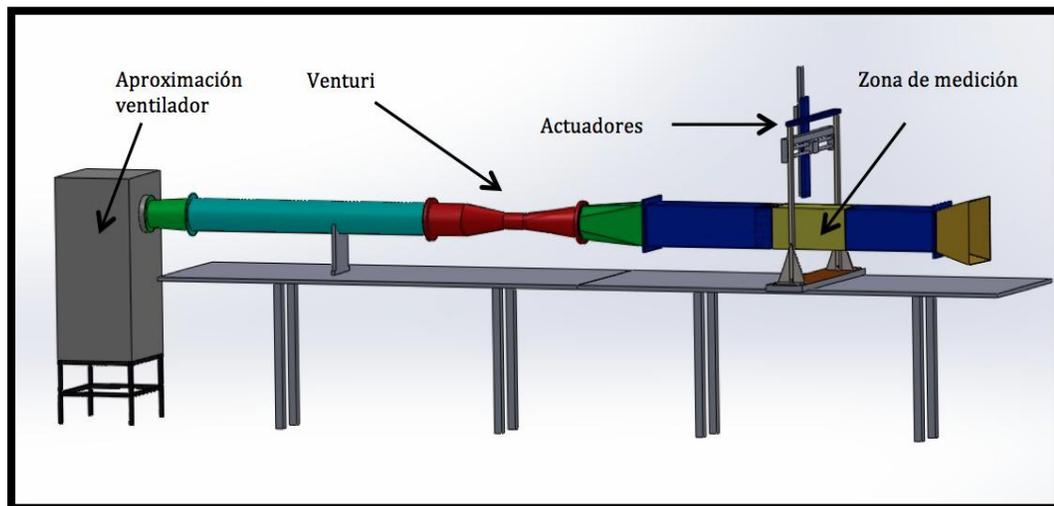


Figura 1-1. Sistema para medir la velocidad media.

1.4 Metodología

Para medir la velocidad media del flujo se utiliza una sonda de tres agujeros tipo cobra (ver figura 1-2) que otorga una estimación de la rapidez y la dirección del flujo de aire en un plano horizontal. Las sondas de tres agujeros son particularmente atractivas para estas mediciones, ya sea porque estas

sondas son cada vez más útiles con el desarrollo de pequeños transductores de presión de respuesta rápida y de bajo costo, junto con los sistemas de desplazamientos y adquisición de datos controlados por el ordenador.

Previamente a las mediciones con la sonda, esta se calibra con el propósito de disminuir errores asociados a la construcción y tamaño.



Figura 1-2. Sonda de tres agujeros montado en el laboratorio.

En la figura 1-3 se muestran los principales componentes y actividades comprendidas en esta Tesis.

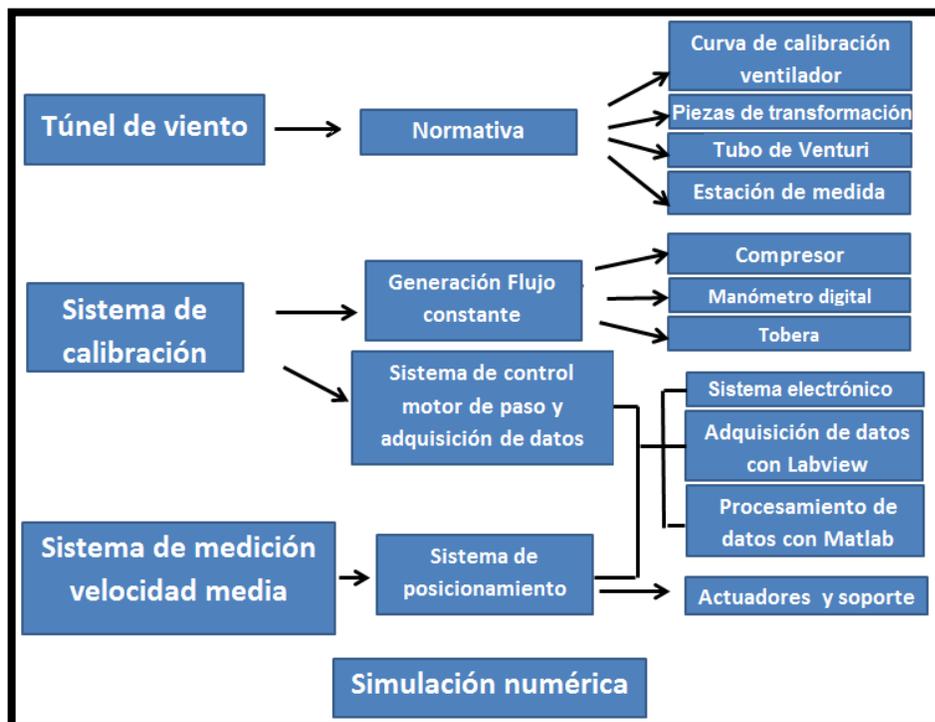


Figura 1-3. Diagrama orgánico de esta Tesis.

1.5 Limitaciones y alcances

- Sistema concebido para medir las componentes medias de la velocidad, dejando de lado las velocidades instantáneas.
- Sistema para medir velocidades medias bajas $< 50 \text{ m/s}$.

Las mediciones de presión diferencial que proporciona las sondas de tres agujeros es una alternativa útil y más económica para los métodos de anemometría, en comparación con hot-wire y hot-film, métodos que determinan las direcciones de flujos complejos capaces de captar con exactitud flujos transitorios de alta frecuencia.

1.6 Objetivos Generales

- Desarrollar un sistema de posicionamiento, calibración y de medición de las componentes espaciales medias de la velocidad del aire, con aplicación para geometrías a escalas.

1.7 Objetivos Específicos

- Desarrollar un sistema de medición para una sonda de tipo tres agujeros.
- Desarrollar un sistema de calibración para la sonda de tipo tres agujeros.
- Construir y desarrollar túnel de viento bajo Norma AMCA-ASHRAE.
- Construir y desarrollar un sistema de posicionamiento de la sonda.
- Realizar un sistema de adquisición de datos y programas de control de la posición y orientación de la sonda.

2. DISEÑO GENERAL DEL TÚNEL DE VIENTO

En el presente capítulo se presentan las normas que se utilizaron para la construcción del túnel de viento, tanto para el dimensionamiento y construcción de piezas de transformación cuando existen cambios en la geometría de las partes que componen el sistema, como también para determinar las distancias necesarias para fijar cada componente con el fin de generar un flujo uniforme y homogéneo. En este capítulo también se describe la implementación de los diferentes instrumentos de medición para obtener las cantidades físicas que son características del túnel de viento.

2.1 Presentación de las Normas Utilizadas para el estudio

Para el túnel de viento empleado en este trabajo, en estricto rigor, no existe una normativa que explique una metodología estandarizada que integre todos los componentes que constituyen el montaje. Por esta razón, las normas utilizadas dan a conocer las reglas, fórmulas y métodos que involucran elementos específicos del túnel: ya sea en la implementación del tubo de Venturi, calibración del ventilador, piezas de transformación y en las características necesarias cuando existe una estación de medida, con el fin de generar un flujo uniforme y homogéneo.

2.1.1 NORMA AMCA-ASHARE: “Laboratory Methods of Testing Fans for Rating, American National Standard”, 1985. Norma utilizada para la construcción de bancos de ensayo. Permite la calibración del ventilador Centrífugo y generar un flujo homogéneo.

2.1.2 NORMA ISO 5167-1: “Measurement of fluid flow by means of pressure differential device inserted in circular cross-section conduits running full, INTERNATIONAL STANDARD, 2003, 2^o edition”.

Norma utilizada para la construcción del tubo de Venturi, para el cálculo del Caudal.

2.1.3 NORMA UNE 100-212-90: Norma española (aenor) ventiladores, 1990, 1º edición.

Norma utilizada para el cálculo de la densidad del aire, teniendo en consideración la presión barométrica, temperatura en bulbo seco y en bulbo húmedo del Psicrómetro. Esta norma también se utiliza para la medición de las presiones dinámicas, totales, estáticas y caudal con la utilización del tubo de Pitot.

2.2 Construcción túnel de viento

2.2.1 Equipamiento

El túnel de viento está constituido por los siguientes componentes:

- Tubería
- Pieza de transformación sección divergente (de secciones circulares)
- Pieza de transformación sección divergente (de zona circular a zona cuadrada)
- Ventilador Centrífugo
- Venturi
- Cámara de medida

2.2.1.1 Tubería

Flujo en tuberías.

Cuando el aire fluye en ductos de diámetro constante, la velocidad del fluido cambia de cero en la superficie debido a la condición de no-deslizamiento hasta un máximo en el centro de la tubería. En el flujo de fluidos, es conveniente trabajar con una velocidad promedio V_{prom} que permanece constante en un flujo incompresible, cuando el área de la sección transversal de

la tubería es constante (ver figura 2-1), lo que se cumple siempre y cuando no existan cambios en la temperatura.

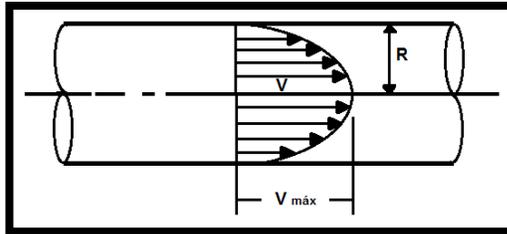


Figura 2-1. Velocidad promedio, para flujo laminar totalmente desarrollado [22].

El perfil de velocidad en un flujo laminar totalmente desarrollado en una tubería es parabólico y tiene la siguiente forma.

$$u(r) = 2V_{prom} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (2.1)$$

Por lo tanto V_{prom} se puede obtener fácilmente sustituyendo $r=0$, que corresponde a la velocidad máxima.

$$V_{prom} = \frac{V_{máx}}{2} \quad (2.2)$$

Existen dos regímenes presentes en flujo por tuberías:

Flujo laminar:

En el régimen laminar (figura 2-2a), el flujo se caracteriza por tener líneas de corriente aproximadamente paralelas y movimiento sumamente ordenado a bajas velocidades.

Flujo turbulento:

En el régimen turbulento (ver figura 2-2b), el flujo se caracteriza por tener un movimiento desordenado y dominado por fluctuaciones. Está presente en la mayoría de los estudios de ingeniería.

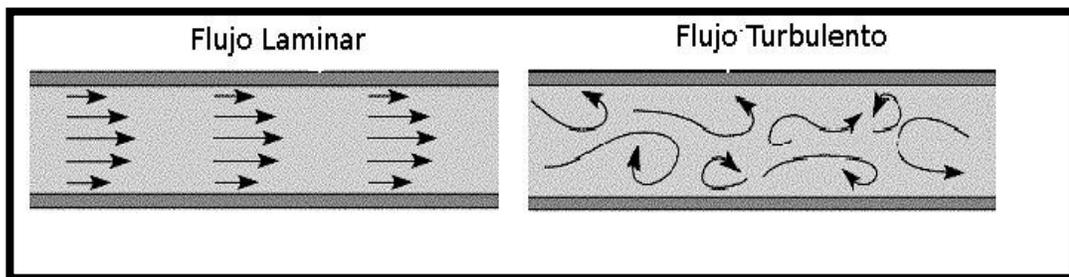


Figura 2-2a. Flujo Laminar.

Figura 2-2b. Flujo turbulento.

Aun cuando el flujo promedio sea estacionario, la turbulencia provoca fluctuaciones importantes en los valores de velocidad, temperatura, presión e incluso densidad (en flujo compresible). La figura 2-3 muestra la variación de la componente instantánea v con el tiempo en una posición específica. Cuando se mide esta cantidad con la sonda de tres agujeros u otro dispositivo sensible, se observa que los valores instantáneos de la velocidad fluctúan en torno a un valor promedio, lo que sugiere que la velocidad se puede expresar como la suma de un valor promedio \bar{v} y una componente fluctuante v' :

$$v = \bar{v} + v' \tag{2.3}$$

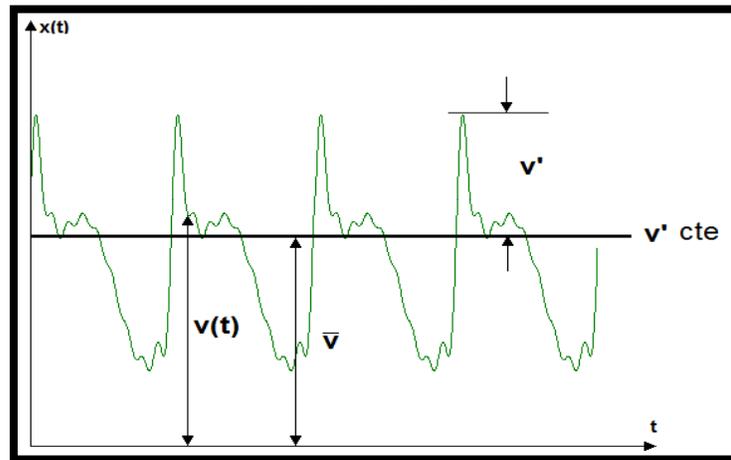


Figura 2-3. Fluctuaciones de la componente v con respecto al tiempo [22].

El régimen de flujo laminar para aire en tuberías es muy difícil de lograr. En la realidad sólo se hace posible con velocidades extremadamente bajas; siendo el régimen turbulento lo habitual para estas situaciones.

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie, el tipo de fluido, entre otros factores. En otras palabras el régimen dependerá directamente del número de Reynolds.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu} = \frac{V_{prom} D \rho}{\nu} \tag{2.4}$$

Siendo $D_h = \frac{4A_c}{P}$. Para flujos a través de tuberías circulares y no-circulares.

Donde:

D_h : Diámetro hidráulico (m), con P =perímetro (m) y A_c = área de sección transversal (m^2).

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3), ν : Viscosidad cinemática (m^2/s),

V_{prom} : Velocidad media del flujo (m/s), μ : Viscosidad dinámica ($kg/m \cdot s$)

Se considera como flujo laminar si el número de Reynolds es menor a 2000 y turbulento si es mayor a 4000. El rango entre ambos números se conoce como zona crítica o de transición y el fluido tiene un comportamiento impredecible.

2.2.1.2 Piezas de transformación

Los elementos de transformación o empalme (ver figura 2-4), se emplearán cuando exista una conexión de componentes cuando estos sean de tamaños diferentes. Estas piezas no deben tener ningún elemento convergente que forme con el eje del ducto un ángulo mayor de $7,5^\circ$ y ningún elemento divergente que forme con el eje del ducto un ángulo mayor de $3,5^\circ$. Los ejes de los componentes deben coincidir.

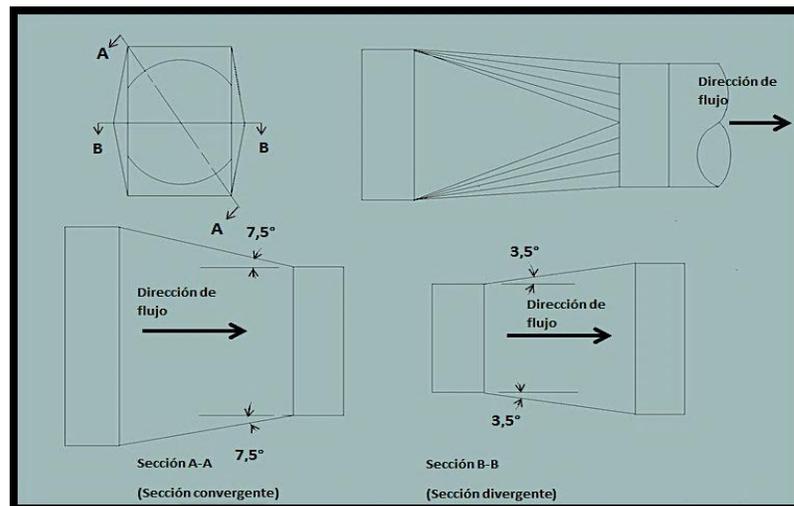


Figura 2-4. Pieza de transformación, norma ASHRAE [14].

2.2.1.3 Enderezador de Flujo

Estos se emplean en todos los conductos en los que se encuentran estaciones de medida (ver figura 2-5). Su función es eliminar las turbulencias originadas por el funcionamiento del ventilador, disipando remolinos y disminuyendo la turbulencia desarrollada del flujo que pasará a través de la estación de medida. Su ubicación está entre 5-5,25 diámetros corriente arriba, desde el plano de la estación de medida.

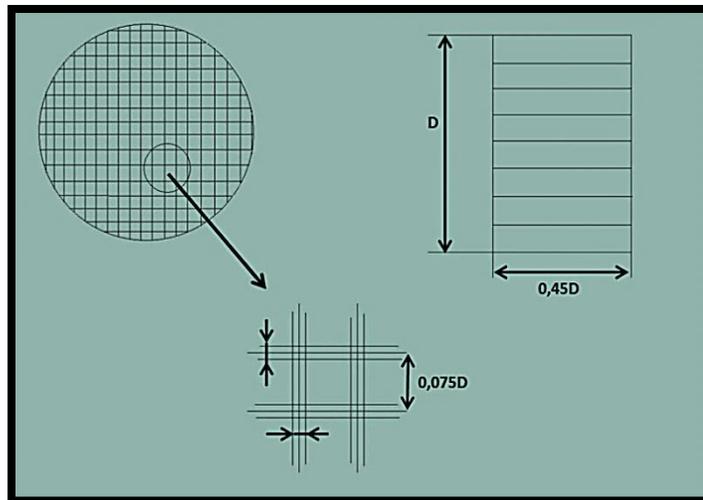


Figura 2-5. Enderezador de flujo, norma ASHRAE [14].

2.2.1.4 Tubo de Venturi, para el cálculo del Caudal Q

Es un elemento deprimógeno (ver figura 2-6), cuya función es provocar una diferencia de presión, siendo Q una función de dicha diferencia. Está constituido de tres partes: una convergente, otra sección mínima o garganta, y finalmente una tercera parte divergente. La sección transversal del Venturi es circular. La diferencia de presión se mide en la zona de alta presión y en la zona de baja presión con manómetro diferencial. Las dimensiones del Venturi como las piezas de transformación que constituyen el túnel de viento se basan en el diámetro de la tubería bajo la norma ISO 5167-1.

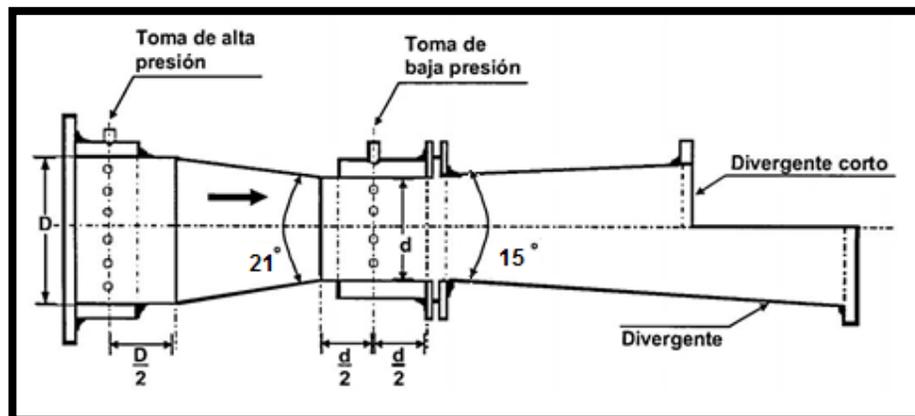


Figura 2-6. Dimensiones tubo medidor Venturi, Norma ISO 5167-1 [9].

El tubo de Venturi va unido a una tubería de diámetro $D=15,29$ cm. El cono convergente de entrada tiene un ángulo de 21° , se dirige hacia la sección recta denominada garganta de diámetro d . Finalmente, un largo cono divergente con un ángulo de 15° restaura la presión con la expansión del flujo hacia el mismo diámetro de la entrada.

La presión que precede al cono de entrada se transmite a través de múltiples aberturas a una abertura anular llamada anillo piezométrico. De modo análogo, la presión en la garganta se transmite a otro anillo piezométrico. Una sola línea de presión sale de cada anillo y se conecta con un manómetro.

En algunos diseños los anillos piezométricos se sustituyen por sencillas uniones de presión que conducen a la tubería de entrada y a la garganta.

Es esencial que el flujo de entrada sea uniforme [9], para disminuir las pérdidas de carga o de presión. La relación de diámetros (β) del tubo de Venturi, es importante para fijar esta uniformidad del flujo. Esta se logra garantizando una longitud suficiente de tramo recto aguas arriba. En esta sección no debe existir ningún accesorio o conexión.

Luego que el flujo sale del ventilador, existe una pieza de transformación de expansión que une el ducto de salida del Ventilador con la tubería. Entonces,

sabiendo la relación de diámetros (β) y el tipo de conexión y/o accesorio que existe antes del tramo recto, es posible conocer esta longitud.

Tabla 2.1. Longitudes de tramo recto en aguas arriba, Norma ISO 5167-1

Accesorio y/o conexión	Dispositivo	Valor de β						
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
Codo simple	Tobera	14	16	18	20	26	28	36
	Venturi	---	0,5	1,5	1,5	3	4	4,5
Dos codos en el mismo plano	Tobera	14	16	18	20	26	36	42
	Venturi	---	1,5	1,5	2,5	3,5	4,5	4,5
Dos codos en planos distintos	Tobera	34	34	36	40	48	62	70
	Venturi	---	0,5	0,5	8,5	17,5	27,5	29,5
Reducción	Tobera	5	5	5	6	9	14	22
	Venturi	---	0,5	2,5	5,5	8,5	10,5	11,5
Expansión	Tobera	16	16	16	18	22	30	38
	Venturi	---	1,5	1,5	2,5	3,5	5,5	6,5
Válvula de globo abierta	Tobera	18	18	20	22	26	32	36
	Venturi	---	1,5	2,5	3	3,5	4	4,5
Válvula de compuerta abierta	Tobera	12	12	12	12	14	20	24
	Venturi	---	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	5,5

La longitud de tramo recto aguas arriba se define como el producto del valor proveniente de la tabla 2.1 (conociendo el valor de β y el tipo de conexión) por el diámetro de la tubería. El valor de $\beta = 0,5$ y el tipo de conexión es de expansión. Sabiendo esto, la tabla entrega un valor de 2,5. Finalmente, la longitud de tramo recto es de $\sim 38,2$ cm.

En el tubo de Venturi se acelera el flujo desde la tubería principal en la sección 1 a través de la sección angosta, donde disminuye la presión del fluido. Después el flujo se expande a través del cono divergente al mismo diámetro que la tubería principal. En la pared de la sección 1 y en la pared de la garganta designada como sección 2, se encuentran ubicados las tomas de presión. En la figura 2-7 se exhibe el diseño experimental implementado del tubo de Venturi en el laboratorio de ventilación.



Figura 2-7. Tubo de Venturi, montado en el laboratorio.

Considerando Flujo incompresible de un fluido en tubería horizontal de diámetro D que se restringe a un área de flujo de diámetro d , las ecuaciones de conservación de masa y de Energía entre una posición antes de la restricción (sección 1) y la posición en la sección angosta (sección 2) se puede escribir como:

Equilibrio de masa

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (2.5)$$

Reordenando,

$$V_1^2 = V_2^2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \quad (2.6)$$

Donde:

A_1, A_2 : Áreas transversales a los planos de medida

V_1, V_2 : Velocidades medias en los planos de medida

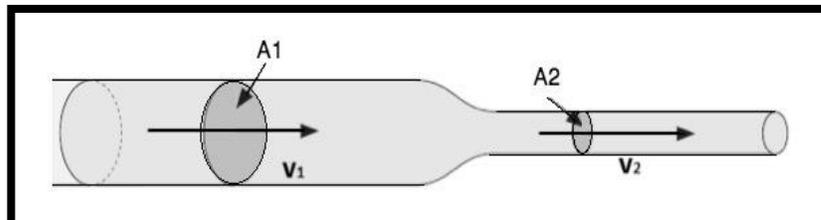


Figura 2-8. Diagrama de flujo estacionario a través de un ducto con distintas secciones [22].

Ecuación de Bernoulli

Para un flujo estacionario e incompresible ($\rho = \text{constante}$):

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{Constante} \quad (2.7)$$

La ecuación de Bernoulli que atraviesa las secciones 1 y 2 resulta:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) - h \quad (2.8)$$

Cuando se combinan las ecuaciones (2.4) y (2.6) y se resuelve para V_2 , se obtiene:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) + (Z_1 - Z_2) - H}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \quad (2.9)$$

Donde:

Z: Altura Geodésica o Cota, Energía Potencial/ Peso del fluido

H: Término incorporado por las pérdidas de energía

P_1, P_2 : Presiones que corresponden a las dos secciones

ρ : Densidad del fluido

Se pueden realizar dos simplificaciones. El término $(Z_1 - Z_2)$ es muy pequeño, se desprecia. Segundo término H es la pérdida de la energía a medida que se pasa de la sección 1 a la sección 2. El valor de H debe determinarse de manera experimental. Pero es más conveniente modificar la ecuación eliminando H e introduciendo un coeficiente de descarga C por norma. De esta forma la ecuación se puede utilizar para calcular la velocidad de flujo en la garganta del medidor y el caudal, por lo que la ecuación queda de la forma:

$$Q = CA_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \quad (2.10)$$

El valor del coeficiente de descarga C depende del número de Reynolds del flujo y de la geometría del medidor. La figura 2-9 enseña la curva típica de C versus número de Reynolds.

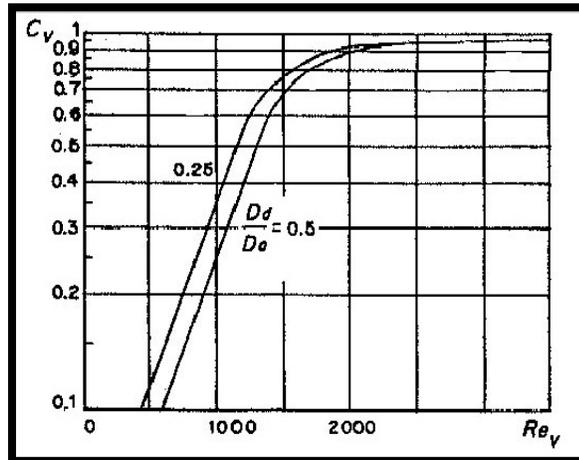


Figura 2-9. Coeficiente de descarga vs N° de Reynolds.

2.2.1.5 Ventilador

La fuente generadora del flujo de aire para el experimento, es un ventilador centrífugo. En la figura 2-10 se muestra el ventilador indicando la entrada y la descarga del aire.

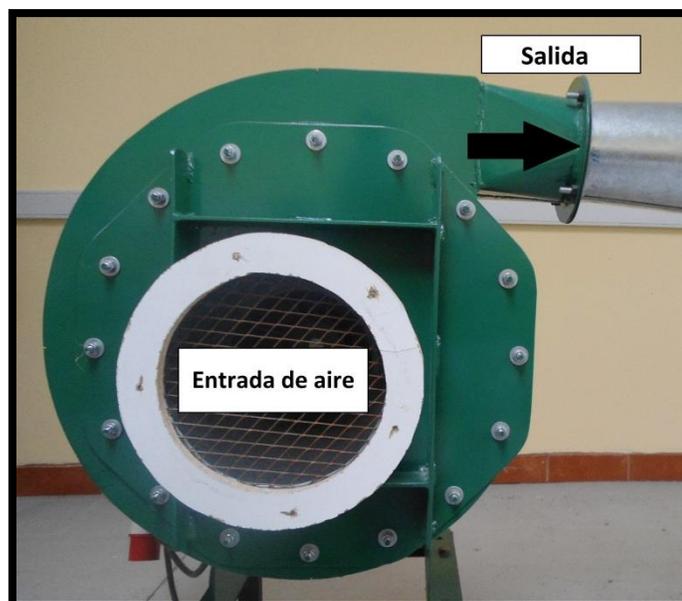


Figura 2-10. Ventilador Centrífugo.

Especificaciones Técnicas del motor del ventilador dadas por el fabricante.

Tabla 2.2. Características del motor del ventilador.

HP	3
Voltaje (V)	380
RPM	3000
KW	2,2
Hz	50
Coseno φ	0,85
Eficiencia del motor	81,10%

En un ventilador centrífugo el fluido entra de manera axial por la parte central llamada oído de entrada (ver figura 2-11). Después que el fluido enfrenta los alabes rotatorios, adquiere velocidad tangencial y radial por la transferencia de cantidad de movimiento por parte de los álabes. El flujo después de acumular tanto velocidad o presión, es lanzado hacia la voluta, cuyo objetivo es desacelerar el movimiento rápido del fluido, provocando un aumento en la presión del fluido, y combinar y dirigir el flujo hacia una salida común.

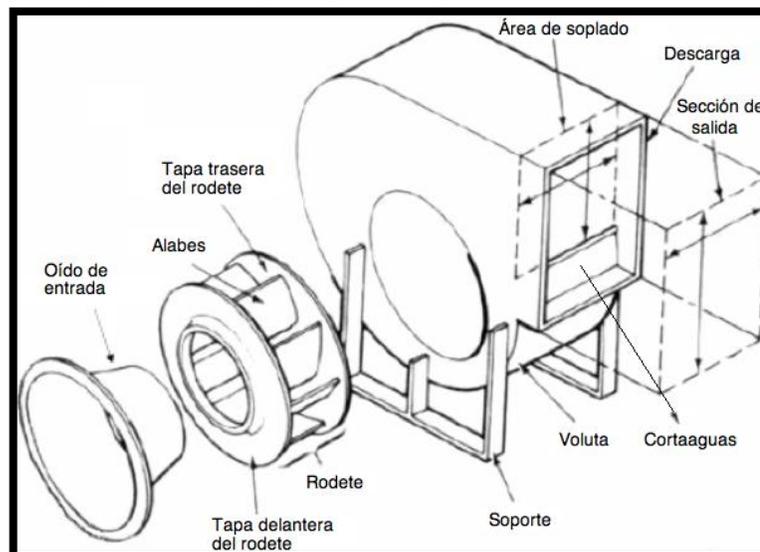


Figura 2-11. Componentes ventilador Centrífugo [11].

La curva característica del ventilador es una representación gráfica que abarca todo el rango de funcionamiento (ver figura 2-12). Es importante ya que permite saber en que punto de funcionamiento se encuentra el ventilador, y con esto, conocer en que punto de eficiencia está situado al momento de realizar la experiencia.

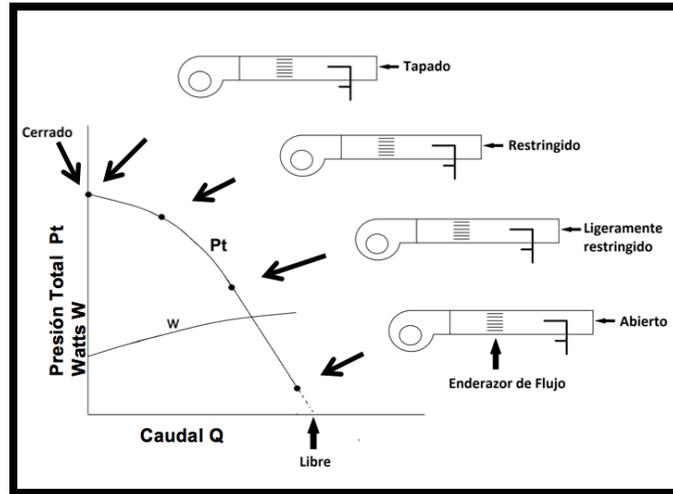


Figura 2-12. Esquema de la curva característica de un ventilador.

La obtención de la curva característica, se realiza con tubo de Pitot (dimensiones según normas existentes) midiendo las tres presiones de manera simultánea; Presión estática (P_s), Presión dinámica (P_d), y Presión total (P_t), para diferentes caudales. La figura 2-13 muestra como se produjo la variación del caudal.

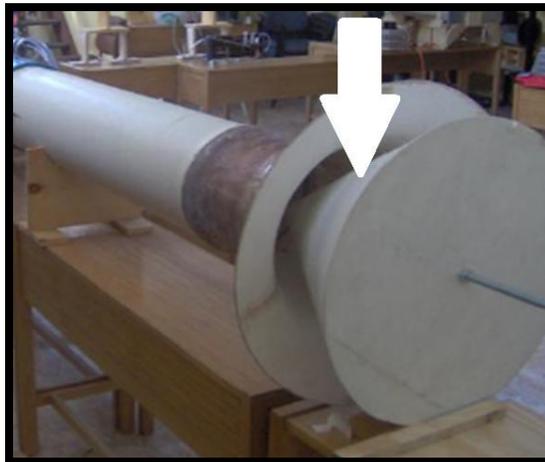


Figura 2-13. Sistema para al cálculo de la curva característica del ventilador.

El ventilador funciona a velocidad constante descargado hacia el ducto recto. Se necesita una alimentación de 380V para su funcionamiento, por lo que se utiliza un sistema de corriente trifásico.

La figura 2-14 expone la curva característica del ventilador centrífugo.

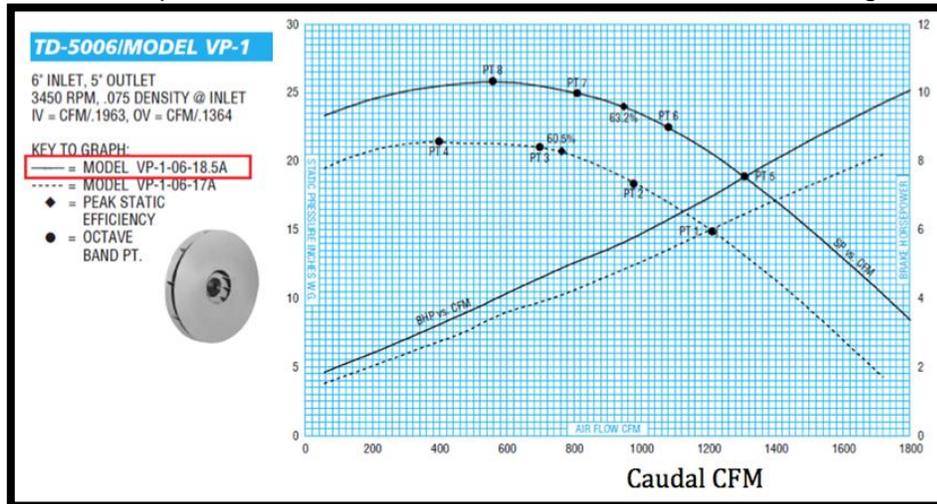


Figura 2-14. Curva característica del ventilador dada por el fabricante.

2.2.1.5.1 Instrumentación Utilizada en la calibración del ventilador

Medición de Presión

Tubos de Pitot y tubos de Prandtl:

Tubo de Pitot y los tubos de Pitot estáticas (Tubos de Prandtl), se usan para medir el caudal y la velocidad de flujo con la ayuda de un manómetro diferencial. El tubo de Pitot básicamente consiste en un tubo con un orificio en el punto de estancamiento, donde la velocidad es nula. Mientras que el tubo de Prandtl, además de tener este agujero, tiene agujeros ubicados en la superficie exterior para medir la presión estática. Para este trabajo, por simplicidad, ambos tubos se les denominará tubos de Pitot.

El tubo de Pitot se coloca en sentido contrario al flujo (ver figura 2-15), con el fin de que el flujo choque por el agujero frontal (punto 1). La velocidad en la entrada es nula, siendo este un punto de estancamiento (ver figura 2-16), la energía cinética se convierte en energía de presión.

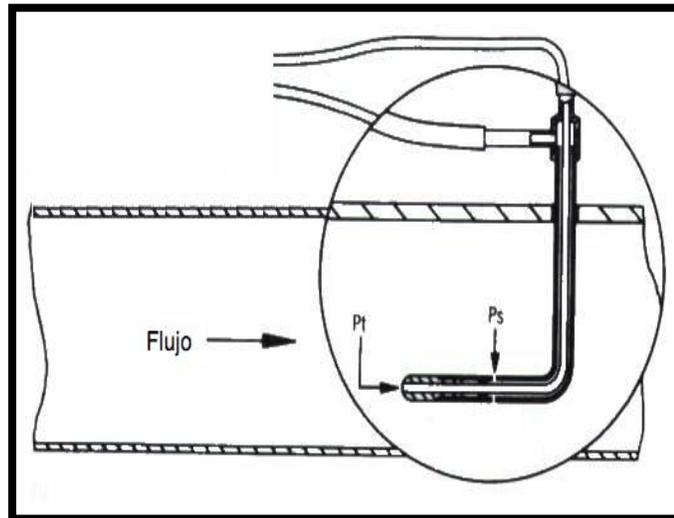


Figura 2-15. Posición Pitot [22].

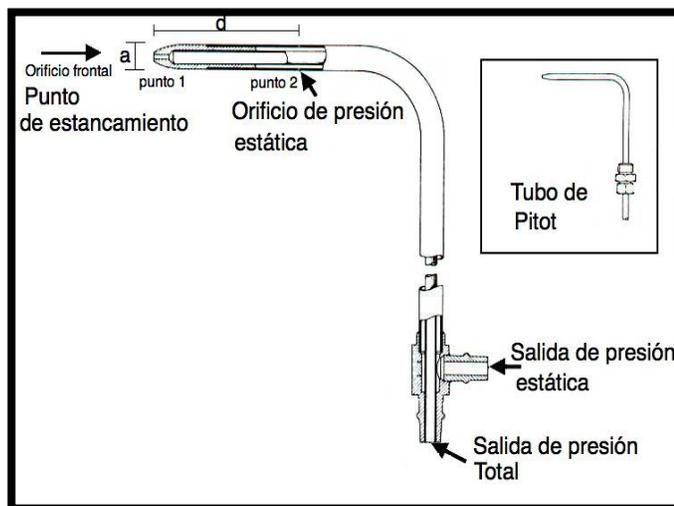


Figura 2-16 Pitot y sus orificios [22].

El flujo además de generar presión por el agujero frontal, lo produce por los orificios de la superficie del tubo (punto 2). El tubo de Pitot mide la velocidad local cuando se mide la diferencia de presión aplicando la ecuación de Bernoulli.

Para un flujo estacionario a lo largo de una línea de corriente se cumple:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \frac{V^2}{2} + g = \text{Constante} \quad (2.11)$$

Para un flujo estacionario e incompresible ($\rho = \text{constante}$) se cumple:

$$P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g z = \text{Constante} \quad (2.12)$$

Donde:

P : Presión estática (P_s) (No incorpora efectos dinámicos).

$\rho V^2/2$: Presión dinámica (P_d)

$\rho g z$: Presión hidrostática, relacionado al aumento en la presión, producto al peso del fluido sobre la presión.

La suma de presión estática y la presión dinámica se le denomina presión total P_t .

$$P_t = P + \rho \frac{V^2}{2} \quad (2.13)$$

Bernoulli dice que para un flujo estacionario e incompresible la energía total de flujo que pasa a través de una línea de corriente es constante. En otras palabras la suma de energía cinética y energía potencial es constante.

Por lo tanto, entre los puntos 1 y 2 la ecuación de Bernoulli es aplicable y se puede expresar como:

$$P_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho g z_1 = P_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \rho g z_2 \quad (2.14)$$

Desarrollando y aproximando las ecuaciones con $z_1 \cong z_2$, porque los agujeros de presión estática se distribuyen de manera circular alrededor del tubo y $V_1 = 0$, por la condición de estancamiento, simplificando para V_2 la ecuación queda finalmente:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (2.15)$$

La ecuación 2.15, se conoce como la fórmula de Pitot, si esta velocidad corresponde a la velocidad de flujo promedio, el caudal se puede determinar a partir de:

$$Q = V_2 A \quad (2.16)$$

Donde:

A: Sección transversal de la tubería.

Q: Caudal o flujo volumétrico.

Manómetro digital:

Instrumento ideal para obtener una medición de presión rápida y precisa en un lugar concreto de un fluido o diferencias de presiones. Consta de dos tomas de presión las que van conectadas a la fuente de presión y transmiten la presión al interior del instrumento, donde existe un sistema calibrado que entrega las mediciones en las siguientes unidades: mmH_2O , inchH_2O , Pa, PSI y mbar. Adicionalmente, este instrumento entrega las medidas de la velocidad y de temperatura.



Figura 2-17. Manómetro digital.

Medición de temperatura

Psicrómetro:

Instrumento que mide la temperatura ambiente, con bulbo húmedo y bulbo seco, con una precisión de $0,5^{\circ}\text{C}$.

El bulbo seco entrega la temperatura ambiente, mientras que el bulbo húmedo mide la temperatura con un 100% de saturación de agua. A partir de la diferencia de estas temperaturas se puede obtener la humedad relativa. Cuando la diferencia entre las dos temperaturas medidas es mínima, significa que la humedad relativa del ambiente es alta. En cambio cuando la diferencia es grande, significa que la humedad relativa es baja.

Humedad ambiental:

La humedad ambiental es la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Se puede expresar de forma absoluta mediante la humedad absoluta, o de forma relativa mediante la humedad relativa o grado de humedad.

Humedad absoluta:

Es la cantidad de vapor de agua presente en el aire, se expresa en gramos de agua por Kilogramos de aire seco (g/kg), gramos de agua por unidad de Volumen (g/m^3), o como presión de vapor (Pa, kPa o mmHg). A mayor temperatura mayor cantidad de vapor de agua en el aire.

La humedad relativa:

Es humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosféricas. La forma más habitual de expresar la humedad ambiental es en tanto por ciento.

Densidad del aire:

La densidad del aire es la masa por unidad de volumen del aire. Se obtiene mediante los valores de la temperatura en bulbo húmedo, bulbo seco provenientes del psicrómetro y el valor de la presión atmosférica. Determinada por un barómetro. La densidad del aire se puede calcular mediante la ecuación 2.19 con un margen máximo de error del 0,5%.

Según la NORMA UNE 100-212-90, el cálculo de la densidad del aire se traduce en:

$$P_H = 0,0243 \cdot T_H^2 + 0,1365 \cdot T_H + 5,19 \quad (2.17)$$

$$P_P = P_H - 6,66 \cdot 10^{-4} \cdot P_B \cdot (T_S - T_H) \quad (2.18)$$

Reemplazando,

$$\rho_{aire} = \frac{133,322(P_B - 0,378P_P)}{R(T_S + 273,2)} \quad (2.19)$$

Donde:

P_H : Función de T_H

P_P : Función de P_H, P_B, T_S y T_H

P_B : Presión barométrica (mmHg)

T_H : Temperatura Húmeda (°C)

T_S : Temperatura seca (°C)

ρ_{aire} : Densidad del aire (kg/m^3)

R : Constante de los gases

2.2.1.5.2 Tipos de Instalaciones del ventilador

Existen cuatro instalaciones diferentes (ver figura 2-18). La elección dependerá de las pruebas que se quiera realizar, como también de las características del ventilador.

Tipo A: La entrada se encuentra libre y la descarga libre, Figura 2-18.A.

Tanto a la entrada como a la salida no se encuentran ductos, es un ejemplo de ventiladores que están posicionados en una pared que funcionan como extractor o evacuador del aire.

Tipo B: La entrada se encuentra libre y la descarga entubada, Figura 2-18.B.

Solamente la descarga del aire contiene un ducto, con el fin de trasladar el flujo de aire a un lugar distante, donde será requerido.

Tipo C: La entrada se encuentra entubada y descarga libre, Figura 2-18.C

La entrada del ventilador se encuentra conectada a un ducto y la salida se descarga directamente en la atmosfera.

Tipo D: La entrada y salida del ventilador se encuentra entubada, figura 2-18.D.

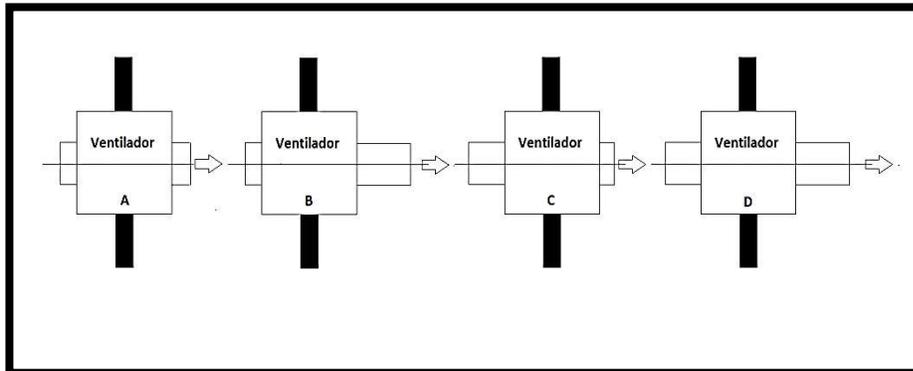


Figura 2-18. Tipos de Instalaciones sugeridas por la Norma ASHARE.

2.2.2 Dimensionamiento y unión de componentes

La construcción de la estación de medida y el montaje para la calibración del ventilador se basa en la norma AMCA-ASHRAE (ver figura 2-19) y utilizando la instalación de ventiladores tipo B.

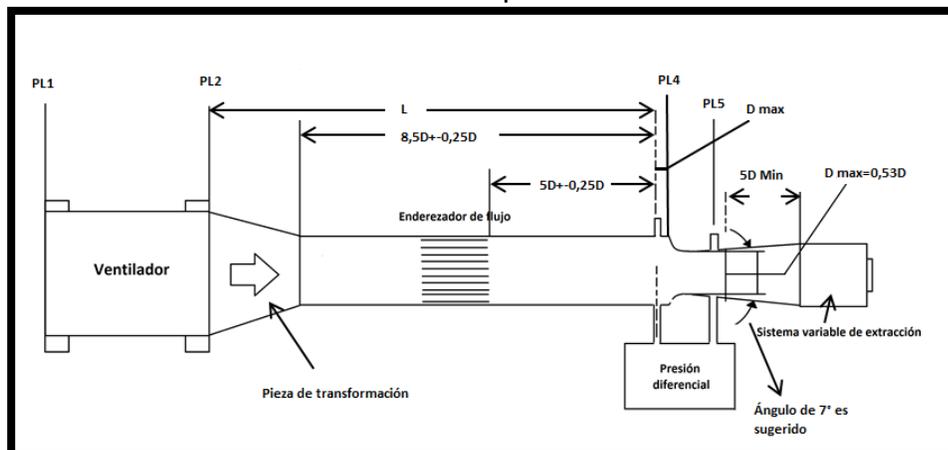


Figura 2-19. Ensayo en ducto, Norma AMCA-ASHRAE.

Las dimensiones del ventilador estrictamente no son necesarias salvo, el ducto de salida (ver figura 2-20). El ducto de salida va conectado a una pieza de transformación divergente de sección circular para aumentar el diámetro.

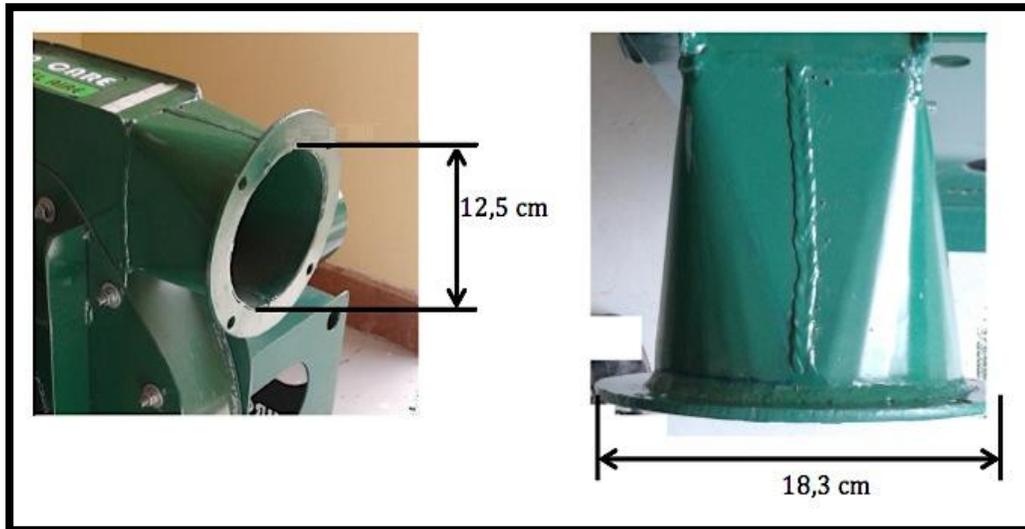


Figura 2-20. Dimensiones del ducto de salida, Ventilador.

Pieza de transformación divergente de secciones circulares: conectado al ducto de salida, el cual bajo norma AMCA-ASHRAE tiene las dimensiones mostradas en la figura 2-21.

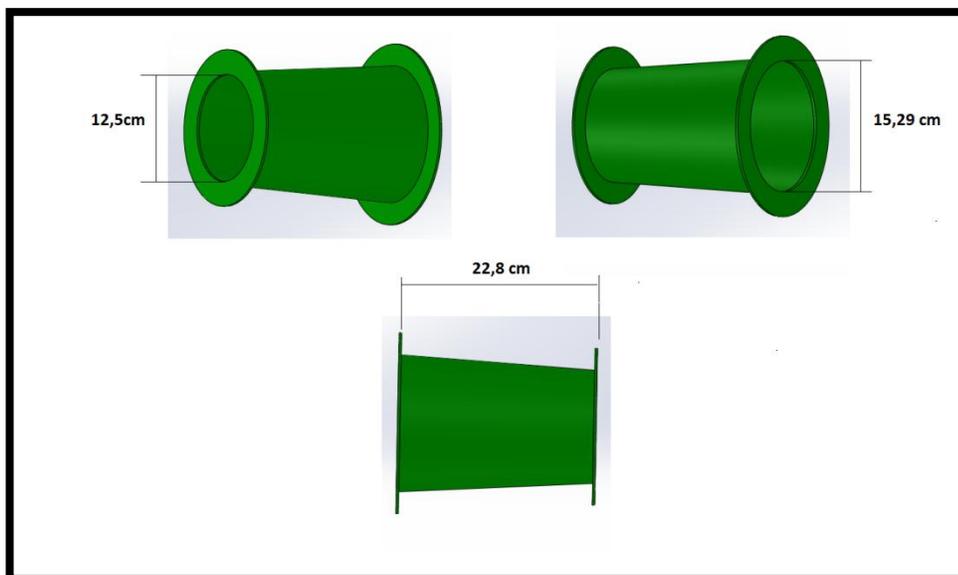


Figura 2-21. Pieza de transformación divergente.

La figura 2-22 presenta el acople de estas dos piezas montada en el laboratorio.



Figura 2-22. Acople ducto de salida con pieza de transformación.

Tubería de sección circular (ver figura 2-23): El largo de la tubería es de 38,2 cm, detallado en la sección 2.2.1 (Tubo de Venturi), cuyo largo se fijó en 50cm para tener más seguridad en la uniformidad del flujo. La figura 2-24 presenta la tubería montada en el laboratorio.

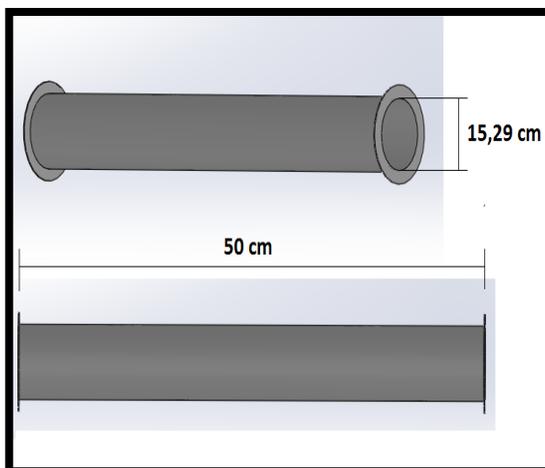


Figura 2-23. Dimensión tubería



Figura 2-24. Tubería montada en el Laboratorio.

Tubo de Venturi: se rige bajo la Norma ISO 5167-1. La figura 2-25 exhibe sus dimensiones. La toma de medida de alta presión se fija a 7,65 cm del comienzo del cono convergente, la toma de baja presión a 3,82 cm del comienzo de la garganta y los diámetros de entrada y de garganta son de 15,3cm y 7,65cm respectivamente. En la salida del tubo de Venturi va conectado a una pieza de transformación de expansión (ver figura 2-26), la que conecta con una sección transversal cuadrada.

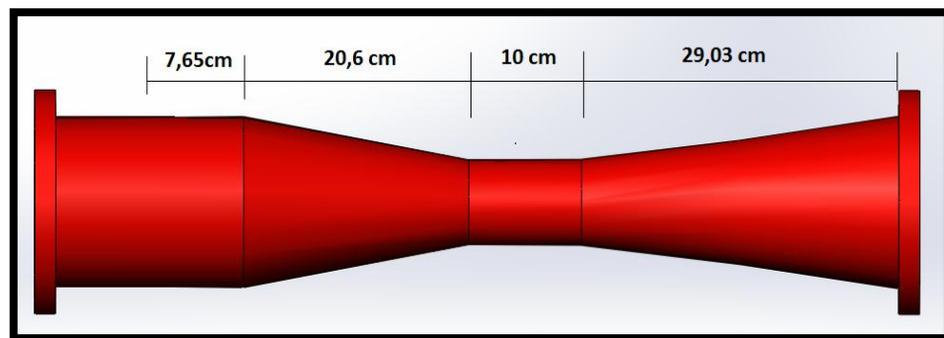


Figura 2-25. Dimensiones tubo de Venturi.

La pieza de transformación siguiente: una una sección circular proveniente del Venturi y una sección cuadrada que proviene de la estación de medida. La figura 2-26 muestra sus dimensiones mientras que la figura 2-27 el acople de estos dos componentes en el laboratorio.

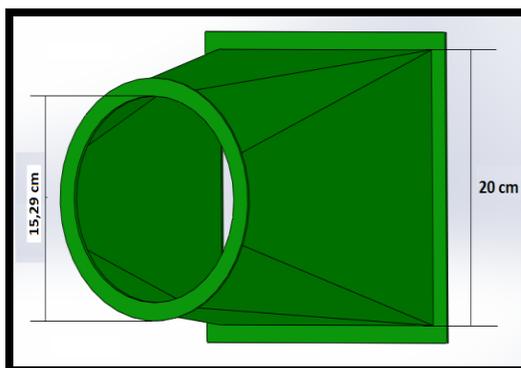


Figura 2-26. Pieza de transformación de sección circular a sección cuadrada.

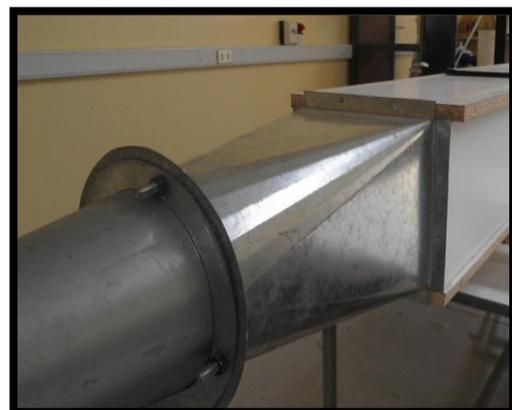


Figura 2-27. Pieza de transformación montada en el laboratorio.

La estación de medida: tiene una sección transversal cuadrada de 20x20 cm. En esta zona se coloca un enderezador de flujo (ver figura 2-28). Se encarga de disminuir los efectos de turbulencia producto del funcionamiento del ventilador, tiene una profundidad de 9 cm.

Como se mencionó las características de la estación de medida se visualiza en la figura 2-19.

La figura 2-29 muestra las posiciones de cada componente del túnel de viento y las dimensiones de la estación de medida (zona demarcada).

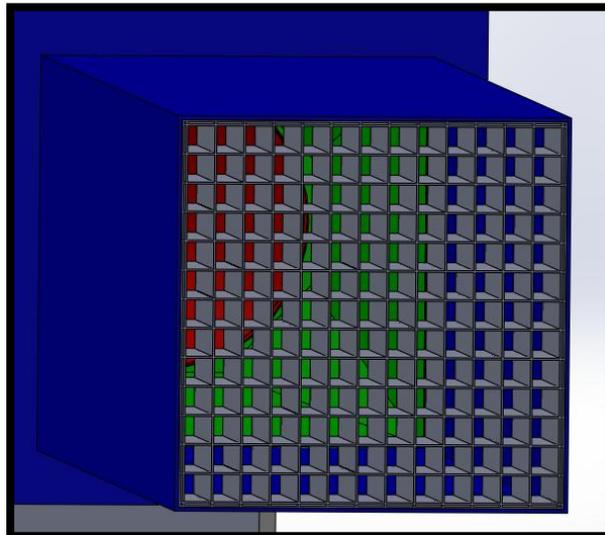


Figura 2-28. Esquema del enderezador de flujo.

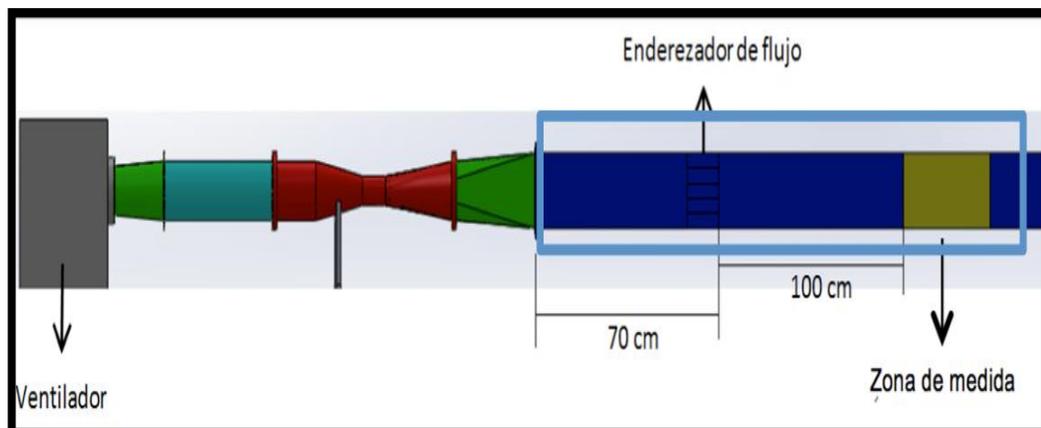


Figura 2-29. Dimensiones de la estación de medida.

La figura 2-30 es una fotografía del montaje del túnel de viento montado en el laboratorio de ventilación del Departamento de ingeniería en Minas.

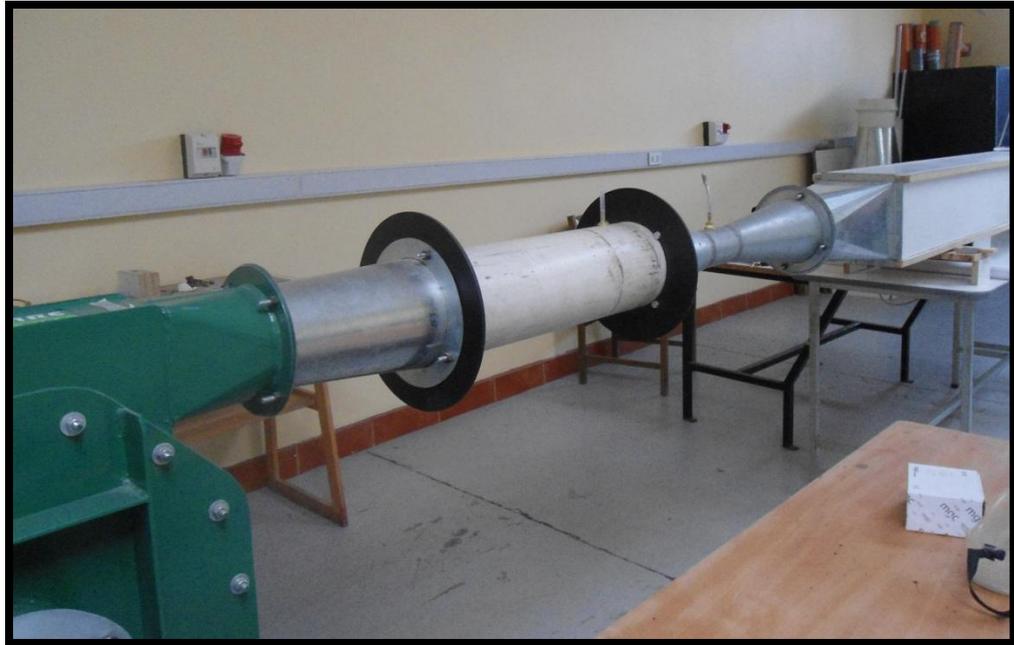


Figura 2-30. Túnel de viento.

3 CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE TRES AGUJEROS

En el presente capítulo se describe la sonda de tres agujeros, capaz de medir flujos en dos dimensiones. Se desarrolla su calibración con procedimientos teóricos-analíticos y su respuesta a través de un sistema de calibración construido para este propósito.

3.1 Sonda de tres agujeros

El Campo de velocidad y la distribución de la presión son dos variables de valor por sí mismos, éstas se pueden utilizar para corroborar la teoría. Se necesita una gran cantidad de datos experimentales para la calibración de los modelos matemáticos que representan éstas cantidades. Sin embargo, la medición de la velocidad y la presión en un sistema de flujo es útil como diagnóstico para determinar diversas cantidades, por ejemplo las mediciones de velocidad se utilizan a menudo en los problemas relacionados con el ruido, la vibración y como diagnóstico en la investigación de calor y transferencia de masa.

La sonda de tres agujeros utiliza el método de presión diferencial para determinar la dirección del flujo, donde la sonda de presión se mantiene fija en una posición y se mide el ángulo que determina la dirección de flujo, con los datos de calibración previa.

Existen varias configuraciones de estas sondas de tres agujeros para la medición de flujo con dependencia de dos-dimensiones, como las sondas con cabeza Cilíndrica, Trapezoidal y Cobra, la figura 3-1 muestra los bosquejos para estos tres tipos de sondas de tres agujeros.

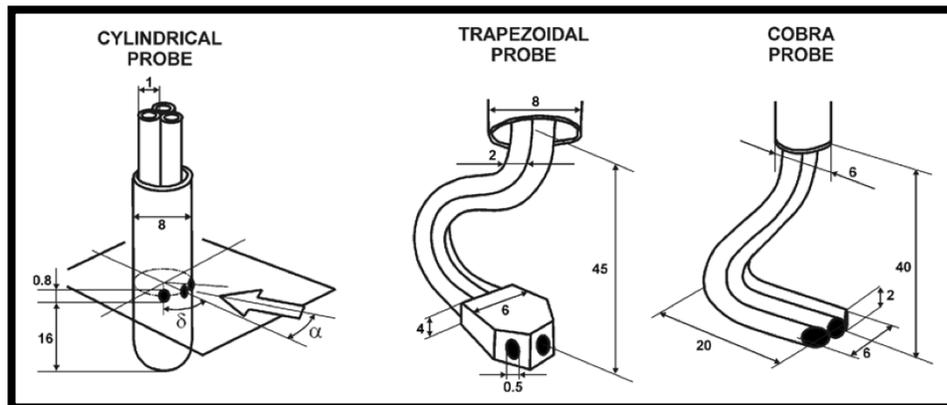


Figura 3-1. Geometría de las sonda tipo: Cilíndrica, Trapezoidal y Cobra [12].

Cada tipo de sonda tiene sus ventajas y desventajas específicas relacionadas a las componentes de la velocidad. La sonda que se utiliza en este trabajo es la de tipo cobra.

3.2 Método de análisis teórico

Existen métodos analíticos que nos permiten conocer las características de la respuesta de las sonda de tres agujeros desde un marco de referencia teórico.

Estos métodos son:

- El método de proyección de línea de corriente
- La solución de flujo potencial

El método de proyección de línea de corriente se usa para la investigación científica, como también para estudios con técnicas CFD. Este método puede predecir los coeficientes de calibración, al menos de forma cualitativa. Hipotéticamente, también se pueden usar relaciones teóricas usando el método de flujo potencial, pero generalmente el flujo no es ideal, lo que hace que tales cálculos sean poco prácticos [5].

Con la ayuda de las relaciones analíticas, se puede caracterizar el comportamiento de la sonda y como una guía de la forma funcional de las ecuaciones de calibración. Es importante mencionar que estas relaciones no

reemplazan la calibración de la sonda, porque no incluyen las imperfecciones de construcción o problemas relacionados con el tamaño de la sonda que están presentes en la realidad.

3.3 Calibración

El objetivo de la sonda para este estudio es determinar las propiedades vectoriales y escalares de campos de velocidad de flujos, tales como los que se encuentran alrededor de los cuerpos complejos o en turbomáquinas (En términos de presión estática y total). Esto se realiza gracias a funciones de calibración y relaciones dinámicas de los gases, que se convierten en ángulos de flujo y número de Mach [5].

Presiones diferenciales son seleccionadas bajo un rango de ángulo yaw, respecto al eje de la dirección de flujo. A través de esto se establecen presiones diferenciales entre pares de agujeros como funciones del ángulo yaw. Esto es posible siempre y cuando el flujo de aire no tenga efectos compresivos (esto se logra debido al diseño de instalación y número de Mach), la dirección de flujo es conocida y la perturbación debe ser mínima al introducir la sonda [5].

3.3.1 Técnicas de Calibración

Tanto para la calibración y la utilización de la sonda, la línea de referencia es necesaria para establecer condiciones de equilibrio que sea consistente para la geometría de la sonda.

Se puede lograr la calibración de la sonda mediante dos caminos:

- Técnica de Anulación
- Método estacionario

Ambos métodos ofrecen ventajas y desventajas. Debido principalmente a las restricciones de espacio e infraestructura del sistema de calibración.

3.3.1.1 Técnica de Anulación

La técnica de Anulación es precisa y más simple en términos de análisis de datos, pero mecánicamente más compleja.

La sonda se coloca en un sistema que ofrece 3 grados de libertad para desplazarse y es orientado de tal manera que el eje x sea paralelo al flujo (ángulo de yaw y pitch son cero). La toma de presión central corresponde a P_1 (Presión de estancamiento) y las presiones de los agujeros exteriores son iguales ($P_2 = P_3$) y proporcional a la presión estática. Finalmente, la posición de la sonda es registrada y se determina la dirección de flujo a partir de una escala calibrada. Esta técnica requiere de un sistema de desplazamiento sofisticado y un largo tiempo de adquisición de datos, puesto que cada vez que se posiciona la sonda para la adquisición, las presiones de los extremos deben ser iguales. Esto puede resultar lento, especialmente si la sonda es pequeña y tiene un tiempo de respuesta lento [5].

3.3.1.2 Método estacionario

El método estacionario tiende ser menos preciso, pero ofrece una mayor simplicidad de construcción.

Se realiza por el ajuste del ángulo yaw, mientras que el ángulo pitch se mantiene constante respecto a la sección de prueba. Las tres presiones se miden en cada lugar de medición mediante el desplazamiento angular respecto al eje del flujo. Con estas tres presiones medidas, la dirección y magnitud del flujo con respecto al eje de la sonda se pueden determinar.

Se sabe que el movimiento del flujo es en función de varios parámetros adimensionales, los más relevantes para este estudio son:

Numero de Reynolds (ecuación descrita en el capítulo 2)

Número de Mach
$$M_a = \frac{V_{prom}}{V_0} \quad (3.1)$$

Donde: V_0 = Velocidad del sonido

Para flujos a bajas velocidades (los experimentos de calibración se realizan con número de $M_a < 0,2$), estos se pueden considerar como incompresibles.

El flujo estacionario para este tipo de fluidos se analiza con las ecuaciones de conservación de masa y energía.

Considerando un flujo unidimensional a lo largo del tubo de corriente (figura 3-2).

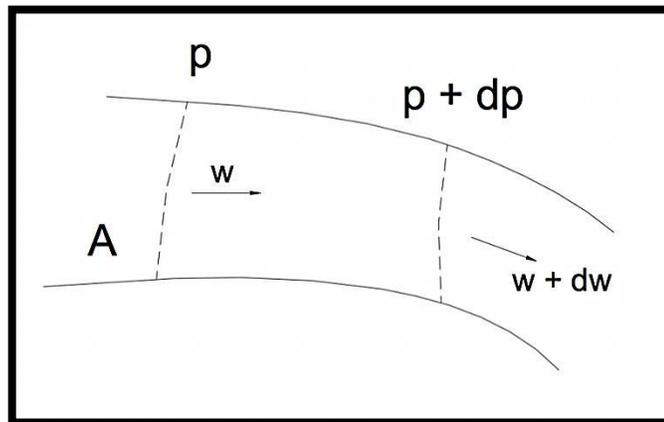


Figura 3-2. Flujo no viscoso a lo largo de un tubo de corriente [5].

La sección transversal del tubo de corriente debe ser pequeña, a fin de considerar los valores locales de presión y velocidad. Integrando la ecuación de conservación de energía 2.11 del capítulo 2 a lo largo de una dirección s , se obtiene la velocidad a partir de las presiones total y estática como:

$$V = w = \sqrt{\frac{2(P_t - P)}{\rho}} \quad (3.2)$$

3.4 Definición de los agujeros y coeficientes de calibración

La presión P_i medido en el agujero i , difiere de la presión estática del chorro libre P , esto puede ser representado por un coeficiente adimensional de presión.

El coeficiente de agujero K_i , es usualmente representado de la siguiente forma:

$$K_i = \frac{P_i - P}{\frac{\rho \cdot W^2}{2}} \quad (3.3)$$

Donde:

i = Representa los agujeros que van del 1 al 3

En el método estacionario debe incluir en la calibración la diferencia de presión en el plano yaw y las diferencias que existe entre los datos medidos por la sonda y el valor real, tanto para la presión total y estática. La relación entre estas cantidades y el ángulo yaw $\Delta\beta$ es descrito por los coeficientes de calibración. Estos coeficientes se deben definir de tal manera que no sean dependientes de la velocidad y sean sólo una función del ángulo de flujo.

El presente trabajo utiliza el método estándar para la reducción de datos con el fin de obtener los coeficientes adimensionales. Usando las definiciones de Treaster y Yocum [20], los coeficientes adimensionales acondicionados para la sonda de tres agujeros son:

Coeficiente de dirección k_β :

$$k_\beta = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - \bar{P}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} \quad (3.4)$$

Coeficiente de presión total k_t :

$$k_t = \frac{P_1 - P_t}{P_1 - \bar{P}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} \quad (3.5)$$

Coeficiente de presión estática k_s :

$$k_s = \frac{\bar{P} - P}{P_1 - \bar{P}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} \quad (3.6)$$

La diferencia de las dos presiones $P_1 - \bar{P}$ es la presión dinámica. Parámetro normalizador de los coeficientes (coeficientes adimensionales) y reduce la dispersión de los datos comparado con la real presión dinámica [20].

Las cantidades:

$$\bar{P} = \frac{P_2 + P_3}{2} \quad (3.7)$$

$$\bar{k} = \frac{k_2 + k_3}{2} \quad (3.8)$$

Representan la presión media y el coeficiente medio de los agujeros respectivamente.

3.5 Geometría de la sonda

La nomenclatura frecuentemente usada y que se utiliza para numerar los agujeros de detección de presión en la sonda de tres agujeros, se muestran en la figura (3-3).

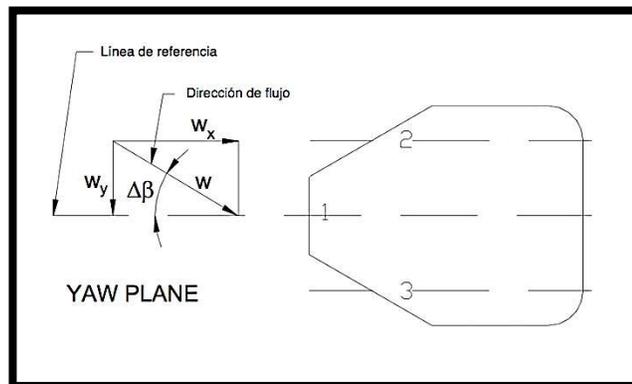


Figura 3-3. Numeración de los agujeros de la sonda [5].

De la figura 3-3 el ángulo definido entre el vector w y el eje de la sonda es el ángulo yaw $\Delta\beta$, mientras que para este caso el ángulo pitch $\Delta\alpha$ se define como cero (flujo en 2 dimensiones).

Las relaciones entre las componentes de la velocidad w_x y w_y respecto a los ejes x e y del sistema de coordenadas de la sonda y el ángulo yaw son:

$$w_x = w \cdot \cos \Delta\beta \quad (3.9)$$

$$w_y = w \cdot \sen \Delta\beta \quad (3.10)$$

La distribución de la presión en la superficie de la sonda depende del ángulo de incidencia del flujo con respecto al eje de la sonda. La presión se

registra en los tres lugares: en el eje de la sonda y en dos puntos equidistantes como revela la figura 3-4.

El agujero central entrega la presión que corresponde a la presión de estancamiento, siempre y cuando la dirección de flujo sea perpendicular a la cara de la sonda. La diferencia de presión de los agujeros de los lados puede estar relacionado con el vector de velocidad, si se tiene una calibración apropiada.

La sonda ha sido construida en el laboratorio y está hecha de plata. Las características geométricas se muestran en la figura 3-4.

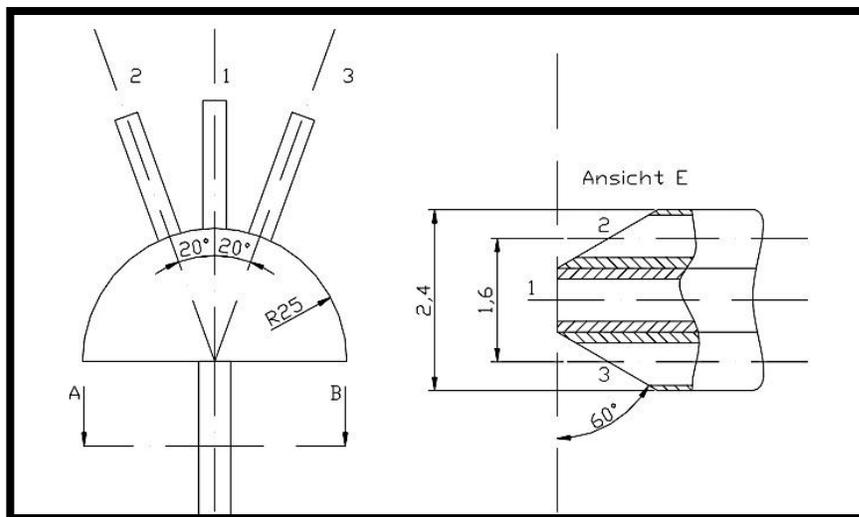


Figura 3-4. Dibujo de la geometría en base a la sonda tipo cobra SVUSS/3 [5].

3.6 Método de proyección de línea de corriente

Las líneas de corriente es una curva tangente a todos los vectores de velocidad instantánea. Las líneas de corriente son útiles como indicadores de la dirección instantánea del movimiento del fluido en todo el campo de flujo. Por lo tanto, entregan una imagen clara del flujo debido a que el vector de velocidad tiene en cada punto la dirección de la línea de corriente [22].

Las líneas de corriente no se pueden observar fácilmente de forma experimental, excepto cuando el flujo es estacionario, en los cuales coinciden con las líneas de trayectoria, las que siguen las partículas de fluido.

Este método se basa en que la velocidad a chorro libre (donde se supone w constante) es proyectada en los tres agujeros de medición. A consecuencia de esto, la componente normal a la superficie de la sonda resulta en una presión dinámica, que se añade a la presión estática del chorro libre.

Los agujeros de la sonda miden una presión total igual a la presión estática más la correspondiente fracción de la presión dinámica. Esto es:

$$P_i = P + \frac{\rho \cdot w_i^2}{2} \quad i=1, 2, 3 \quad (3.11)$$

Donde:

w_i : Velocidad normal al agujero de la sonda.

Usando la definición de agujero (ecuación 3.3), se puede obtener que:

$$P_i = P + \frac{k_i}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \quad (3.12)$$

Comparando las ecuaciones 3.11 y 3.12, se puede reescribir el coeficiente de agujero cuando se utiliza el método de proyección de línea de corriente.

$$k_i = \left(\frac{w_i}{w}\right)^2 \quad (3.13)$$

3.7 Coeficientes Teóricos de los agujeros

La figura 3-5 muestra la geometría de la sonda, donde el ángulo característico es $\delta = 30^\circ$ y el ángulo de yaw $\Delta\beta$ es definido entre la velocidad del flujo y el eje de la sonda. Con esto se puede deducir que las componentes de la velocidad del flujo normales a la superficie son:

$$w_1 = w \cdot \cos \Delta\beta \quad (3.14)$$

$$w_2 = w \cdot \text{sen}(\delta + \Delta\beta) \quad (3.15)$$

$$w_3 = w \cdot \text{sen}(\delta - \Delta\beta) \quad (3.16)$$

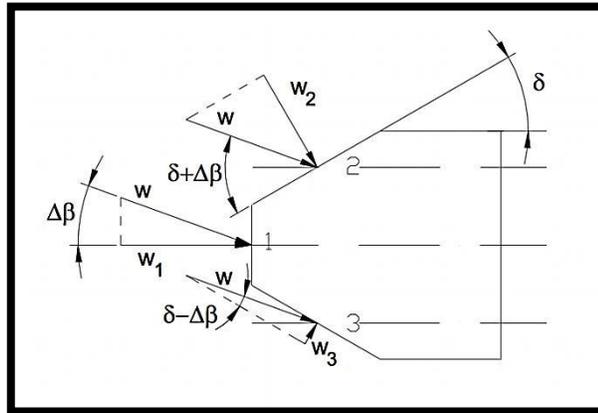


Figura 3-5. Geometría sonda SVUSS/3 [5].

Reemplazando estos valores en la ecuación 3.11, las presiones medidas por los tres agujeros son:

$$P_1 = P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w \cdot \cos\Delta\beta)^2 \quad (3.17)$$

$$P_2 = P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [w \cdot \text{sen}(\delta + \Delta\beta)]^2 \quad (3.18)$$

$$P_3 = P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [w \cdot \text{sen}(\delta - \Delta\beta)]^2 \quad (3.19)$$

Los coeficientes se pueden calcular usando la ecuación 3.13:

$$k_1 = \cos^2\Delta\beta \quad (3.20)$$

$$k_2 = \text{sen}^2(\delta + \Delta\beta) \quad (3.21)$$

$$k_3 = \text{sen}^2(\delta - \Delta\beta) \quad (3.22)$$

Se puede observar que el coeficiente k_1 sólo depende del ángulo de ataque, en cambio los coeficientes k_2 y k_3 no sólo dependen del ángulo de ataque si no también del ángulo característico de la sonda.

Los coeficientes de calibración se pueden determinar de su definición teórica (ver ecuaciones 3.4 a 3.6):

➤ Coeficiente de dirección

$$k_\beta = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - \bar{P}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\text{sen}^2(\delta + \Delta\beta) - \text{sen}^2(\delta - \Delta\beta)}{\cos^2\Delta\beta - \frac{1}{2}[\text{sen}^2(\delta + \Delta\beta) + \text{sen}^2(\delta - \Delta\beta)]} \quad (3.23)$$

- Coeficiente de presión total

$$k_t = \frac{P_1 - P_t}{P_1 - \bar{P}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\cos^2 \Delta\beta - 1}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2} [\text{sen}^2(\delta + \Delta\beta) + \text{sen}^2(\delta - \Delta\beta)]} \quad (3.24)$$

- Coeficiente de presión estática

$$k_s = \frac{\bar{P} - P}{P_1 - \bar{P}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\frac{1}{2} [\text{sen}^2(\delta + \Delta\beta) + \text{sen}^2(\delta - \Delta\beta)]}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2} [\text{sen}^2(\delta + \Delta\beta) + \text{sen}^2(\delta - \Delta\beta)]} \quad (3.25)$$

3.8 Instalación sistema de calibración

El sistema de calibración consiste en generar condiciones de flujo bien conocidas y constantes.

A continuación, se nombran los elementos que componen el sistema de calibración de la sonda de tres agujeros. Posteriormente se revisa las características técnicas de cada uno.

- 1 Motor de paso
- 1 PaperStepper (L298N H-bridge)
- 1 Compresor
- 3 Sensores diferenciales de presión MPXV7002DP
- Sonda de tres agujeros con soporte
- Tobera y soporte de sonda
- 1 Tarjeta de adquisición
- Mangueras
- Interfaz para obtener los datos de calibración
- Fuente de poder DC GODTOOL
- Manómetro EXTECH 406800

3.8.1 Motor de paso

Los motores de paso son esenciales para la calibración, debido a su precisión y se utiliza para la orientación de la sonda. Existen diferentes tipos de

motores de paso, algunos de estos son: de reluctancia variable, de imán permanente e híbridos.

Para este experimento se emplea el motor de paso híbrido de tamaño 39 mm de 4 cables (ver figura 3-6).



Figura 3-6. Motor de paso bipolar de 200 pasos.

El motor de paso de la figura 3-6 contiene dos set de bobinas independientes por cada polo del estator. Está construido con un estator de polos multidentados y un rotor de imán permanente, por ser un motor híbrido estándar, contiene 200 dientes y rota con pasos de $1,8^\circ$, además puede soportar un gran torque dinámico.

La Tabla 3.1 muestra las principales características del motor de paso utilizado.

Tabla 3.1. Características del motor de paso utilizado [8].

	Especificación
N° de pasos completos/vuelta	200
Tensión de alimentación (V)	5-12
Impedancia (Ω)	200

Para controlar el movimiento de los motores de paso, se necesita variar la corriente que pasa a través de las bobinas en la secuencia apropiada.

3.8.2 PaperStepper (L298N H-bridge)

Éste es un driver de potencia que permite el control del motor, utiliza el chip L298N que contiene 2 H-bridge en su interior. Tiene la capacidad de cambiar la polaridad en las bobinas y con esto invertir la dirección de la corriente, es por esto que nos da la posibilidad de girar el motor en ambos sentidos y a un mayor torque cambiando los niveles lógicos de tensión a corrientes. En la figura 3-7 se puede observar los componentes del Driver PaperStepper.

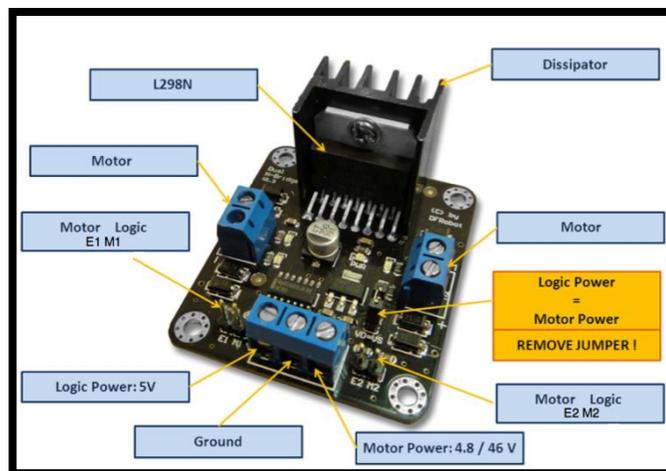


Figura 3-7. Componentes del PaperStepper [4].

En la figura 3-7 se muestra el pin E, el cual energiza las bobinas y el pin M que afecta la polaridad del terminal de salida del motor. Éstos pines se energizan y desenergizan bajo una secuencia de bits logrando que el motor gire. La secuencia se muestra en la tabla 3.2.

Para que el motor gire en sentido contrario basta con invertir la secuencia.

Tabla 3.2. Secuencia de bits para mover el motor de paso.

Secuencia de bits			
E1	E2	M1	M2
1	1	1	1
1	1	0	1
1	1	0	0
1	1	1	0

3.8.3 Tarjeta de Adquisición de datos

La tarjeta de adquisición utilizada es Personal Daq/3000 Series de IOtech, actualmente Measurement Computing Corp. Ésta es una tarjeta de control y medida multifuncional con entrada USB. Es un módulo que cuenta con un convertidor A/D de 16-bit/1-MHz, 16 canales de entrada analógicos o 8 canales diferenciales de entrada analógicos, 4 salidas analógicas, además contiene 24 canales de salidas digitales de alta velocidad, 2 temporizadores y 4 contadores de 32 bits (ver la figura 3-8).

Esta tarjeta se ha utilizado en conjunto con el programa de adquisición de datos y emisión de pulsos, desarrollado en el laboratorio de Ventilación, el cual establece la secuencia necesaria para el movimiento del motor, la frecuencia de adquisición y el número de datos a grabar.



Figura 3-8. Tarjeta de adquisición de datos Personal Daq/ 3000 series.

La tarjeta de adquisición tiene una resolución de 16 bits, lo que significa que se pueden obtener 65536 niveles de tensión. La frecuencia de escaneo con un sólo canal llega a 1 M muestras/s (con resolución de 20,83 ns). Este margen de frecuencia es común para todas las entradas, es decir, si se trabaja con 3 entradas el margen de entrada es de 333 KHz.

La figura 3-9 muestra las conexiones de estos tres componentes para el control del motor de pasos: Los canales digitales del puerto A, PaperStepper y los cables provenientes del motor junto con la Alimentación.

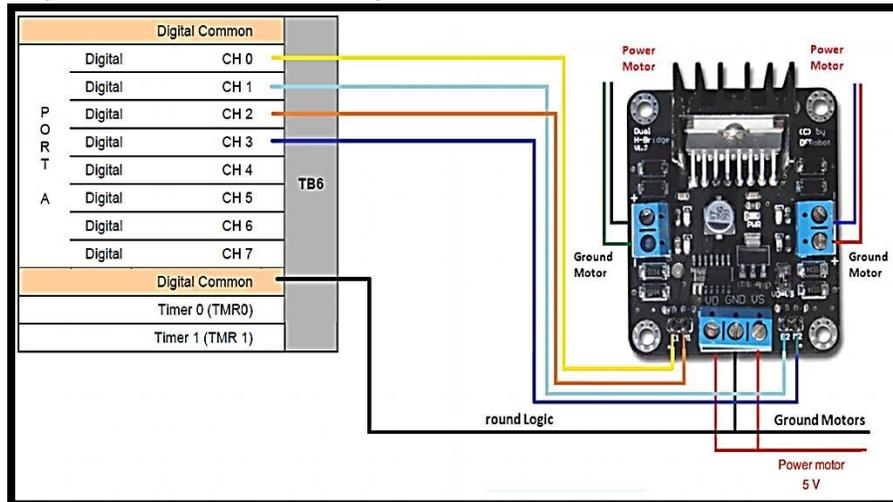


Figura 3-9. Conexión tarjeta de adquisición con PaperStepper.

3.8.4 Fuente de alimentación DC

Fuente de poder GOLDTOOL de voltaje variable, la cual suministra los 5V que son suficientes para la alimentación del motor de pasos.



Figura 3-10. Fuente de poder DC.

3.8.5 Sensores de Presión diferencial MPXV7002DP

Las señales de presión obtenidas a través de la sonda de tres agujeros se convierten en señales eléctricas a través de transductores de presión

piezorresistivo MPXV7002DP (ver figura 3-11). El transductor tiene un componente cristalino que se deforma producto a la presión externa, generando un campo eléctrico. El cristal está contenido en dos placas paralelas, donde la señal eléctrica se genera a través de ellas. La tensión medida en las placas es proporcional a la fuerza aplicada y por lo tanto es proporcional a la diferencia de presión.

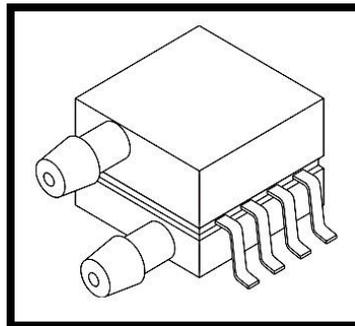


Figura 3-11. Sensor de presión MPXV7002DP [6].

La figura 3-12 muestra un diagrama de bloques de la circuitería interna del chip del sensor y la figura 3-13 muestra la nomenclatura de las patas del sensor.

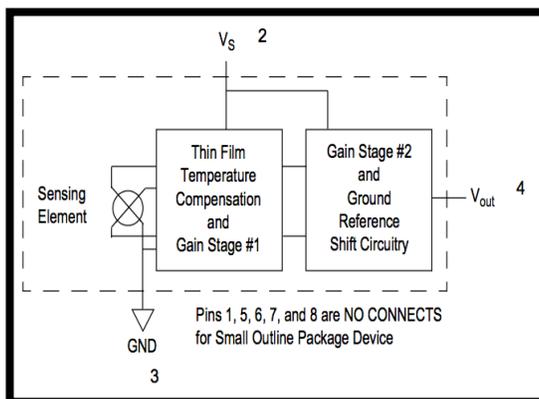


Figura 3-12. Circuito interno del chip del sensor [6].

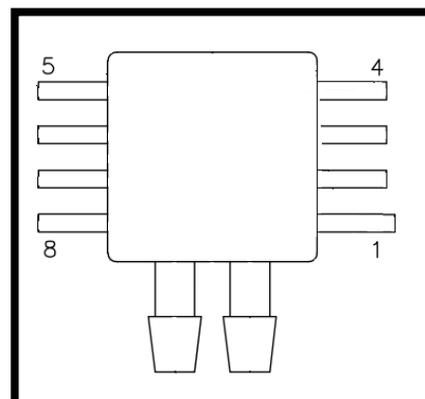


Figura 3-13. Nomenclatura de las patas del sensor [6].

Las patas 1, 5, 6, 7, y 8 son conectores de superficie, no son parte de las conexiones eléctricas. Sin embargo, no deben estar en el aire.

Tabla 3.3. Características principales del sensor utilizado.

Característica	Símbolo	Min	Optimo	Max	Unidad
Rango de presión	Pop	-2,0	-	2,0	K Pa
Rango de Voltaje	Vs	4,75	5	5.25	V dc
Corriente de alimentación	Io	-	-	10	mA dc
Tiempo de respuesta	tR	-	1	-	ms

3.8.5.1 Filtro del ruido

El sensor de presión dispone de una compensación de temperatura integrada y una salida amplificada single-ended, que lo hacen compatible con los convertidores A/D.

Debido a la gran resolución de la tarjeta de adquisición (16 bits), el ruido que es inherente a los sensores piezorresistivo se convierte en una consideración de diseño. Los ruidos más comunes para estos casos son: el ruido blanco y el ruido de parpadeo. El primero corresponde al ruido generado de un flujo no uniforme y es independiente de la temperatura. El segundo corresponde al ruido generado por imperfecciones del cristalino del sensor y al proceso de deformación de este, donde este ruido es proporcional a la inversa de la frecuencia ($1/f$) y es más dominante a frecuencias bajas.

El ruido también puede provenir de circuitos externos, donde en un sistema de sensores, la alimentación, la tierra y la conexión con la tarjeta de adquisición generan un ruido en la señal. Por estos motivos es necesaria una consideración especial en el diseño.

Para disminuir los efectos de ruido a nivel de hardware se conecta la salida del sensor a un filtro RC pasa baja, con una frecuencia de corte de 650 Hz. Para esto se utiliza una resistencia de 750Ω y un condensador de $0.33\mu\text{F}$.

Es importante mencionar que no es necesario disminuir la impedancia de salida del filtro ya que la impedancia de entrada de la tarjeta de adquisición según el fabricante es de $10\text{M}\Omega$, y la impedancia para estos sensores es del

orden de los 100 Ω . Esto significa que no existirá una distorsión en la lectura de la tensión al momento de medirla a través de la tarjeta.

La figura 3-14 muestra la conexión del sensor de presión con el filtro RC pasa baja conectado con la tarjeta de adquisición. Los condensadores 1.0 μF y 0,01 μF corresponden a los recomendados por el Datasheet del sensor.

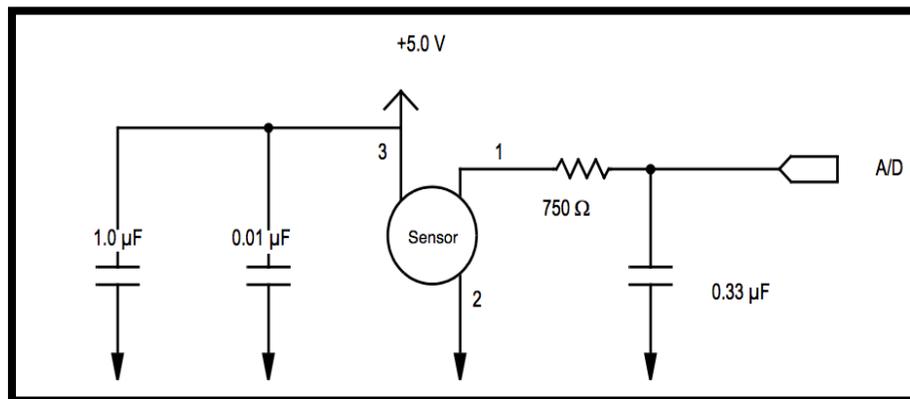


Figura 3-14. Conexión sensor y filtro pasa baja [1].

3.8.5.2 Chip MC78L05

Con el objetivo de seguir disminuyendo el ruido de la señal vinculado a la señal de alimentación de los sensores, y dejarlos alimentados de forma independiente, se utilizó el chip MC78L05 (ver figura 3-15). Es un regulador de voltaje positivo, de bajo costo y fácil de usar.

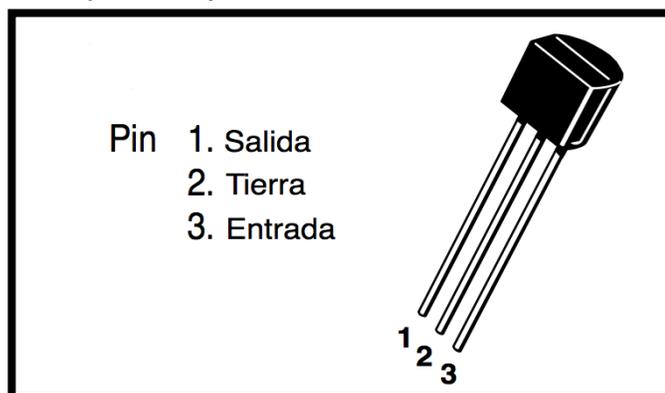


Figura 3-15. Esquema del regulador de voltaje [4].

La conexión típica para este chip se muestra en la figura 3-16. Se requiere una tierra común entre la entrada y la tensión de salida.

Para el caso de los condensadores del circuito, C_{in} es necesario si el regulador se encuentra a una distancia apreciable del filtro de la fuente de alimentación y C_{out} no es necesario para la estabilidad. Sin embargo, mejora la respuesta transitoria.

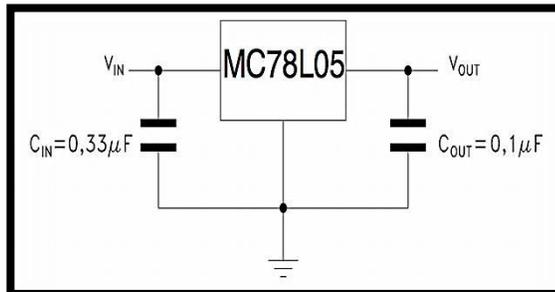


Figura 3-16. Circuito estándar para el Chip MC78L05 [4].

La tabla 3.4 entrega las características eléctricas que ofrece el chip cuando es alimentado con un adaptador AC-DC modelo MW41-950 que entrega una alimentación de 9 V DC.

Tabla 3.4. Características eléctricas del chip MC78L05.

característica	Símbolo	Min	Optimo	Max	Unidad
Voltaje de Salida	V_o	4,8	5,0	5,2	V dc
Corriente de Salida	V_s	1	10	40	mA dc

La figura 3-17 muestra la conexión entre estos componentes y la tarjeta de adquisición para un sensor.

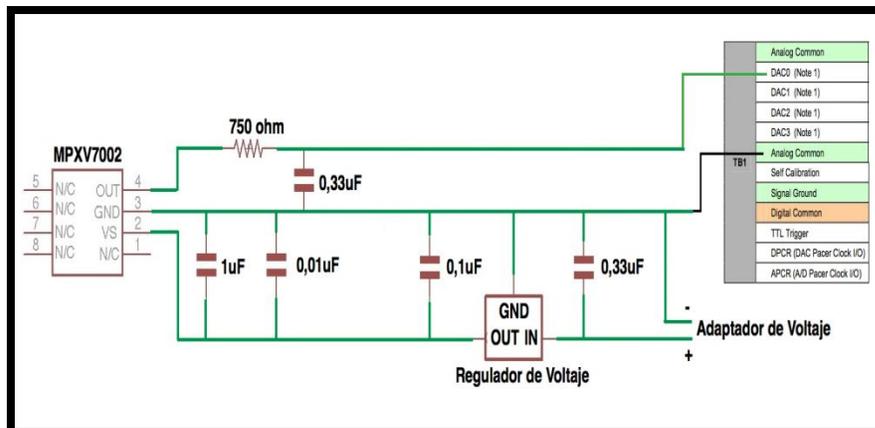


Figura 3-17. Conexiones entre el sensor, filtro y tarjeta de adquisición.

Esto se replica para los tres sensores de presión diferencial utilizados en la calibración (Por motivo de generar una imagen clara sobre las conexiones, solo se muestra para un sensor) y en la medición de la velocidad media del flujo de aire.

3.8.6 Compresor

Con la finalidad de tener un flujo conocido y constante se utilizó el compresor AIRLET (ver figura 3-18). Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar fluidos. Esto es posible gracias al intercambio de energía entre la máquina y el fluido. El trabajo realizado por la máquina para comprimir el fluido, se convierte en energía de flujo, tanto para aumentar la presión, como de energía cinética que es la que la impulsa a fluir.



Figura 3-18. Compresor AIRLET, montado en el laboratorio.

El compresor puede almacenar aire comprimido a una presión de aproximadamente 6 bar y un estanque de acumulación de 250 L, suficiente para generar un flujo constante a chorro libre a una presión que se encuentra en el rango de medición de los sensores.

3.8.7 Tobera y soporte de la sonda de tres agujeros

El aire comprimido proveniente del compresor pasa a través de una manguera que llega a una tobera o contenedor (ver figura 3-19), en el que las conexiones se realizan con acoples tipo Chicago. La tobera se construyó en el laboratorio y está hecha en base de fibra de vidrio. En la figura 3-20 se visualiza las tomas de presión que se realizaron con un anillo piezométrico y la toma chicago.



Figura 3-19. Tobera en fibra de vidrio.

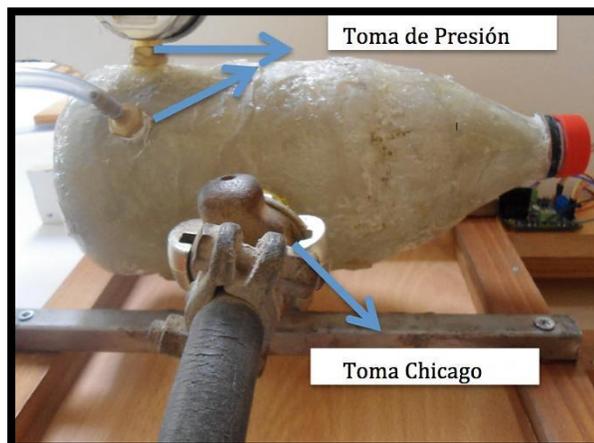


Figura 3-20. Tobera con sus componentes.

La calibración de la sonda se realiza para valores constantes de Reynolds y de Mach, también se considera el intervalo de ángulo yaw que es sensible la sonda. Las mediciones se realizan con descarga a chorro libre hacia la atmósfera. Se sabe que las mediciones de las presiones totales y estáticas, en

estas condiciones, prueban la existencia de un campo de flujo homogéneo en el rango de :

$$0 \leq x \leq 2,5 \cdot d_n \quad (3.26)$$

Donde la variable x , representa la distancia aguas abajo desde el plano de salida del flujo, a la localización de la punta de la sonda. Fuera de este rango, la presión total decae rápidamente hasta un 75% del valor existente dentro de la tobera [7]. El parámetro d_n , representa el diámetro de la abertura de salida del flujo, la cual es de 1,2 cm.

La sonda es montada a 2,5 cm aguas abajo (ver figura 3-21), partiendo del plano de salida del flujo. La figura 3-22 muestra el acople entre el eje del motor y el soporte que sujeta la sonda.

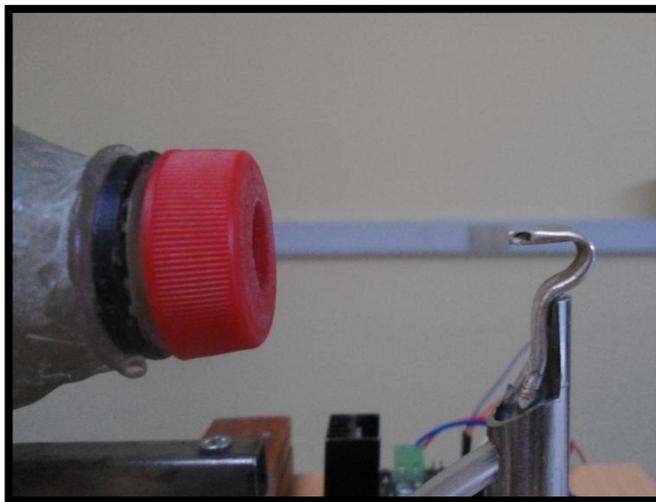


Figura 3-21. Localización de la sonda.



Figura 3-22. Soporte de la Sonda.

La orientación de la sonda va desde los -30° hasta los 30° gracias al control del motor de pasos. Como ya se explicó el motor ajusta la orientación en pasos de $1,8^\circ$.

Fuera del rango de sensibilidad de la sonda, esta deja de ser sensible al cambio angular [18]. Esto sucede cuando el denominador de las funciones de calibración tienden a cero o existe un cambio en el signo, esto significa que las presiones P_1 y \bar{P} se desvían significativamente del valor real de estas cantidades.

En cada punto de medición se registran las tres presiones obtenidas de los agujeros de la sonda (P_1 , P_2 y P_3). Estas mediciones se obtienen con relación a la atmósfera, por lo tanto las presiones pueden tener valores tanto positivos como negativos.

Los parámetros P y P_S de las funciones de calibración, se obtienen a partir de un tubo de Pitot, el cual se posiciona en el mismo lugar que la sonda (ver figura 3-23) y se registran con un manómetro diferencial.

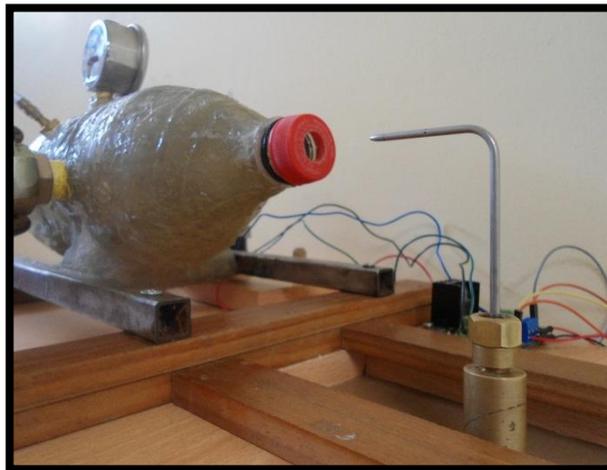


Figura 3-23. Medición de P y P_S , con tubo de Pitot.

La figura 3-24 muestra el tubo de Pitot utilizado.



Figura 3-24. Tubo de Pitot empleado en la medición de P y P_S .

3.8.8 Manómetro de presión diferencial EXTECH Modelo 406800

Con el objeto de tener controlada la presión en la tobera, se utiliza el manómetro de presión diferencial EXTECH 406800 (ver figura 3-25). Su funcionamiento se basa en el cálculo de presiones que se transmiten por dos tomas conectadas a una fuente de presión.

El manómetro se conecta a la tobera con un anillo piezométrico, con la ayuda de una manguera que conduce la presión hasta el interior del instrumento, donde existe un sistema digital calibrado. Cuenta con 11 unidades de medida: inH_2O , psi, bar, mbar, kPa, inHg, mmHg, $ozin^2$, ftH_2O , cmH_2O , kg/cm^2 .



Figura 3-25. Manómetro utilizado para el control de presión en la tobera.

La interfaz realizada en el programa Labview 2011 controla la adquisición de datos para obtener las características del flujo a partir de los datos obtenidos de la sonda y el control del motor con la generación de señales de pulsos (ver figura 3-26). El resultado de los datos obtenidos al final del proceso, es obtener las curvas características de los coeficientes adimensionales característicos de la sonda de tres agujeros construida en el laboratorio y sus curvas de ajuste.

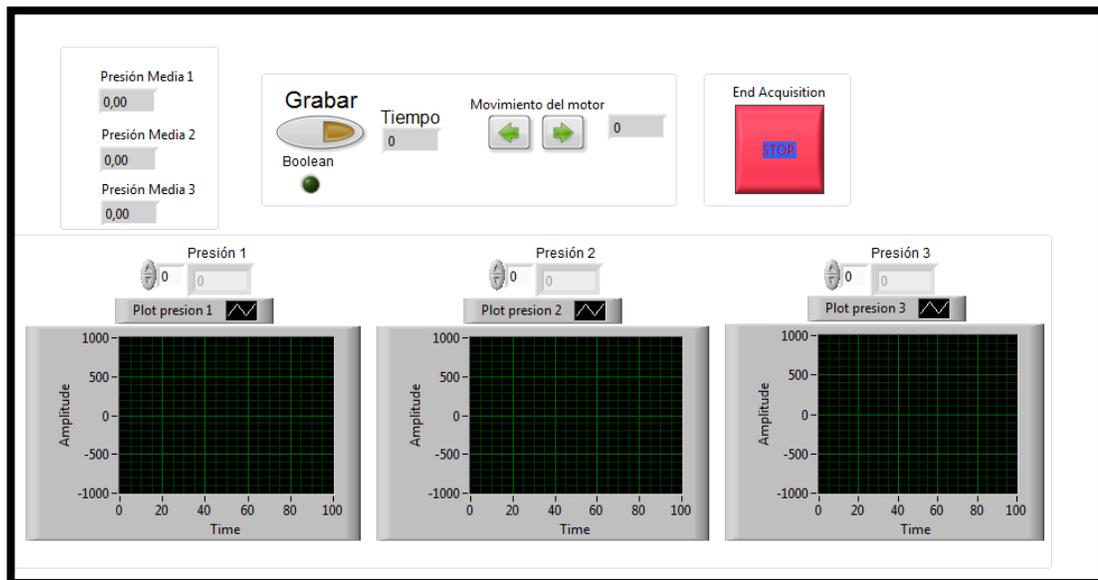


Figura 3-26. Interfaz para controlar la adquisición de datos y generación de bits.

La figura 3-27 es un esquema de la cadena del sistema de calibración de la sonda de tres agujeros tanto para la adquisición de datos como la generación de señales de pulsos.

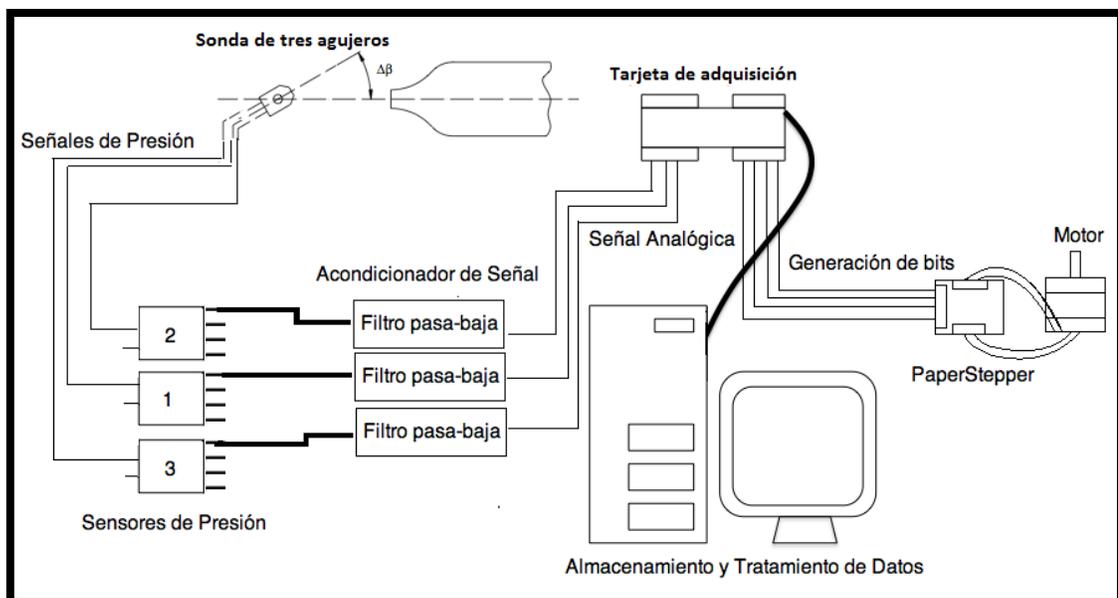


Figura 3-27. Cadena de medida, para la calibración de la Sonda.

4 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO Y ZONA DE MEDICIÓN

En el presente capítulo se describe el sistema de posicionamiento desarrollado para la sonda de tres agujeros: Las dimensiones del soporte y el funcionamiento de los dos actuadores que posicionan la sonda en dos ejes. También se dan las características de la zona de medición y las condiciones necesarias para generar un flujo 2D.

4.1 Soporte del sistema de posicionamiento

El soporte de los actuadores está construido con barras de acero soldadas con un perfil de 30x20 mm. Éstas se acoplan a una base de madera para equilibrar el sistema de posicionamiento.

La figura 4-1 muestra las dimensiones del soporte.

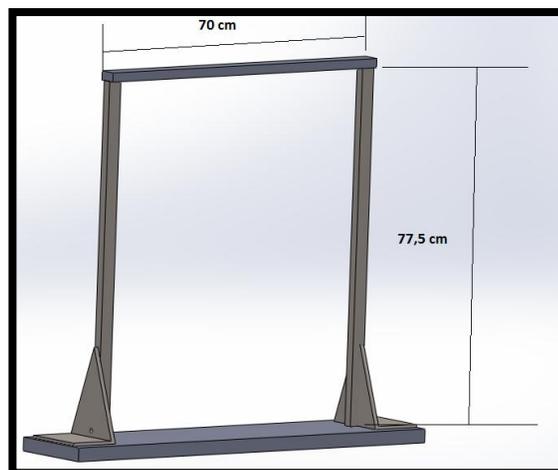


Figura 4-1. Dimensiones del soporte de los actuadores.

4.2 Actuador

El actuador es un dispositivo, cuya función es proporcionar fuerza y precisión en un proceso automatizado. Es controlado por dispositivos de control, como lo es la tarjeta de adquisición, PLC, etc. Existen varios tipos de actuadores, los que se diferencian por el origen de su fuerza, estos se definen principalmente como: Hidráulicos, Neumáticos y Eléctricos.

Actuadores Hidráulicos: La fuente de energía es proporcionada por fluidos a presión, existen de varios tipos, que se pueden clasificar de acuerdo con su forma de operación: cilindro hidráulico, motor hidráulico y motor hidráulico de oscilación. Son de uso industrial, donde se requiera trasladar una carga pesada.

Actuadores Neumáticos: La fuente de energía es proporcionada a consecuencia de la diferencia de presión en ambos lados del cilindro sobre un embolo. En esencia son idénticos a los hidráulicos. Sin embargo, el rango de compresión es mayor porque se trabaja con aire comprimido, existen principalmente de dos clases: Efecto Simple y Efecto Doble.

Actuadores Eléctricos: La fuerza ejercida por estos actuadores, es a partir de un motor eléctrico o solenoide. Este tipo de actuador presenta gran control y precisión, son los más utilizados en la robótica y en general, en los robots industriales actuales. Existen de tres tipos: Motores de corriente continua (DC), Motores de paso y Motores de corriente alterna (AC).

Para este trabajo se utilizan dos Actuadores Eléctricos con motor de paso de modelos LEL y LEF respectivamente de la empresa SMC (ver figura 4-2 y figura 4-3).



Figura 4-2. Actuador LEL de SMC, con motor de paso [2].



Figura 4-3. Actuador LEL de SMC, con motor de paso [3].

4.3 Características de los actuadores tipo LEL y LEF

Se utilizaron dos actuadores para posicionar la sonda en dos ejes, con el objetivo de cubrir planos de medición (ver figura 4-4).

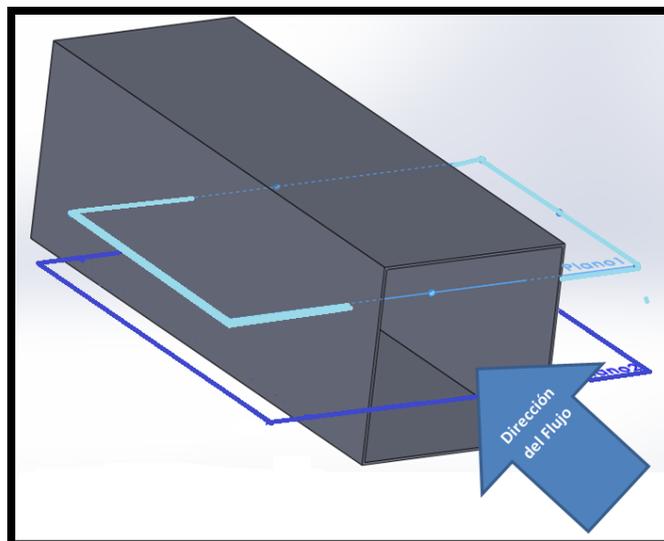


Figura 4-4. Planos de medición.

En cada plano de medición la sonda se fija en distintos puntos, los que generan una grilla de medición (ver figura 4-5), con el propósito de obtener una imagen clara del flujo que se encuentra en aquel plano.

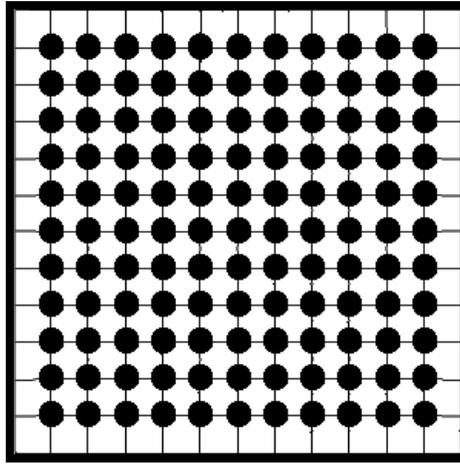


Figura 4-5. Puntos de medición en un plano.

Cada uno de los actuadores tiene sus características y consideraciones para su instalación y funcionamiento.

4.3.1 Actuador LEL

Es el actuador más robusto de los dos y desplaza la sonda de manera horizontal. La figura 4-6 muestra el actuador Serie LEL con sus características físicas.

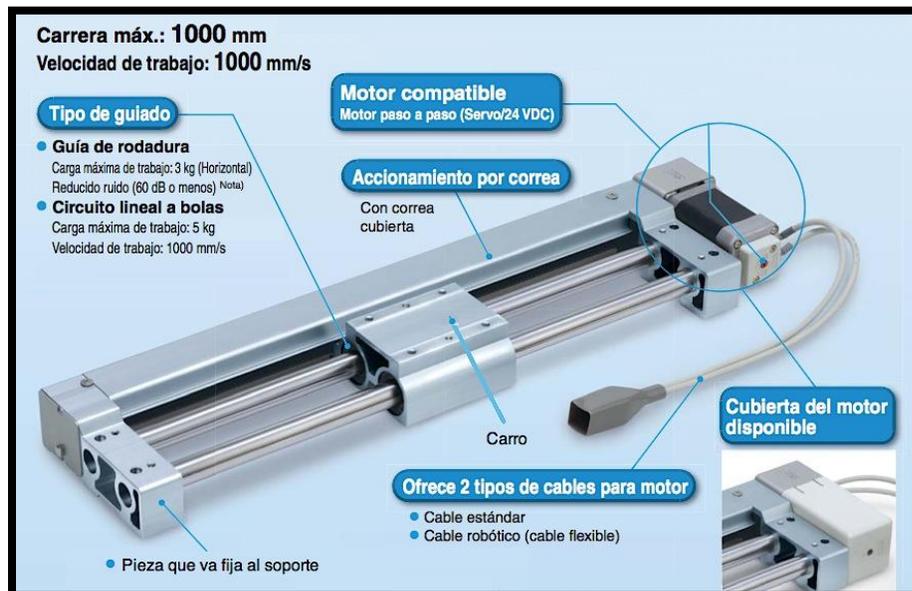


Figura 4-6. Características físicas actuador LEL.

Las características técnicas y eléctricas del actuador LEL se observan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características del Actuador LEL de motor de paso.

Modelo		LEL 25LT-500C-S16P1
Características técnicas del actuador	Carrera [mm]	500
	Carga de trabajo [kg]	5
	Velocidad [mm/s]	48 a 1000
	Aceleración/deceleración máx. [mm/s ²]	3000
	Repetitividad de posicionamiento [mm]	±0.1
	Paso equivalente [mm]	48
	Resistencia a impactos/vibraciones [m/s ²]	50/20
	Tipo de actuación	Correa
	Tipo de guiado	Rodamiento lineal a bolas
	Fuerza externa admisible [N]	5
Características eléctricas	Rango de temperatura de trabajo [°C]	5 a 40
	Rango de humedad de trabajo [% HR]	90 o inferior (sin condensación)
	Tamaño del motor	□42
	Tipo de motor	Motor paso a paso (24 VDC)
	Encoder	Fase A/B incremental
	Tensión nominal [V]	24 VDC ±10%
	Consumo de energía [W]	32
	Consumo de energía en reposo durante el funcionamiento [W]	16
	Consumo de energía máx. momentánea [W]	60
	Peso del controlador [kg]	LECP1: 0.13

4.3.2 Actuador LEF

Es el actuador que desplaza la sonda junto con la tubería (diámetro 6,12mm) de forma vertical, que contiene las mangueras provenientes de la sonda (ver figura 4-7).



Figura 4-7. Características físicas actuador LEF.

La tubería es sostenida por un pequeño soporte que va fijado al carro del actuador LEL (ver figura 4-8) y guiada por un rodamiento lineal que la mantiene recta y rígida al momento de desplazarla junto con la sonda (ver figura 4-9). Las características técnicas y eléctricas del actuador LEF se observan en la tabla 4.2.



Figura 4-8. Soporte Tubería.

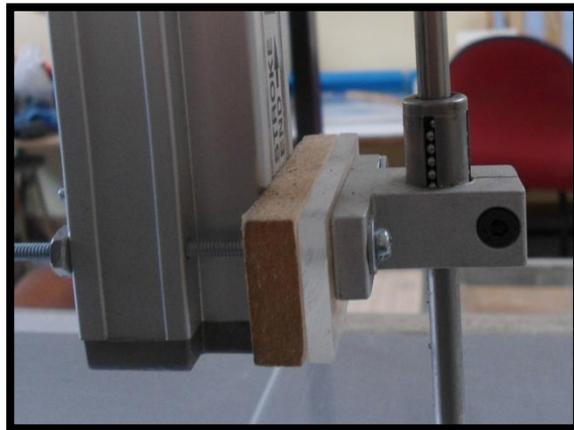


Figura 4-9. Rodamiento lineal.

Tabla 4.2. Características actuador LEF de motor de paso.

Modelo		LEFB16
Características técnicas del actuador	Carrera [mm] ^{Nota 1)}	500
	Carga de trabajo [kg] ^{Nota 2)} Horizontal	1
	Velocidad [mm/s] ^{Nota 2)}	48 a 1100
	Aceleración/deceleración máx. [mm/s ²]	3000
	Repetitividad de posicionamiento [mm]	±0.1
	Paso equivalente [mm]	48
	Resist. a impactos/vibraciones [m/s ²] ^{Nota 3)}	50/20
	Tipo de actuación	Correa
	Tipo de guiado	Guía lineal
	Rango de temp. de trabajo [°C]	5 a 40
Rango de humedad de trabajo [% HR]	90 o inferior (sin condensación)	
Características eléctricas	Dimensiones del motor	□28
	Tipo de motor	Motor paso a paso (Servo/24 VDC)
	Encoder	Fase A/B incremental (800 pulsos/giro)
	Tensión nominal [V]	24 VDC ±10%
	Consumo de energía [W] ^{Nota 4)}	24
	Consumo de energía en reposo durante el funcionamiento [W] ^{Nota 5)}	18
	Consumo de energía máx. momentánea [W] ^{Nota 6)}	51
Peso del controlador [kg]	0.15 (Montaje con tornillo)	

Los dos actuadores se acoplan con una pieza de adaptación (ver figura 4-10), la que es montada en el carro del actuador tipo LEL de manera que queden de forma perpendicular. La figura 4-11 muestra los dos actuadores montados en el laboratorio.



Figura 4-10. Pieza de adaptación de actuadores.



Figura 4-11. Los actuadores montados en el laboratorio.

La cadena de control del sistema de posicionamiento es la misma para los dos actuadores, se muestra en la figura 4-12, donde se especifica cada componente; el elemento de control, el controlador, el actuador y la alimentación.

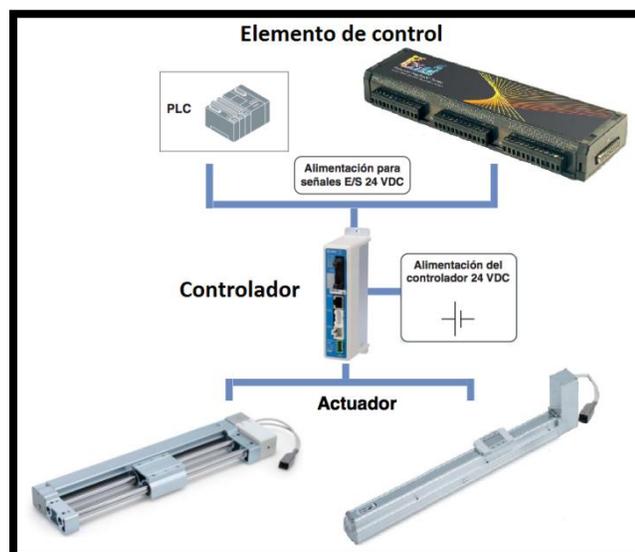


Figura 4-12. Cadena de control de los actuadores.

El elemento de control genera señales de pulsos (ver figura 4-13), que se envían al controlador generando la activación de los pines que controlan el movimiento del motor del actuador.

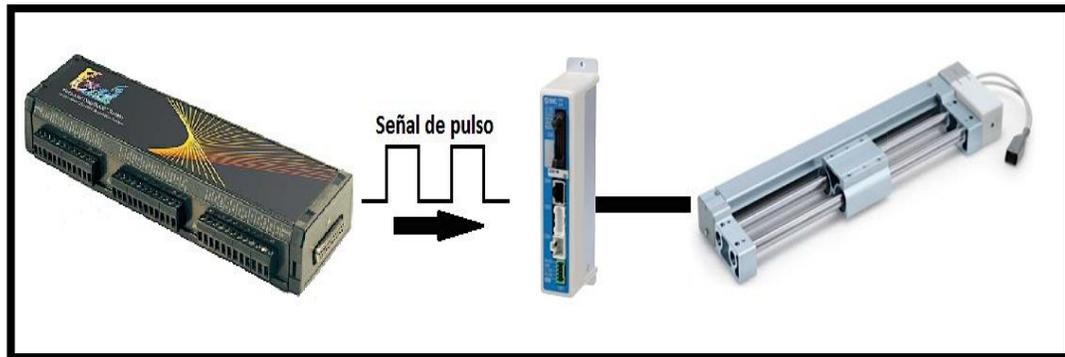


Figura 4-13. Señal de pulso para la activación de los pines.

La tarjeta de adquisición no puede conectarse directamente con el controlador, la señal emitida de la tarjeta es de 0V-5V y los pines del controlador se alimentan con 0V-24V DC. Es por esto que al sistema se le incorporará un Driver SN754410 que está diseñado para proporcionar corrientes bidireccionales de hasta 1A, con tensiones de 4,5V a 36 V. La figura 4-14 muestra el driver con sus terminales.

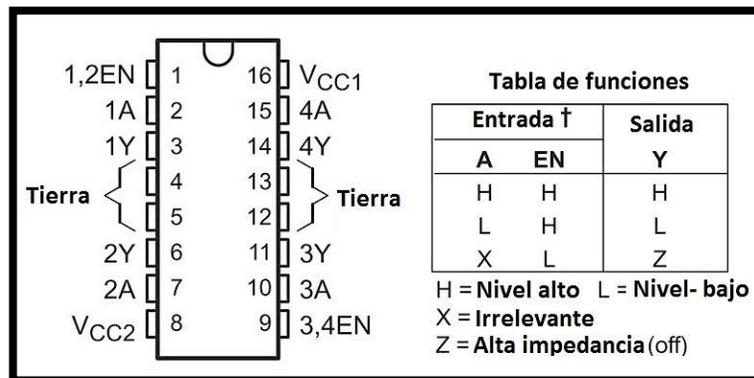


Figura 4-14. Driver SN754410.

El voltaje V_{CC1} proviene de la señal de entrada con nivel lógico de 5V de la tarjeta de adquisición, mientras que V_{CC2} es usado como señal de salida, en este caso corresponde a los 24 V que son los que se necesitan para activar los pines del actuador. Por lo tanto, como se muestra en la figura 4-14, para activar

la salida con 24 V se necesita un nivel lógico de 5V en la entrada; en cambio, para desactivar el pin basta con llevar la entrada a tierra o a un nivel lógico de 0V. Esto siempre y cuando los Enables que corresponden a los terminales 1 y 9 del Driver, se encuentren activados.

4.4 Control del movimiento

Cada actuador tiene su propio controlador, los que deben coincidir en su numeración dados por el fabricante. Sin embargo, las conexiones de los controladores son las mismas, son del tipo PNP.

El control del movimiento de los actuadores comienza con la alimentación del Conector de Alimentación a 24 V. En la figura 4-15 se visualiza los terminales del conector.

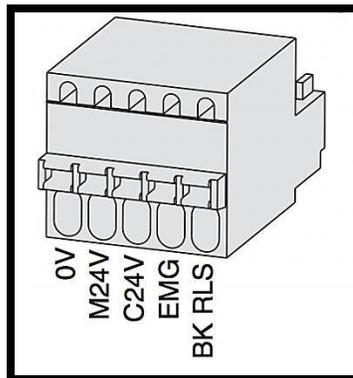


Figura 4-15. Conector de alimentación CN1.

La tabla 4.3 detalla las características de los terminales del conector CN1.

Tabla 4.3. Terminales del conector alimentador.

Nomb. Del terminal	Función	Descripción de funciones
0V	Alimentación común (-)	Terminales M24V/C24V/EMG/BK RLS son comunes (-).
M24V	Alimentación del motor (+)	Es el suministro eléctrico (+) del motor suministrado al controlador.
C24V	Alimentación de control (-)	Es el suministro eléctrico (+) del control suministrado al controlador.
EMG	Parada	Es la entrada (+) que libera la parada.
BK RLS	Desbloqueo	Es la entrada (+) que libera el bloqueo.

4.4.1 Secuencia de inicio del actuador

Para el control del actuador solo es necesaria la activación de algunos terminales. Se toman en cuenta los pines de entrada del conector E/S [anexo A.4] que son los que proporcionan el movimiento. Los terminales de salida, en rigor no serán necesarios, salvo que se requiera comprobar alguna propiedad de los actuadores como por ejemplo: La aceleración, El torque, etc.

Existe una secuencia necesaria para iniciar el movimiento del actuador. Comienza con la alimentación COM+ y COM- con una fuente externa (ver figura 4-16) de 24V. En el siguiente paso se desactivan las alarmas que son activadas por sensores que no permiten el movimiento sin previa instrucción. Para desactivarlas basta con enviar una señal de pulso al pin RESET. La figura 4-17 muestra el comportamiento de las señales de los terminales de salida cuando se desactiva la alarma.

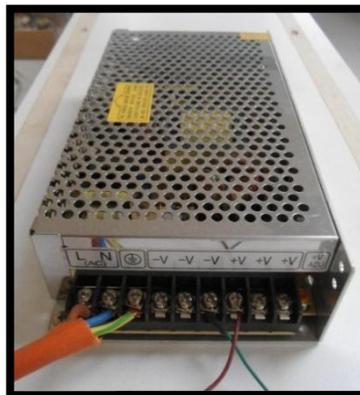


Figura 4-16. Fuente de 24 V DC.

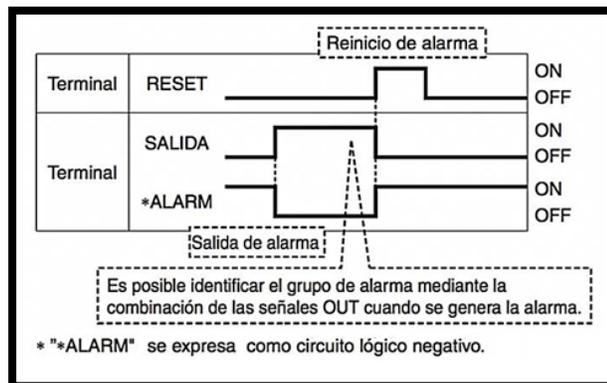


Figura 4-17. Señal de salida al desactivar la alarma.

El tercer paso corresponde llevar los actuadores a su posición de inicio. Es una condición estrictamente necesaria siempre que se quiera iniciar el movimiento. Para esto, lo primero es activar el pin SVON que energiza el motor, después de su estabilización se procede con enviar una señal de pulso al pin SETUP que acciona el actuador para llevarlo a la posición de origen. En la figura 4-18 se visualiza dicha secuencia.

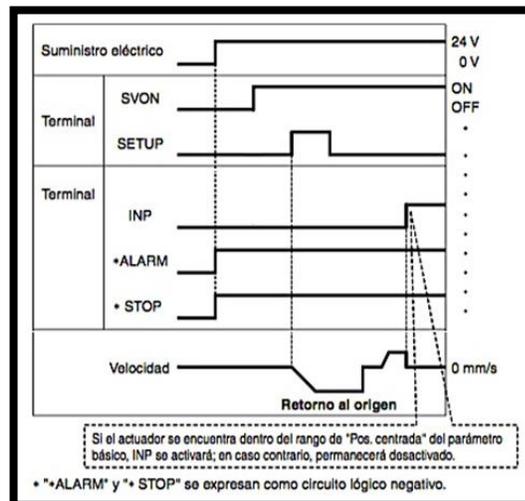


Figura 4-18. Terminales de salida al momento de activar el pin SETUP.

Para accionar finalmente el movimiento se activa el pin de entrada (IN0-IN5), previamente programados por software (suministrado por el fabricante). En este experimento se programó el pin IN0 para que se desplace 1mm, el pin IN1 cada 2mm y el pin IN2 cada 0,5mm. Los demás pines no se encuentran programados. Finalmente, se mandan señales de pulsos al pin DRIVE para accionar el movimiento. En la figura 4-19 se visualiza la secuencia.

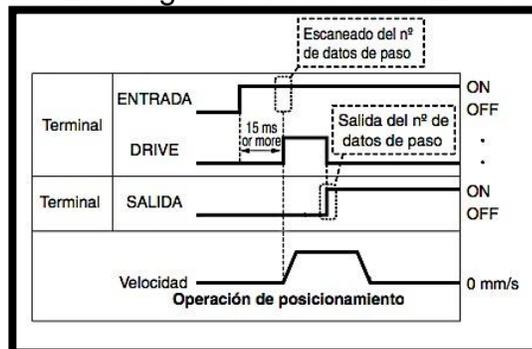


Figura 4-19. Secuencia de operación de posicionamiento.

La figura 4-20 muestra la cadena del sistema de medición de la sonda de tres agujeros, tanto para la adquisición de datos como la generación de pulsos para el control de los actuadores. El resultado de los datos obtenidos al final del proceso son: El campo de la velocidad del flujo y sus componentes en los ejes coordenados (x,y).

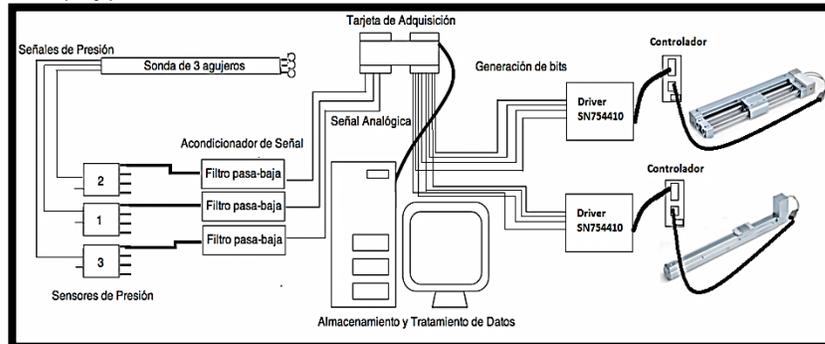


Figura 4-20. Cadena de medida para el sistema de posicionamiento.

4.5 Zona de medición

El tipo de flujo que se requiere tiene dependencia en 2-D, para ello se coloca una geometría de dimensiones 5,0x5,0x20 cm (ver figuras 4-21y 4-22), posicionado a la mitad de la estación de medición, el cual distribuye el flujo de manera simétrica. El obstáculo se posiciona con la ayuda de una hoja milimetrada (figura 4-22) para obtener los puntos correspondientes al plano de medición.



Figura 4-21. Obstáculo vista 1.

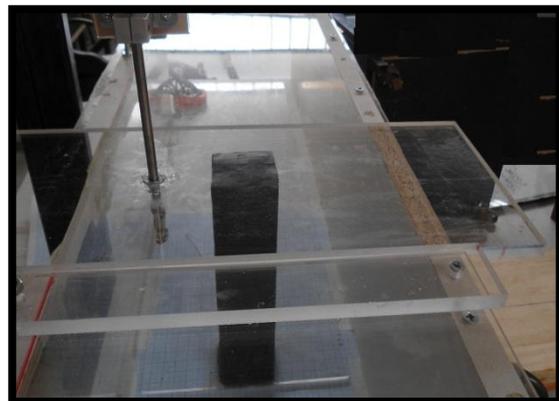


Figura 4-22. Obstáculo vista 2.

Como se puede observar en las figuras 4-21 y 4-22, la estación de medida está demarcada con placas de acrílico para poder visualizar lo que ocurre al momento de desplazar la sonda y mientras se obtienen los datos.

En teoría, previa medición, se presume que la distribución del flujo al momento de colisionar con la geometría tiene forma simétrica, debido a que la geometría tiene forma y se ubica de manera simétrica con respecto a la estación de medida. La figura 4-23 muestra la dirección del flujo, mientras que la figura 4-24 muestra el patrón del flujo al momento de colisionar.

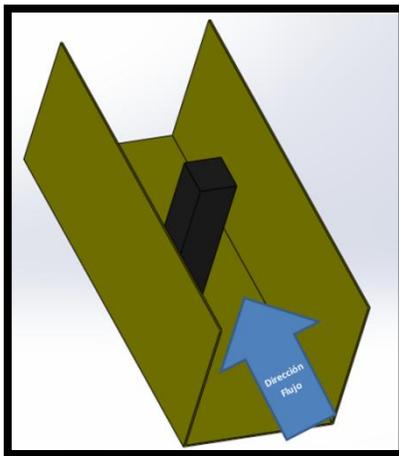


Figura 4-23. Dirección del flujo.

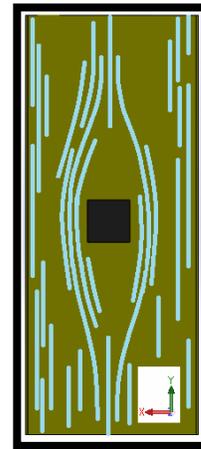


Figura 4-24. Distribución del flujo.

En las zonas donde se indeterminan los coeficientes adimensionales se genera un offset con la ayuda de un transportador para variar la posición angular de la sonda hasta que los coeficientes no se indeterminen. La figura 4-25 muestra el offset generado.



Figura 4-25. Offset de la posición angular de la sonda.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados de la calibración

En las figuras 5-1 a 5-3 se muestran los resultados teóricos de los coeficientes adimensionales, usando el método de proyección de línea de corriente para la sonda de tres agujeros.

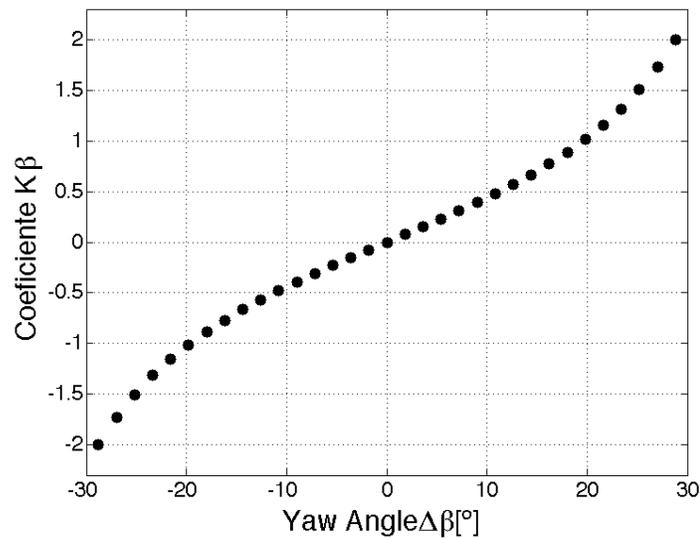


Figura 5-1. Curva teórica del coeficiente de dirección K_β .

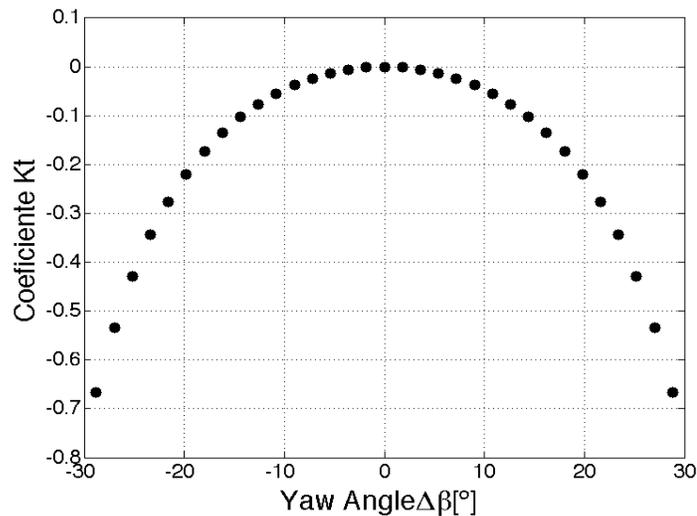


Figura 5-2. Curva teóricas del coeficiente K_t .

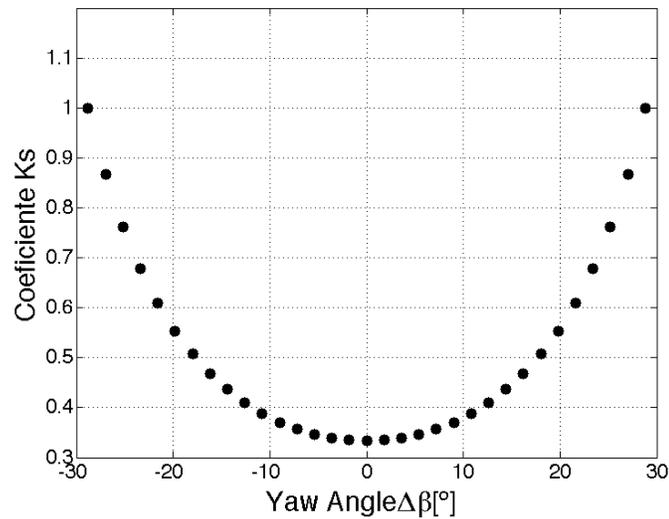


Figura 5-3. Curva teórica del coeficiente K_s .

Los datos obtenidos en la calibración experimental se realizaron con: $Re=21372$ y $Ma=0,09$ con una presión de ~ 550 Pa en la tobera y con una velocidad a chorro libre de $29,38$ m/s en la posición de la sonda. En estas condiciones se miden los coeficientes adimensionales y se comparan con los resultados teóricos. Los coeficientes de dirección K_β , de presión total K_t y de presión estática K_s medidos durante la calibración vs el ángulo $\Delta\beta$ se registran en las figuras 5-4, 5-5 y 5-6 respectivamente.

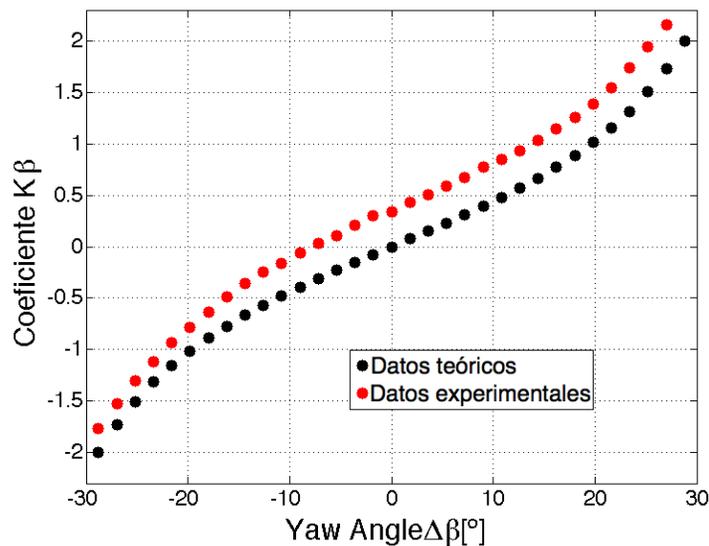


Figura 5-4. Coeficiente experimental de dirección K_β .

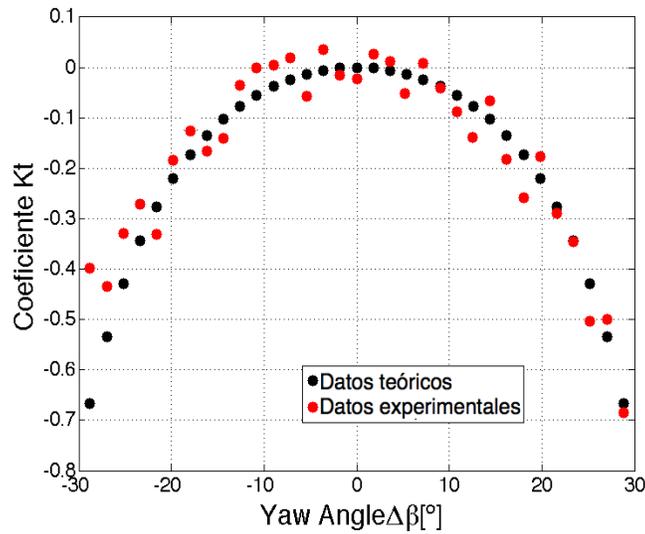


Figura 5-5. Coeficiente experimental de presión total K_t .

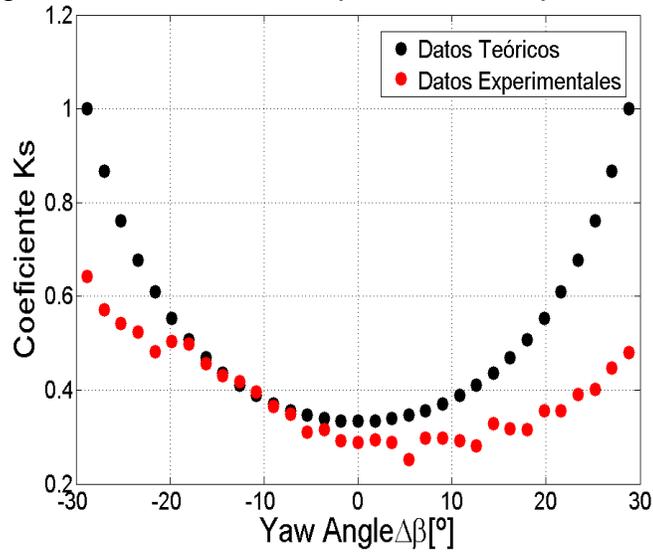


Figura 5-6. Coeficiente experimental de presión estática K_s .

El resultado experimental para el coeficiente de dirección K_β , tiene la misma forma funcional al resultado teórico usando el método de proyección de línea de corriente. Sin embargo, los datos experimentales presentaron un offset. Para pequeños ángulos de $\Delta\beta$, el método teórico muestra una relación lineal entre el coeficiente de dirección y el ángulo yaw. Una expansión en serie de Taylor de la ecuación 3.23 resulta:

$$k_\beta \approx \Delta\beta \cdot \frac{\pi}{45} \cdot \tan \delta \tag{5.1}$$

Lo que demuestra el comportamiento lineal dentro del rango $-15^\circ < \Delta\beta < 15^\circ$.

Los coeficientes de presión total y estática, exponen dispersión en los datos, esto puede deberse a dos razones principalmente.

Durante la calibración, resultó una ardua labor mantener las condiciones constantes de Re y Ma durante el periodo de adquisición de datos, esto se debió a que el compresor perdía presión al momento de generar el chorro libre o ganaba presión durante su carga, esta variación de presión provocó en definitiva la dispersión en los datos de los coeficientes. A pesar de fijar el tiempo relativamente corto pero lo suficiente para tener una cantidad de datos significativos, la dispersión resultó inherente a los resultados.

La segunda razón importante es la falta de simetría o imperfecciones producto de la construcción de la sonda, donde el tamaño resultó una gran complicación.

Los coeficientes adimensionales K_β y K_t resultaron sensibles al cambio de $\Delta\beta$. Sin embargo, el coeficiente k_s pareciera ser independiente al cambio angular. Estas curvas demuestran que las mediciones de presión total y estática se alejan del valor real medidas con el tubo de Pitot.

Para obtener la dirección del flujo a partir del coeficiente K_β , es necesario ajustar con la mejor curva los datos experimentales. La figura 5-7 presenta el ajuste del coeficiente de dirección vs ángulo $\Delta\beta$ en radianes. Este ajuste permite determinar los valores de los ángulos de incidencia del flujo, al momento de colisionar con la sonda durante la medición con el sistema de medición 2D.

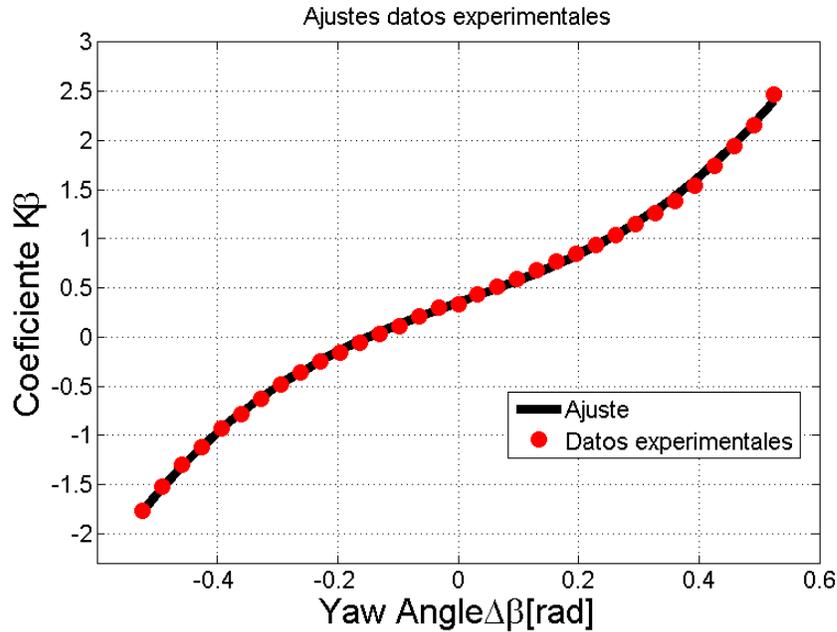


Figura 5-7. Curva de ajuste para K_{β} .

El resultado del ajuste del coeficiente de dirección, corresponde a la ecuación:

$$k_{\beta} = P1 \cdot \Delta\beta^3 + P2 \cdot \Delta\beta^2 + P3 \cdot \Delta\beta + P4 \quad (5.2)$$

Los coeficientes resultaron con 95% de límites de confianza :

$$P1 = 6,428 \quad (6,076, 6,782)$$

$$P2 = -0,1358 \quad (-0,2318, -0,03984)$$

$$P3 = 2,22 \quad (2,153, 2,287)$$

$$P4 = 0,3484 \quad (0,3359, 0,3609)$$

$$SSE = 0,01589$$

$$r^2 = 0,9996$$

$$RMSE = 0,02338$$

La curva se ajusta a los datos experimentales, esto se ve reflejado con el coeficiente de determinación (r^2). Aunque el valor del error cuadrático medio (RMSE) es un mejor indicador, resultando un error pequeño el cual corrobora lo interpretado.

5.2 Resultados del cálculo de la velocidad media

Determinación de la curva característica del Ventilador

Se escogen 11 puntos para determinar la curva, la tabla 5.1 muestra los resultados.

Tabla 5.1. Resultados para calcular la curva característica.

Pd (Pa)	Ps (Pa)	Pt (Pa)	Q (m ³ /s)
15,04	3218,40	3233,43	0,04
35,19	3132,97	3168,17	0,07
80,56	3043,98	3124,54	0,10
169,26	2856,35	3025,61	0,15
295,62	2597,46	2893,08	0,20
526,14	2059,61	2585,76	0,27
760,27	1422,44	2182,71	0,33
947,47	1018,98	1966,45	0,36
1146,14	474,90	1621,04	0,40
1284,85	9,73	1294,59	0,42
1410,60	-351,62	1058,97	0,44

Graficando los caudales vs las presiones total (Pt), estática (Ps) y dinámica (Pd) se obtiene el gráfico de la figura 5-8. Esta curva sirve como guía para identificar la capacidad del ventilador y los puntos de operación que se pueden utilizar siendo estos puntos función de la presión que le exige el sistema.

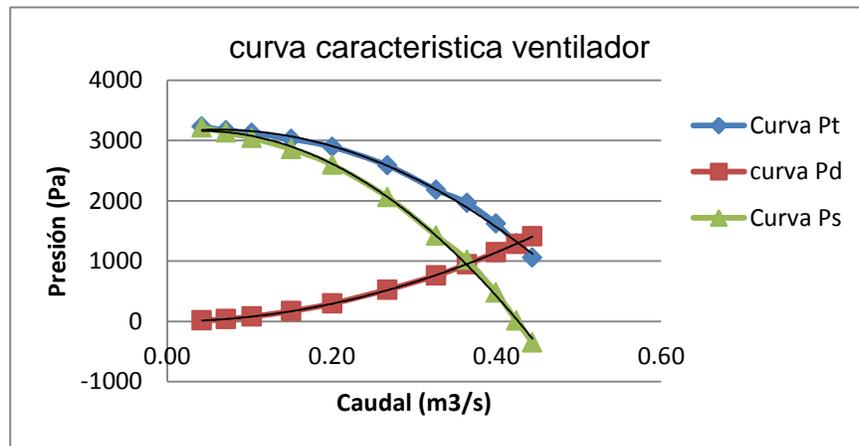


Figura 5-8. Curva característica del ventilador.

El caudal suministrado por el ventilador medido con el tubo de Venturi es de $0.5861 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el número de $\text{Re}= 174210$. Con la ayuda de Matlab se grafican los resultados experimentales del campo de velocidad usando la función QUIVER (ver figura 5-9) y las componentes de la velocidad media usando la función CONTOURF se muestran en las figuras 5-10 y 5-11.

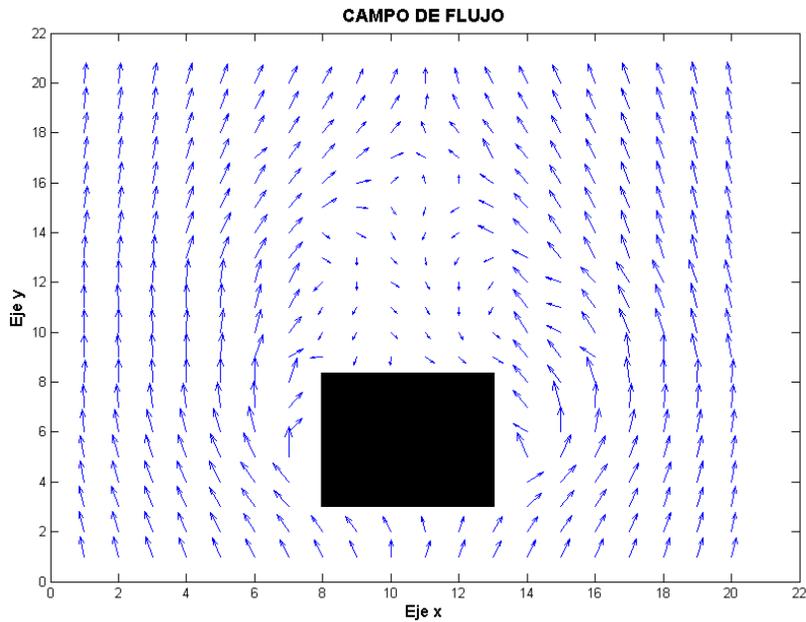


Figura 5-9. Componentes medios de la velocidad medidos con la sonda.

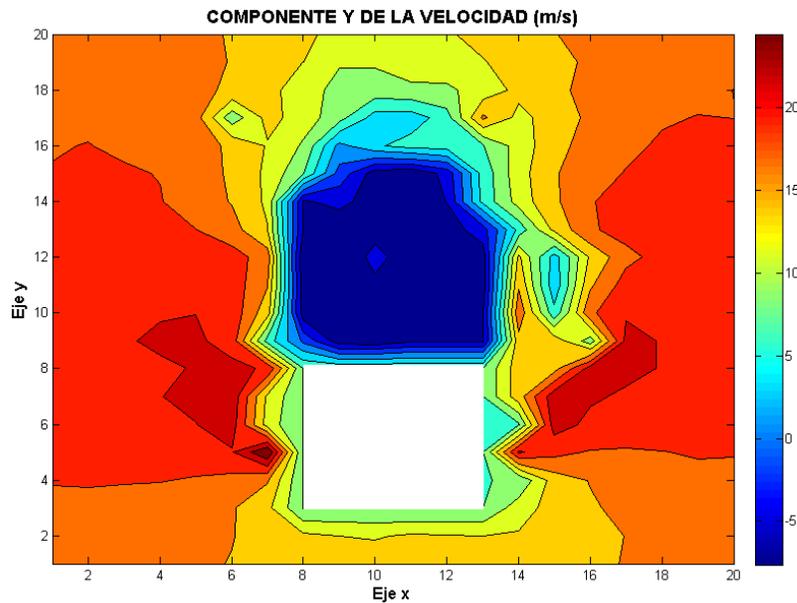


Figura 5-10. Componente Y de la velocidad media.

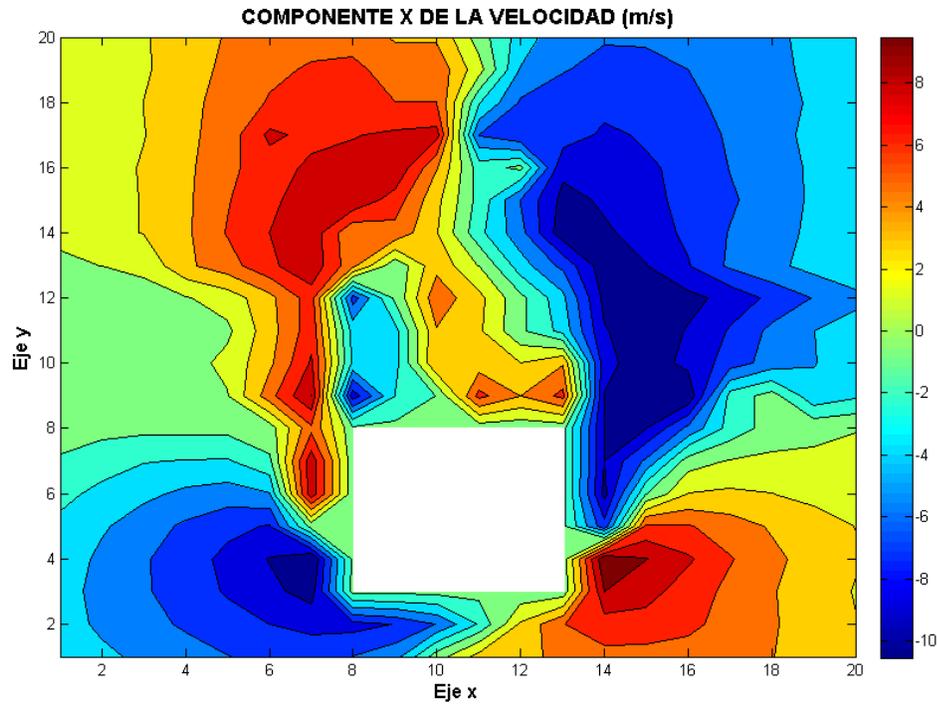


Figura 5-11. Componente X de la velocidad media.

5.3 Simulación CFD

El estudio numérico del flujo está basado en la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics). Con la utilización del programa comercial Fluent que utiliza el método de Volúmenes finitos [16]. Este programa permite simular el movimiento del flujo como también otros fenómenos vinculados con la Dinámica de Fluidos (transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc.). La metodología de solución empleada para este estudio se basa en una simulación permanente y una transiente con el fin de comparar ambos casos con el resultado experimental.

Este software tiene sus bases en los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y conservación de energía. El programa utiliza una discretización de volúmenes finitos y en la resolución de este caso se utiliza el algoritmo de acoplamiento presión-velocidad SIMPLEC (Transiente) y SIMPLE

(permanente) con el fin de resolver las ecuaciones que caracteriza el modelo de turbulencia de manera iterativa hasta converger a una solución.

En el anexo A1 se describe las principales características de los modelos de turbulencia asociados al programa ANSYS-FLUENT y su formulación matemática. Estos cumplen la función de ayudar a la simulación del flujo de manera tal que se evidencien los efectos viscosos que produce el fluido con su paso por los diferentes sectores del caso de estudio.

Se debe aclarar que se utilizó el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ Realizable, debido a su gran gama de aplicaciones en ingeniería y su relativa simpleza matemática. Es compatible para fenómenos de turbulencia lo que permite obtener resultados de gran confiabilidad.

En el Anexo A2 se describe el método de los volúmenes finitos que utiliza Fluent para determinar los valores escalares y vectoriales del problema.

La geometría (ver figura 5-12) es bidimensional, corresponde a un plano horizontal análogo al caso experimental con el fin de lograr una comparación.

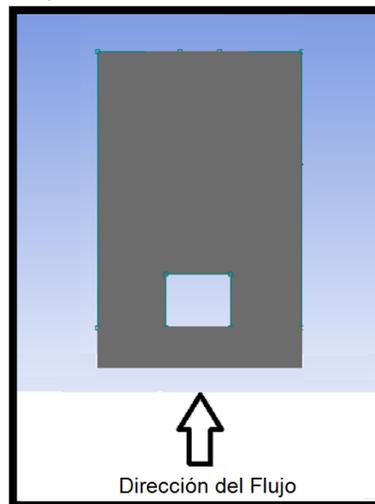


Figura 5-12. Geometría 2D.

Debido a la simplicidad del caso de estudio se ha aplicado un mallado simple estructurado (ver figura 5-13a y figura 5-13b) de tamaño de celda de 0,25 cm.

El programa trabaja definiendo condiciones de borde: VelocityInlet, PressureOutlet y Wall. La condición de Wall define la rugosidad de las paredes y los límites de la geometría.

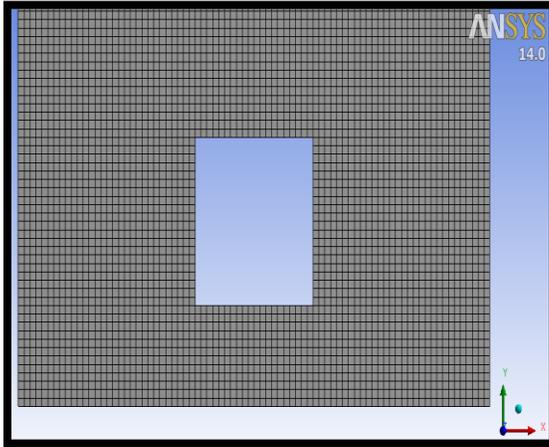


Figura 5-13a. Mallado Geometría 2D

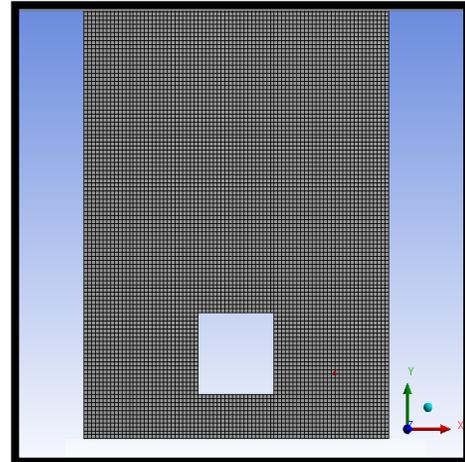


Figura 5-13b. Mallado Completo 2D.

La simulación se realizó en las siguientes condiciones:

- La velocidad del flujo de aire de entrada es de 15 m/s.
- La salida (PressureOutlet) está conectada con la atmósfera.
- La condición de Wall se utiliza en todos los contornos que no llevan alguna otra condición.

El paso temporal empleado en este caso corresponde a un 0,000125 s. Esta discretización temporal, permite capturar los fenómenos transientes como los torbellinos y vórtices. En la tabla 5.2 se muestra un resumen de los parámetros que definen la discretización temporal 2D.

Tabla 5.2 Resumen de la discretización 2D.

N° de Celdas	25200
Paso temporal	0,000125 s
Modelo de turbulencia	k-e Realizable
Iteraciones por paso temporal	40

Los resultados de la simulación permanente del campo de velocidad y la distribución de las componentes de la velocidad se muestran en las figuras 5-14 a 5-16 respectivamente.

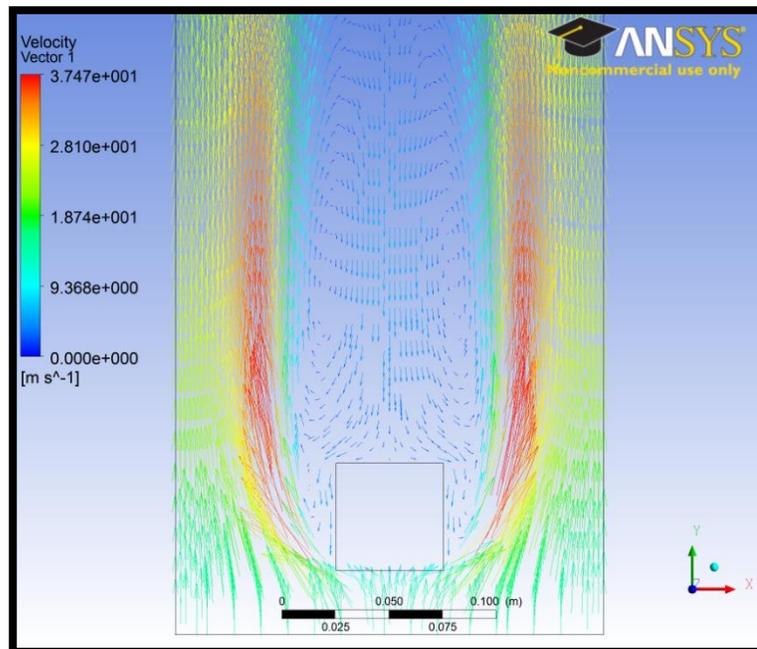


Figura 5-14. Vectores de Velocidad en estado permanente.

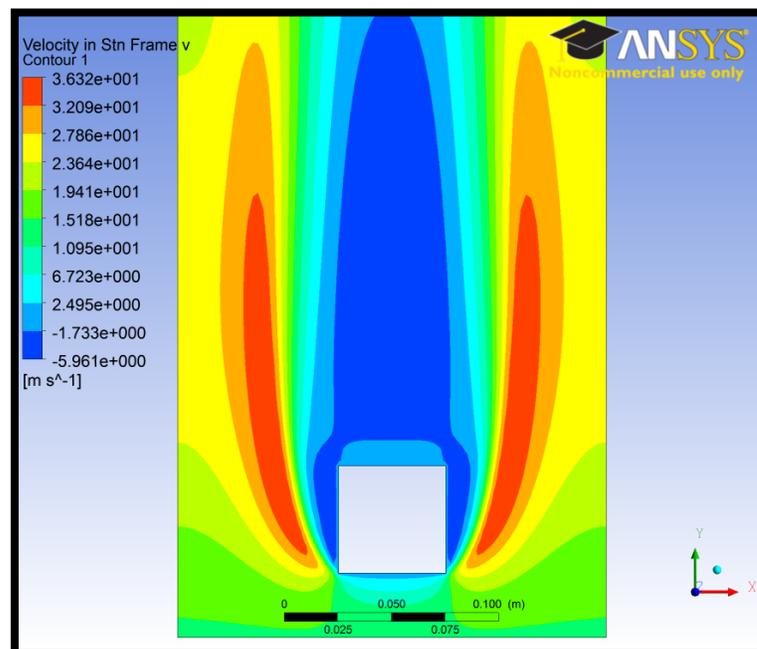


Figura 5-15. Componente Y en estado permanente.

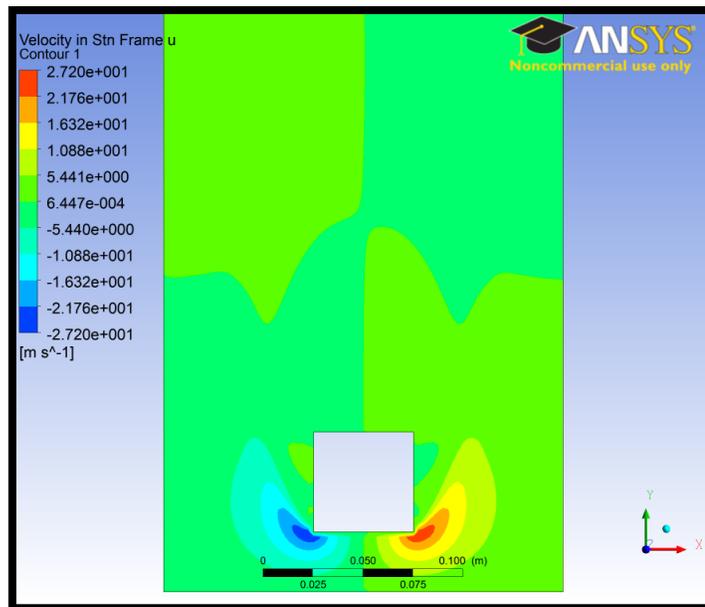


Figura 5-16. Componente X en estado Permanente.

Los resultados de la simulación transiente se muestran en las figuras 5-17 a 5-19 respectivamente.

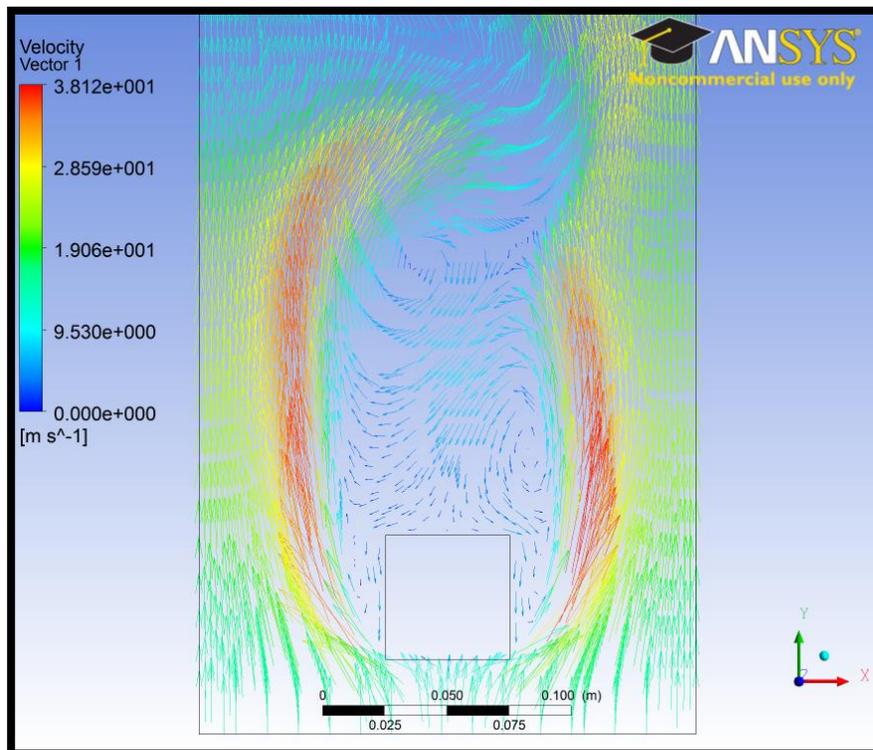


Figura 5-17. Campo de velocidad en estado transiente.

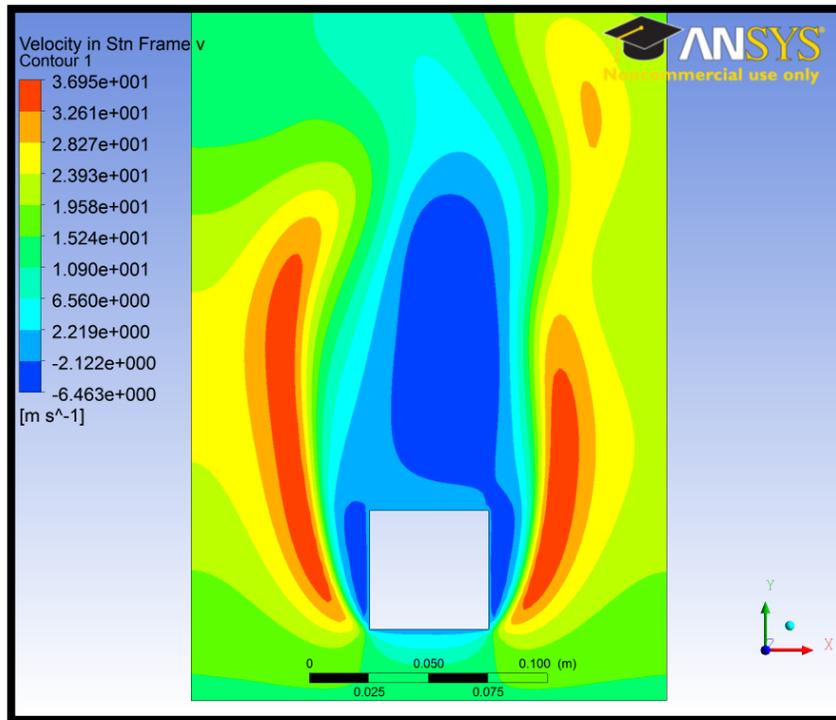


Figura 5-18. Componente Y en estado transiente.

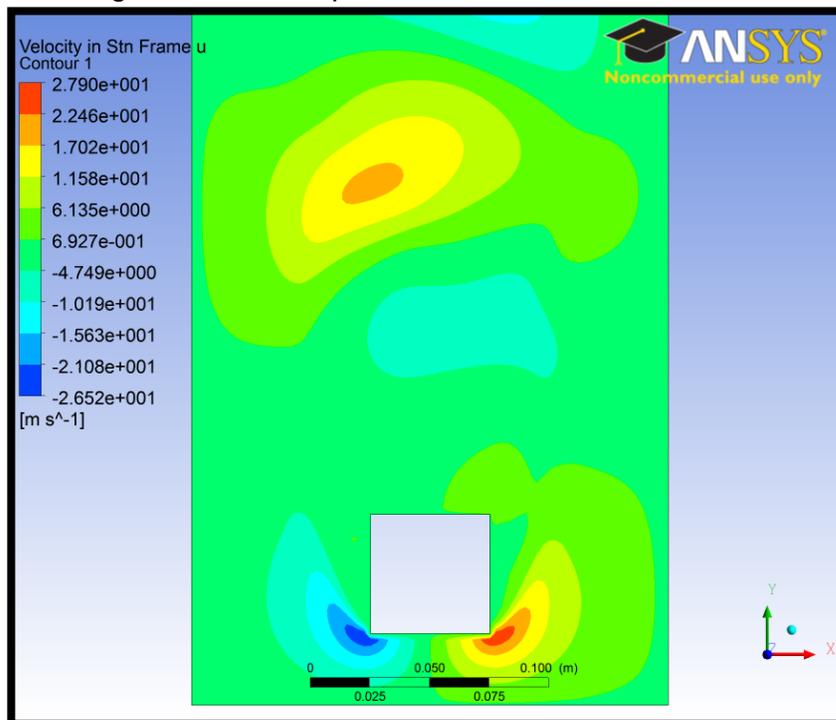


Figura 5-19. Componente X en estado transiente.

En la simulación estacionaria presenta una distribución simétrica del campo de velocidad, generando una gran zona de flujo inverso (zona azul) ubicándose principalmente en la zona posterior y en los costados del obstáculo (ver figura 5-14).

En la simulación transiente se observan fenómenos tales como los que generan los vórtices junto con su incidencia en el campo de flujo. La figura 5-17 muestra los vórtices en un instante t , por ser un caso transiente se espera que cuando transcurra un instante $t + dt$ los vórtices se localicen en otro sector del campo de flujo.

Con la ayuda de la herramienta CFD-Post de Ansys Workbench se genera un video de la simulación transiente que muestra la secuencia de vórtices alternados generando estelas como los bien conocidos Vórtices de Kármán.

Este comportamiento del flujo se debe principalmente a la alta velocidad de impacto del flujo y a la forma del obstáculo siendo este último poco aerodinámico provocando zonas donde la capa límite no puede ajustarse a las bruscas esquinas provocando un desprendimiento del propio obstáculo.

El resultado experimental entrega información relevante y representativa de la distribución del flujo en la zona anterior y en los costados del obstáculo, salvo en las zonas conflictivas. Esto se debe a que la sonda de tres agujeros funciona con el método de línea de corriente para flujos estacionarios, donde la sonda entrega valores medios de la velocidad. Por lo tanto, no entrega información de comportamientos transientes como los observados en la simulación. Sin embargo, el resultado experimental tiene más semejanza al resultado transiente, donde este representa el comportamiento real del flujo.

Las dos zonas provenientes de los costados del obstáculo donde también se genera flujo inverso, la sonda no logra obtener información de las componentes de velocidad debido a su tamaño. El tamaño de estas zonas es del mismo rango del tamaño de la sonda, por lo que se infiere una interferencia de la misma sonda con el flujo.

6 CONCLUSIONES

Durante el transcurso de la elaboración de esta tesis, se formularon soluciones para los distintos problemas que se llevan a cabo durante una experiencia en laboratorio, logrando obtener las primeras consideraciones y aciertos para estudios posteriores.

Después de los resultados obtenidos tanto experimentalmente como los resultados numéricos realizados con Fluent, es posible concluir lo siguiente:

Se ha diseñado, construido e implementado un sistema de medición de las componentes medias de la velocidad de aire en una sonda de tres agujeros tipo cobra para flujos con dependencia 2D, con un ángulo de incidencia de 60° ($+30^\circ$, -30°).

Se ha diseñado, construido e implementado un túnel de viento para desarrollar mediciones de forma controlada, en un espacio acorde al tamaño y diseño de la sonda.

Se ha diseñado, construido e implementado un sistema de posicionamiento bidimensional, que contempla dos actuadores eléctricos controlados a través del software Labview por medio de un sistema electrónico a través una tarjeta de adquisición de datos.

Se ha diseñado, construido e implementado un sistema de calibración para la sonda bajo un rango angular restringido, según las características geométricas de la sonda.

Se logró la calibración de la sonda de 3 agujeros obteniendo los coeficientes adimensionales, los que fueron comparados con el resultado teórico usando el método de proyección de línea de corriente. Los resultados reflejan que el coeficiente k_β resultó muy similar al resultado teórico, mientras que los coeficientes k_t y k_s a pesar de tener las mismas tendencias que el resultado teórico estos presentan dispersión debido principalmente a la

dificultad de generar condiciones de flujo constante y a imperfecciones de construcción de la sonda.

Se logró realizar un sistema de adquisición de datos, tanto para el cálculo de la velocidad media como para la calibración de la sonda el cual contempla un sistema electrónico que incorpora sensores de presión diferencial, filtros pasa baja para las señales de alimentación y de salida de los sensores, y una tarjeta de adquisición.

Para el campo de velocidad bidimensional se implementó una geometría rectangular (2D) y se midieron las componentes del flujo a su alrededor. La geometría genera fenómenos turbulentos y transitorios por tener contornos abruptos y por la alta velocidad de impacto del flujo, por lo que resultó no ser la geometría más adecuada para capturar las componentes permanentes de flujo.

Se realizaron simulaciones CFD de manera de generar una aplicación y visualización de vectores de velocidad de manera de verificar el alcance de los resultados obtenidos con la sonda. Los resultados demuestran que la simulación transiente representa mayor semejanza que el resultado permanente, debido a los fenómenos turbulentos que están presentes en la realidad.

Recomendaciones

Para estudios posteriores se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tener mayor control de las condiciones de flujo constante generado para la calibración de la sonda.
- Ampliación del espectro de medición a un flujo tridimensional, lo que implica una sonda de 5 agujeros y un sistema de calibración en 3D.
- Variación de frecuencia del ventilador para cambiar el flujo de entrada con buena precisión, lo que permitiría tener un mejor control del ventilador y modificar el número de Reynolds para la geometría en

estudio. Se puede hacer lo mismo utilizando una obturación en la entrada pero con la consiguiente pérdida de prestaciones en el ventilador debido a la turbulencia en la entrada.

- Estimación del error de la medición, que lamentablemente queda fuera del alcance de este trabajo.
- Antes de realizar una experiencia se deben considerar los efectos potenciales de la producción de vórtices generados por el diseño de la geometría del obstáculo y el número de Reynolds. Para ello se recomienda elegir una geometría más aerodinámica, como un perfil alar que tenga mínimos efectos transientes en su flujo.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ador Reodique, Sensor and Systems Applications Engineering and Warren Schultz, Field Engineering: Noise Considerations for Integrated Pressure Sensors.

[2] Catálogo Actuador LEL, SMC. URL: http://.content2.smcetech.com/pdf/LEL-A_ES.pdf.

[3] Catálogo Actuador LEF, SMC. URL: http://.content2.smcetech.com/pdf/LEF-D_ES.pdf.

[4] Datasheet de los componentes L298N H-bridge y MC78L00A respectivamente. URL: www.robotshop.com/media/files/pdf/l298n-motor-driver-datasheet.pdf, www.Cypress.com/?docID=46812.

[5] Diego Lerena Díaz: Experimental Calibration of Three- Hole Pressure Probes with Different Head Geometries. Institute of Thermal Turbomachines and Powerplants Viena University of Technology.

[6] Freescale MPXV7002, Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated. URL: www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPXV7002.pdf.

[7] Gieß P. A., Rehder H.J. and Kost. F.: A New Test Facility for Probe Calibration – Offering Independent Variation of Mach and Reynolds Number. Proceedings of the 15th Bi-Annual Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines. Firenze, Italy. (September 2000)

[8] INC.AMS Advanced Micro System. Stepper motor System basic (Rev.5/2010). Nov. de 2013. URL: <http://www.ams2000.com/pdf/step101.pdf>.

[9] Ivan Rivas Acosta. Coordinación de Tecnología Hidráulica (IMTA): Tubos Venturi, Dall y Tobera. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

[10] José Luis Llanca Pacheco: Simulación (CFD) de la interferencia Fluidodinámica y puntos de operación en la incorporación de un ventilador en paralelo, Proyecto Nuevo Nivel Mina de Codelco Chile.

- [11] Juan Pablo Hurtado: Generación Aerodinámica de Ruido en un Ventilador Centrífugo: Estudio Numérico y Contrastación Experimental. Universidad de Oviedo, 2006.
- [12] K.M.Argüelles Díaz, J.M. Fernández Oro, E. Blanco Marigorta, R. Barrio Perotti: Head geometry effect on pneumatic three-hole pressure probes for wide angular range
- [13] NORMA UNE 100-212-90, "Norma española (AENOR) ventiladores", 1990, 1º edición.
- [14] NORMA ISO 5167-1, "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full", INTERNATIONAL STANDARD, 2003, 2º edition.
- [15] NORMA AMCA-ASHRAE, "Laboratory Methods of Testing Fans for Rating", American National Standard, 1985.
- [16] Patankar, Suhuas. Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer. Maple Grove. Innovative Research, 1890. pp 79-128.
- [17] Patankar, Suhuas. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Washington Hemisphere Publishing Corporation, 1980. pp 79-128..
- [18] Pisasale A.J., Ahmed N.A.: A Novel Method for Extending the Calibration Range of Five-Hole Probe for Highly Three-Dimensional Flows. Flow Measurement and Instrumentation 13 (2002).
- [19] Texas Instrument, SN754410 QUADRUPLE HALF-H DRIVER. URL: <http://www.ti.com/product/sn754410>.
- [20] Treasted, A.L, Yocum, A.M: The Calibration and Application of Five- Hole Probes. ISA Transactions Vol. 18, No.3 (1979).
- [21] Versteeg, H., Malalasekera, W. An introduction to Computational Fluid Dynamics The finite Volume Method. Essex. Longman Scientific & Technical, 1995. pp.
- [22] Yunus A. Çengel, Jhon M. Cimbala: Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones.

ANEXOS

A1: Modelos de turbulencia

La complejidad de los diferentes modelos de turbulencia varía dependiendo de los detalles que se quieren observar e investigar, mediante la realización de las simulaciones numéricas

El número de Reynolds es una medida de la inestabilidad del flujo. Tales inestabilidades se originan debido a la interacción entre los términos no lineales de inercia y los términos viscosos en las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de estudio.

La descripción del movimiento de las partículas en régimen turbulento, resulta altamente complejo desde el punto de vista de análisis con métodos numéricos. Se han propuesto varios modelos para abordar este problema.

A continuación, se presentan los principales modelos de turbulencia asociados al programa ANSYS-FLUENT. Estos modelos reproducen los efectos viscosos que produce el fluido con su paso a los diferentes sectores de la geometría simulada.

Modelo $k - \varepsilon$ Standart

El modelo de turbulencia se define mediante el sistema de ecuaciones diferenciales compuesto por (Lauder, 1974):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon \mu_i) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{A1.1}) \\ \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon \mu_i) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon + Y_M + S_k \\ \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \end{aligned}$$

Donde:

k : Energía cinética turbulenta.

ε : Tasa de disipación de energía turbulenta.

G_k : Generación de energía cinética turbulenta producto de los grandes gradientes de velocidad media.

Y_M : Representa la contribución de la dilatación fluctuante en una turbulencia compresible.

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$: Constantes.

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$: Corresponde al número de Prandtl turbulento para k y ε respectivamente.

S_k, S_ε : Término Fuente.

Los valores de las constantes se observan en la tabla A1.1.

Tabla A1.1 Valor de las constantes del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ Standard.

Constante	Valor
$C_{1\varepsilon}$	1,44
$C_{2\varepsilon}$	1,92
$C_{3\varepsilon}$	0,09
σ_k	1,0
σ_ε	1,3

Es el modelo más simple de los modelos de turbulencia de dos ecuaciones, es uno de los más utilizados en el cálculo de flujos prácticos de ingeniería, gracias a que en su implementación en los cálculos se logran resultados razonables precisos y a un costo computacional moderado para una gran gama de casos de flujos turbulentos.

El modelo está basado en las ecuaciones de transporte de la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación de turbulencia ε .

El modelo trabaja bajo el supuesto en que el flujo es totalmente turbulento y que los efectos de la viscosidad moléculas son despreciable (Saavedra, 2010).

Modelo $k - \varepsilon$ Realizable

El modelo $k - \varepsilon$ Realizable es relativamente nuevo y difiere del modelo Standard en dos aspectos:

- El modelo $k - \varepsilon$ Realizable introduce una nueva formulación para la viscosidad turbulenta.
- Una nueva ecuación de transporte para la tasa de disipación ε , ha sido derivada de una ecuación exacta para el transporte de la fluctuación de la vorticidad media cuadrada.

El término Realizable significa que este modelo satisface ciertas restricciones matemáticas de los esfuerzos de Reynolds, consistente con la física de los fluidos turbulentos.

Las ecuaciones de transporte para el modelo $k - \varepsilon$ Realizable son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon + Y_M + S_k \quad (\text{A1.2})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (\text{A1.3})$$

Donde:

$$C_1 = \text{Max} \left[0,43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

k : Energía cinética turbulenta.

ε : Tasa de disipación de energía turbulenta.

G_k : Generación de energía cinética turbulenta producto de los gradientes de velocidad media.

G_b : Generación de energía cinética turbulenta producto de la flotación.

Y_M : Representa la contribución de la dilatación fluctuante en una turbulencia compresible.

$C_{1\varepsilon}, \sigma_\varepsilon$: Número de Prandtl turbulento para ε .

C_{2k}, σ_k : Número de Prandtl turbulento para k .

La viscosidad turbulenta se calcula mediante la misma expresión que los modelos Standard y RNG, ecuación 3.11. La diferencia es debida al término C_μ , ya que este término no es constante y se calcula mediante la ecuación A1.4:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (\text{A1.4})$$

A2. Fundamentos del método de volúmenes finitos.

Aquellas situaciones físicas en las que está presente la mecánica de fluidos y/o transferencia de calor corresponden a un grupo general llamados Problemas de Convección y Difusión. Para describir este tipo de fenómenos se recurre a la ecuación de transporte para una propiedad ϕ , que se expresa como:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{V}) = \text{div}[\Gamma \text{grad}(\phi)] + S \quad (\text{A2.1})$$

Siendo Γ el coeficiente de difusión y S corresponde a los términos fuente.

Tal como se presentó durante la formación académica, S.V. Patankar [16] desarrolló el método de los volúmenes finitos (MVF) que permite resolver de mejor manera los problemas de transporte a través de una solución numérica. Este método consiste básicamente en a) discretizar el dominio físico, considerando un nodo en el centro de cada volumen de control y b) discretizar

el modelo matemático, integrando cada ecuación diferencial con respecto a cada variable independiente y usando funciones de interpolación adecuadas.

Discretización

Para simplificar la figura A2-1 presenta la discretización de un dominio 2D a través del método de los volúmenes finitos.

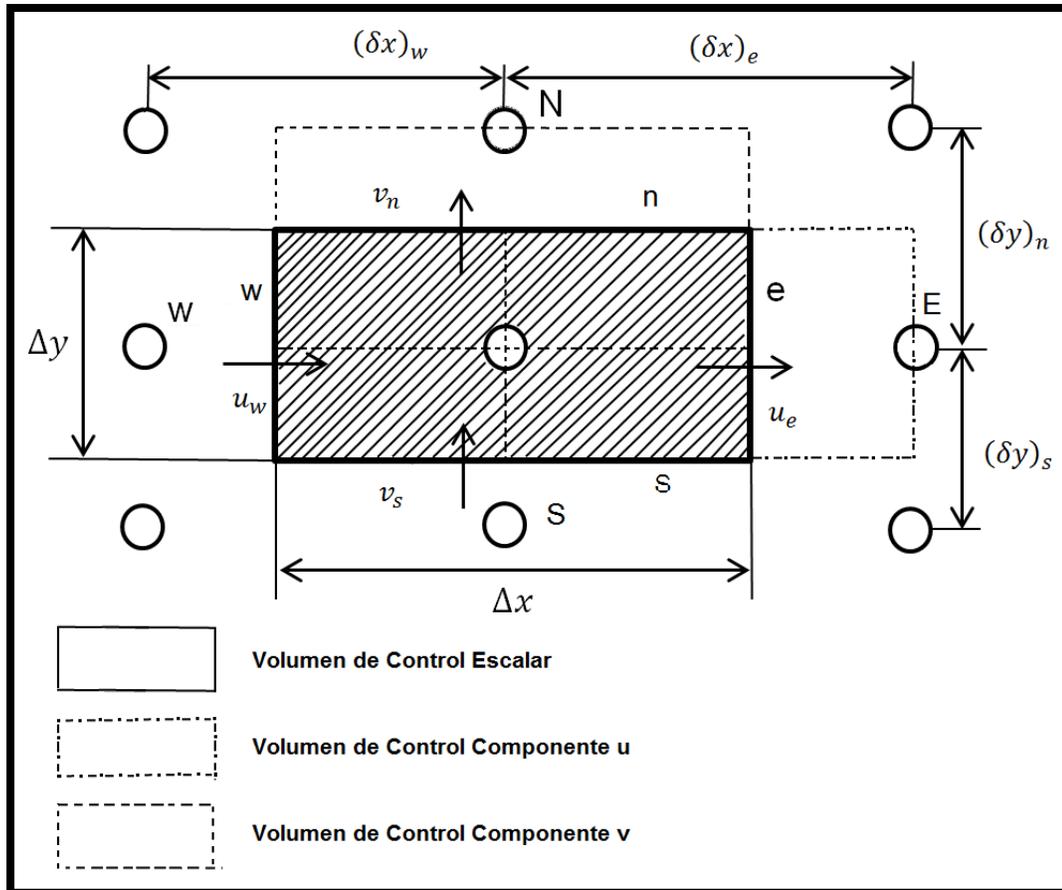


Figura A2-1. Discretización mediante volúmenes de control del dominio físico.

En un dominio 2D, el tamaño del volumen de control corresponde a $\Delta x \Delta y$ y en el centro de éste se ubica el nodo P . Los nodos vecinos corresponden a N, S, E, W (Norte, sur, Este y Oeste respectivamente). En un volumen 3D se deben incorporar los nodos Top y Bottom (T y B). Las distancias entre P y sus vecinos se representan como $(\delta y)_n, (\delta y)_s, (\delta x)_e$ y $(\delta x)_w$.

En esta discretización se aprecia un traslape entre el volumen del nodo P y los volúmenes de control para los términos del vector velocidad. Hacia la cara e se traslapa el término u , mientras que el término v lo hace hacia la cara n del volumen $\Delta x \Delta y$.

Este tipo de malla escalonada o traslapada para los componentes de velocidad fue introducida por Harold y Welch [17] para solucionar los problemas de sigzaguo u oscilación de los campos de velocidad y presión que se originan al discretizar sobre una malla sin traslape.

Al discretizar la ecuación A2.1 y usar adecuadas funciones de interpolación, más un adecuado reordenamiento, el modelo matemático 2D se escribe como:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (\text{A2.2})$$

, que corresponde a la forma estándar de la ecuación discretizada de transporte.

Para un caso 1D permanente de convección y difusión, la ecuación A2.1 queda de la siguiente manera:

$$\frac{d(\rho u \phi)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (\text{A2.3})$$

, donde u representa la velocidad en la dirección x . La ecuación de continuidad se convierte en:

$$\frac{d(\rho x)}{dx} = 0 \quad (\text{A2.4})$$

Siguiendo el procedimiento descrito por H.K. Versteeg y W. Malalasekera [21], se integran las ecuaciones (A2.2) y (A2.3) sobre el volumen de control correspondiente al dominio físico 1D, quedando:

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \quad (\text{A2.5})$$

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w = 0 \quad (\text{A2.6})$$

Para evaluar los términos difusivos de la ecuación (A2.4) en las fronteras del volumen de control se utiliza interpolación lineal, quedando estos términos de la manera que se presenten a continuación.

$$\left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} \right) \quad (\text{A2.7})$$

$$\left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w = \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} \right) \quad (\text{A2.8})$$

Con la intención de facilitar la escritura se definen las variables F y D que representan el flujo másico convectivo por unidad de área y la difusión de conductancia en las caras del volumen de control [21] como:

$$F = \rho u \quad \text{y} \quad D = \frac{\Gamma}{\delta x} \quad (\text{A2.9})$$

Reescribiendo las ecuaciones (A2.4) y (A2.5) en términos de estas nuevas variables y considerando que $A_e = A_w$ éstas quedan así:

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_w) \quad (\text{A2.10})$$

$$F_e - F_w = 0 \quad (\text{A2.11})$$

Funciones de interpolación

Para evaluar los términos convectivos en las fronteras del volumen de control se utilizan diversas funciones de interpolación. Algunas de estas funciones son:

Diferencia central:

Considera interpolación lineal para evaluar ϕ en las fronteras del volumen de control, independiente del sentido del flujo. Esto es:

$$\phi_e = \frac{\phi_P + \phi_E}{2} \quad (\text{A2.12a})$$

$$\phi_w = \frac{\phi_w + \phi_P}{2} \quad (\text{A2.12b})$$

Upwind:

A diferencia del método anterior, Upwind considera el sentido del flujo para determinar el valor de ϕ en la frontera. Este valor corresponde a ϕ evaluando en el nodo aguas abajo.

$$\phi_e = \phi_P \quad \text{si } F_e > 0 \quad (\text{A2.13a})$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{si } F_e < 0 \quad (\text{A2.13b})$$

ϕ_w Se determina de manera similar.

Formulación de 5ta potencia:

Este método es desarrollado por Patankar en 1979 y define distintas funciones de interpolación según el rango en que se encuentre en número de Peclet. Este valor relaciona las fuerzas convectivas versus las fuerzas difusivas y corresponde a:

$$P_e = \frac{F}{D} = \frac{\rho u}{\Gamma / \delta x} \quad (\text{A2.14})$$

La formulación de 5ta potencia expresada en términos de a_E corresponde a:

$$\text{a. Para } Pe_e < -10; \quad \frac{a_E}{D_e} = -Pe_e \quad (\text{A2.15a})$$

$$\text{b. Para } -10 \leq Pe_e < 0; \quad \frac{a_E}{D_e} = (1 + 0.1Pe_e)^5 - Pe_e \quad (\text{A2.15b})$$

$$\text{c. Para } 0 \leq Pe_e \leq 10; \quad \frac{a_E}{D_e} = (1 - 0.1Pe_e)^5 \quad (\text{A2.15c})$$

$$\text{d. Para } Pe_e > 10 \quad \frac{a_E}{D_e} = 0 \quad (\text{A2.15d})$$

Quick:

Fue desarrollado por Leonard en 1979 y a diferencia de los otros métodos utiliza la información de tres nodos para determinar el valor de ϕ en la frontera del volumen de control, a través de una interpolación cuadrática. Al igual que Upwind también considera el sentido del flujo al momento de definir los nodos a utilizar en la interpolación.

- Si $u_w > 0$ y $u_e > 0$ se utilizan los nodos WW, W y P para determinar ϕ_w y los nodos P, E y EE para determinar ϕ_e .
- Si $u_w < 0$ y $u_e < 0$ se utilizan los nodos W,P y E para determinar ϕ_w y los nodos P, E y EE para determinar ϕ_e .

Siendo WW el nodo que se encuentra a la izquierda de W y EE el nodo que está inmediatamente a la derecha de E.

Es decir, este método ocupa la información de los nodos aguas abajo más la información de un nodo aguas arriba para determinar el valor de ϕ en las fronteras del volumen de control. La fórmula general de interpolación de este método corresponde a:

$$\phi_{\text{frontera v.c.}} = \frac{6}{8}\phi_{i-1} + \frac{3}{8}\phi_i - \frac{1}{8}\phi_{i-2} \quad (\text{A2.16})$$

Las ecuaciones de momento y continuidad, que provienen de la ecuación general de transporte (A2.1), tienen por variable ϕ a los componentes de velocidad u, v y w . Estas ecuaciones, para un modelo 2D, son:

Ecuación de momento en x

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + Su \quad (\text{A2.17a})$$

Ecuación de momento en y

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial p}{\partial y} + Sv \quad (\text{A2.17b})$$

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (\text{A2.17a})$$

A3 Curvas de calibración Transductores de presión MPXV7002

La curva de calibración que entrega el Datasheet del sensor se muestra en la figura A3-1.

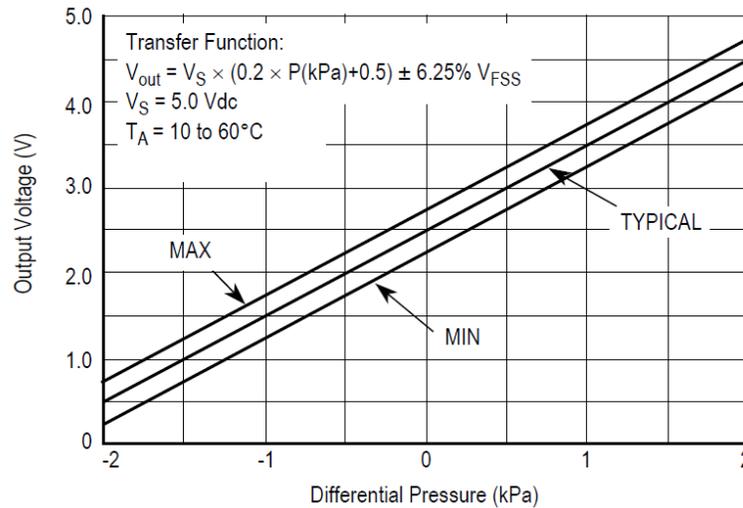


Figura A3-1. Señal de salida vs Presión diferencial [6].

Las curvas de calibración utilizadas para medir las presiones provenientes de la sonda, se muestran en las figuras A3-2, A3-3 y A3-4 respectivamente. Las presiones diferenciales se registran con un manómetro digital.

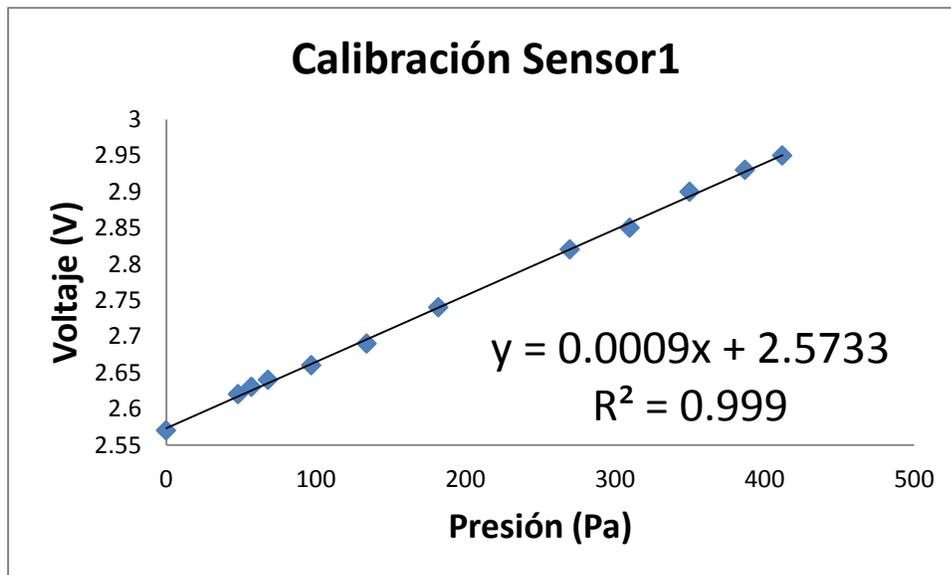


Figura A3-2. Señal de salida Sensor 1 vs Presión diferencial.

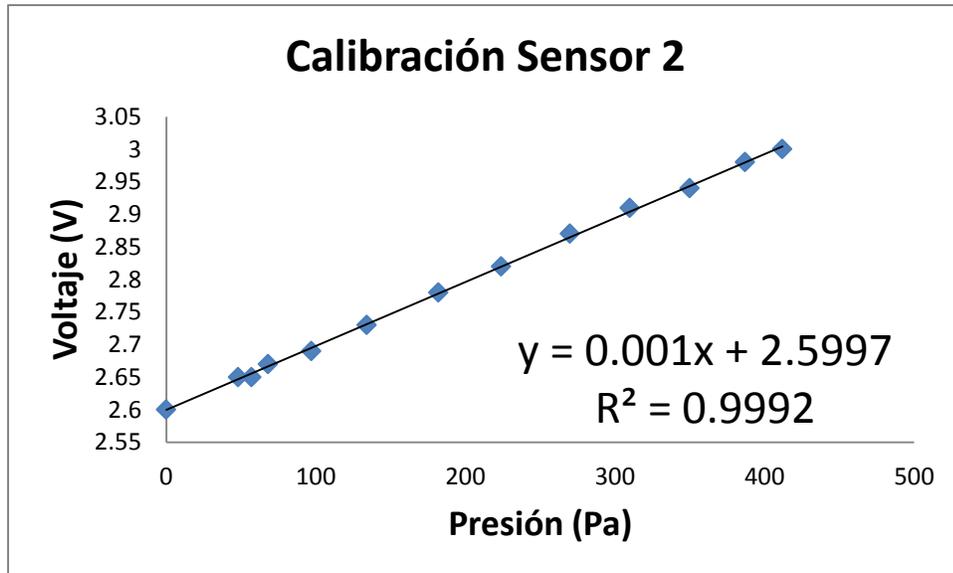


Figura A3-3. Señal de salida Sensor 2 vs Presión diferencial.

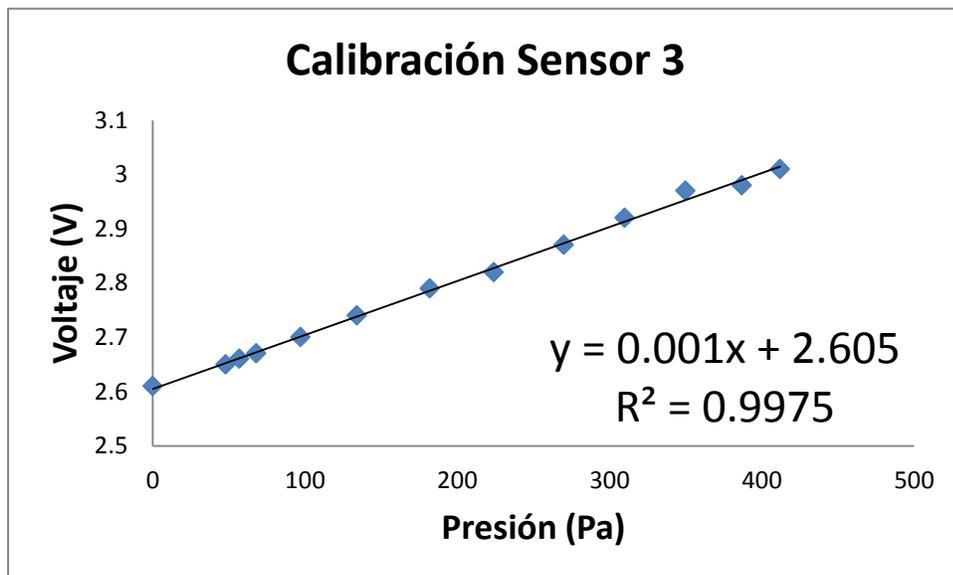


Figura A3-4. Señal de salida Sensor 3 vs Presión diferencial.

Estas curvas corresponden a un sub-rango del entregado por el Datasheet del sensor (figura A3-1), esta limitación del rango de calibración fue provocado por la utilización de un ventilador el cual solo entrega presiones totales dentro del rango de 0-412 Pa, medido con Pitot. Sin embargo, es representativo para realizar las mediciones correspondientes.

A4 Conector E/S

Los pines que constituyen al conector E/S, que une la tarjeta de adquisición con el controlador se observan en la figura 4-16.

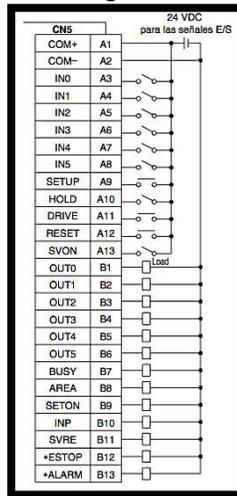


Figura 4-16. Terminales del conector E/S, de tipo PNP [2], [3].

La descripción de los terminales para las señales de entrada y salida del conector E/S, son descritas en las tablas A4.4 y A4.5 respectivamente.

Tabla A4.1. Descripción de los pines de entrada.

Señal de entrada	
Denominación	Contenido
COM+	Conecta la alimentación de 24 V para la señal de entrada/salida
COM-	Conecta la alimentación de 0V para la señal de entrada/salida
IN0 a IN5	Nº de bits especificado en los datos de paso (la entrada se define en la combinación de IN0 a IN5)
SETUP	Instrucción para el retorno a la posición de origen
HOLD	El funcionamiento se detiene temporalmente
DRIVE	Instrucción para accionamiento
RESET	Reinicio de alarma e interruptor del funcionamiento
SVON	Instrucción de activación del servoaccionamiento

Tabla A4.2. Descripción de los pines de salida.

Señal de salida	
Denominación	Contenido
OUT0 a OUT5	Salidas del nº de datos de paso durante el funcionamiento
BUSY	Salidas cuando el actuador está en movimiento
AREA	Salidas dentro del rango de ajuste de salida del área de datos de paso
SETON	Salidas durante el retorno a la posición de origen
INP	Salidas cuando se alcanza la posición objetivo o la fuerza objetivo (Se activa cuando se completa el posicionamiento o el empuje).
SVRE	Salidas cuando el servoaccionamiento está activado
*STOP	No hay salida cuando se ordena la parada EMG
*ALARM	No hay salida cuando se genera la alarma