

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA INSTALACIÓN PARA LA
CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE
UTILIZANDO COMO PATRÓN EL BANCO DE ALTO CAUDAL DEL
CDT DE GAS**

JAIR FERNANDO ANGARITA DELGADO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

Bucaramanga

2010

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA INSTALACIÓN PARA LA
CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE
UTILIZANDO COMO PATRÓN EL BANCO DE ALTO CAUDAL DEL
CDT DE GAS**

JAIR FERNANDO ANGARITA DELGADO

Trabajo de Grado para Optar Título de Ingeniero Mecánico

Director

**JAVIER RUGELES
Ingeniero Mecánico**

Codirector

**LUIS EDUARDO GARCIA SÁNCHEZ
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA**

Bucaramanga

2010

DEDICATORIA

A mis padres Luis Fernando Angarita y Lucila Delgado por su amor, apoyo y consejos, que me han permitido crecer como persona y llegar a ser quien soy ahora.

A mi hermana Laura Andrea que desde la distancia sigue siendo mi gran ejemplo a seguir.

Al amor de mi vida que ha sido en los últimos años mi motivación y fuente de inspiración.

A aquellas personas que con su aprecio y amistad me han dado fortaleza en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme su formación,
permitiéndome abrir puertas y oportunidades en mi vida.

A la Corporación CDT de GAS por la oportunidad brindada, y a todo su
personal por el apoyo y respaldo, recibido durante el desarrollo del presente
proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE | 2 |
| 1.1 PROPIEDADES DEL AIRE | 2 |
| 1.1.1 Presión Y Temperatura. | 3 |
| 1.1.2 Humedad Relativa | 3 |
| 1.1.3 Caracterización Del Flujo De Aire. | 4 |
| 1.1.4 Ecuación De Continuidad | 4 |
| 1.1.5 La Ecuación De Bernoulli | 5 |
| 1.1.6 El Número De Reynolds | 6 |
| 1.1.7 El Número De Mach | 6 |
| 1.1.8 Flujo Laminar Y Flujo Turbulento | 8 |
| 1.2 CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE FLUJO | 9 |
| 1.2.1 Condición De Flujo Laminar. | 11 |
| 1.2.2 Condición De Flujo Turbulento | 12 |
| 1.2.3 Axisimetría Del Perfil De Velocidades | 14 |
| 1.2.4 Distorsión Del Perfil | 14 |
| 1.2.5 Medición De La Velocidad | 15 |
| 1.2.6 Medidores De Velocidad De Aire | 16 |
| Figura 8. Clasificación De Los Medidores De La Velocidad Del Aire. | 16 |
| 1.2.7 El Anemómetro | 17 |
| 1.2.8 Tubo PITOT | 19 |
| 2. MARCO TEORICO | 21 |

| | |
|---|----|
| 2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA FACILIDAD TECNOLÓGICA PARA MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE | 21 |
| 2.2 COMPONENTES GENERALES DE UNA INSTALACIÓN | 23 |
| 2.3 SECCIÓN PARA PRUEBAS | 24 |
| 2.4 DIFUSOR | 25 |
| 2.5 CONTRACCIÓN | 25 |
| 2.6 SECCIÓN DE ADECUACIÓN DE FLUJO | 26 |
| 2.7 PROPULSOR O GENERADOR DE FLUJO | 26 |
| 2.8 MEDIDOR PATRÓN | 26 |
| 2.8.1 PATRÓN DE REFERENCIA | 27 |
| 2.8.2 PATRÓN DE TRABAJO | 27 |
| 2.9 INSTRUMENTACIÓN SECUNDARIA | 27 |
| 2.10 IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE PROYECCIÓN | 28 |
| 2.10.1 INGENIERÍA DEL VIENTO | 28 |
| 2.10.2 EFECTOS ASOCIADOS A LA CALIDAD DEL AIRE | 29 |
| 2.10.3 EMISIONES DE GASES EN FUENTES FIJAS | 31 |
| 2.10.4 CORRECCIÓN A CONDICIONES DE REFERENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINACIÓN. | 32 |
| 3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE | 35 |
| 3.1 DEDUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA CALIBRACIÓN EL PATRÓN DE TRABAJO | 35 |
| 3.2 MAGNITUDES DE ENTRADA | 37 |
| 4. DISEÑO Y SELECCIÓN | 42 |
| 4.1 CONDICIONES DE FLUJO | 42 |
| 4.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN | 43 |

| | |
|--|----|
| 4.3 CONDICIONES METROLÓGICAS | 44 |
| 4.4 SELECCIÓN Y DISEÑO DE LA INSTALACIÓN | 47 |
| 4.5 PATRÓNES DE OPERACIÓN | 48 |
| 4.5.1. Patrones De Referencia | 48 |
| 4.5.2 Patrones De Trabajo | 49 |
| 4.6 DISEÑO DE LA SECCIÓN DE PRUEBAS | 50 |
| 4.7 DISEÑO DE DE ACCESORIOS, CONEXIONES Y SOPORTES | 53 |
| 4.8 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS | 55 |
| 4.9 DISEÑO DE LA SECCIÓN DE PRUEBAS | 56 |
| 4.10 DISEÑO DE LA SECCIÓN ESTABILIZADORA DE FLUJO | 59 |
| 4.11 SECCIÓN GENERADORA DE FLUJO | 61 |
| 4.12 DISEÑO Y SELECCIÓN ESTRUCTURA DE SOPORTE | 62 |
| 4.13 DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL DE DATOS, INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (HMI) | 63 |
| 4.14 ETAPA FINAL DEL DISEÑO | 67 |
| 5. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DE LA INSTALACIÓN | 69 |
| 5.1 SECCIÓN DE PRUEBAS | 69 |
| 5.2 SECCIÓN DE ENTRADA | 72 |
| 5.3 SECCIÓN ESTABILIZADORA DE FLUJO | 73 |
| 5.4 ENSAMBLE FINAL DE LAS SECCIONES | 75 |
| FIGURA 54. ENSAMBLE FINAL DE LA INSTALACIÓN EN EL LABORATORIO | 76 |
| 6. PUESTA A PUNTO | 77 |
| 6.1 VERIFICACIÓN DIMENSIONAL | 77 |
| 6.2 PRUEBAS DE RUGOSIDAD | 78 |
| FIGURA 56. RUGOSIMETRO | 78 |

| | |
|---|----|
| 6.3 CALIBRACIÓN DEL PATRÓN DE TRABAJO | 79 |
| 6.3.1 Caracterización Del Perfil De Velocidad | 79 |
| 6.3.2 Calibración | 87 |
| 7. CONCLUSIONES | 92 |
| 8. RECOMENDACIONES | 93 |
| BIBLIOGRAFIA | 94 |
| ANEXOS | 96 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Flujo Laminar. | 8 |
| Figura 2. Flujo Turbulento. | 9 |
| Figura 3. Esquema Del Perfil De Velocidades Para Un Flujo Laminar Y Turbulento. | 10 |
| Figura 4. Relación Entre La Velocidad Máxima Y La Velocidad Promedio Para Superficies De Tipo Liso Y Rugoso. | 13 |
| Figura 5. Variación Del Perfil De Velocidades Aguas Abajo Por Asimetría [2] | 14 |
| Figura 6. Variación Del Perfil De Velocidades Aguas Abajo Por Swirl [2]. | 14 |
| Figura 7. Ejemplo De Una Sección Transversal Con Acondicionamiento De Flujo [2]. | 15 |
| Figura 8. Clasificación De Los Medidores De La Velocidad Del Aire. | 16 |
| Figura 9. Anemómetro Dwyer | 17 |
| Figura 10. Anemómetro De Hilo Caliente. | 18 |
| Figura 11. Tubo Pitot Estándar Tipo L | 19 |
| Figura 12. Tubo Pitot Tipo S | 19 |
| Figura 13. Operación De Un Medidor Annubar. | 20 |
| Figura 14. Instalación De Circuito Abierto | 20 |
| Figura 15. Instalación Convencional De Flujo Cerrado | 21 |
| Figura 16. Esquema General | 23 |
| Figura 17. Descripción De La Instalación. | 34 |
| Figura 18. Magnitudes De ENTRADA | 36 |
| Figura 19. Árbol De Incertidumbre Para K. | 39 |
| Figura 20. Brida De 12 Pulgadas En Pvc. | 44 |
| Figura 21. Cadena De Trazabilidad Del Banco De Medidores De Velocidad De | |

| | |
|---|----|
| Aire. | 46 |
| Figura 23. Patrón De Referencia Del Banco De Alto Caudal | 48 |
| Figura 24. Patrón De Trabajo De Velocidad De Aire | 49 |
| Figura 25. Perfil De Velocidades Completamente Desarrollado. | 51 |
| Figura 26. Sección De Pruebas En Pvc | 53 |
| Figura 27. Diseño Del Soporte Para El Patrón De Trabajo | 54 |
| Figura 30. Diseño Final De La Sección De Pruebas | 56 |
| Figura 31. Esquema General De Contracción Según Norma Ansi/ Amca Standard 210-85 | 57 |
| Figura 32. Dimensiones De La Sección De Entrada | 58 |
| Tabla 6. Dimensiones De La Sección De Entrada [5] | 58 |
| Figura 33. Diseño En Cad De La Sección De Entrada. | 59 |
| Figura 34. Panal De Nido De Abeja Seleccionado Para La Sección De Entrada De Flujo. | 60 |
| Figura 35. Celda Del Panal De Nido De Abeja | 61 |
| Figura 36 Blowers Del Cuarto De Maquinas Banco De Alto Caudal Del Cdt De Gas. | 62 |
| Figura 37. Soporte Móvil | 62 |
| Figura 38. Inicio Del Proceso Y Secuencia De Adquisición Y Control De Los Datos Para El Sad Opto 22 (Visto Desde El Hmi) | 64 |
| Figura 45. Renderizado Del Diseño Final. | 68 |
| Figura 46. Accesorios De La Sección De Pruebas | 70 |
| Figura 47. Ventana De Soporte. | 71 |
| Figura 48. Brida De 12'' en Pvc. | 71 |
| Figura 49. Contracción En Acrilico | 72 |
| Figura 50. Sección De Entrada De Flujo. | 73 |
| Figura 51. Rectificador Tipo Colmena (Honeycomb). | 74 |
| Figura 52. Ensamble Del Rectificador Con La Sección De Entrada. | 74 |
| Figura 53. Secciones De La Instalación | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura 54. Ensamble Final De La Instalación En El Laboratorio | 76 |
| Figura 55. Micrómetro Tubular | 77 |
| Figura 56. Rugosímetro | 78 |
| Figura 57. Medición De Rugosidad En La Superficie De La Sección De Pruebas | 79 |
| Tabla 8. Caracterización Del Perfil De Velocidad | 80 |
| Figura 58. Perfil De Velocidad | 81 |
| Figura 59. Descripción Del Perfil De Velocidad. | 83 |
| Figura 60. Descripción Del Perfil De Velocidad De 12 M/S Hasta 18m/S. | 84 |
| Figura 61. Selección De La Velocidad Media. | 87 |
| Figura 62. Curva De Calibración | 90 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Medidores De Velocidad. | 19 |
| Tabla 2. Características De Una Instalación Para Evaluar El Aire De Circuito Abierto Y De Circuito Cerrado. | 22 |
| Tabla 3. Medición De Las Magnitudes De Influencia. | 38 |
| Tabla 4. Requerimientos Para La Medición De Velocidad De Aire Usando Un Tubo Pitot De Acuerdo A La Norma Iso 10780-2006 [6]. | 33 |
| Tabla 5. Instalaciones Para Medidores De Velocidad De Aire | 45 |
| Tabla 6. Instrumentación Usada Por La Instalación | 48 |
| Tabla 7. Dimensiones De La Sección De Entrada[5] | 56 |
| Tabla 8. Caracterización Del Perfil De Velocidad | 78 |
| Tabla 9. Valor Estimado De La Velocidad Media Según Miller. | 83 |
| Tabla 10. Valor Estimado De La Velocidad Media Según Las Ecuaciones De Las Curvas Dadas En La Figura 49. | 84 |
| Tabla 11. Datos De La Calibración E Incertidumbre Del Mensurando | 85 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO 1. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL PANAL DE NIDO DE ABEJA. | |
| 96 ANEXO 2. NORMA AMCA 210/85. LABORATORY METHODS OF TESTING FANS FOR AERODYNAMIC PERFORMANCE RATING | 97 |
| ANEXO 3. TRANSMISOR DE TEMPERATURA | 98 |
| ANEXO 4. TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL (607-3 RANGE DE 0- 1IN AGUA) | 99 |
| ANEXO 5. PLANTILLAS PARA DETERMINA EL CAUDAL MÁSIKO QM Y EL FACTOR K | 102 |
| ANEXO 6. GLOSARIO DE TÉRMINOS | 102 |
| ANEXO 7. PLANOS | 105 |

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA INSTALACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE UTILIZANDO COMO PATRÓN EL BANCO DE ALTO CAUDAL DEL CDT DE GAS*

AUTOR:

JAIR FERNANDO ANGARITA DELGADO**

PALABRAS CLAVES

Medición, Medidores de Velocidad del Aire, Calibración, Patrón de Referencia, Patrón de Trabajo, Fuentes Fijas, Calidad de Aire.

DESCRIPCIÓN

Para el presente proyecto se realizó un estudio de estado del arte de la anemometría en el País y a nivel internacional, permitiendo identificar las falencias y el poco conocimiento existente en la medición y fenomenología de la velocidad de aire. Por ello, con el propósito de contribuir a la infraestructura Metrológica de Colombia, se diseño y construyo en la Corporación CDT de GAS una facilidad tecnológica, que permita un desarrollo continuo de conocimientos en lo que concierne a la medición exacta y al avance de nuevas tendencias en la medición de la velocidad de aire.

La instalación esta dotada de una sección de entrada y adecuación de flujo de aire, de una sección de pruebas y ensayos, de las conexiones necesarias para los medidores, de una sección generadora de flujo, de una secuencia de adquisición y control de los datos para el SAD OPTO 22 con el que se opera el banco de prueba y de los medidores Patrón.

La instalación permite generar un flujo de aire a succión con los requerimientos necesarios para la realización de pruebas y ensayos, en un rango de velocidad de 4(m/s) hasta 12 (m/s).

Considerando que no existe referencia de la calibración de un patrón de velocidad utilizando un patrón volumétrico, se hizo necesario determinar un modelo matemático basado en el principio de conservación de la masa, con el fin de garantizar la trazabilidad en la medición de velocidad con un adecuado nivel de incertidumbre. La posterior calibración de instrumentos de trabajo (anemómetros y tubos pitot) se realiza bajo estándares y normas internacionales aplicables.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director. Ing. RUGELES, Javier.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FACILITY FOR THE CALIBRATION OF AIR VELOCITY METERS USING THE CDT DE GAS' HIGH FLOW RATE BENCH AS MEASUREMENT STANDARD*

AUTHOR:

JAIR FERNANDO ANGARITA DELGADO**

KEY WORDS

Measurement, Air velocity meters, calibration, Referent standard, working standard, fixed sources, Air quality.

DESCRIPTION

In order to develop the present work, a state-of-the-art research was carried out, nationally and abroad, which allowed to identify the weaknesses and the limited knowledge regarding the phenomena and issues dealing with air velocity. Therefore, in order to contribute to increase the Colombian metrological infrastructure, a technological facility was built in the CDT de GAS with the objectives of calibrating air velocity meters and fostering the continuous development of knowledge regarding the exact measurement and the advance of new trends in air velocity and mass flow rate measurement.

The facility is composed by an inlet section which provides air flow arrangement, a test section, the necessary fittings for the meters, a flow generating section, a sequence of control and data acquisition based on the program OPTO 22 with which the test bench and measurement standards are operated.

The experimental bench guarantees an homogenous working and completely developed flow to perform tests and calibrations within the velocity interval which goes from 4 to 12 m/s.

A mathematical model was implemented for the present work which was supported by the mass conservation principle, taking into account that there is no reference involving the calibration of a velocity standard using a volumetric standard, thus, the objective of providing traceability in measurement with an adequate uncertainty value under international standards was set, in order to fulfill the requirements established for the calibration of anemometers and pitot tubes, among others.

* Proyect of grade

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. RUGELES, Javier.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA INSTALACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE MEDIANTE EL USO DEL BANCO DE ALTO CAUDAL DEL CDT DE GAS COMO PATRON DE REFERENCIA” se desarrolló por el interés de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de GAS, de proveer una alternativa confiable que supla las deficiencias en los conocimientos y métodos existentes en el país, en la fenomenología y en la medición de la velocidad de aire.

El desarrollo de la presente facilidad tecnológica permite tener al servicio de la Universidad Industrial de Santander y del país, un patrón que provea trazabilidad en las mediciones de velocidad de aire, en procesos como las emisiones de gases contaminantes en fuentes fijas¹.

Por todo lo anterior, este proyecto, además de ser novedoso para los sectores interesados, es una infraestructura de alta calidad y cuenta con el personal capacitado para asumir la tarea de soportar la medición de velocidad de aire, a través de las actividades de calibración y verificación, contribuyendo al desarrollo continuo de un nuevo patrón y método de medición.

Durante el progreso del escrito se mostrará, específicamente, que los patrones seleccionados para evaluar la velocidad del aire, a condiciones reales, son necesarios para garantizar la calidad metrológica en las calibraciones bajo estándares internacionales y de esta forma poder dar cumplimiento a los

¹ Fuentes Fijas: Es la fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa (chimeneas, quemadores calderas).

requerimientos establecidos en las normas que permitan llevar a cabo la calibración de anemómetros y tubos pitot.

Es así que el presente proyecto es el precedente de una investigación del estado del arte de la fenomenología de la velocidad de aire, enmarcando la necesidad de nuevas tendencias para el estudio y medición de la velocidad de aire a condiciones atmosféricas con sus correspondientes ventajas.

La caracterización de la instalación permite observar que el mejor valor estimado de la velocidad del aire, se desarrolla en el punto donde se encuentra la velocidad media del perfil de velocidad, para ello la caracterización de la instalación garantiza que el perfil de velocidad es completamente desarrollado y homogéneo en la sección para pruebas y ensayos.

Este resultado se obtuvo por medio de un análisis CFD del comportamiento del flujo, e igualmente fue confirmado a través de ensayos en el laboratorio, ubicando el patrón de trabajo (tubo pitot estándar) en diferentes puntos de la sección transversal en la sección de pruebas de manera perpendicular al flujo para observar el comportamiento del perfil de flujo en la sección transversal seleccionada.

El resultado del proyecto es un banco de calibración de medidores de velocidad de aire que opera en el intervalo de velocidad de 4 m/s a 12 m/s.

Su desarrollo se presenta en el actual trabajo de grado, en seis capítulos, organizados de la siguiente manera:

El primero de ellos, describe las generalidades del flujo de fluidos y algunos requerimientos necesarios para comprender la importancia de la medición de la velocidad del aire.

El segundo, describe las generalidades de una instalación para medidores de velocidad de aire, sintetiza las principales aplicaciones que tiene el banco de calibración en la comunidad colombiana, comprendiendo los sectores productivos en donde la instalación va a ofrecer sus servicios.

La siguiente temática, describe la deducción del modelo matemático para realizar la calibración del patrón de trabajo y de los bajo prueba.

El cuarto capítulo, trata de la selección y el diseño de la facilidad, en él se tiene en cuenta los requerimientos de diseño metrológicos, de operación y de régimen de flujo.

Posteriormente, se encuentra la construcción del banco, en él se observa el seguimiento realizado durante la fabricación de las secciones que comprende la instalación.

A continuación a la construcción del banco se realiza la puesta a punto de éste, comprende de manera breve las pruebas y ensayos de verificación que se le realizaron a las secciones de la instalación y la calibración del patrón de trabajo por medio de un proceso de comparación con el patrón volumétrico del Banco de Alto Caudal.

1. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE

1.1 PROPIEDADES DEL AIRE

El aire como tal es un fluido, de acuerdo con la literatura convencional, la definición técnica de fluido, permite definir un fluido como una sustancia o medio continuo que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una sollicitación o tensión tangencial sin importar la magnitud de ésta. Una interpretación más sencilla de fluido, es toda aquella sustancia capaz de fluir[8], por ello, su flujo se expresa literalmente como la cantidad de materia que pasa por un punto o a través de una sección de referencia transversal a la superficie que lo contiene, en un valor determinado de tiempo.

En este capítulo se presentan los conceptos necesarios para entender las características de la instalación, el modelo matemático y la selección de los medidores patrón que garantizan la calidad Metrológica del banco, para aquellos que quieran profundizar en terminología de la mecánica de fluidos se recomienda consultar las referencias [1] y [8].

El flujo de aire puede ser expresado como un parámetro volumétrico Q_v (m^3/h) (Caudal o flujo volumétrico) representado en función del producto de la velocidad media del flujo (V_p) y del área de la sección transversal (A_t) que él atraviesa (ver ecuación 1).

$$Q_v = A_t \times V_p \text{ Ec 1.}$$

De igual manera se puede obtener como un parámetro másico Q_m (kg/h) (flujo másico) al relacionar el caudal volumétrico con la densidad del fluido como se observa en la siguiente ecuación..

$$Q_m = Q_v \times \rho \text{ Ec 2.}$$

La densidad (ρ) es la relación existente entre la masa (m) del fluido y su volumen (v) ocupado.

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ Ec 3.}$$

La medición experimental de la densidad del aire se relaciona directamente en función de su Presión, Temperatura y Humedad relativa.

1.1.1 Presión y temperatura.

La ecuación P- v -T relaciona el volumen ocupado por un fluido (v) con su temperatura (T) y la presión (P) que actúa sobre él. En la práctica, para relacionar las propiedades presión-volumen-temperatura de un fluido se aplica un factor Z de corrección denominado factor de compresibilidad, el cual, es un coeficiente de desviación de la ley de los gases ideales.

$$\frac{Pv}{T} = Z \bullet Cte \text{ Ec. 4}$$

1.1.2 Humedad Relativa

El aire puede ser seco o húmedo, es decir, pueden incorporar una determinada cantidad máxima de vapor de agua a una temperatura dada. Este límite máximo aumenta en la medida que la temperatura se incrementa.

Cuando el aire contiene la cantidad máxima posible de vapor de agua, se dice que el aire está saturado. Por otro lado, si no está totalmente saturado, su grado de saturación puede expresarse en términos de un parámetro denominado humedad relativa (Hr).

La humedad del aire altera su masa específica, lo que puede producir fluctuaciones que pueden ocasionen errores en la medición de flujo.

1.1.3 Caracterización del flujo de aire.

El flujo de aire se puede caracterizar de diferentes maneras, tales como laminar, turbulento, continuo, en régimen permanente o uniforme. Y para éste existen tres condiciones mínimas que se deben considerar para su apreciación:

- La ecuación de continuidad.
- La ecuación de Bernoulli.
- El principio de no deslizamiento aplicado a la capa de aire en contacto con paredes sólidas. En las paredes del tubo, la componente normal de la velocidad es igual a la velocidad de la superficie que lo contiene, y por el principio de adherencia la componente tangencial es cero en relación con la zona de contacto.

1.1.4 Ecuación De Continuidad

La Ley de la Conservación de la masa, aplicada a un volumen de control (vc) que solo presente un entrada y una salida en flujo permanente, lleva a igualar los flujos máscicos y se expresa mediante la siguiente ecuación

$$Qm_{in} = Qm_{out} \quad \text{Ec, 5}$$

Esto significa, que la cantidad de materia que entra en la sección de puabas (SW) es igual a la que pasa por el Banco de Alto Caudal.

1.1.5 La Ecuación De Bernoulli

De esta misma forma, la energía total de un fluido en movimiento es la misma en toda la línea de corriente de flujo a lo largo del volumen de control (Vc). La Ecuación de Bernoulli expresa este fenómeno en términos matemáticos.

Ahora si se asume que el fluido atraviesa el volumen de control (Vc) en régimen permanente sin cambio de altura entre la entrada y la salida, que el fluido es incompresible y despreciando un factor como lo es el efecto de la fricción en la transformación de la energía mecánica en calor, la Ecuación de Bernoulli se resume a la de la relación existente entre la velocidad promedio del flujo, la presión, la gravedad y a la densidad del fluido como se ve en la siguiente expresión:

$$\frac{V_p^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} = Cte \quad \text{Ec, 6}$$

Esta expresión es constante en todas las secciones transversales teniendo las consideraciones anteriormente mencionadas.

1.1.6 El Número De Reynolds

Es un número adimensional que describe el comportamiento de un fluido real:

$$R_e = \frac{V_p \cdot D \cdot \rho_f}{\mu} \text{ Ec, 7}$$

El numerador me indica las fuerzas dinámicas, definido por el producto entre la velocidad media (V_p) del fluido, el diámetro (D) de la sección transversal de la sección de referencia y la densidad del fluido (ρ_f).

El denominador define las fuerzas viscosas, y se expresa como la viscosidad dinámica o absoluta del fluido (μ).

El número de Reynolds también es un indicador de cual es el tipo de fuerza que predomina en el flujo de un fluido. Cuando el término ($\rho \cdot V \cdot D$) y el R_e es grande prevalecen las fuerzas dinámicas, y si el denominador (μ , es la medida de su capacidad de producir fuerzas viscosas) es grande y el R_e es pequeño prevalecen las fuerzas viscosas.

1.1.7 El Número De Mach

En la práctica, para fluidos en movimiento el número de Mach (M) se utiliza como criterio para identificar un flujo como incompresible, si se encuentra un flujo con un número menor de 0,3 el flujo puede considerarse incompresible.

En el flujo incompresible el fluido se mueve a lo largo del V_c manteniendo su densidad constante. Estrictamente hablando, ningún fluido es

verdaderamente incompresible, puesto que hasta los líquidos varían su densidad cuando se someten a alta presión.

El número de Mach (M) viene dado por:

$$M = \frac{V_p}{c} \quad \text{Ec, 8}$$

V_p = Velocidad promedio del flujo.

c = Velocidad del sonido (340m/s).

Cuando la velocidad de un fluido alcanza su velocidad del sonido, la variación de la densidad (o del volumen) es igual a la variación de la velocidad. Es decir, una gran variación de la velocidad, en un flujo a alta velocidad, ocasiona una gran variación en la densidad del fluido. Los flujos de gases pueden fácilmente alcanzar velocidades elevadas, características de flujos compresibles.

Igualmente por la velocidad que se desarrolla el flujo en una sección determinada que lo contiene, el número de Mach permite caracterizar un fluido en:

Subsónicos; $Mach < 0.4$

Transónicos; $0.4 < Mach < 1.3$

Supersónicos; $1.3 < Mach < (4 - 5)$

Hipersónicos; $Mach > 4$

1.1.8 Flujo Laminar Y Flujo Turbulento

Un fluido fluye en una sección circular básicamente bajo dos regímenes diferentes; flujo laminar o flujo turbulento.

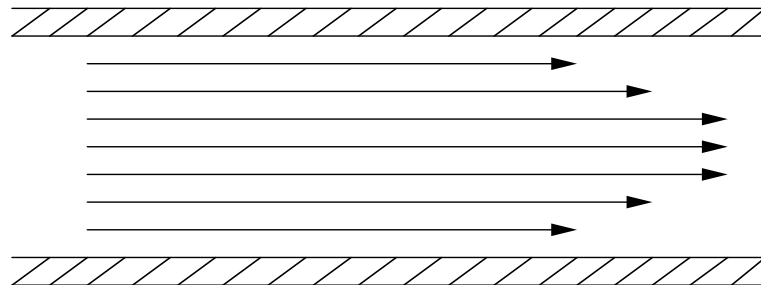
En el flujo laminar todas las partículas del fluido se mueven en líneas rectas distintas, paralelas al eje de la superficie y de modo ordenado (ver Figura 1). El flujo en régimen laminar se caracteriza por un movimiento suave y continuo del fluido, con poca deformación. El régimen laminar se consigue de varias formas:

Por medio de un fluido con baja densidad,

Un flujo de baja velocidad o a través de elementos de dimensiones pequeñas,

Por medio de un fluido con alta viscosidad, como por ejemplo aceites y lubricantes.

Figura 1. Flujo laminar.

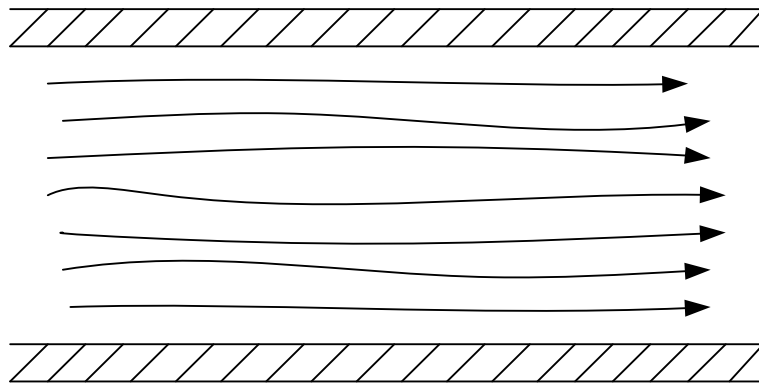


Fuente: Autor.

El régimen de flujo laminar, o como muchas veces es llamado de flujo en líneas de corriente, o también flujo viscoso, es gobernado por la ley de Newton de la viscosidad. Puede considerarse como el régimen de flujo donde toda la turbulencia es amortiguada por la acción de la viscosidad, y teóricamente ocurre cuando el número de Reynolds es inferior a 2000.

El flujo en régimen turbulento teóricamente se desarrolla a números de Reynolds superiores a 2000. Sin embargo, muchas ocasiones puede iniciarse a un número de Reynolds mucho mas bajo que 2000. Esto se debe, a que en él, no es posible distinguir líneas de corriente independientes, componiéndose el flujo de una “masa de remolinos”. Es decir, las partículas del fluido no siguen la misma trayectoria (ver Figura 2).

Figura 2. Flujo Turbulento.



Fuente: Autor.

Igualmente, es común observar que un fluido en régimen laminar se transforme a turbulento, Normalmente se puede presentar esta situación cuando hay alteraciones o perturbaciones en el flujo, y un cambio en las propiedades del fluido, como lo son; la velocidad, la densidad, la viscosidad, la presión. Por consiguiente, el flujo de aire ocurre en régimen turbulento, a menos que se especifique la condición de flujo laminar.

1.2 CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE FLUJO

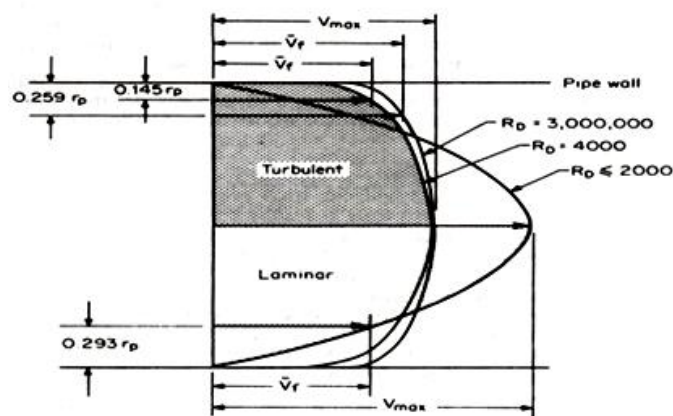
Como se mencionó anteriormente el flujo se puede caracterizar como laminar o turbulento según el número de Reynolds, y este a su vez se puede

relacionar directamente con el perfil de velocidades del flujo en el volumen de control.

La representación gráfica que muestra como la velocidad de un fluido varía de acuerdo con el diámetro de la sección de superficie de referencia que lo contiene se llama “perfil de velocidades de flujo”. El perfil de velocidades es, probablemente, el parámetro más importante y menos conocido que influencia una medición de flujo.

Sin embargo, es importante entender que aunque el flujo en el interior de una superficie continua ocurre en tres dimensiones, la representación gráfica del perfil de velocidad se hace en un plano bidimensional para observar de manera fácil la forma del perfil (ver Figura 3). A partir del régimen de flujo, que pasa a través de la sección de pruebas (SW) de sección transversal circular, se pueden obtener relaciones para observar y determinar las características del perfil de velocidades.

Figura 3. Esquema del perfil de velocidades para un flujo laminar y turbulento [1].



Fuente: Referencia [1].

1.2.1 Condición de flujo laminar.

Para flujo Laminar el perfil es parabólico y se desarrolla para números de Re por debajo de 2000, y este no se ve afectado por la rugosidad de la sección.

La velocidad promedio está aproximadamente en el medio de la velocidad máxima (V_{\max}). Es decir,

$$V_p \cong \frac{1}{2} V_{\max} \text{ Ec. 9}$$

Y la relación entre la velocidad puntual (V_i) y la velocidad máxima está dada por:

$$V_i = V_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_p} \right)^2 \right] \times r_p \text{ Ec. 10}$$

La distancia (y) dada teóricamente entre la pared de la sección y el punto donde se encuentra la velocidad promedio del fluido es:

$$\bar{y} = 0.293 r_p \text{ Ec.11}$$

La distancia a partir de la sección de adecuación de flujo a la cual el perfil se encuentra prácticamente desarrollado es:

$$L_L = 0,028 \cdot D \cdot R_e \text{ Ec. 12}$$

Nota; Para flujo transitorio, el cual, se encuentra en un régimen de Re entre 2000-4000, la geometría del perfil es alterada y es difícil parametrizar sus dimensiones.

1.2.2 Condición De Flujo Turbulento

Se desarrolla normalmente para flujos con números de Re mayores a 4000, pero en la práctica también puede ocurrir en cifras menores a ésta.

Sufre cambios en el perfil debido al Reynolds y a la rugosidad de la superficie de la sección de pruebas que contiene el flujo a caracterizar.

Según Miller, una ecuación simple para determinar la velocidad en un punto del perfil para una superficie cerrada de sección circular lisa es The empirical power-law equation[1], esta ley admite describir adecuadamente un perfil turbulento, pero no permite calcular con exactitud la línea central de la velocidad (ver Ecuación 13).

$$V_p = V_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_p} \right) \right]^{1/n} \quad \text{Ec. 13}$$

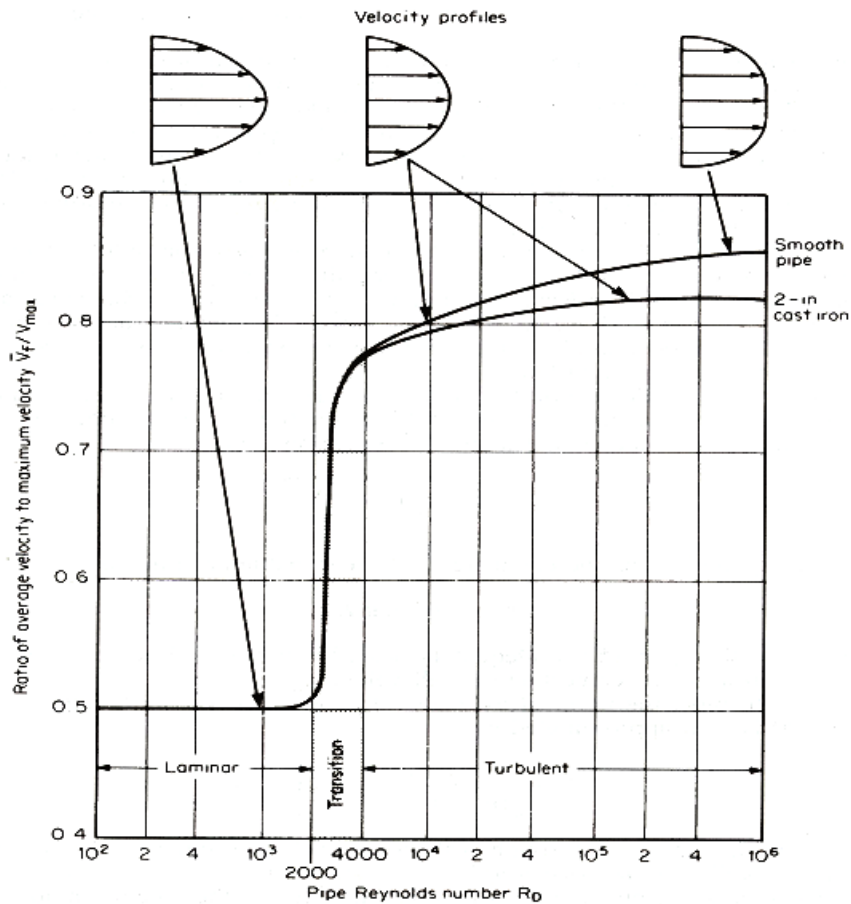
Donde el exponente (n) puede ser calculado con una razonable exactitud, con el producto entre un factor igual a 1.66 dado [1] y el logaritmo del Reynolds así:

$$n = 1,66 \bullet \log R_e \quad \text{Ec. 14}$$

El punto aproximado al cual se encuentra la velocidad promedio de la superficie de la sección circular para Reynolds mayores a 10000 es el dado por la siguiente expresión:

$$\bar{y} = \left[\left(\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \right)^n \right] \text{ Ec. 15}$$

Figura 4. Relación entre la velocidad máxima y la velocidad promedio para superficies de tipo liso y rugoso.



Fuente; Ver Referencia [1]

1.2.3 Axisimetría Del Perfil De Velocidades

La asimetría de un perfil de velocidades es trascendental en el comportamiento de un medidor que depende de una simetría perfecta de flujo respecto a su eje central, debido a que una distorsión del perfil de velocidades es crítica en la operación del medidor y podrá causar posibles errores de medición de difícil detección y cuantificación.

Figura 5. Variación del perfil de velocidades aguas abajo por asimetría [2]

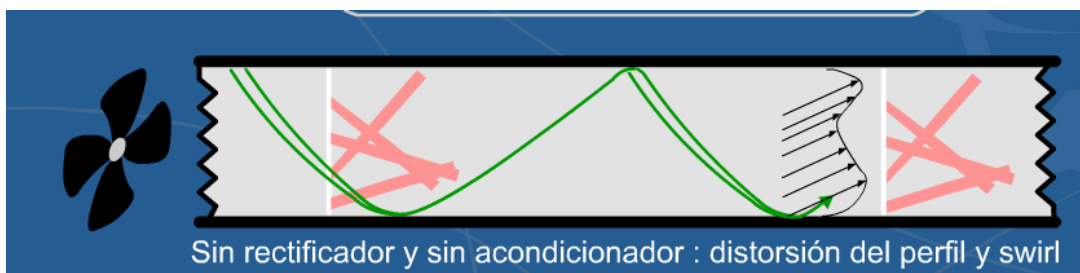


Fuente [2]

1.2.4 Distorsión Del Perfil

Otro fenómeno que se encuentra en la medición de fluidos es el flujo rotacional en tres dimensiones o swirl, el cual se produce por números de Reynolds altos y/o al existir dos curvaturas adyacentes en planos diferentes.

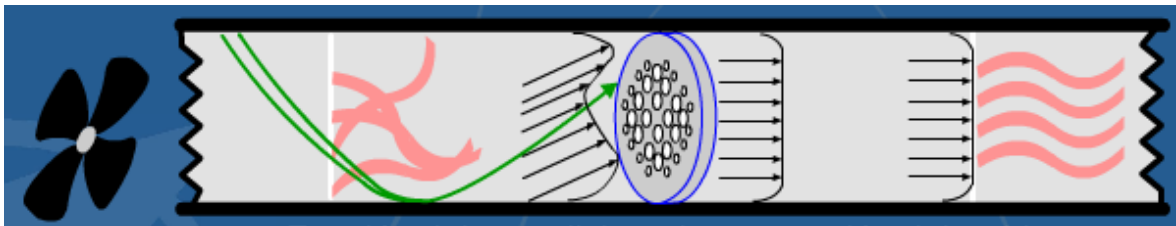
Figura 6. Variación del perfil de velocidades aguas abajo por Swirl [2].



Para contrarrestar el efecto rotacional; primero, se debe dejar suficiente longitud entre la entrada del flujo y el medidor para lograr la asimetría y

segundo, se pueden instalar secciones de acondicionamiento de flujo. Lo que se quiere con estas dos medidas de prevención es conseguir que el flujo sea lo mas uniforme y asimétrico posible.

Figura 7. Ejemplo de una sección transversal con acondicionamiento de flujo [2].



1.2.5 Medición De La Velocidad

La velocidad (V) es una magnitud física de carácter vectorial que expresa el desplazamiento del fluido por unidad de tiempo (m/s).

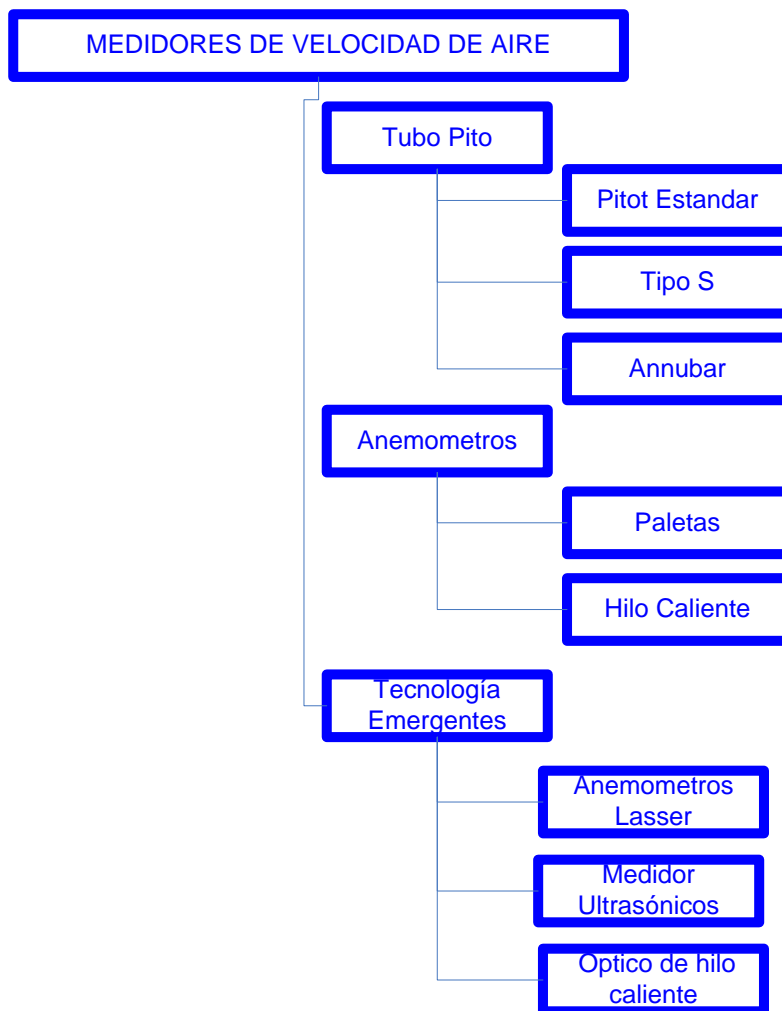
La medición de la velocidad se puede realizar en un punto representativo del fluido en movimiento, o se pueden llevar a cabo diversas mediciones en diferentes puntos de la sección transversal de referencia de la superficie que contiene el flujo y así obtener el valor mejor estimado de la velocidad media en el perfil de velocidades que se encuentre desarrollado. Para ello existen instrumentos convencionales como lo son; el anemómetro, el tubo pitot, el annubar, el anemómetro de hilo caliente y otros de mejor tecnología como el anemómetro Laser Doppler y el óptico de hilo caliente.

1.2.6 Medidores De Velocidad De Aire

Para la medición de velocidad de aire en un punto existen diversos instrumentos de medición como lo son el anemómetro y el tubo pitot (ver figura 8).

Todo instrumento de medición utilizado para cuantificar una magnitud tiene características que son propias de su comportamiento y representativas de su desempeño (ver tabla 1).

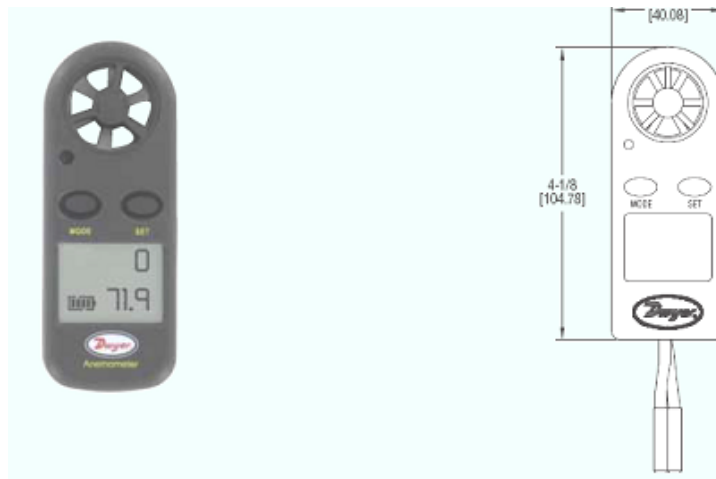
Figura 8. Clasificación de los medidores de la velocidad del aire.



1.2.7 El Anemómetro

Es un instrumento que puede medir la velocidad puntual del flujo de aire, la dirección y su intensidad. Pero como los anemómetros comunes (ver figura 8) solo miden la velocidad instantánea del viento se toma siempre un valor promedio entre intervalos de muestreo.

Figura 9. Anemómetro Dwyer



El principio de medición es como el de un molino, se basa en la conversión de la rotación del mismo en una señal eléctrica. Un sensor inductivo de proximidad “cuenta” las revoluciones del rodete y emite una secuencia de pulsos que se convierten en el instrumento de medición a valores de velocidad. Se recomiendan las paletas de diámetro grande para efectuar mediciones en caudales turbulentos (ya que el área del rodete ayuda a tener lecturas promedio del flujo de turbulencia de la rejilla) y los de diámetro pequeño para mediciones en ductos, en cuya sección se espera tener un flujo de aire unidireccional. El Anemómetro de paletas también se debe ajustar a la dirección del flujo de caudal tomando como indicación el eje rodete, siendo la ubicación óptima aquella en la cual se logra medir el valor máximo.

Igualmente existe otro tipo de Anemómetro, el de hilo caliente (ver figura 9), base su funcionamiento, en registrar los cambios térmicos que sufre un pequeño sensor expuesto al movimiento del fluido.

Figura 10. Anemómetro de hilo caliente.



Un anemómetro de hilo caliente es un dispositivo que para medir la velocidad, usa una sonda en la cual va instalado un hilo metálico que se calienta por efecto Joule y se enfría por el flujo incidente, en función del gasto circulante y la temperatura del flujo, predominantemente mediante convección forzada. A partir de la diferencia de tensión entre los extremos del hilo o de su resistencia eléctrica (en el caso del anemómetro de intensidad constante) es posible entonces, obtener información de la velocidad del flujo.

Los sensores de un anemómetro de hilo caliente son hilos con un diámetro de 0.5 – 5 mm y una longitud de 0.1 – 2 mm.

1.2.8 Tubo Pitot

Tiene la capacidad de expresar su medición en unidades de velocidad. El tubo pitot (ver figura 10) mide la diferencia entre la presión total y la estática, es decir la presión dinámica y es proporcional al cuadrado de la velocidad, obteniéndose la siguiente relación:

$$V = K \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho_f}} \text{ Ec. 16}$$

Figura 11. Tubo Pitot Estándar tipo L



Existen otro tipo de tubo pitot, como lo son el tipo S (ver figura 11) y el Annubar (ver figura 12).

Figura 12. Tubo Pitot tipo S



El Annubar es una versión mejorada del tubo Pitot convencional, posee una incertidumbre menor que el Pitot, del orden de $\pm 3\%$ y ofrece una baja caída de presión. Se encuentra compuesto por dos tubos el de la presión total y el

de la presión estática, el de presión estática se encuentra aguas abajo del flujo y por detrás del de presión total (ver figura 12). Mide la presión total en varios puntos, obteniendo la media de estos valores y evitando el error que produce el tubo de Pitot.

Figura 13. Operación de un medidor Annubar.

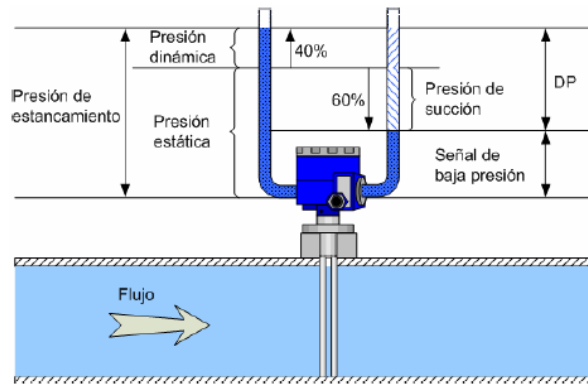


Tabla 1. Medidores de velocidad.

| MEDIDOR | APLICACIÓN | RANGO DE OPERACIÓN | DE | ERROR MAXIMO PERMISIBLE |
|-----------------------------|---|--|----|--|
| Anemómetro De Hilo Caliente | Muestreo y ensayos en laboratorio. Mediciones puntuales de la velocidad de flujo | Velocidad [0,2 a 20] m/s T[0 a 50] °C | | Velocidad $\pm 1\%$ (del rango de medición). T ± 1 °C; |
| Anemómetro De Paletas | Muestreo en espacios Abiertos. Mediciones meteorológicas, en aire acondicionado y ensayos en laboratorio. | Velocidad [0,3 a 45] m/s T [-10 a 50]°C | | Velocidad $\pm 1\%$ (del rango de medición) T ± 1 °C; Hr ± 3 % |
| Tubo Pitot Estándar | Mediciones en conducto cerrado, Chimeneas, Vapor Aeronáutica, Aerodinámica | T=1500°F (815°C) P= 100 psi (6.89 bar) | | Velocidad del viento $\pm 2\%$ |
| Tubo Pitot tipo "S" | Mediciones en conductos; Chimeneas, Vapor, aeronáutica, Aerodinámica | T=1500°F (815°C); P= 100 psig =6.89 bar | | Velocidad del viento $\pm 2\%$ |
| Annubar | Muestreo en conductos Cerrados. | P= 100 bar @ 100 °F (37.8 °C). | | Precision $\pm 1\%$; Repetibilidad $\pm 0.1\%$ |

Fuente: Catálogos Varios

2. MARCO TEORICO

Presenta generalidades de instalaciones para medidores de velocidad de aire teniendo en cuenta los conceptos descritos en el capítulo 1.

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA FACILIDAD TECNOLÓGICA PARA MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE

El propósito de una instalación de este tipo, es obtener un flujo de aire uniforme y desarrollado a una velocidad determinada en la sección de ensayos. En ésta, se sitúan instrumentos de medición o un objeto real, para evaluar y observar la influencia que el viento tiene en ellos.

Existen principalmente dos tipos de instalaciones convencionales:

- Circuito abierto: El aire es succionado del exterior a la presión atmosférica del sitio por un ventilador, turbina u otro dispositivo según sea el diseño, su forma general se puede ver claramente.

Figura 14. Instalación de circuito abierto



Fuente PTB

- Circuito cerrado: Como su nombre lo indica este modelo permite tomar el aire de un camino continuo y cerrado.

Figura 15. Instalación convencional de flujo cerrado.



Fuente PTB

La tabla 2, permite conocer las principales ventajas de cada una de las instalaciones anteriores.

Las dos instalaciones a su vez por la velocidad que se desarrolla en la sección de ensayo se pueden caracterizar en:

- Subsónicos; $Mach < 0.4$
- Transónicos; $0.4 < Mach < 1.3$
- Supersónicos; $1.3 < Mach < (4 - 5)$
- Hipersónicos; $Mach > 4$

Tabla2. Características de una instalación para evaluar el aire de circuito abierto y de circuito cerrado.

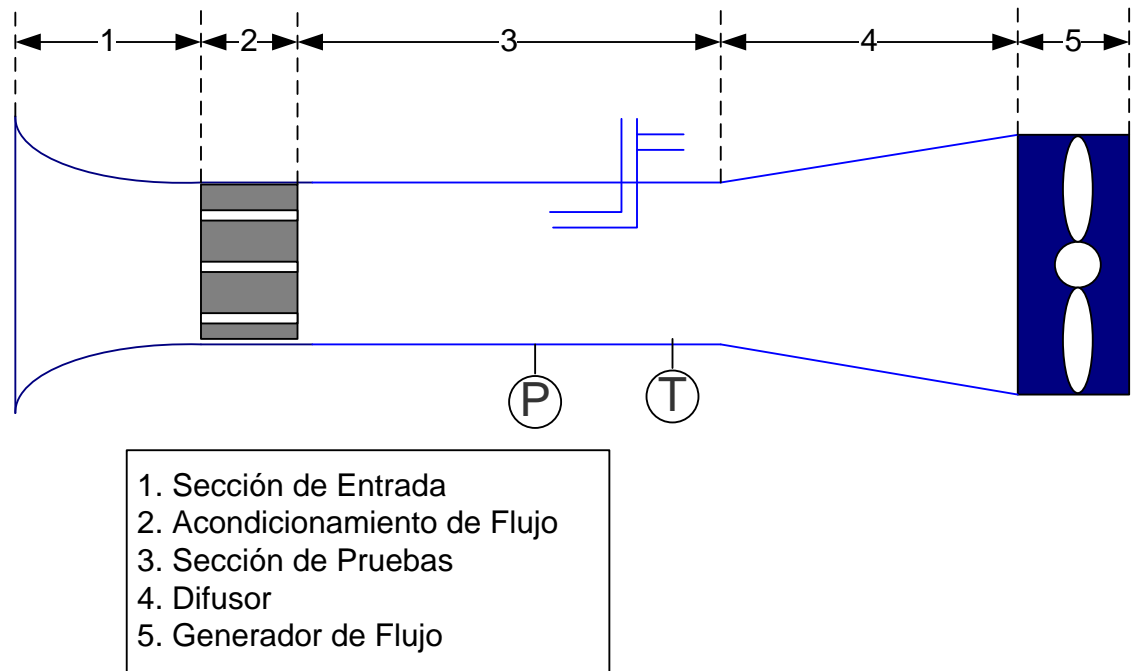
| CIRCUITO CERRADO | CIRCUITO ABIERTO |
|---|--|
| La energía requerida para una determinada velocidad es menor, consecuentemente la potencia requerida por el generador sea menor. | La presión a lo largo de la instalación es substancialmente constante, lo que consecuentemente con el teorema de Bernoulli hace que la velocidad sea aproximadamente uniforme. |
| La capa limite aumenta en espesor a lo largo de la longitud de la instalación, lo que conduce a un aumento de velocidad a lo largo de la sección de prueba. | Posee mayor libertad en instalación, observación, modificación y retiro de modelos o instrumentos de medición. Es decir se garantiza un montaje más flexible. |
| Necesitan de grandes espacios para un correcto funcionamiento. Por lo cual, no es práctico para proyectos de educación. | Son una opción perfecta cuando el espacio en el laboratorio y / o la financiación son limitados. Es práctico para la realización de proyectos de investigación y educación. |
| La velocidad en la sección de prueba es mayor que en uno de circuito abierto, con la misma potencia entregada. | Requiere una gran cantidad de potencia, en orden a suplir las pérdidas de energía en la sección de pruebas. |
| El aumento de la temperatura del aire puede convertirse en un problema durante el uso prolongado. | Al aire no ser reciclado este tipo de diseño no se encuentra propenso a ningún daño cuando se trabaja en periodos prolongados. |

2.2 COMPONENTES GENERALES DE UNA INSTALACIÓN

La instalación esta dotada de las secciones necesarias para garantizar en el volumen para pruebas y ensayos un flujo uniforme y desarrollado, operable en un rango de velocidad determinada.

Igualmente cuenta con los parámetros necesarios para garantizar la calidad metrológica en las calibraciones, ya que cuenta con un análisis confiable de las magnitudes de influencia en la obtención de la ecuación para determinar el valor del mensurando del patrón de calibración.

Figura 16. Esquema general.



2.3 SECCIÓN PARA PRUEBAS

Es en donde se efectúan los ensayos y se deben cumplir las condiciones de flujo deseadas para la aplicación que se haya diseñado. El espacio, los costos de construcción y las decisiones de diseño para las demás secciones dependen del volumen y tamaño de esta zona. La longitud de la sección de ensayo normalmente varía entre uno y dos veces la mayor dimensión del área transversal, de esta misma, igualmente, esta puede ser determinada a criterio del diseñador y del uso potencial del túnel de viento, también cabe recordar (ver tabla 2), que los costos y la potencia requerida dependen de esta área, por lo tanto la forma de la zona vienen determinados por el uso que se le quiera dar, para ello, la cámara de ensayos del túnel esta provista de partes desmontables para adaptarse a las necesidades de cada ensayo en particular.

2.4 DIFUSOR

Pueden existir dos en el diseño, el primero aguas abajo de la sección de cámara de adecuación de flujo y el segundo a la salida de la sección de ensayo.

Difusor de salida: Son descritos por sus dos áreas y por un Ángulo de cono equivalente. Se recomienda que este difusor tenga un ángulo de 7° para su diseño. Como se desea que la reducción de velocidad se haga en el menor trayecto posible, para disminuir las pérdidas, el difusor se transforma en un elemento importante en la operación exitosa del túnel. Se encuentra después del volumen de ensayo, éste permite recuperar presión y evitar inestabilidades en la sección de prueba al colocar los modelos en su interior.

Para el presente proyecto, este elemento no aplica, debido a que la facilidad tecnológica trabaja a succión por medio del banco de alto caudal ya existente en el laboratorio de CDT del GAS.

2.5 CONTRACCIÓN

Conforma la sección de entrada de flujo y es la antesala de la zona de ensayos, igualmente es la encargada de producir un aumento en la velocidad del flujo. Asimismo permite obtener un flujo más uniforme, disminuye las inestabilidades y las posibilidades de separación de capa límite. El largo de la contracción no debe superar 1.25 veces el diámetro mayor de ésta.

2.6 SECCIÓN DE ADECUACIÓN DE FLUJO

Puede estar compuesta de pantallas de alambre, de un acondicionador de flujo, de un rectificador de flujo, del denominado panel de nido de abeja o de una combinación de todos los anteriores. Su objetivo es reducir las turbulencias lo que permite obtener un flujo mas uniforme y adecuado para la medición y obtención de datos. Su largo viene definido por las dimensiones del elemento o conjunto de elementos seleccionados y otras a considerar durante el diseño.

2.7 PROPULSOR O GENERADOR DE FLUJO

Es el elemento mecánico encargado de entregar la potencia y las condiciones del flujo necesarias para el funcionamiento del banco. El propulsor que generará el aire en la instalación son los Blowers ubicados en el cuarto de maquinas del banco de alto caudal. En este tipo de generador el aire sigue la dirección del eje de la tubería, estando alineadas la entrada y la salida, el Blower es un marca Chicago Blowers diseño 53 modelo I2 opera entre caudales de 650 m³/h a 4500 m³/h con una potencia de 30Hp.

2.8 MEDIDOR PATRÓN

Un patrón de medición es una medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o mas valores de una magnitud que sirva como referencia.

Un patrón se utiliza frecuentemente como referencia para obtener valores medidos e incertidumbres de medida asociadas para otras magnitudes de la misma naturaleza, estableciendo así la trazabilidad metrológica, mediante calibración de otros patrones, instrumentos o sistemas de medida.

2.8.1 Patrón De Referencia

La Norma Técnica Colombiana NTC 2194 define como patrón de referencia, al patrón que posee la máxima calidad metrológica que le permite en un sitio dado y a partir del cual se derivan las mediciones hechas en dicho lugar. El patrón de referencia del CDT de GAS es Turbina G 1000.

2.8.2 Patrón De Trabajo

Según la NTC 2194 un patrón que se utiliza rutinariamente para calibrar o comprobar, instrumentos de medición. Tiene las siguientes características:

- Generalmente se calibra contra un patrón de referencia
- Se denomina patrón de comprobación un Patrón de Trabajo que se utiliza rutinariamente para asegurar que las mediciones se efectúan correctamente.

El patrón de trabajo de la corporación CDT de GAS es el tubo pitot estándar con un alcance de 4 in agua.

2.9 INSTRUMENTACIÓN SECUNDARIA

La instrumentación secundaria utilizada en la calibración de medidores de velocidad de aire es la necesaria para cumplir con los requerimientos de la calibración, esta compuesta por:

- Instrumentos transmisores presión diferencial (DPT)
- Transmisores de Temperatura (RTD)
- Barómetro
- Termo hidrómetro

Antes de dar a conocer el desarrollo del modelo matemático y las magnitudes de influencia para la calibración del medidor patrón de trabajo con el patrón de referencia del banco de alto caudal, se identifican los sectores o círculos de proyección, en el cual, tendrá influencia el uso facilidad tecnológica para calibrar y ensayar instrumentos de medida de velocidad de aire.

2.10 IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE PROYECCIÓN

El desarrollo del presente proyecto permite investigar fenómenos relacionados al flujo de aire a la atmósfera en áreas vinculadas con la medición de caudal de fluidos, la emisión de gases contaminantes por fuentes fijas, la calidad del aire y el estudio de la aerodinámica (de la ingeniería del viento).

2.10.1 Ingeniería Del Viento

El Concepto engloba las áreas tecnológicas en las que se estudian los fenómenos y las cargas producidas por el Viento para el desarrollo de soluciones técnicas a problemas de diversa índole como son:

- Estudio y visualización del perfil de velocidades.
- La forma y el efecto en la que influye la capa límite en las mediciones (dependiendo del tipo de superficie).
- La aplicación de técnicas de visualización del flujo alrededor de la superficie del túnel y de los medidores. La infraestructura de la aplicación posibilita una

descripción cualitativa de la interacción de éste con los medidores, facilitando la realización de diagnósticos y el estudio por medio de herramientas computacionales.

El término convencional de Ingeniería del Viento, que se ha incorporado recientemente al vocabulario técnico, se refiere a una combinación de campos como la Meteorología, la dinámica de fluidos, y un análisis estadístico para minimizar los efectos desfavorables del viento y maximizar los favorables. En tales aplicaciones para la medición de velocidad de aire, es común trabajar con instrumentos para campo, es decir en un lugar abierto a la atmósfera, con medidores tales como hilo caliente y anemómetros de paletas.

2.10.2 Efectos Asociados A La Calidad Del Aire

La fenomenología que se encuentra alrededor de la estimación de las mediciones de velocidad de aire asociada al Confort y a la calidad de aire en recintos cerrados, permite observar la acción de la velocidad de dicho fluido sobre la ecuación de carga térmica (cantidad de calor) con el objeto de conocer la demanda de enfriamiento en un recinto y alcanzar las condiciones de confort dentro de él.

A continuación se muestra la relación existente entre el Calor Transferido (Q) y la velocidad (V) de descarga de flujo.

$$Q \propto \dot{m} \propto \dot{V} \propto V$$

Donde;

\dot{m} es el flujo masico que pasa por la sección de referencia

\dot{V} es el flujo de volumen que pasa por la sección de referencia

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho_f \quad \text{Ec. 17}$$

Como;

$$\dot{V} = V \times A_{sr} \quad \text{Ec. 18}$$

Con la siguiente ecuación se determina el calor extraído del aire.

$$Q = \dot{m} \Delta h \quad \text{Ec. 19}$$

El valor de Δh corresponde a la diferencia entre las entalpias en dos puntos de medición, este valor es normalmente calcula en confort con una carta psicrométrica.

Los instrumentos que con frecuencia son usados para mediciones en ductos de aire acondicionado son los anemómetros de paletas, los anemómetros de hilo caliente y en algunas ocasiones los tubos pitot. Su objeto es el mismo, determinar la velocidad de flujo del aire (V) asociada a comprobar el flujo másico en determinado tiempo que pasa por la sección de área definida donde se va realizar el ensayo.

2.10.3 Emisiones de gases en fuentes fijas

La estimación de incertidumbre en fuentes fijas se relaciona directamente con:

La técnica de operación para realizar el muestreo en chimeneas.

La influencia que tiene en el valor de velocidad al cual se toma la muestra.

Con el fin de garantizar el análisis, la velocidad de muestreo debe ser la misma que la velocidad en el ducto durante el tiempo que sea definido el ensayo.

El instrumento a utilizar durante la medición de velocidad al momento de tomar una muestra de gas a la atmósfera es el denominado tubo pitot, este puede ser tipo "L" o "S".

La estimación de la velocidad en la emisión de partículas (E_p) y de flujo contaminante (FC) al ambiente se relaciona directamente como se observa a continuación.

$$\dot{V}_{CR} = V \times A_{st} \text{ Ec. 20}$$

$$E_p \propto \dot{V} \propto V$$

$$FC \propto \dot{V} \propto V$$

Donde el Caudal o Flujo volumétrico \dot{V} influye directamente en la Emisión de partículas y en la concentración de contaminación (CCL) que se expulsa al ambiente.

$$C_{CL} = \left(\frac{w_p}{\dot{V}_m} \right) \text{ Ec 21}$$

W_p = Masa total de las partículas colectadas [g].

$\forall m$ = Volumen de gas seco obtenido por el medidor de gas seco [m³].

2.1.0.4 Corrección a condiciones de referencia de la concentración de contaminación.

Según el “Artículo 86. Corrección a condiciones de referencia” de la resolución 909 de junio de 2008, todos los resultados de las mediciones de los diferentes contaminantes deben ser corregidos a condiciones de referencia por medio de la siguiente ecuación.

$$C_{CR} = C_{CL} \left(\frac{T_{CL} \times P_{CR}}{T_{CR} \times P_{CL}} \right) \text{ Ec 22}$$

CCR: Concentración del contaminante a condiciones de referencia (25 °C, 760mm Hg) en [mg/m³].

CCL: Concentración del contaminante a condiciones locales en [mg/m³].

TCL: Temperatura de los gases a la salida del ducto en [K].

PCR: Presión a condiciones de referencia en [mm Hg].

PCL: Presión de los gases a la salida del ducto en [mm Hg].

TCR: Temperatura a condiciones de referencia en °K].

$\dot{\forall CR}$ = Caudal de gas en la chimenea en base seca corregido a condiciones de referencia (25 °C, 760mm Hg) [m³/h] Ver Ecuación 20.

La E_p en [kg/h] se determina con la siguiente ecuación.

$$E_p = 0.001 \cdot C_{CR} \cdot \dot{V}_{CR} \text{ Ec 23}$$

Y el FC es el Flujo del contaminante en [k g/h] que se transfiere a la atmósfera.

$$FC = \left(\frac{C_{CR} \times \dot{V}_{CR}}{1000000} \right) \text{ Ec 24}$$

Existen programas como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que permiten obtener un campo novedoso para la práctica de estudios en la instalación.

Por ejemplo los MDL son proyectos dirigidos a reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), implementados en los países en desarrollo, el objetivo de aplicar a este, es para vender Certificados de Reducción de Emisiones (Certified Emission Reductions, CERs), también conocidos como Bonos de Carbono, con lo cual se pueden conseguir fondos para la financiación o que ayuden a eliminar barreras que impidan la realización del proyecto. Los CERs son comprados por los países industrializados para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones.

Un CER corresponde a la reducción de una tonelada de dióxido de carbono equivalente. La equivalencia corresponde al potencial de efecto invernadero de cada gas, y se expresa en unidades equivalentes de CO₂ (CO₂e) para efectos de simplicidad en los cálculos.

A pesar de que ya existen varios tipos establecidos de proyectos MDL, cualquier proyecto que reduzca emisiones de GEI, puede aspirar a vender CERs. Existen procedimientos a través de los cuales los desarrolladores de

proyectos pueden proponer nuevas categorías de proyectos, así como las metodologías para su implementación y monitoreo.

Luego al proyectar los sectores en los cuales tiene influencia la instalación, se realiza un desarrollo del modelo matemático a seguir que permite la calibración del patrón de trabajo, con el cual se realizaran las calibraciones de los medidores de velocidad.

3. DESCRIPCIÓN DEL METODO PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE

Para la calibración de medidores de velocidad de aire en la instalación se tiene como referencia el patrón tipo turbina del Banco de Alto Caudal del CDT de GAS, por ello, se desarrolla un método matemático que permita comparar el patrón de trabajo de la facilidad tecnológica con el patrón de referencia.

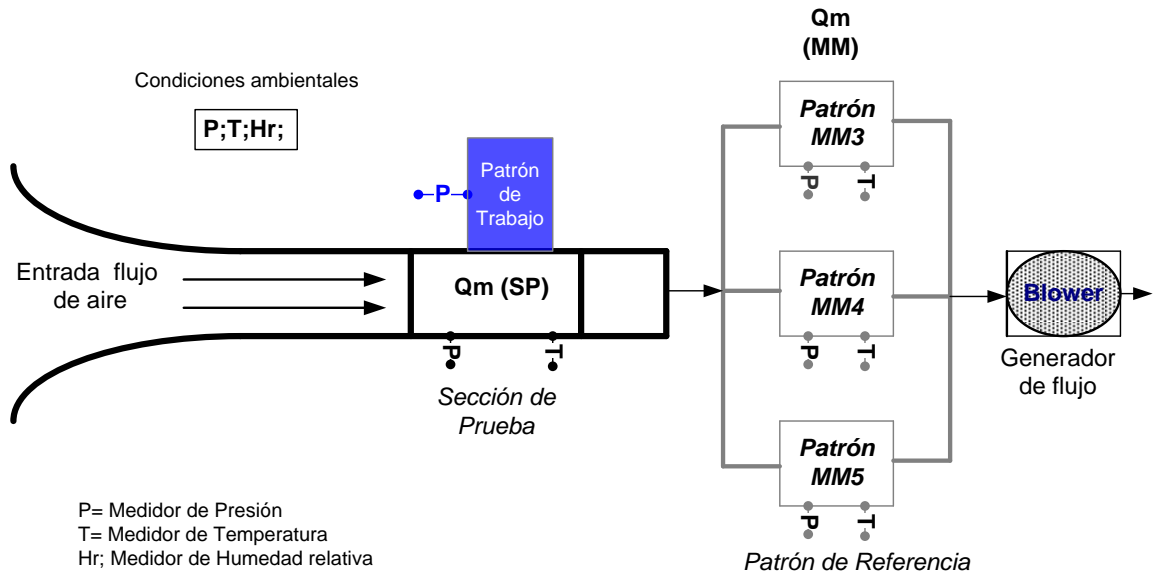
3.1 DEDUCCIÓN DEL MODELO MATEMATICO PARA CALIBRACIÓN EL PATRÓN DE TRABAJO

El proceso de calibración del medidor patrón de trabajo se realizó implementando un modelo matemático apoyado en el principio de conservación de la masa, es decir, el método de comparación se basa, en la masa de aire que pasa a través del patrón de trabajo (tubo pitot estándar) es igual a la que pasa por los patrones volumétricos tipo turbina del banco de alto caudal. La calibración del pitot estándar se realiza con el fin de garantizar la trazabilidad en la medición con un adecuado nivel de incertidumbre bajo estándares y normas internacionales para cumplir con los requerimientos en la calibración de anemómetros y tubos pitot.

Por medio del principio de continuidad y de conservación de la masa, se compara la cantidad masa que pasa por el Patrón de Referencia (PR) contra el Patrón de Trabajo (PT);

$$Q_{mPR} = Q_{mPT} \quad \text{Ec 25}$$

Figura 17. Descripción de la Instalación.



Donde el flujo másico en el medidor patrón de referencia (Q_{PR}) es igual en el patrón de trabajo (Q_{PT}) es:

$$Q_{mPR} = \rho_f \times Q_v$$

$$Q_{mPT} = A \cdot V \cdot \rho_{PT}$$

Luego al reemplazar las expresiones anteriores en la ecuación 25 se obtiene:

$$\rho_f \times Q_v = A \cdot V \cdot \rho_{PT} \quad \text{Ec 26}$$

Donde la velocidad V en el Patrón de Trabajo es:

$$V = K \times \sqrt{h_m} = V = K \times \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{PT}}} \text{ Ec 27}$$

Siendo (h) El diferencial de presión y (K) el coeficiente del tubo pitot que se necesita obtener de la medición (Mensurando), para compararlo con el valor dado por certificado del fabricante, el cual tiene un valor de $0,99 \pm 0.1$.

Ahora al reemplazar en la ecuación 26, se obtiene La siguiente expresión:

$$\rho_f \cdot Q_v = A \cdot K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{PT}}} \cdot \rho_{PT} \text{ Ec 28}$$

El siguiente paso es despejar los valores en función de K, y así, se obtiene la expresión que permite determinar el valor correspondiente para K del patrón de trabajo.

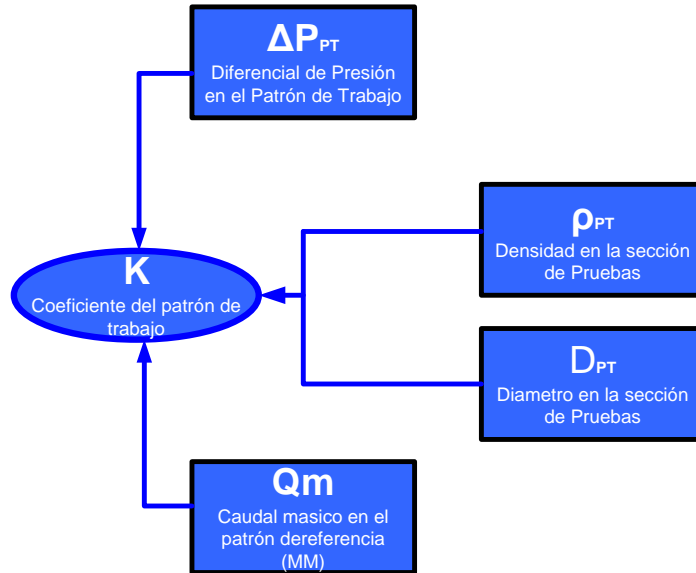
$$\frac{4 \cdot (\rho_f \cdot Q)_{MM}}{\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{PT}} \cdot \rho_{PT}} = K \text{ Ec 29}$$

La contribución de cada magnitud en el valor del mensurando depende de su incertidumbre y del coeficiente de sensibilidad.

3.2 MAGNITUDES DE ENTRADA

Las magnitudes de entrada se que afectan el valor del mensurando se pueden observar en el siguiente gráfico:

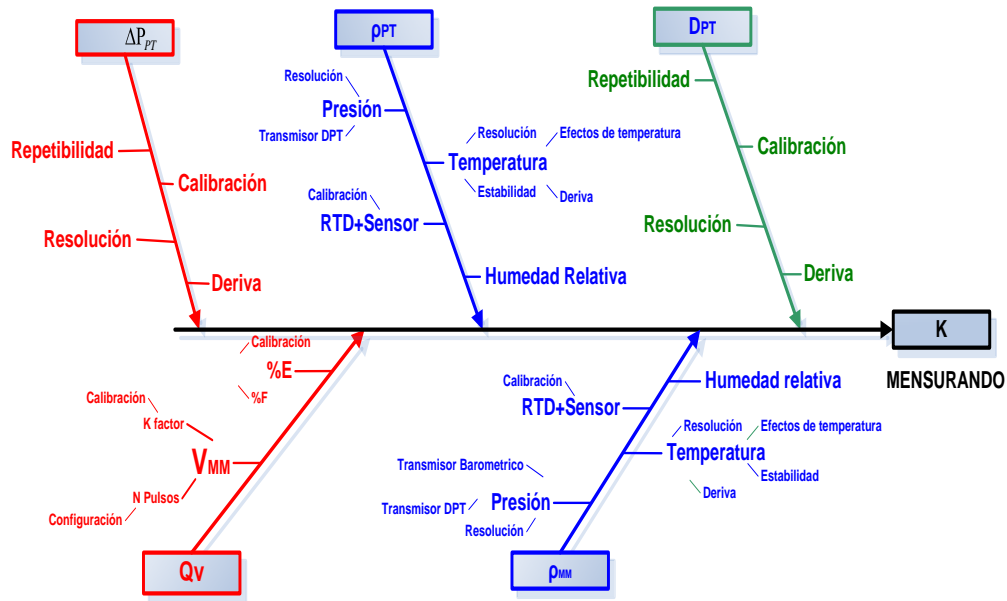
Figura 18. Magnitudes de Entrada



Una muestra gráfica del aporte de cada una de las fuentes de incertidumbre en las magnitudes de entrada del modelo matemático planteado se observa en el siguiente árbol de incertidumbre.

Donde el caudal másico depende de la suma de los caudales de cada turbina que se encuentre en uso, multiplicado por la respectiva densidad en ese punto. Por ello en el árbol de incertidumbre se muestran las fuentes que afectan el caudal volumétrico y la densidad.

Figura 19. Árbol de Incertidumbre para K.



Los coeficientes de sensibilidad se obtienen a partir de la derivación parcial de cada magnitud de influencia en el modelo planteado.

Coefficientes de sensibilidad ρ_{MM}

$$\frac{\partial K}{\partial Q_v} = \frac{4 \cdot \rho_{MM}}{\pi \cdot D_{PT}^2 \cdot (2 \cdot \Delta P_{PT} \cdot \rho_{PT})^{1/2}}$$

Coefficientes de sensibilidad Q_v

$$\frac{\partial K}{\partial \rho_{MM}} = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot D_{PT}^2 \cdot (2 \cdot \Delta P_{PT} \cdot \rho_{PT})^{1/2}}$$

Coefficientes de sensibilidad D_{PT}

$$\frac{\partial K}{\partial D_{SP}} = \frac{-8 \cdot \rho_{MM} \cdot Q_v}{\pi \cdot D_{PT}^3 \cdot (2 \cdot \Delta P_{PT} \cdot \rho_{PT})^{1/2}}$$

Coefficientes de sensibilidad ΔP_{PT}

$$\frac{\partial K}{\partial \Delta P_{PT}} = \frac{-2 \cdot \rho_{MM} \cdot Q_v}{\pi \cdot D_{PT}^2 \cdot (2 \cdot \rho_{PT})^{1/2} \cdot (\Delta P_{PT})^{3/2}}$$

Coefficientes de sensibilidad ρ_{PT}

$$\frac{\partial K}{\partial \rho_{PT}} = \frac{-2 \cdot \rho_{MM} \cdot Q_v}{\pi \cdot D_{PT}^2 \cdot (2 \cdot \Delta P_{PT})^{1/2} \cdot (\rho_{PT})^{3/2}}$$

En la siguiente tabla se contextualiza la relación entre las magnitudes de entrada y el instrumento de medida, es claro, que la sensibilidad de las magnitudes de entrada en la determinación del valor del mensurando depende del instrumento con el cual se realiza la medición.

Tabla 3. Medición de las magnitudes de influencia.

| MAGNITUD DE ENTRADA | | INSTRUMENTO DE MEDIDA | |
|--|---------------------------|--|----------------------|
| Caudal másico (Q_m) en el patrón de trabajo | $(Q_v \times \rho)_{MM3}$ | Turbina MM3 | G1000 |
| | | Plantilla densidades del CDT $\rho(P,T,Hr)$ | DPT; RTD; Hidrómetro |
| | $(Q_v \times \rho)_{MM4}$ | Turbina MM4 | G1000 |
| | | Plantilla densidades del CDT $\rho(P,T,Hr)$ | DPT; RTD; Hidrómetro |
| | $(Q_v \times \rho)_{MM5}$ | Turbina MM5 | G1000 |
| | | Plantilla densidades del CDT $\rho(P,T,Hr)$ | DPT; RTD; Hidrómetro |
| Presión Diferencial | ΔP | Presión diferencial del patrón de trabajo (DPT Dwyer: 607-3) | |
| Densidad Sección de Pruebas | ρ_{PT} | Plantilla densidades del CDT $\rho(P,T,Hr)$ | DPT; RTD; Hidrómetro |
| Diámetro Sección de Pruebas | D_{PT} | Micrómetro Tubular de Interiores Mitutoyo | |

Para obtener el valor de K, se utilizaron las plantillas desarrolladas durante el presente trabajo de grado (ver Anexo 5). Las Plantillas muestran el análisis de las fuentes de incertidumbre, el aporte en porcentaje de cada una de las magnitudes de entrada del modelo matemático (los valores utilizados para estimar la contribución de cada una de las variables en la incertidumbre del mensurando son obtenidos en la calibración del patrón de trabajo).

3.3 MODELO MATEMATICO PARA CALIBRAR MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE

Para la calibración de los medidores bajo se prueba (MUT) se realiza la comparación de la velocidad en el medidor objeto y la velocidad medida por el Patrón de Trabajo (tubo pitot estándar).

$$V_{PT} = V_{MUT} \quad \text{Ec. 30}$$

Para la calibración de tubos pitot se reemplaza en cada velocidad la Ec. 27.

$$Cp_{MUT} \sqrt{\frac{\Delta P_{PMUT}}{\rho_{MUT}}} = K \sqrt{\frac{\Delta P_{PT}}{\rho_{PT}}} \quad \text{Ec. 31}$$

El siguiente paso es despejar los valores en función de C_p , y se determina la expresión para evaluar el mensurando del pitot, y así, realizar su respectiva calibración.

$$Cp_{MUT} = K \sqrt{\frac{\Delta P_{PT}}{\Delta P_{MUT}}} \quad \text{Ec. 32}$$

ΔP_{MUT} y ΔP_{PT} Son el diferencial de presión obtenido por el MUT Y el PT respectivamente, su magnitud es obtenida con un diferencial de presión independiente para cada uno de ellos..

K Es el coeficiente caracterizado del patrón.

C_p Es el coeficiente que se necesita determinar para calibrar y verificar el MUT.

Para la evaluación de los anemómetros se comparan las velocidades de la ecuación 30, es decir, el patrón de trabajo contra el medidor bajo prueba.

4. DISEÑO Y SELECCIÓN

Para la realización del diseño, se deben tener en cuenta parámetros que permitan definir las cualidades que tendrá la instalación para ser funcional y operativa.

Por los requerimientos en espacio y ubicación con los que cuenta el laboratorio del CDT de GAS se seleccionó una instalación de circuito abierto, la cual, debe trabajar con el sistema de generación a succión y el patrón de referencia del banco de alto caudal del CDT de gas.

4.1 CONDICIONES DE FLUJO

Las condiciones que debe presentar el flujo en la sección de pruebas, permiten parametrizar detalles de los componentes de la instalación:

- El flujo se debe encontrar en régimen turbulento a bajos números de Reynolds (Se consideran un bajo número de Reynolds debido a que el mayor valor determinado en la sección para pruebas y ensayos no supera los 400.000).
- Se debe presentar un flujo uniforme y estable.
- El perfil de velocidades se debe encontrar desarrollado antes de la sección de pruebas.

- El perfil para cada una de las velocidades debe describir una curva sin anomalías, desde la pared del ducto hasta el centro del mismo (característico de un flujo turbulento a bajos números de Reynolds [1]).
- El flujo debe ser axisimétrico con respecto al eje del ducto que conforma la sección de pruebas.

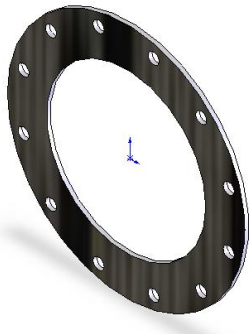
4.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación que debe presentar la instalación delimitan el diseño, es decir, permiten obtener los parámetros condicionales, en los cuales, la facilidad tecnológica va ser funcional en conjunto con el Banco de Alto Caudal del CDT de GAS.

- Se deben calibrar medidores de velocidad que apliquen en un rango de operación desde 4(m/s) hasta 18 (m/s), utilizando como Patrón de Referencia del Banco de Alto Caudal del CDT de GAS. El rango de velocidad se encuentra limitado por el alcance de caudal mínimo y máximo que permite las turbinas G1000 del Banco de Alto Caudal.
- La instalación debe operar con el sistema de generación de flujo del Banco de Alto Caudal, el cual proporciona estabilidad en el flujo (estabilidad menor del 2%) y tiene la capacidad de recuperar la caída de presión presentes por las condiciones de la instalación.
- Los accesorios de la instalación deben evitar las fugas de aire y garantizar hermeticidad en la infraestructura de calibración.

- El sistema de Adquisición y Control de datos (SAD) apto para la instalación, debe operar de manera independiente el Caudal, los Instrumentos y la calibración, al software de control del Banco de Alto Caudal.
- La instalación de medidores de velocidad de aire debe ser operable y funcional en conjunto con Banco de Alto Caudal.
- Para conectar la Instalación con el Banco de Alto Caudal se debe utilizar una brida de 12 pulgadas en PVC (ver figura 20), igualmente, la brida debe permitir la concetricidad, el alineamiento y que no ocurra obstrucción del flujo entre ambas infraestructuras.

Figura 20. Brida de 12 pulgadas en PVC.



4.3 CONDICIONES METROLÓGICAS

A continuar se dan algunos parámetros que deben garantizar la calidad metrológica de la instalación.

- Se deben seguir los lineamientos planteados en las normas ISO 10780:2006 y 3966:1977 (ver Tabla 4).

Tabla 4. Requerimientos para la medición de velocidad de aire usando un tubo Pitot de acuerdo a la norma ISO 10780-2006 [6].

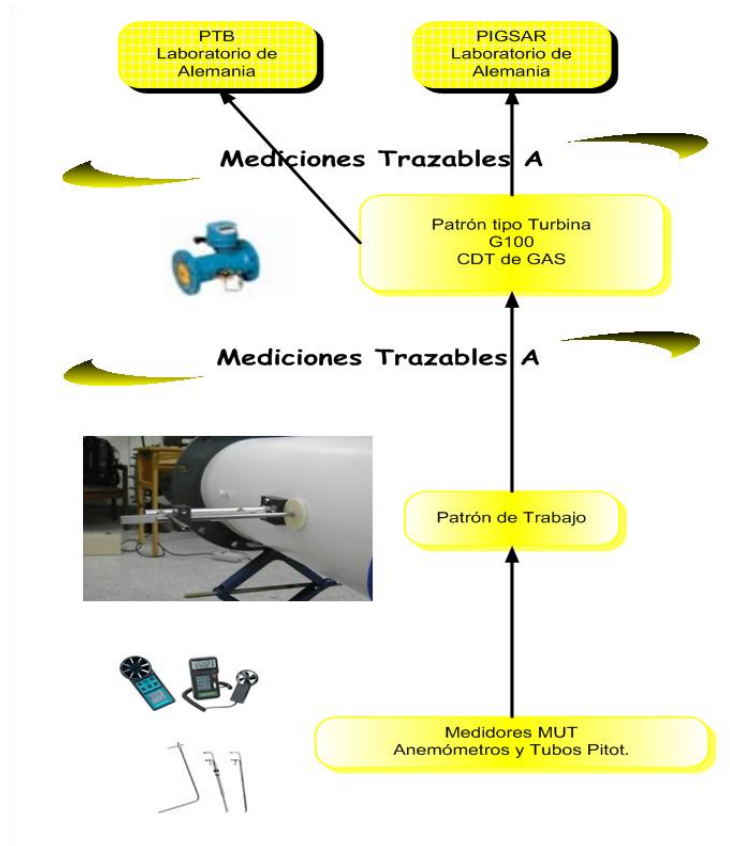
| CARACTERISTICA | REQUERIMIENTO |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Presión Dinamica | $5Pa \leq \Delta P \leq 4800Pa$ |
| Rango de Velocidad | [2.9(m/s) a 90(m/s)] a 20°C |
| | [6(m/s) a 180(m/s)] a 1273K |
| Numero de Reynolds | Mayor de 1200 |
| Area transversal del ducto (A) | Mayor a 0.07m ² aprox. |
| Stem Blockage | Menor o igual al 3% |

Fuente NPL Report, DQL - AS 022.

- La instalación debe garantizar la trazabilidad de la facilidad tecnológica a patrones internacionales del BIPM² ver figura.
- Se deben usar los instrumentos acorde a la Sensibilidad que tienen ellos en la determinación del valor del mensurando, para garantizar las condiciones metrológicas de operación. Es decir, cada instrumento se debe seleccionar acorde a características como lo son:
 - Alcance del instrumento.
 - Estabilidad por año del instrumento.
 - Clase del instrumento.
 - Repetibilidad del instrumento.

²BIPM, Bureau international des poids et mesures (Oficina Internacional de Pesas y Medidas).

Figura 21. Cadena de Trazabilidad del Banco de Medidores de Velocidad de Aire.



- La instalación debe garantizar un nivel de incertidumbre relativo a la estimación del error en la lectura del medidor patrón de trabajo (tipo pitot estándar) menores al 10%. Con $K=2$, donde K^3 es un Factor de cobertura, correspondiente a un nivel de confianza del 95.45%.
- El Banco en funcionalidad debe poder compararse con instalaciones internacionales como lo son:

³ K es un factor de cobertura, el valor de la confianza de la medición se obtiene por el método GUM [12].

Tabla 5. Instalaciones para medidores de velocidad de aire

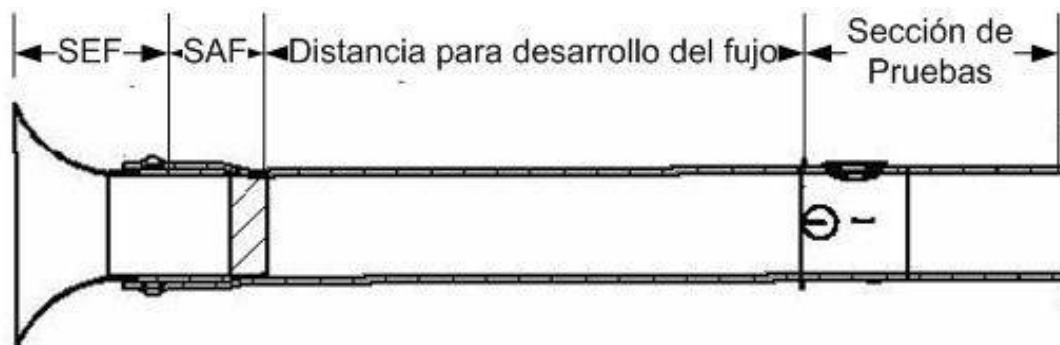
| Laboratorio | Alcance de Velocidad [m/s] | Tecnología de medición |
|-------------|----------------------------|------------------------------|
| Hotektech | 2.5-10 | Hilo Caliente |
| PTB | 0.-60 | LDA |
| Labinthab | 5.-30 | Hilo Caliente-Pitot Estándar |
| NIST | 0.15-40 | LDA |
| CDT de GAS | 41-18 | Pitot Estándar |

Fuente: Varios

4.4 SELECCIÓN Y DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

Para la selección y el diseño de los parámetros dimensionales de la instalación para la calibración de medidores de velocidad, se debe cumplir con los requerimientos en la sección de pruebas y ensayos, por ello, se seleccionó la mejor alternativa de diseño para la facilidad tecnológica y para cada uno de sus componentes.

Figura 22. Esquema general de la instalación.



4.5 PATRÓN DE OPERACIÓN

La instalación cuenta con los patrones para cumplir con los requerimientos de operación para calibrar medidores de velocidad de aire, de tal forma que se garantiza la calidad y la trazabilidad en la facilidad tecnológica.

4.5.1. Patrones De Referencia

El patrón de referencia de la corporación para medidores de velocidad de aire se es patrón volumétrico tipo turbina del Banco de Alto Caudal (ver figura 23), la turbina G 1000 se calibró en el instituto PTB (Phisikalische Technische Bundesansalt) de Alemania a bajas presiones y en PYGSAR a altas presiones, lo cual la hace la mejor alternativa para establecer la trazabilidad metrológica, para la calibración del patrón de trabajo tipo pitot estándar.

Figura 23. Patrón de referencia del Banco de Alto Caudal



Fuente Corporación CDT de GAS

4.5.2 Patrones De Trabajo

El patrón de trabajo de velocidad de aire seleccionado es un tubo pitot tipo estándar (ver figura 24), fue calibrado con el patrón de referencia tipo turbina en la Corporación CDT de GAS. Para la calibración se utilizó el modelo matemático descrito en el numeral 3.8.1 del presente trabajo de grado, el cual se fundamenta en el principio de continuidad y en la conservación de la masa existente entre el punto donde se encuentra la sección de pruebas y el Banco de Alto Caudal.

Figura 24. Patrón de trabajo de velocidad de aire



Fuente: Autor.

INSTRUMENTACIÓN SECUNDARIA

Es la necesaria para obtener todas las magnitudes de entrada, deben tener un alcance de medición y resolución adecuado, teniendo en cuenta que los valores obtenidos de presión diferencial son muy pequeños.

Tabla 6. Instrumentación usada por la instalación

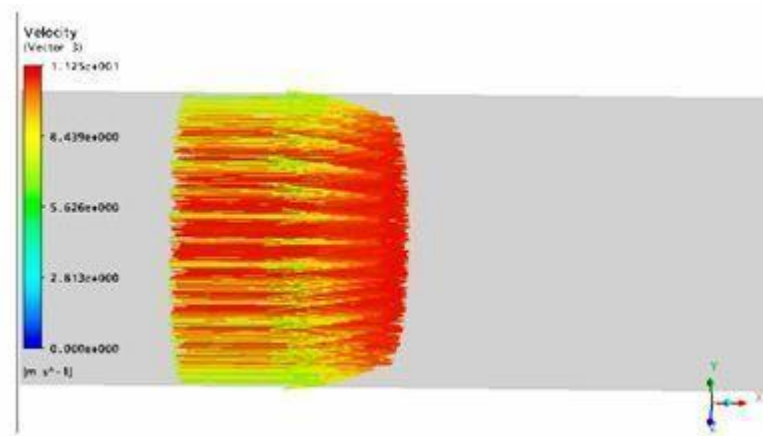
| INSTRUMENTACIÓN USADA POR LA INSTALACIÓN | | | |
|--|---------------------------|--|----------|
| INSTRUMENTACIÓN | CARACTERÍSTICA | FUNCIÓN | CANTIDAD |
| DIFERENCIALES DE PRESIÓN (DPT) | Alcance [0-2.5]mbar | Medir presión diferencial del patrón de trabajo | 1 |
| | Alcance [0-25]mbar | Medir presión diferencial en la sección de prueba | 1 |
| | Alcance [0-62.5]mbar | Medir presión diferencial en el patrón de referencia | 3 |
| RTD:PT-100 | Alcance -51°C a 150°C | Sensar la temperatura en la instalación | 5 |
| TERMO HIDRÓMETRO | Alcance 0-100% Hr | Evaluar la humedad relativa Hr, en la instalación | 1 |
| BAROMETRO | Alcance de [500-1200]mbar | Medir presión atmosférica | 1 |

4.6 DISEÑO DE LA SECCIÓN DE PRUEBAS

Para la sección de pruebas se selecciono un ducto de sección transversal circular de 290[mm] de diámetro nominal (ver figura 25), El área equivalente es de 0.066 m², para obtener un flujo desarrollado en la sección de pruebas, se optó por una longitud equivalente a 5 diámetros nominales desde el panel de nido de abeja hasta el pitot estándar, la longitud total del ducto es 2550 [mm].

La selección de la distancia mínima para obtener un flujo desarrollado en la sección de pruebas es de 5 diámetros nominales del ducto, lo anterior, se soporto con un análisis en ANSYS, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 25. Perfil de velocidades completamente desarrollado.



Fuente: Autor

Para cumplir con los requerimientos de caracterización del perfil y la calibración de medidores de velocidad, la sección de pruebas tiene un montaje flexible, que provee hermeticidad en la sección de prueba y permite la generación de un perfil de velocidad uniforme. Cumpliendo lo anterior, la sección de pruebas esta compuesta por:

- El Patrón de Trabajo
- Los accesorios de hermeticidad del Patrón.
- El elemento de apoyo que permite posicionar al patrón para realizar los ensayos.
- Los accesorios y apoyos para el MUT.
- Orificio y accesorios para toma de presión y de temperatura.
- Una ventana para observar y ubicar el patrón o los MUT.
- Instrumentación Secundaria para la calibración.

El diseño se enfoca en ubicar al patrón de trabajo y los MUT (medidor bajo prueba de calibración) en la misma línea de acción, es decir, a la misma velocidad de trabajo en la sección para pruebas y ensayos. Para ello el patrón

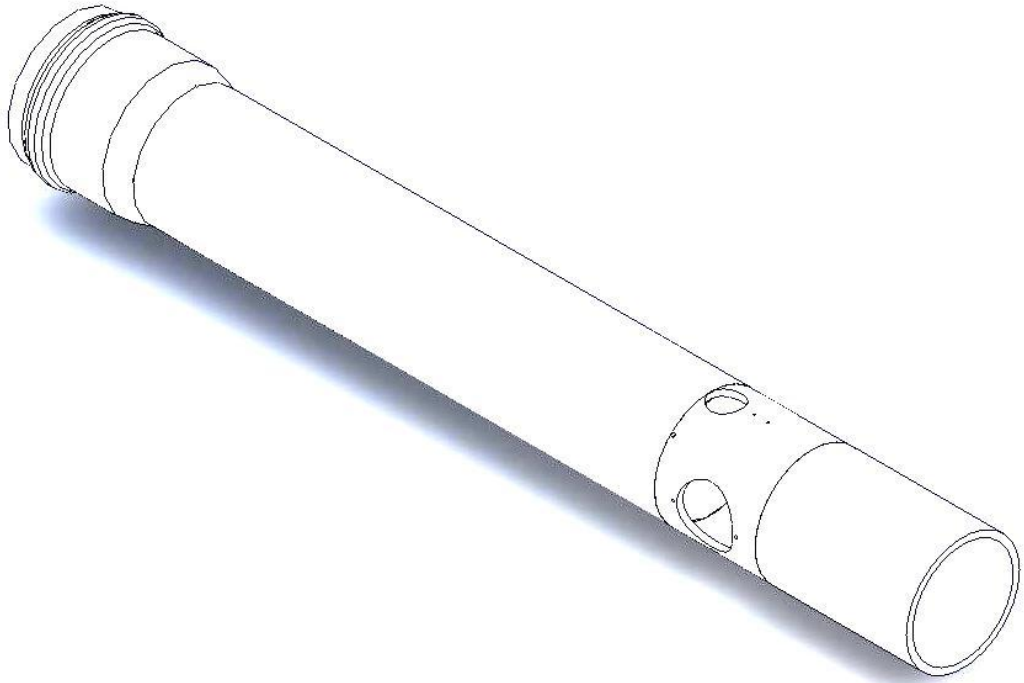
de trabajo se encuentra a 90° del medidor MUT y a 180° de la ventana realizada en acrílico transparente para analizar el efecto del flujo en los medidores.

Los orificios para localizar cada uno de los elementos anteriores en la sección de pruebas, se diseñaron de tal manera que quedarán después del perfil de velocidad de aire que permite evaluar los medidores. Esto con el fin de no distorsionar el perfil y poder obtener un perfil homogéneo y aximétrico en la sección para las pruebas y ensayos. Siguiendo los parámetros dimensionales anteriores se ubico para la ventana en acrílico, un orificio con diámetro de 160(mm) , en la vista frontal (ver figura 26) , para el MUT se realizo uno de 86 (mm) de diámetro en la sección superior y para el patrón se ubico otro de 50 (mm) de diámetro en la posterior.

Habiendo cumplido con los requerimientos anteriores la sección de pruebas se encuentra compuesta por el diseño del accesorio para el patrón de trabajo, de los accesorios para los medidores bajo prueba (MUT), de una ventana en acrílico, de la toma de presión y de la toma de temperatura.

Para el registro de la presión se realizaron dos orificios enfrentados a 180°, con rosca 1/8'' NPT para las T neumáticas. Los accesorios para la toma de presión en la sección de pruebas se encuentran sobre la misma línea de flujo donde se encuentra el medidor patrón el MUT, esto con el objetivo de tener las mismas condiciones de flujo para cada componte que conforma la sección de pruebas al momento de realizar los ensayos, y así, descartar posibles fuentes de incertidumbre adicionales que afecten el error en la medición (calibración).

Figura 26. Sección de pruebas en PVC



Para registrar los datos de temperatura se decidió realizar un orificio con rosca de 3/8" NPT para el accesorio donde se va encontrar la RTD (transmisor de la temperatura), se ubico a 304 [mm], es decir a aproximadamente un diámetro después de la ubicación del patrón de trabajo.

4.7 DISEÑO DE DE ACCESORIOS, CONEXIONES Y SOPORTES

Para el patrón de trabajo y los MUT se diseñaron dos soportes (ver figura 27), los cuales, tiene como principal función, dar movilidad y apoyo al patrón de trabajo y al MUT.

Figura 27. Diseño del soporte para el patrón de trabajo



Igualmente se diseñaron dos accesorios para dar mayor rigidez, soporte y hermeticidad a los medidores. Ambos van sobre la superficie de la sección de pruebas, tienen como particularidad el haberse diseñado con un anillo para un o 'ring que permita hacer sello entre el accesorio y la pared del ducto, y además la superficie del accesorio que va paralela a la pared del ducto describe la misma curva del diámetro interior de este para no producir irregularidades en el desplazamiento del flujo. Los accesorios son de poliuretano, para obtener compatibilidad con el material de la sección de pruebas.

La ventana se diseñó en acrílico, para observar el comportamiento de los medidores durante el ensayo e igualmente al ser removible, permite ubicar y nivelar el patrón de trabajo tipo tubo pitot estándar para la calibración.

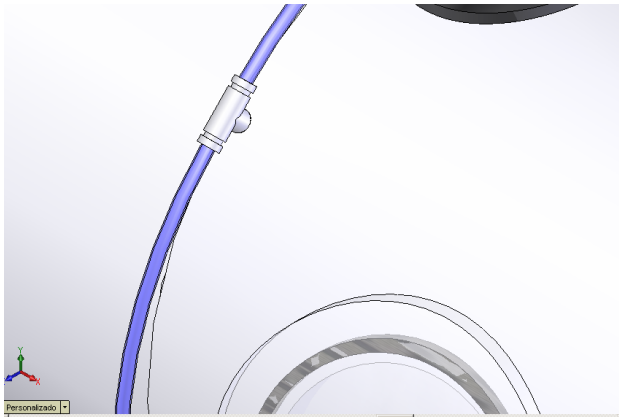
El accesorio para la RTD se diseñó en Nylon por estética y para que la rosca del accesorio no dañe la rosca del PVC, tiene una rosca de 3/8" NPT, y un orificio para RTD de 2 [mm].

El sistema que permite comunicar el flujo para medir la presión diferencial, con un transmisor de presión diferencial (DPT), está compuesto por :

Dos T neumáticas con rosca de 1/8" NPT ubicadas sobre el ducto a un ángulo 180° entre ellas .

- Una T neumática de conexión para el DPT.
- Manguera festo de 6 (mm) para interconectar los componentes anteriores.

Figura 28. Diseño para la toma de presión.



4.8 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS

Para la toma de presión y temperatura en la sección de pruebas se seleccionó un transmisor de presión diferencial (DPT) marca Dwyer Instruments, referencia 607-8. Y una RTD + transmisor Pt 100 Programable (ver Ficha Técnica en Anexo 3 y 4).

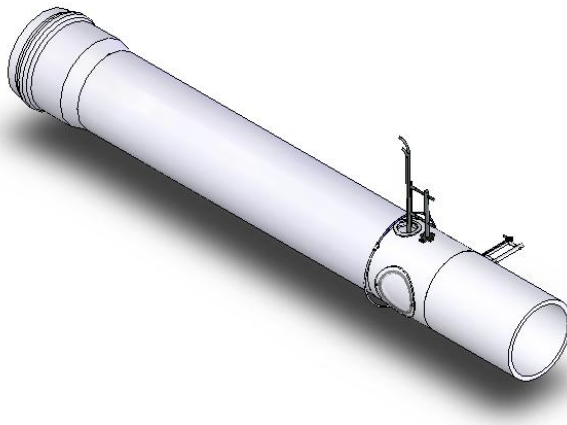
La selección del DPT para el pitot estándar, se determinó con la confiabilidad de un proceso metrológico. Teniendo en cuenta que el valor de presión diferencial es la magnitud con mayor influencia en la determinación del valor del mensurando (Kwt) del patrón de trabajo. Por ello el DPT seleccionado, es el DPT 607-3 (ver Ficha Técnica en Anexo 4) .

Figura 29. RTD Y DPT de la sección de pruebas.



Como se puede observar a continuación el diseño se encuentra descrito por los requerimientos de los ensayos, la calibración de los medidores y el espacio disponible para la ubicación de los instrumentos de medición.

Figura 30. Diseño final de la sección de pruebas



4.9 DISEÑO DE LA SECCIÓN DE PRUEBAS

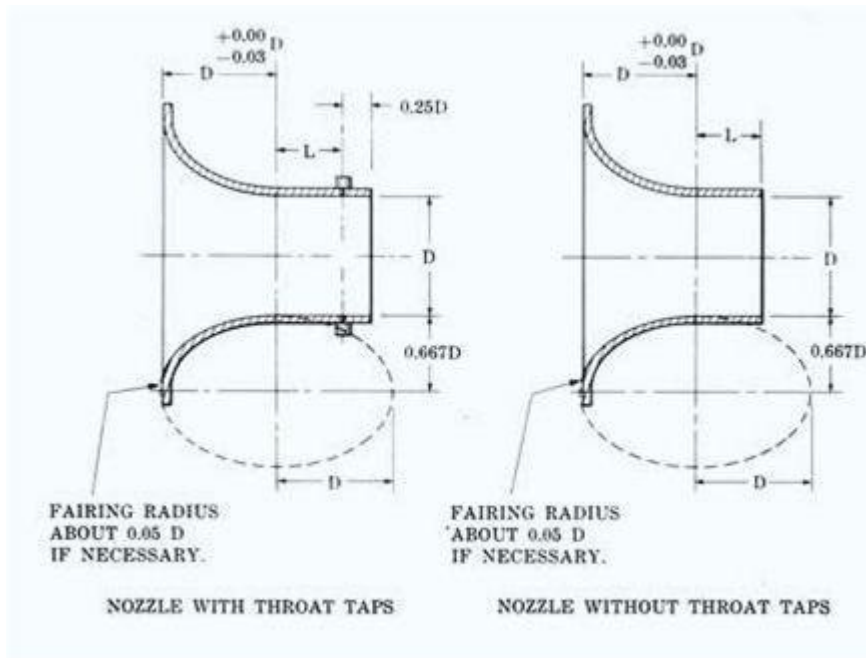
Para la sección de entrada se optó por una sección circular sustentada en la norma ANSI/AMCA Standard 210-85 (ver figura 30), la cual especifica unos

parámetros dimensionales para la contracción a partir del diámetro nominal (D) de la sección de ensayos.

Como el $D=D_1= 290$ mm, y según la norma el diámetro de entrada D_2 debe ser;

$$D_2 = 2 \cdot 0,667 \overline{D} + D \text{ Ec 36}$$

Figura 31. Esquema general de Contracción según norma ANSI/AMCA Standard 210-85



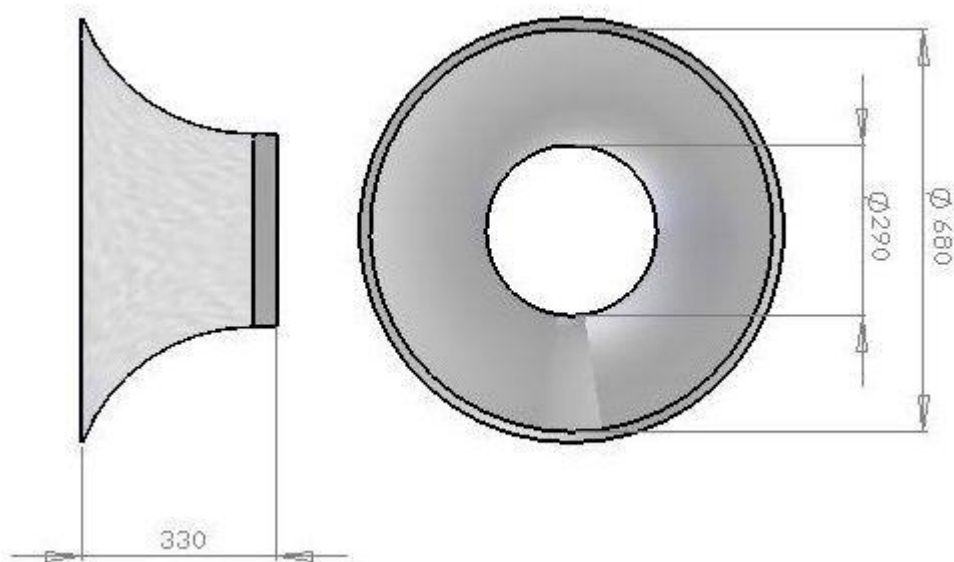
Ahora para la longitud de la contracción (L_c) J.B. Barlow, W.H. Pope and Alan Pop⁴, recomienda que esta no debe ser mayor a 1.25 veces el diámetro mayor de ésta. Y como se observa en la siguiente figura L_c es;

$$L_c \leq 1,25 \overline{D}_2 \text{ Ec 37}$$

⁴ BARLOW, J.B, POPE, W.H. and POP, Alan. Low-speed Wind Tunnel testing 3rd. edition – Edit. John Wiley and Sons. 1999

Las dimensiones de la sección de entrada y de la contracción se observan en la siguiente tabla.

Figura 32. Dimensiones de la sección de entrada



El diseño final de la sección de entrada que compone la facilidad tecnológica (ver figura 33) ofrece las siguientes características.

Tabla 7. Dimensiones de la Sección de entrada [5]

| D / mm | D2 / mm | Lc / mm | A / mm ² | A2 / mm ² | R área |
|--------|---------|---------|---------------------|----------------------|--------|
| 290 | 680 | 330 | 66052 | 363170 | 5,5 |

Figura 33. Diseño en CAD de la sección de entrada.



El diseño de la curva de entrada de la sección se soporta en la norma AMCA 210/85.

La contracción diseñada ofrece las siguientes ventajas:

- permite que el flujo ingrese de forma tangencial a la superficie de la sección.
- Uniformidad del flujo al final de la contracción.
- Evitar la separación del flujo
- Longitud mínima y espesor mínimo de la capa límite en la contracción.
- Material en acrílico, favorece el perfil de velocidad del flujo de aire al ser una superficie lisa (bajo nivel de rugosidad).

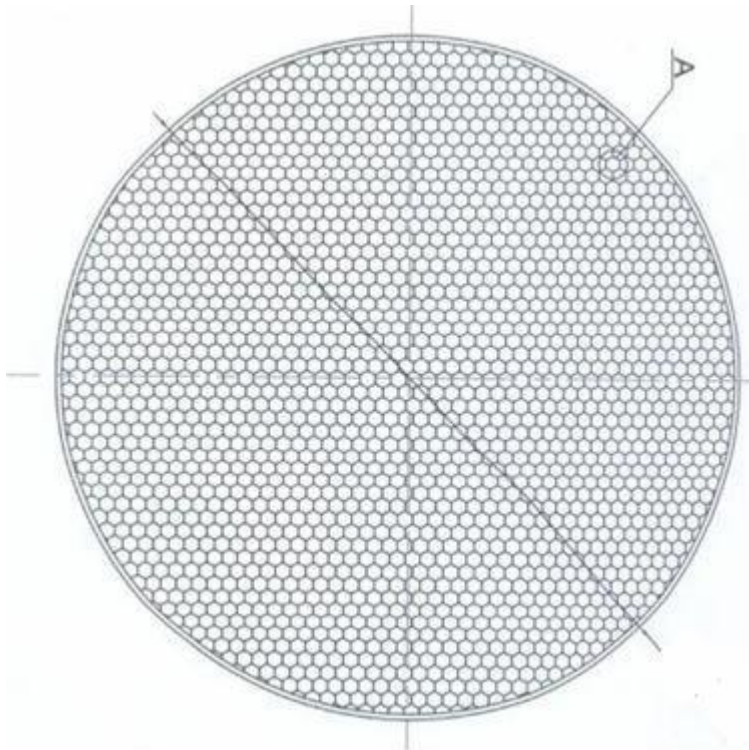
La selección del material aparte de ofrecer un muy buen acabado, fue la mejor alternativa para la manufactura de la contracción (dentro de la mano de obra encontrada).

4.10 DISEÑO DE LA SECCIÓN ESTABILIZADORA DE FLUJO

El Diseño de la sección encargada de acondicionar el flujo de aire de la instalación (ver figura 34), entre otros requerimientos, facilita las condiciones de régimen de flujo que se necesitan en la sección de pruebas.

Para estabilizar y darle uniformidad al flujo de viento en la sección de pruebas, se seleccionó un acondicionador tipo panal de abejas.

Figura 34. Panal de nido de abeja seleccionado para la sección de entrada de flujo.



Fuente Andertech Technology

Para dimensionar el honeycomb se realizó un estudio previo (ver anexo 2), del intervalo de velocidades de trabajo, el número de Reynolds, las pérdidas por presión y el diámetro para la sección de prueba.

Partiendo de lo anterior, la sección de adecuación de flujo le permite tener al diseño las siguientes características:

- Se seleccionó un diámetro hidráulico de celda (dh) de 5[mm] (ver figura 35), el cual, permite obtener un flujo uniforme y disminuir favorablemente la turbulencia en la sección de ensayos.

Figura 35. Celda del panel de nido de abeja



Fuente Andertech Technology

- El panel se dimensionó con una longitud de 100 [mm], en función del dh de la celda y con el objetivo de tener en la instalación una caída mínima de presión.
- Por razones favorables de manufactura, costo del producto y condiciones de régimen de flujo el honeycomb se ubicó entre la contracción y la sección para pruebas.

4.11 SECCIÓN GENERADORA DE FLUJO

El Blower del Banco de Alto Caudal del CDT de GAS, funciona como sección de generación de flujo de la instalación. El trabajo en conjunto de las dos infraestructuras le permite tener al servicio de la instalación para medidores de velocidad de aire, un flujo de aire a succión entre 1000m³/h a 4800m³/h en la Sección de Pruebas, lo cual, limita las velocidades de operación dentro del rango requerido para las pruebas.

Figura 36 Blowers del cuarto de maquinas Banco de Alto Caudal del CDT de GAS.



Fuente Corporación CDT de GAS.

4.12 DISEÑO Y SELECCIÓN ESTRUCTURA DE SOPORTE

La estructura móvil por el diseño que se selecciono, tiene la capacidad de soportar eficazmente la instalación (Ver figura 37).

Figura 37. Soporte Móvil



La estructura es de tubo cuadrado de 20x20x2, con una longitud de 2300[mm] x 400[mm], cuenta con tres gatos tipo tijera para soportar mínimo 1 [Ton], por lo tanto

es un diseño adecuado para soportar la masa del banco de calibración de medidores de velocidad de aire, las ruedas tienen una capacidad de carga mínima cada una de 150 kg. Lo que demuestra un diseño robusto para soportar carga y así ser viable para modificaciones que se le puedan realizar a la Instalación.

4.13 DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICION Y CONTROL DE DATOS, INTERFAZ HOMBRE MAQUINA (HMI)

Se realizo una propuesta para la secuencia de adquisición y control de los datos para el SAD del software OPTO 22, con el cual operan los bancos de calibración del CDT de gas.

El sistema de adquisición y control de datos esta diseñado para encargarse de captar las variables físicas presentes en el desarrollo de la calibración, de analizar y controlar el funcionamiento del mismo.

De manera simultánea a las necesidades de la calibración, se realizo la programación de la estrategia, la cual se observa operativa en las interfaces de la HMI (Interfaz Hombre- Maquina) para el proceso.

Como se observa en las siguientes imágenes, el SAD para la calibración de medidores de velocidad de aire, permite controlar de manera independiente el caudal generado por los Blowers del Banco de Alto Caudal, el estado de instrumentos del Banco y el proceso de calibración. Los pasos que se deben seguir en la calibración son los siguientes:

- Cargar la interfaz hombre - maquina, para desarrollar el proceso de calibración.

Figura 38. Inicio del Proceso y Secuencia de adquisición y control de los datos para el SAD OPTO 22 (Visto desde el HMI).



Fuente Corporación CDT de GAS

- Se deben revisar los sistemas de la instalación (proceso de verificación).
- Primero se asegura que las válvulas que necesitan para la realización del servicio se encuentren abiertas.

Figura 39. Paso de verificación



- Luego se revisa que los instrumentos de medición estén funcionando.

Figura 40. Paso dos de verificación



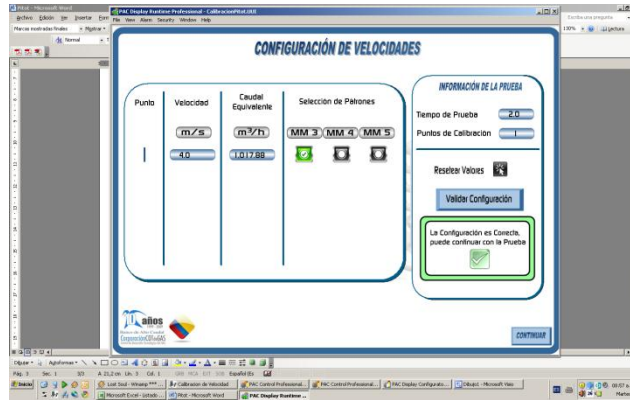
- Luego de revisar el funcionamiento de la instalación y del Banco de Alto Caudal, se registran los datos del servicio. Lo más importante en este espacio es introducir los puntos de calibración (numero de velocidades para realizar el servicio), y decirle a la plataforma la velocidad mínima y máxima requerida, igualmente se realiza lo mismo con el diferencial de presión que se obtiene del pitot estándar.

Figura 41. Digitar Datos del servicio



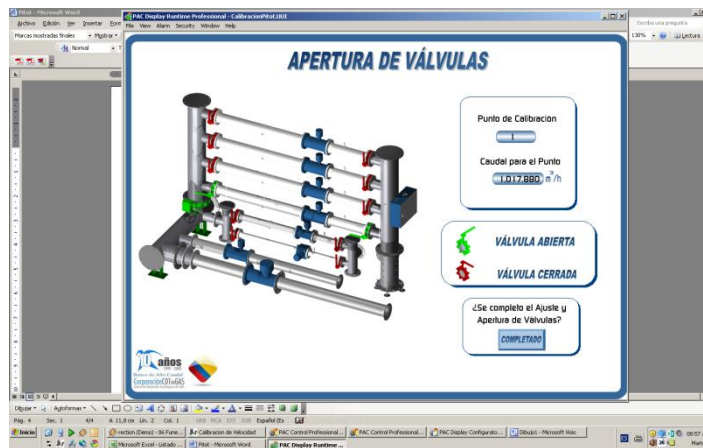
Después de digitar el número de puntos de calibración es necesario que software solicite al usuario las velocidades a las cuales opera cada punto de calibración.

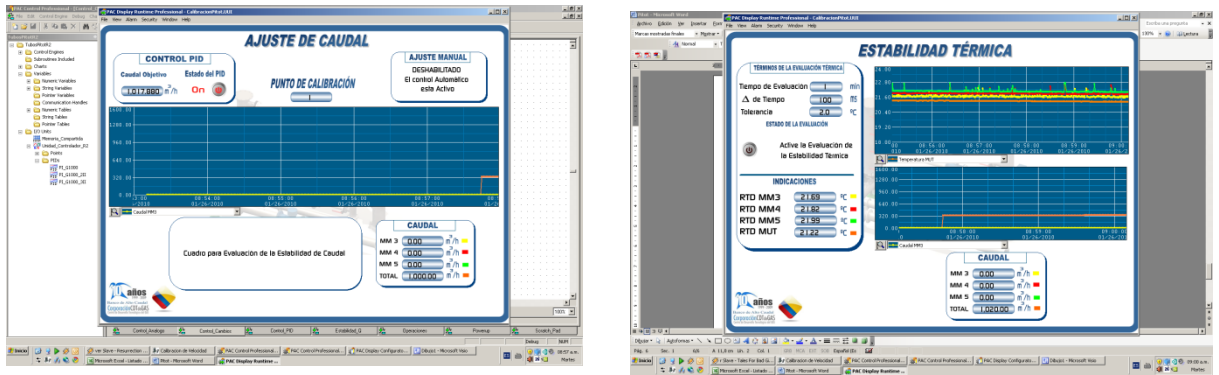
Figura 42. Velocidades de calibración



Ahora el sistema tiene que configurar el caudal del Banco de Alto Caudal y ajustarlo a la respectiva velocidad equivalente que se obtiene en la sección de pruebas de la instalación. Para cada punto de velocidad el sistema espera un punto seguro de calibración (Estabilidad térmica y de caudal).

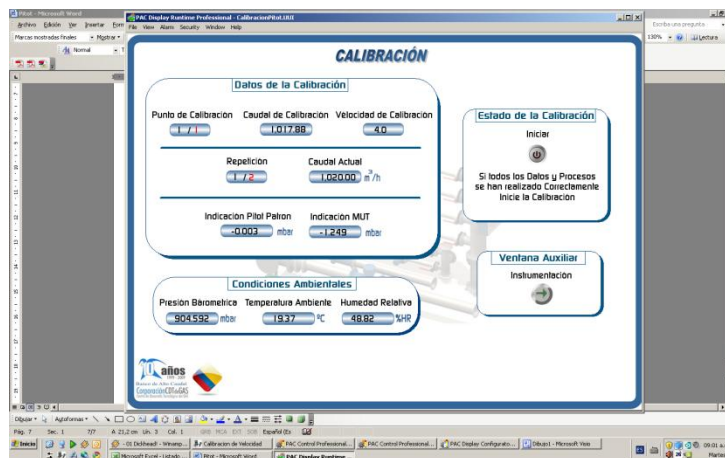
Figura 43. Estabilidad térmica y de caudal.





Ahora el sistema realiza la calibración, los datos se obtienen en un histórico, para proceder a evaluarlos. Y así obtener el resultado del mensurando mediante las plantillas desarrolladas para el presente proyecto.

Figura 44. Proceso de calibración

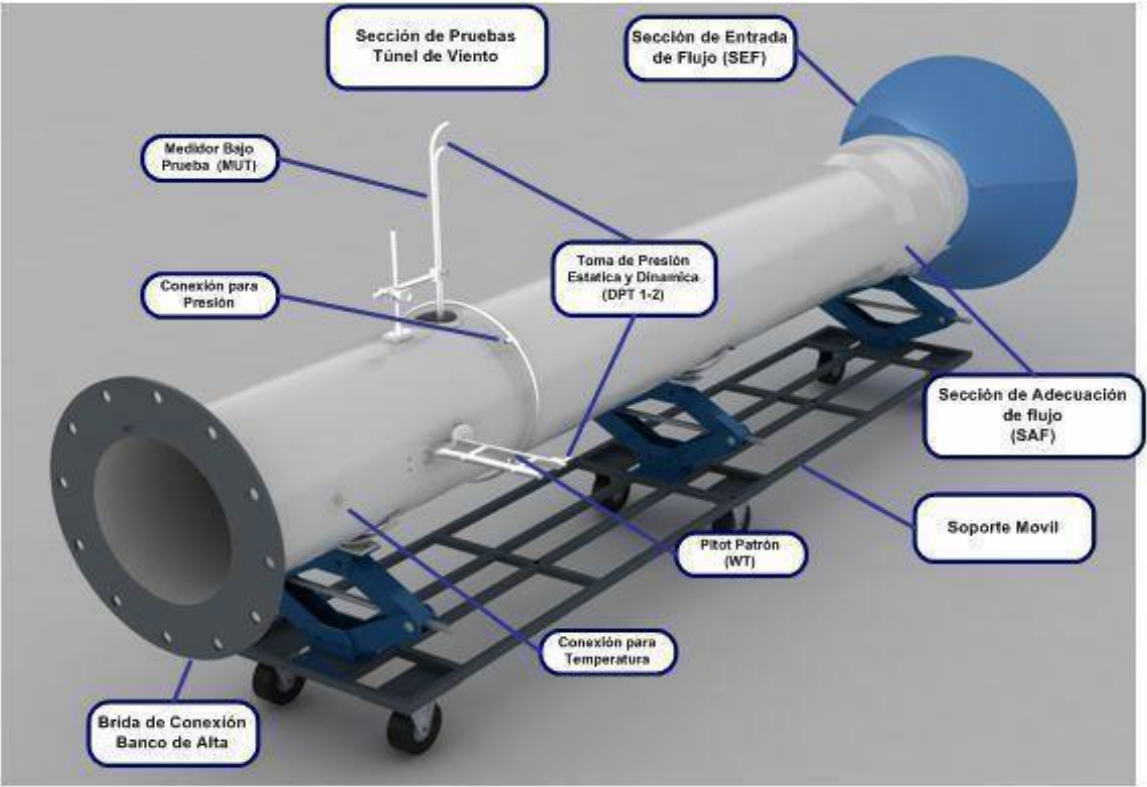


Como lo muestran las imágenes, el diseño de la interfaz (HMI) es funcional, operativo e independiente para el proceso de adquisición y control de datos e la instalación.

4.14 ETAPA FINAL DEL DISEÑO

El diseño final de la instalación muestra el ensamble de las secciones y de cada componente que compone la instalación.

Figura 45. Renderizado del diseño final.



5. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DE LA INSTALACIÓN

Para la manufactura de cada componente que conforma la instalación se seleccionaron los mejores proveedores existentes acorde al presupuesto y características de montaje, teniendo en cuenta la calidad del material y del trabajo, el cumplimiento y responsabilidad en la entrega.

Los detalles de acabados en la construcción y el ensamble se realizaron en la corporación CDT de GAS, por el autor y en colaboración del personal capacitado del CDT de GAS.

El ensamble tiene características particulares que permiten el funcionamiento adecuado de la facilidad tecnológica.

5.1 SECCIÓN DE PRUEBAS

Para cumplir con los requerimientos del diseño, se seleccionó como fabricante de la sección tubular a tubos Celta. La sección y los accesorios fueron fabricados y mecanizados en industrias M.D.O. ya que cuentan con la infraestructura para realizar un proceso de manufactura de calidad con el mejor precio encontrado en el mercado.

A continuación se resumen los trabajos realizados en la sección tubular para que quedara acorde al diseño de la sección de pruebas.

- ❖ Corte del tubo de 12" para obtener la longitud de 2.5m requerida por el diseño.

- ❖ Elaboración de los dos orificios de 50mm, 86mm, de sus accesorios en Nylon y de los soportes para el patrón de trabajo, y el medidor MUT (ver figura 46).
- ❖ Fabricación de las 2 tomas de presión en rosca 1/8'' NPT para colocar las dos T neumáticas (ver figura 46).
- ❖ Fabricación de la toma de temperatura en rosca hembra de 3/8'' NPT y del accesorio para colocar la RTD en rosca macho de 3/8'' NPT (ver figura 46).
- ❖ Elaboración del orificio de 160mm para la ventana en acrílico (ver figura 47). La ventana se fabricó en acrílico por la facilidad para su manufactura sobre otros materiales como el vidrio.
- ❖ Fabricación de la brida de 12'' en PVC (ver figura 48).

Los accesorios y soportes permiten posicionar el patrón de trabajo, el medidor bajo prueba (MUT), la toma de presión y temperatura como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 46. Accesorios de la sección de pruebas



Fuente: Autor

La brida y la sección de pruebas se unieron con soldadura líquida para PVC, la cual, permite una unión fuerte entre ambas superficies.

Figura 47. Ventana de Soporte.



Fuente: Autor

Figura 48. Brida de 12'' en PVC.



Fuente: Autor

5.2 SECCIÓN DE ENTRADA

La contracción (ver figura 49) que conforma la sección de entrada se fabricó en acrílico, por facilidad para su obtención y por las características que el material posee para la conformación del perfil de velocidad en el proceso de calibración.

El acrílico se empalmó al PVC con una mezcla de acrilato líquido y polvo de acrílico. Lo que garantiza una unión firme y fuerte entre los dos elementos.

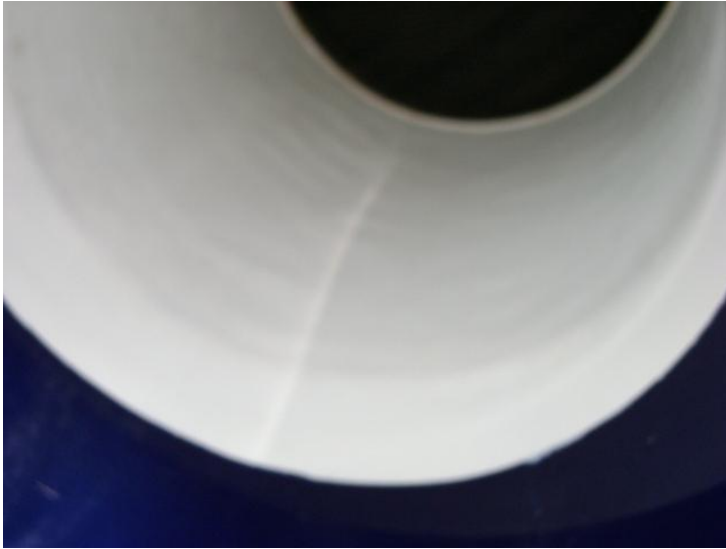
Figura 49. Contracción en Acrílico.



Fuente: Autor

Igualmente en la unión entre el acople en PVC y la Contracción se realizó un acabado con diferentes denominaciones de lija para evitar protuberancias que puedan perturbar el flujo (ver figura 50).

Figura 50. Sección de entrada de flujo.



5.3 SECCIÓN ESTABILIZADORA DE FLUJO

Para esta sección se seleccionó un fabricante extranjero, ello se debe a la complejidad del diseño y porque en el mercado local no se encontró un fabricante competente y de calidad.

El encargado de la fabricación del rectificador tipo colmena (honeycomb) fue Andertech Technology, ubicados en Bei Ging (Republica de China).

El rectificador (ver figura 42) se introdujo 60 mm entre un segmento de PVC a ajuste forzado, para poderlo ensamblar con la sección de Entrada de flujo. Así mismo, esta ubicado a un diámetro después de la sección de entrada de flujo (ver figura 51) y a cinco diámetros nominales antes de la sección de pruebas

Figura 51. Rectificador tipo Colmena (Honeycomb).

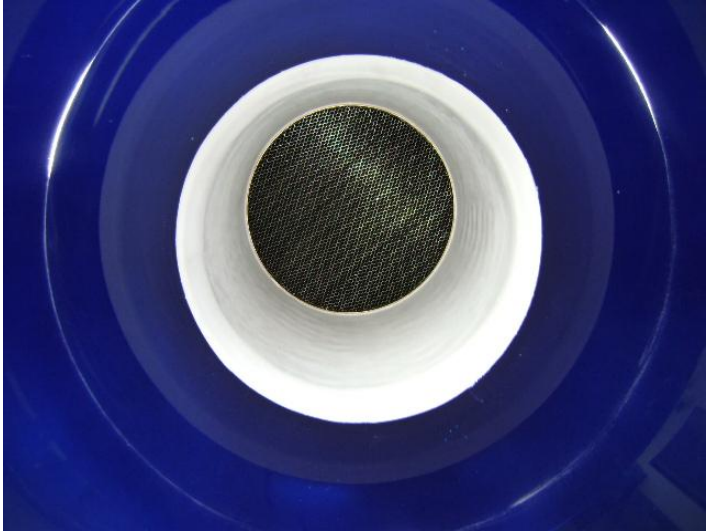


Figura 52. Ensamble del rectificador con la Sección de Entrada.



Fuente Autor

5.4 ENSAMBLE FINAL DE LAS SECCIONES

Una vez terminados todos los detalles de fabricación y a conformidad de la evaluación que realizaron los funcionarios de la Corporación CDT de GAS de cada sección según los planos y especificaciones dadas de diseño, se realizó el ensamble final en el laboratorio de la Corporación (ver figura 53 y 54).

Figura 53. Secciones de la instalación

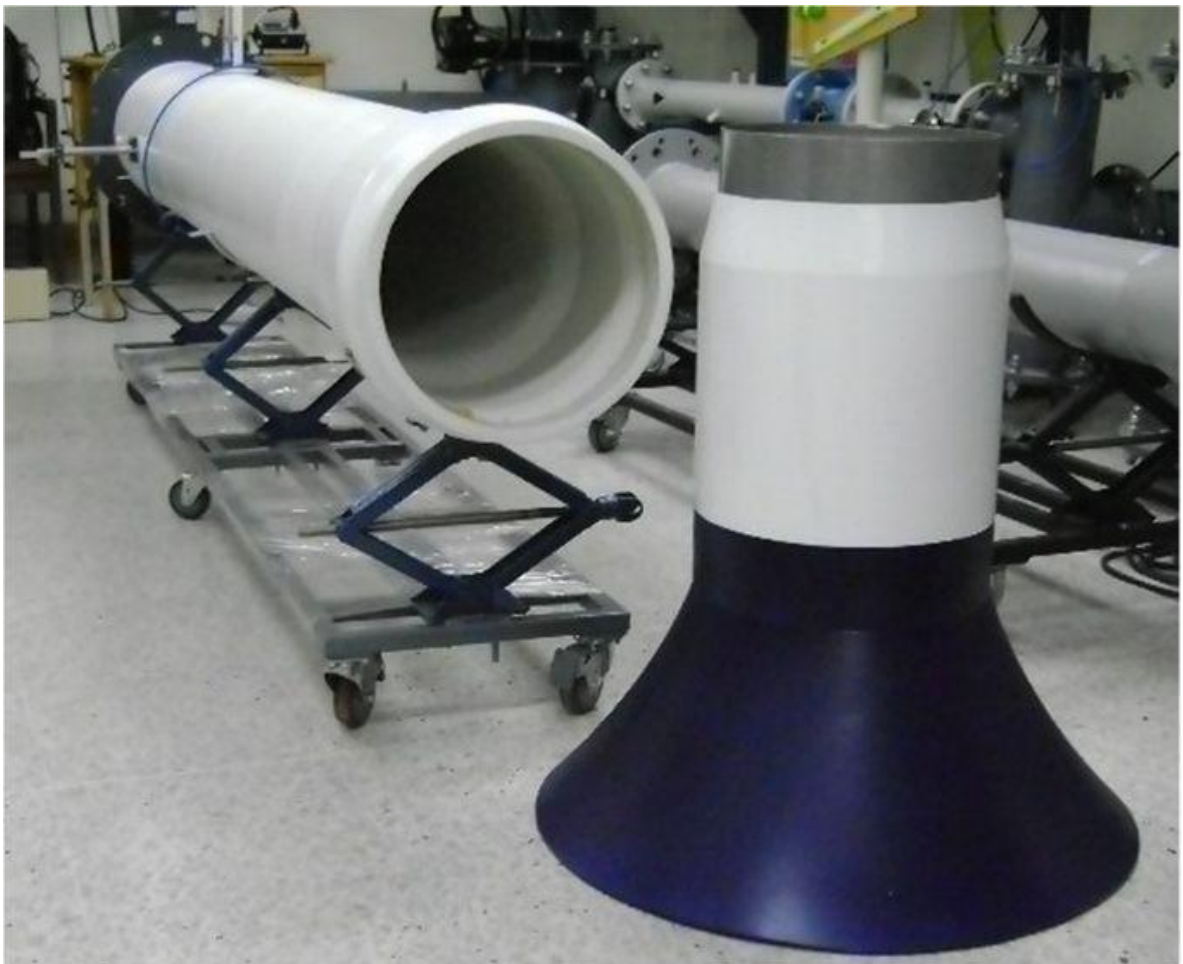


Figura 54. Ensamble Final de la instalación en el laboratorio



Fuente: Autor

6. PUESTA A PUNTO

Con el objetivo de cumplir con los requerimientos del perfil de velocidades y de construcción se realizó una verificación dimensional del diámetro nominal de la instalación y de la rugosidad de la superficie de PVC.

Con el perfil de velocidades obtenido con la caracterización, se determina cual es la velocidad media y el punto en el cual se desarrolla, esto se debe, a que con la velocidad media del perfil desarrollado se tiene que realizar la calibración del patrón de trabajo. Los resultados obtenidos permiten calibrar el patrón de trabajo y tener un patrón operable para medidores de velocidad de aire.

6.1 VERIFICACIÓN DIMENSIONAL

Para la verificación dimensional del diámetro de la sección de entrada y de la sección de pruebas se uso un instrumento de medición debidamente calibrado como lo es el micrómetro tubular de interiores Marca Mitutoyo (ver figura 55).

Figura 55. Micrómetro Tubular



Fuente: Corporación CDT de GAS

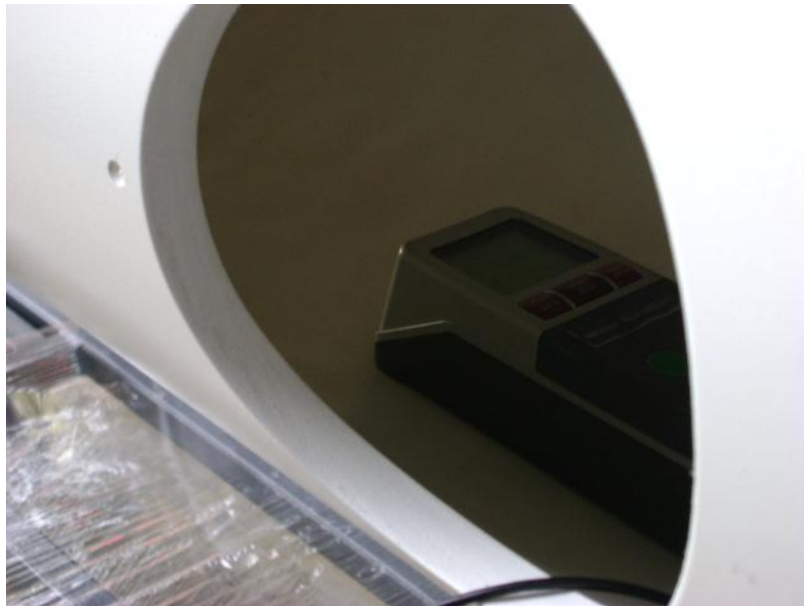
Se verificó que el diámetro nominal es de 290mm en la entrada y en la sección de ensayos, cumpliendo así, con las especificaciones generales realizadas en los planos de construcción.

6.2 PRUEBAS DE RUGOSIDAD

La confirmación de la rugosidad en la instalación es importante para garantizar, que el PVC es una superficie lisa, debido a que una superficie lisa permite la formación de un perfil de velocidades con una menor capa límite.

La rugosidad obtenida en dos puntos internos diferentes de la instalación es menor de 80 micro-pulgadas. El equipo utilizado en la corporación es el rugosímetro Mitutoyo SJ- 201P (ver figura 56).

Figura 56. Rugosímetro



Fuente: AUTOR

Figura 57. Medición de Rugosidad en la superficie de la sección de Pruebas



Fuente: Autor

6.3 CALIBRACIÓN DEL PATRÓN DE TRABAJO

Para la calibración del patrón de trabajo primero se realiza una caracterización del perfil de velocidad, esto se hace para obtener el lugar más óptimo en el cual se debe ubicar el pitot estándar y los medidores de velocidad bajo prueba (MUT).

6.3.1 Caracterización del perfil de velocidad

La principal consideración para caracterizar el perfil de velocidad de flujo de aire en la sección de pruebas, es la sensibilidad que él posee en las aplicaciones vistas en el capítulo dos en la medición de velocidad de aire.

Las siguientes son las características que presenta el perfil de velocidad en la instalación que se desarrollo en el presente proyecto:

- Se presenta un régimen de flujo turbulento con bajo número de Reynolds menores a 400000 para cada velocidad (ver tabla 8).

Tabla 8. Caracterización del perfil de velocidad

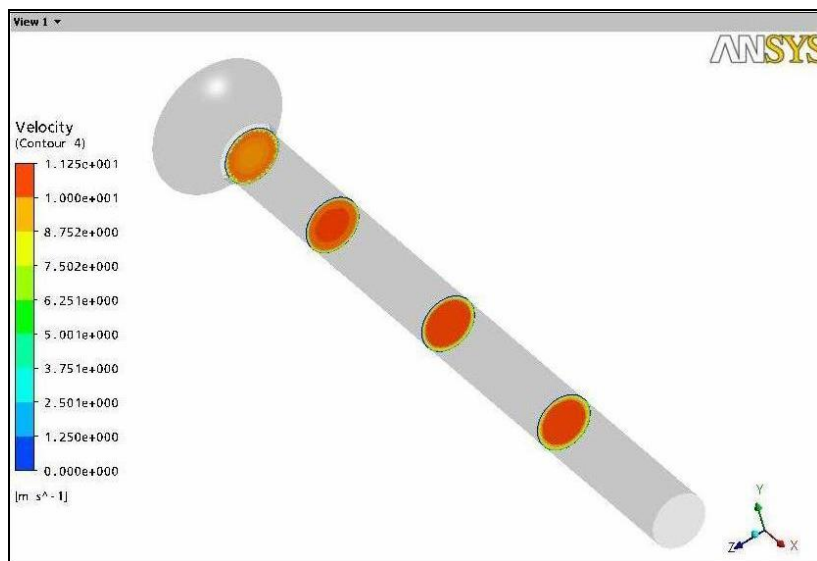
| Patrón de Referencia | Inmersión | Vel pitot [m/s] | R Vp/Vmax | ρ [kg/m ³] | Re | Posición [mm] | Mach |
|---|-----------|-----------------|-----------|-----------------------------|-----------|---------------|---------|
| Vprom a un caudal de 1000m ³ /h en el Banco de Alto Caudal | 1 | 4,65 | 1 | 1,067 | 79939,2 | 145 | 0,01368 |
| | 2 | 4,628 | 0,9953 | 1,068 | 79628,7 | 100 | 0,01361 |
| | 3 | 4,59 | 0,987 | 1,069 | 79023,9 | 75 | 0,0135 |
| | 4 | 4,49 | 0,9656 | 1,069 | 77326,5 | 50 | 0,01321 |
| | 5 | 4,1268 | 0,8875 | 1,069 | 71045,6 | 25 | 0,01214 |
| Vprom a un caudal de 1400m ³ /h en el Banco de Alto Caudal | 1 | 6,482 | 1 | 1,07 | 111379,13 | 145 | 0,01906 |
| | 2 | 6,443 | 0,994 | 1,07 | 110665,11 | 100 | 0,01895 |
| | 3 | 6,356 | 0,9807 | 1,07 | 109154,33 | 75 | 0,01869 |
| | 4 | 6,239 | 0,9625 | 1,07 | 107113,6 | 50 | 0,01835 |
| | 5 | 5,735 | 0,8847 | 1,07 | 98402,5 | 25 | 0,01687 |
| Vprom a un caudal de 1850m ³ /h en el Banco de Alto Caudal | 1 | 8,6 | 1 | 1,07 | 147782,05 | 145 | 0,02529 |
| | 2 | 8,489 | 0,9871 | 1,07 | 145809,83 | 100 | 0,02497 |
| | 3 | 8,407 | 0,9776 | 1,07 | 144372,46 | 75 | 0,02473 |
| | 4 | 8,214 | 0,9551 | 1,07 | 141020,34 | 50 | 0,02416 |
| | 5 | 7,639 | 0,8883 | 1,07 | 131088,39 | 25 | 0,02247 |
| Vprom a un caudal de 1000m ³ /h en el Banco de Alto Caudal | 1 | 10,72 | 1 | 1,07 | 184203,09 | 145 | 0,03153 |
| | 2 | 10,612 | 0,99 | 1,07 | 182281,04 | 100 | 0,03121 |
| | 3 | 10,551 | 0,9843 | 1,07 | 181194,91 | 75 | 0,03103 |
| | 4 | 10,437 | 0,9736 | 1,07 | 179192,91 | 50 | 0,0307 |
| | 5 | 9,669 | 0,902 | 1,07 | 165910,39 | 25 | 0,02844 |
| Vprom a un caudal de 2800m ³ /h en el Banco de Alto Caudal | 1 | 12,674 | 1 | 1,07 | 217781,4 | 145 | 0,03728 |
| | 2 | 12,533 | 0,9889 | 1,07 | 215269,37 | 100 | 0,03686 |
| | 3 | 12,399 | 0,9783 | 1,07 | 212924,89 | 75 | 0,03647 |
| | 4 | 12,322 | 0,9722 | 1,07 | 211554,46 | 50 | 0,03624 |
| | 5 | 11,486 | 0,9063 | 1,07 | 197088,55 | 25 | 0,03378 |
| Vprom a un caudal de 3750m ³ /h en el Banco de Alto Caudal | 1 | 16,941 | 1 | 1,07 | 291106,92 | 145 | 0,04983 |
| | 2 | 16,824 | 0,9931 | 1,07 | 288978,34 | 100 | 0,04948 |
| | 3 | 16,786 | 0,9909 | 1,07 | 288256 | 75 | 0,04937 |
| | 4 | 16,827 | 0,9933 | 1,07 | 288901,09 | 50 | 0,04949 |
| | 5 | 15,807 | 0,9331 | 1,07 | 271247,67 | 25 | 0,04649 |
| Vprom a un caudal de 4500m ³ /h en el Banco de Alto Caudal | 1 | 18,484 | 1 | 1,07 | 317619,95 | 145 | 0,05436 |
| | 2 | 18,522 | 1,0021 | 1,07 | 318155,35 | 100 | 0,05448 |
| | 3 | 18,463 | 0,9989 | 1,07 | 317056,75 | 75 | 0,0543 |
| | 4 | 18,412 | 0,9961 | 1,07 | 316120,39 | 50 | 0,05415 |
| | 5 | 17,829 | 0,9646 | 1,07 | 305929,6 | 25 | 0,05244 |

- El mayor número de Mach (ver tabla 8) que se puede establecer en la sección destinada para los ensayos es de aproximadamente 0.05, lo que

permite considerar el flujo como subsónico, esto se debe, a que en la región de pruebas se trabaja en un rango de baja velocidad.

- El flujo en la sección de ensayos (SW) se considera homogéneo. Esta consideración se encuentra respaldada en la construcción del tipo colmena (HC), de la contracción seleccionada como sección de entrada y de los cinco diámetros nominales existentes entre el HC y la SW.
- Para la construcción del perfil se considera un flujo axisimétrico. Ya que experimentalmente en la sección de pruebas se va evaluar el perfil desde la superficie del tubo hasta el eje axial de la sección de referencia, es decir desde una distancia cero hasta 145mm. Igualmente, considerando que en el perfil se obtienen anillos de igual velocidad concéntricos a la superficie de la sección de pruebas, tal como se puede observar en la simulación que se realizó en el software de ANSYS.

Figura 58. Perfil de Velocidad



Para la caracterización del perfil y la determinación de la velocidad media, se realizaron cinco inmersiones con el pitot estándar en la sección de pruebas

para cada una de las siguientes velocidades 4m/s, 6m/s, 8m/s, 10 m/s, 12 m/s.

En cada inmersión se realizaron tres repeticiones de 60 muestras por segundo como lo señala la ISO 10780 [6]. Se procedió a calcular la desviación estándar de los datos obtenidos y, al multiplicar por 2 este valor, se obtuvo un intervalo que permitió realizar una filtración de los datos que se encontraron fuera de este límite.

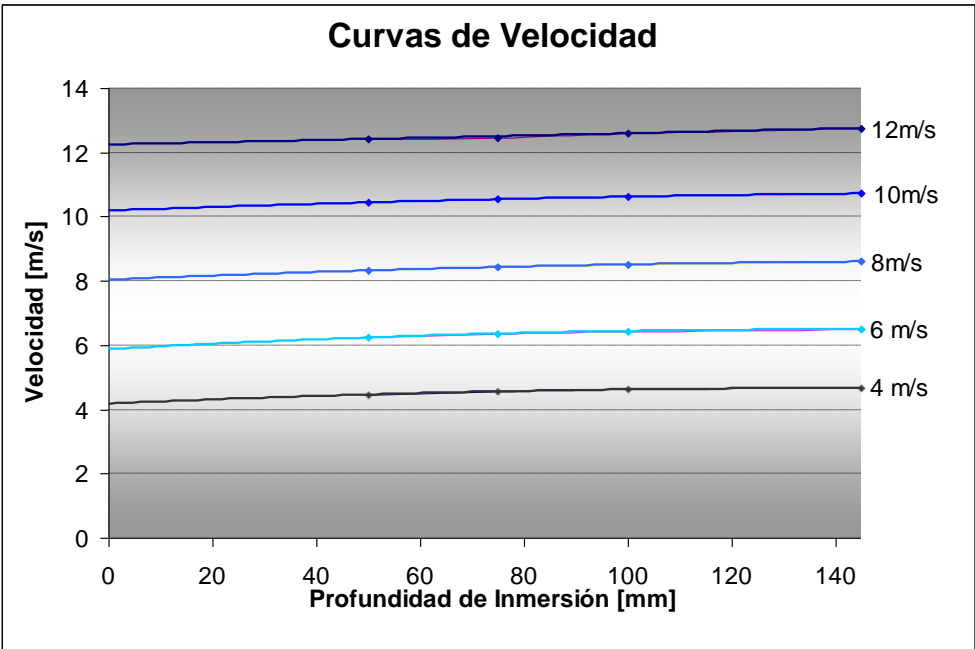
Con los Datos obtenidos después de las correcciones necesarias se obtuvo un promedio de las muestras para cada repetición. Los datos que se utilizaron para determinar el promedio de cada repetición, abarcando aproximadamente el 95% de confianza

Para cada inmersión se tendrá un valor igual al promedio de las tres repeticiones. Con los valores representativos de cada inmersión, se obtuvo la curva para cada velocidad. Como se puede observar en la gráfica, el perfil tiende a describir una curva clásica de flujo turbulento a bajos números de Reynolds, desde la pared del tubo en la sección de referencia hacia el centro de la misma (profundidad de inmersión).

Para velocidades mayores de 12 [m/s] (ver figura 60) se obtuvieron resultados que demuestran que el efecto de la capa límite producida en la pared del tubo de la sección de pruebas, no permite obtener un perfil de velocidades con simetría en razón a que en la sección de entrada se generó una *vena contracta*, es decir, una contracción de la sección del perfil de flujo que no es corregible con tan pocos diámetros hasta llegar a la sección de prueba. Este efecto se debe a las limitaciones de manufactura que se existen en el país para la realización de la sección de entrada, la curva de la

contracción no reproduce una elipse con la exactitud exigida por norma AMCA 210/85 (ver Anexo 2) y por lo cual, el flujo no ingresa a la instalación totalmente tangencial a la superficie. Este efecto se evidencia en perfiles de velocidades mayores a 12 [m/s] y por consiguiente, para la calibración del patrón de trabajo, se caracterizó el perfil con las curvas reproducidas desde [4 m/s] hasta 12 [m/s].

Figura 59. Descripción del perfil de velocidad.



Para 12 m/s

$$y = 0.000002x^2 + 0.0032x + 12.247$$

$$R2 = 0.97733$$

Para 12 m/s

$$y = -0.00002x^2 + 0.00586x + 10.1857$$

$$R2 = 0.99476$$

Para 12 m/s

$$y = -0.00002x^2 + 0.00671x + 8.03675$$

$$R2 = 0.99816$$

Para 12 m/s

$$y = -0.00003x^2 + 0.00899x + 5.87036$$

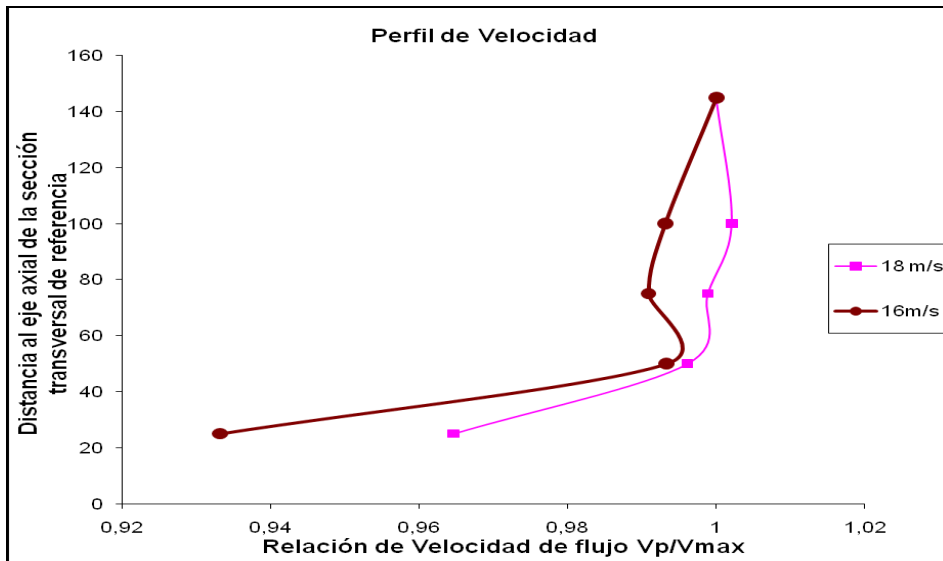
$$R2 = 0.99950$$

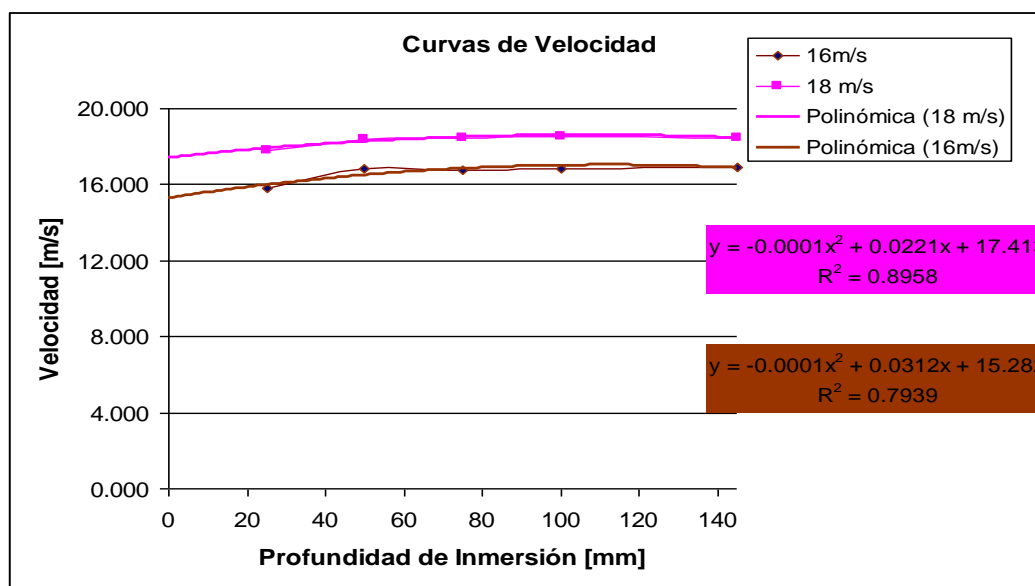
Para 12 m/s

$$y = -0.00003x^2 + 0.00695x + 4.17676$$

$$R2 = 0.99858$$

Figura 60. Descripción del perfil de velocidad de 12m/s hasta 18m/s.





Luego de obtener un rango velocidad de operación, en donde el perfil de velocidad de aire en el ducto es uniforme, se obtuvo la posición en la cual se ubicó el patrón de trabajo para la calibración, a partir de los criterios descritos a continuación:

- Determinar con las ecuaciones de Miller (ver numeral), un valor estimativo que permita obtener la velocidad media para cada una de las cinco curvas descritas en la figura (ver tabla 9).

Tabla 9. Valor Estimado de la velocidad media según Miller.

| Caudal [m ³ /h] | n | y [mm] | %E | Velocidad media [m/s] |
|----------------------------|---------|----------|----------|-----------------------|
| 1000 | 8.13958 | 34.75449 | 0.26392 | 4.50219 |
| 1400 | 8.28839 | 34.71280 | 0.14364 | 6.27111 |
| 1850 | 8.50608 | 34.65435 | -0.02497 | 8.32711 |
| 2800 | 8.66499 | 34.61349 | -0.14286 | 10.38738 |
| 3440 | 8.79991 | 34.57991 | -0.23972 | 12.36790 |

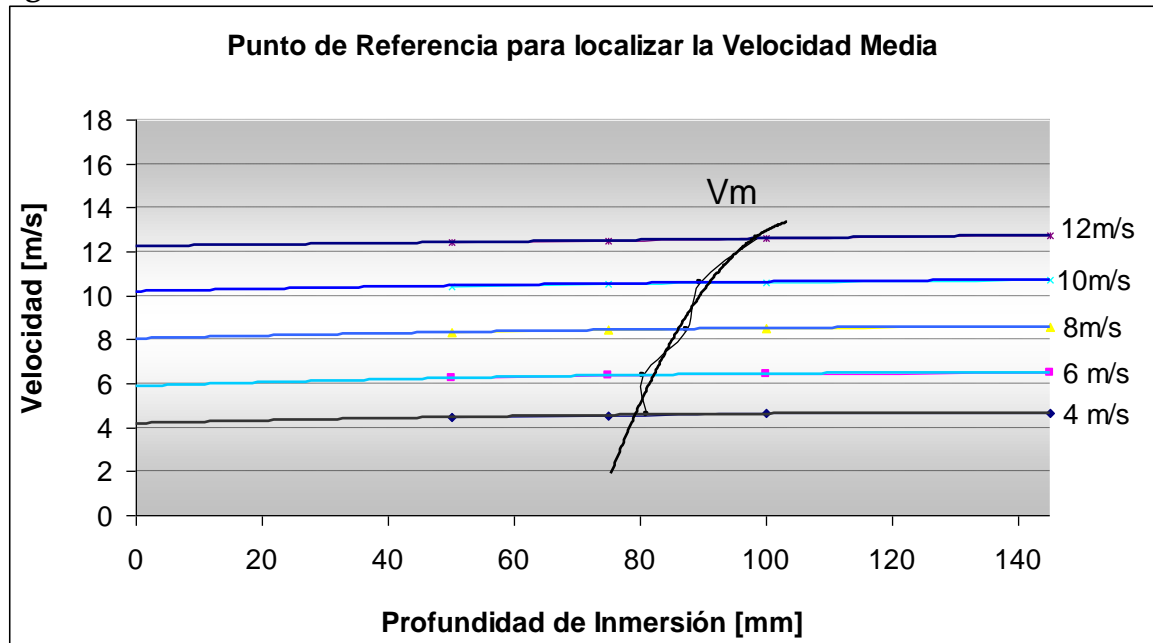
- Observando los valores anteriores se realizó un proceso de interpretación de las curvas de velocidad, se localizó un punto fijo en a una profundidad determinada con respecto a la pared del ducto, con base en cada una de las ecuaciones de las curvas del perfil de velocidad (ver figura 61), y así, se obtiene la velocidad media en cada perfil de velocidad.

Tabla 10. Valor Estimado de la velocidad media según las ecuaciones de las curvas dadas en la figura 59.

| Perfil de Velocidad | V media | Punto ref. |
|---------------------|----------|------------|
| Perfil 1 | 4.574549 | 80.90184 |
| Perfil 2 | 6.38056 | 80.41488 |
| Perfil 3 | 9.206019 | 95.68905 |
| Perfil 4 | 10.59309 | 89.50163 |
| Perfil 5 | 12.583 | 98.43338 |
| Promedio | | 88.988156 |

- El valor seleccionado para ubicar el patrón de trabajo es a 90 milímetros de la superficie de la sección de referencia.

Figura 61. Selección de la velocidad media.



- Luego de seleccionar el punto donde se concluyó va estar la velocidad media del aire, se realizó una curva de corrección por velocidad para la ubicación del patrón, y así, proceder a obtener los valores de K (ver Anexo 5) coeficiente del pitot estándar, el cual, es el resultado de la calibración del pitot estándar o patrón de trabajo.

6.3.2 Calibración

Conociendo la ubicación para el patrón de trabajo, y la contribución de cada una de las magnitudes de entrada que influyen en el valor del mensurando (ver numeral 3.3.2) para la calibración del patrón de trabajo, se obtuvieron los siguientes datos de K con las plantillas respectivas, para las velocidades dadas con anterioridad.

Los siguientes son los datos registrados en la prueba realizad el 28/01/2010.

Tabla 11. Datos de la calibración e Incertidumbre del Mensurando
Para 1000 m³/h

| Punto 1 | Magnitud | Símbolo | Valor | Unidades |
|------------|----------------------------|------------------|---------|-------------------|
| | Diferencial de Presión | ΔP_{STD} | 11.496 | Pa |
| | Densidad Patrón de Trabajo | ρ_{STD} | 1.06549 | kg/m ³ |
| | Diámetro | DSP | 0.29 | m |
| | Caudal Másico en el Patrón | $Q_{m PR}$ | 0.29126 | m ³ /s |
| | Resultado de la medición | K | 0.89092 | NA |
| | Incertidumbre Total | U | 0.0687 | NA |
| | Incertidumbre relativa | U _i | 7.707 | % |

Para 1400m³/h

| Punto 2 | Magnitud | Símbolo | Valor | Unidades |
|------------|----------------------------|------------------|---------|-------------------|
| | Diferencial de Presión | ΔP_{STD} | 21.365 | Pa |
| | Densidad Patrón de Trabajo | ρ_{STD} | 1.06642 | kg/m ³ |
| | Diámetro | DSP | 0.29 | m |
| | Caudal Másico en el Patrón | $Q_{m PR}$ | 0.40008 | m ³ /s |
| | Resultado de la medición | K | 0.897 | NA |
| | Incertidumbre Total | U | 0.0390 | NA |
| | Incertidumbre relativa | U _i | 4.341 | % |

Para 1850 m³/h

| Punto 3 | Magnitud | Símbolo | Valor | Unidades |
|------------|----------------------------|----------------|---------|-------------------|
| | Diferencial de Presión | ΔP STD | 38.202 | Pa |
| | Densidad Patrón de Trabajo | ρ STD | 1.06837 | kg/m ³ |
| | Diámetro | DSP | 0.29 | m |
| | Caudal Másico en el Patrón | Q_m PR | 0.54055 | m ³ /s |
| | Resultado de la medición | K | 0.906 | NA |
| | Incertidumbre Total | U | 0.0226 | NA |
| | Incertidumbre relativa | U_i | 2.493 | % |

Para 2340 m³/h

| Punto 4 | Magnitud | Símbolo | Valor | Unidades |
|------------|----------------------------|----------------|---------|-------------------|
| | Diferencial de Presión | ΔP STD | 59.672 | Pa |
| | Densidad Patrón de Trabajo | ρ STD | 1.06952 | kg/m ³ |
| | Diámetro | DSP | 0.29 | m |
| | Caudal Másico en el Patrón | Q_m PR | 0.67687 | m ³ /s |
| | Resultado de la medición | K | 0.907 | NA |
| | Incertidumbre Total | U | 0.0159 | NA |
| | Incertidumbre relativa | U_i | 1.749 | % |

Para 2800 m³/h

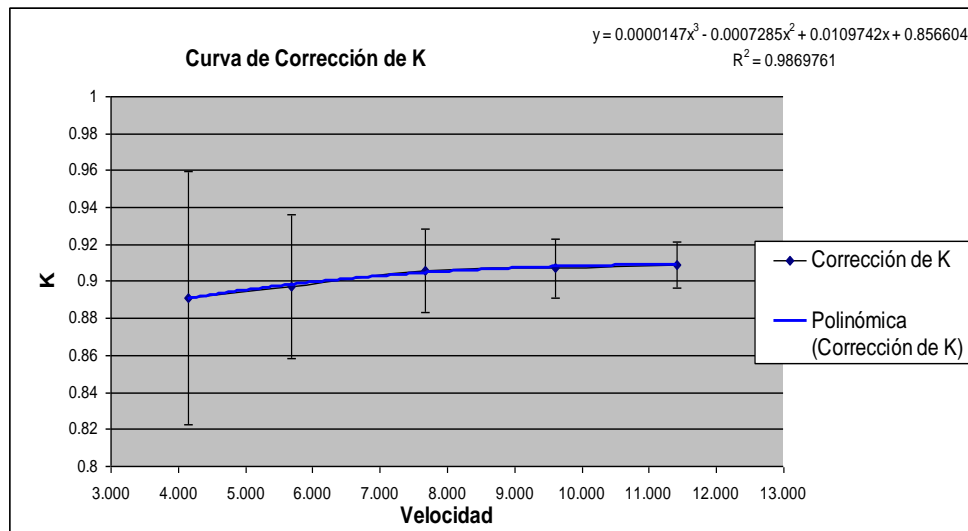
| Punto 5 | Magnitud | Símbolo | Valor | Unidades |
|------------|----------------------------|----------------|---------|-------------------|
| | Diferencial de Presión | ΔP STD | 84.116 | Pa |
| | Densidad Patrón de Trabajo | ρ STD | 1.06905 | kg/m ³ |

| | | | |
|----------------------------|-------|---------|-------------------|
| Trabajo | | | |
| Diámetro | DSP | 0.29 | m |
| Caudal Masico en el Patrón | Qm PR | 0.80527 | m ³ /s |
| Resultado de la medición | K | 0.909 | NA |
| Incertidumbre Total | U | 0.0127 | NA |
| Incertidumbre relativa | Ui | 1.398 | % |

Se obtuvo un coeficiente K de 0.9 para el patrón de trabajo, el cual es corregido con una curva de velocidad, obteniéndose incertidumbres menores al 10%, para un factor de cobertura igual a 2 (k=2).

Para el caso actual, la curva de calibración (o curva característica o de desempeño) es un grafico que muestra la forma en que el desempeño de un medidor varia con la velocidad, o con el numero de Reynolds.

Figura 62. Curva de Calibración



Luego el valor corregido de Kc es:

$$K_C = K - \left(\frac{K}{K_C} \right)_{\text{grafica}} \quad \text{EC. 38}$$

Donde el valor de ajuste es:

$$Y = 0.0000147x^3 - 0.0007285x^2 + 0.0109742x + 0.8566044 \quad \text{EC. 39}$$

Los resultados obtenidos en la calibración se garantizan con:

- Por la cadena de trazabilidad de la medición realizada por el patrón de trabajo (mostrada en el numeral 4.3 Figura 20).
- Por la excelente repetibilidad de los resultados obtenidos en la caracterización del perfil de velocidad y en la calibración del patrón de trabajo.
- El diseño de la facilidad tecnológica es confiable y permite obtener el régimen de flujo esperado.
- Por la validación del modelo matemático realizada por el CDT de GAS para la calibración del Pitot estándar.

7. CONCLUSIONES

- Se observó que el modelo matemático basado en el principio de conservación de la masa permitió calibrar el medidor patrón de trabajo, tipo tubo pitot estándar con los patrones volumétricos tipo turbina del banco de alto caudal.
- El banco de medidores de velocidad de aire se caracterizó para operar en un alcance de velocidad de 4 m/s a 12 m/s.
- A partir de la información obtenida se observó que el perfil sufre una variación en el perfil a velocidades mayores de 12 m/s, causada por que la contracción no describe la curva según la norma AMCA 210/85, debido a las limitaciones que presenta la industria para el desarrollo de este tipo de manufactura.
- El diseño de la propuesta para el sistema de adquisición de datos SAD, permite controlar de manera independiente el caudal generado por los Blowers del Banco de Alto Caudal, el estado de instrumentos del Banco y el proceso de calibración.
- El desarrollo del SAD se realizó en conjunto con el grupo de profesionales de la Corporación CDT de GAS.
- Se obtuvo un coeficiente K de 0.9 para el patrón de trabajo, el cual es corregido con una curva de velocidad, obteniéndose incertidumbres menores al 10%, para un factor de cobertura igual a 2 ($k=2$).
- Se demostró que el vínculo existente entre el CDT de GAS y la Universidad Industrial de Santander permite el crecimiento y el progreso continuo de la región.

8. RECOMENDACIONES

- Para obtener un perfil de velocidades óptimo para calibrar medidores de velocidad de aire en el rango de 12 m/s hasta 18 m/s, se recomienda contratar manufactura extranjera y de alta calidad para desarrollar una sección de entrada que logre describir la curva de la contracción como se encuentra en la norma AMCA 210/85. Otra forma de solucionar este efecto, es extender la sección recta desde la entrada del túnel hasta la sección de pruebas con el fin de permitir la recuperación del perfil.
- Para efectos de las calibraciones se recomienda independizar la instalación del Banco de Alto Caudal, para que este opere con un ventilador axial, con la misma capacidad de generación de caudal volumétrico y se mantenga el rango de velocidad de operación.
- Los instrumentos para la medición de la presión diferencial que acompañan a los medidores bajo prueba deberán tener un alcance de medición y resolución adecuado, teniendo en cuenta que los valores obtenidos de presión diferencial son muy pequeños.
- Se recomienda el uso de un soporte de apoyo para evitar la vibración del patrón de trabajo cuando se realicen pruebas a más de 12 m/s.
- Iniciar estudios de tecnologías emergentes para la medición de velocidad de aire, que le permitirán a la facilidad tecnológica tener en un futuro su propio patrón de referencia trazable a la BIPM.

BIBLIOGRAFIA

1 MILLER, Richard. Flow Measurement Engineering Handbook. MC Graw Hill, Third Edition, Capitulo 5, pag 5.5.

2 FUNDAMENTOS DE METROLOGÍA APLICADOS A LA MEDICIÓN DE FLUIDOS. Corporación CDT de GAS.

3 NORMA TECNICA COLOMBIANA. NTC 2194, Vocabulario de Terminos Básicos y Generales en Metrología, (Segunda Actualización).

4 VIM. Vocabulario Internacional de Medida, Conceptos Fundamentales y Generales , y Términos Asociados.

5 BARLOW J.B., POPE W.H. and POPE Alan, Low-speed Wind Tunnel Testing 3rd. edition - Edit. John Wiley and Sons. 1999

6 ISO 10780. Stationary Source emissions - Measurement of velocity and volume flowrate of gas streams in ducts, 2006.

7 R.D. Mehta and P. Bradshaw, Wind tunnel design. [www-
htgl.stanford.edu/Bradshaw/tunnel/](http://www.htgl.stanford.edu/Bradshaw/tunnel/)

8 Norma EPA, Method 2 - Velocity - S-type Pitot, www.epa.gov/ttn/emc/methods/method2.html

9 MEHTA R.D. y BRADSHAW P, Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels", Aero. Journal (Royal Aeronautical Society), Vol. 73, p. 443 (1979)

10 HINRICHSEN, Ricardo. Diseño de un túnel de viento ultra laminar de velocidad controlable. Universidad de Chile. 2001.

WIGELAND Roald, TAN-ATICHAT Jimmy y NAGIB Hassan. Evaluation of a new concept for reducing free-stream turbulence in wind tunnels. NASA. 1971.

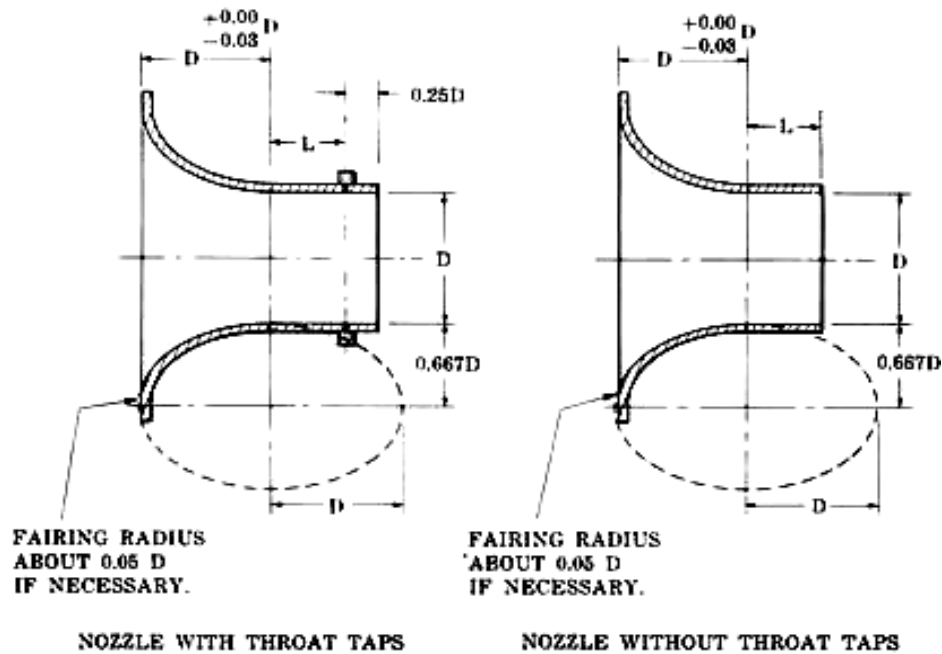
11 CAMACHO, Jaime Alberto. Rector UIS. LINEAMIENTOS GESTIÓN RECTORAL 2006 – 2009. Bucaramanga, 11 de septiembre de 2006.

12 Wind Tunnel Index, www.grc.nasa.gov/.../wandering_windtunnel.html

13 LOEHRKE R.I. and NAGIB H.M. Experiments on Management of Free-Stream Turbulence, AGARD REPORT No. 598.

14 NPL REPORT. Dq1- as 022. A Study of the Measurement Issues Associated with the Monitoring of Gaseous Emissions from Industrial Plants.

ANEXO 2. NORMA AMCA 210/85. Laboratory Methods of Testing Fans for
Aerodynamic Performance Rating




NOTES

1. Nozzle throat dimension L shall be either $0.6D \pm 0.005D$ (recommended) or $0.5D \pm 0.005D$.
2. Nozzle shall have elliptical section as shown. Two and three radii approximations to the elliptical form that do not differ at any point in the normal direction more than $1.5\% D$ from the elliptical form may be used. The outlet edge of the nozzle shall be square, sharp, and free from burrs, nicks or roundings.
3. The nozzle throat shall be measured (to an accuracy of $0.001 D$) at the minor axis of the ellipse and the nozzle exit. At each place, four diameters—approximately 45° apart must be within $\pm 0.002 D$ of the mean. At the entrance to the throat the mean may be $0.002 D$ greater, but no less than the mean at the nozzle exit.
4. The nozzle surface shall fair smoothly so that a straight-edge may be rocked over the surface without clicking and the surface waves shall not be greater than $0.001 D$ peak to peak.
5. When nozzles are used in a chamber, either of the types shown above may be used. Where a nozzle discharges directly to a duct, nozzles with throat taps shall be used, and the nozzle outlet should be flanged.
6. Throat tap nozzles shall have four static pressure taps 90° apart connected to a piezometer ring.

Figure 4 Nozzles

ANEXO 3. TRANSMISOR DE TEMPERATURA

| FICHA TÉCNICA DEL INSTRUMENTO N° 458 | | | | | |
|--|---|---|---|--|-------------|
| Nombre del instrumento: <i>RTD + Transmisor Pt 100 Programable</i> | |  | | | |
| Marca <i>PYROMATION INC.</i> | Modelo <i>Serie 450 Programable</i> | | | | |
| Serie <i>No posee</i> | Referencia <i>R3T185L384 04 - 00 - 45, T- 450 - 00</i> | | | | |
| Código | Catálogo <i>Biblioteca Banco Alta</i> | | | | |
| MME <i>No posee</i> | | | | | |
| Planos <i>No posee</i> | Software <i>TransComm Light. Versión 1.0.8.0</i> | | | | |
| Fabricante <i>PYROMATION INC.</i> | <i>1901 commercial Harvey Louisiana 70058</i> <small>Giroscópico</small> | <i>(260)4842580</i> <small>Fax</small> | www.pyromation.com <small>Web</small> | | |
| Distribuidor <i>Técnicos Andinos Industriales Ltda</i> | <i>Calle 60 No. 9ª-31(Bogotá)</i> <small>Giroscópico</small> | <i>3476494</i> <small>Fax</small> | tecnicosandinos@tecnicosandinos.com <small>E-mail</small> | | |
| Descripción general <i>Transmisor de temperatura serie 450 programable. Formado por un conjunto integral de un sensor RTD de 4 hilos R100 y un transmisor de 4 a 20mA.</i> | | | | | |
| Fecha adquisición | 22 <small>Día</small> | 01 <small>Mes</small> | 08 <small>Año</small> | Fecha instalación | Día Mes Año |
| Ubicación <i>Banco de Alto Caudal (MM 1,2).</i> | | | Garantía <i>1 año</i> | | |
| - | - | <i>3/16" OD</i> <small>Ancho</small> | <i>4 pulg</i> <small>Largo</small> | <i>-51° C - 160° C</i> <small>Capacidad</small> | |
| Instrumentos adicionales <i>Cable de conexión 4-20mA</i> <i>Interface para programar a través del software transComm Light.</i> | | | | | |
| Magnitud <i>Temperatura</i> | Rango de operación <i>0° C - 40° C</i> | | Unidad de medida <i>° C</i> | | |
| Clase <i>Transmisor ±0,1 °C</i> <i>RTD ±0.03% a 0 °C</i> | Incertidumbre <i>0,05</i> | | Escala mínima <i>0,001 °C</i> | | |
| SISTEMAS Eléctrico <input type="checkbox"/> Electrónico <input checked="" type="checkbox"/> Neumático <input type="checkbox"/> Hidráulico <input type="checkbox"/> Mecánico <input type="checkbox"/> Otros <input type="checkbox"/> | | | | | |
| Características <i>Corriente Inducida Requerida ≤ 3.5 mA</i> <i>Límite de corriente ≤ 23 mA</i> <i>Error por medida electrónica 0.1°C</i> <i>α = 0.00385 °C⁻¹</i> | | | | | |
| Observaciones <i>Este instrumento posee un transmisor de corriente 4 a 20mA, programado a través del software TransComm Light. En el software se debe escoger como tipo de unidad "Serie 450 programable integral temperatura transmitter". En él se configuran los límites del alcance de medición, la unidad de temperatura (°C o °F), las características de la señal de salida (4 a 20mA o 20 a 4mA) y en caso de una desviación uniforme en todo el alcance de medición es posible ajustarlo a través del campo etiquetado como "offset", sumando o restando valores entre -9.9 y 9.9°C.</i> | | | | | |

ANEXO 4. TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL (607-3 range de 0-1in Agua)

BULLETIN E-76



SERIES 607 DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER

Specifications- Installation and Operating Instructions

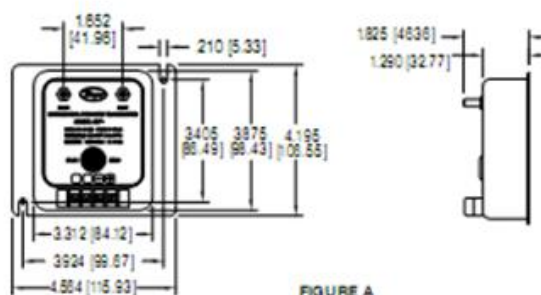


FIGURE A

Description

The Dwyer Series 607 Differential Pressure Transmitter converts positive, negative (vacuum) or differential pressures of clean, dry air or other non-conductive, non-corrosive gases into a standard two wire, 4-20 mA output signal. Several factory calibrated models are available with ranges from 0-.10" W.C. to 0-25" W.C. All models employ a variable capacitance transducer with a micro-machined, ultra thin silicon diaphragm enabling precision measurement and control of very low pressures. Because no epoxies or other organics are used to seal the sensor, performance is exceptionally stable and drift free. It is also highly resistant to overpressure, shock and vibration. See specifications for complete details.

SPECIFICATIONS

GENERAL

Maximum Pressure: 10 psig (0.7kg/cm).
Media Compatibility: Air and non-conduction, non-corrosive gases.

ELECTRICAL

Power Supply: 12-36 VDC, unregulated.
Output Signal: 4-20 mA DC, two wire.
Loop Resistance: 0-1000 ohms
 $V_{min.} = 12V - (I_{0.022A})(R_L)$
Warm-up Time: 15 seconds.

PERFORMANCE AT 70° F.

Output at zero: 4 mA.
Output at full span: 20 mA.
Stability: ±0.5% of full span/year.
Response Time: 250 msec.

TEMPERATURE LIMITS

Operating: -20 to 160°F (-29 to 71°C), 10-95% RH, non-condensing.
Compensated: 35 to 135°F (2 to 57°C).
Storage: -40 to 180°F (-40 to 82°F).
Thermal Effects: ±0.015% F.S./°F (zero and span).

MECHANICAL

Housing: 300 Series stainless steel (NEMA 2).
Pressure Connections: 1/4" barbed stainless steel.
Weight: 14 oz (397 g).
Span and Zero: Factory set to specified range. Externally accessible, non-interactive, ±10% F.S. adjustment.

SERIES 607 TRANSMITTER MODELS & RANGES

Accuracy ±0.5% of Full Scale *

| Model Number | Range in w.c. | Model Number | Range in w.c. |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 607-0 | 0-.10 | 607-9 | 0-2.5 |
| 607-1 | 0-.25 | 607-0B | .10-0-.10 |
| 607-2 | 0-.50 | 607-1B | .25-0-.25 |
| 607-3 | 0-1.0 | 607-2B | .50-0-.50 |
| 607-4 | 0-2.0 | 607-3B | 1.0-0-1.0 |
| 607-7 | 0-5.0 | 607-4B | 2.0-0-2.0 |
| 607-8 | 0-10 | 607-7B | 5.0-0-5.0 |

Accuracy ±0.25% of Full Scale *

| Model Number | Range in w.c. | Model Number | Range in w.c. |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 607-01 | 0-.10 | 607-21 | 0-.50 |
| 607-11 | 0-.25 | 607-71 | 0-5.0 |

* Includes Linearity, Hysteresis, and Repeatability

**ANEXO 5. PLANTILLAS PARA DETERMINA EL CAUDAL MÁSIICO QM
Y EL FACTOR K.**

Para la primera velocidad en un punto de caudal de 1000 m³/h.

$$Q_m = \sum(Qv_{MM} \times \rho_{MM})$$

| Magnitud | Símbolo | Valor | | Tipo Distribución | Inc. Estándar | |
|--|---------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Densidad MM3 | ρ1 | 104.824 | kg/m ³ | Normal | 0.00136 | kg/m ³ |
| Densidad MM4 | ρ2 | 106.301 | kg/m ³ | Normal | 0.00137 | kg/m ³ |
| Densidad MM5 | ρ3 | 106.273 | kg/m ³ | Normal | 0.00138 | kg/m ³ |
| Caudal Volumetric o MM3 | Qv1 | 0.278 | m ³ /s | Normal | 0.0008 | m ³ /s |
| Caudal Volumetric o MM4 | Qv2 | 0.000 | m ³ /s | Normal | 0.0000 | m ³ /s |
| Caudal Volumetric o MM5 | Qv3 | 0.000 | m ³ /s | Normal | 0.0000 | m ³ /s |
| | Coef. Sensibilidad | Contribución | Cuadrado de la contribución | | Porcentaje de contribución | |
| Densidad MM3 | 0.278 | m ³ /kg | 3.78E-04 | 1.43E-07 | 15.755 | |
| Densidad MM4 | 0.000 | m ³ /kg | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.000 | |
| Densidad MM5 | 0.000 | m ³ /kg | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.000 | |
| Caudal Volumetric o MM3 | 1.048 | s/m ³ | 8.75E-04 | 7.65E-07 | 84.245 | |
| Caudal Volumetric o MM4 | 1.063 | s/m ³ | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.000 | |
| Caudal Volumetric o MM5 | 1.063 | s/m ³ | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.000 | |
| | | | | Valor | Contribución % | |
| Suma Total Contribución u(y)^2 | | | | 9.08E-07 | 100 | |
| Descripción | | | | Valor | Unid | |
| Incertidumbre Combinada | | | | 0.0010 | - | |
| Factor de Cobertura | | | | 2 | - | |
| Resultado de la medición Caudal masico Qm | | | | 0.292 | kg/s | |
| Incertidumbre Total | | | | 0.0019 | | |
| Incertidumbre relativa | | | | 0.654 | % | |

$$\frac{\rho_f \cdot Q_v}{\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{PT}} \cdot \rho_{PT}} = K$$

| Magnitud | Símbolo | Valor | | Tipo Distribución | Inc. Estándar | |
|--|--------------------|--------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
| Diferencial de Presión | ΔP_{STD} | 11,496 | Pa | Normal | 0,884 | Pa |
| Densidad Patrón de Trabajo | ρ_{STD} | 1,06549 | kg/m ³ | Normal | 0,0005 | kg/m ³ |
| Diámetro | DSP | 0,29 | m | Normal | 0,000002 | m |
| Caudal Masico en el Patrón | $Q_m PR$ | 0,29126 | m ³ /s | Normal | 0,0008 | m ³ /s |
| | Coef. Sensibilidad | Contribución | | Cuadrado de la contribución | Porcentaje de contribución | |
| Diferencial de Presión | -0,0388 | -3,43E-02 | | 1,17E-03 | 99,52609 | |
| Densidad Patrón de Trabajo | -0,418 | -2,17E-04 | | 4,73E-08 | 0,00401 | |
| Diámetro | -6,144 | -1,23E-05 | | 1,51E-10 | 0,000013 | |
| Caudal Masico en el Patrón | 3,05886 | 2,35E-03 | | 5,54E-06 | 0,46988 | |
| | | | | Valor | Contribución % | |
| Suma Total Contribución $u_i(y)^2$ | | | | 9.08E-07 | 100 | |
| Descripción | | | | Valor | Unid | |
| Incertidumbre Combinada | | | | 0.0343 | - | |
| Factor de Cobertura | | | | 2 | - | |
| Resultado de la medición Caudal masico K | | | | 0.89092 | kg/s | |
| Incertidumbre Total | | | | 0.0687 | | |
| Incertidumbre relativa | | | | 7.707 | % | |

ANEXO 6. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aerodinámica: La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre éstos y el fluido que los baña, siendo éste último un gas y no un líquido, caso éste que se estudia en hidrodinámica

Análisis dimensional: Básicamente es un método que permite reducir el número y complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico dado, con ayuda de una serie de técnicas.

Calibración: conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de las magnitudes que indique un instrumento de medición o un sistema de medición, o valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes determinados por medio de los patrones.

CURVAS DE CALIBRACIÓN: Generalmente esta curva se obtiene por medio de una calibración, es decir a través de una serie de pruebas a lo largo del rango de operación del medidor, comparando las lecturas mostradas por el instrumento contra los valores obtenidos utilizando un medidor de clase de exactitud mayor.

Exactitud De Un Instrumento De Medición: aptitud de un instrumento de medición para dar respuestas cercanas a un valor verdadero.

Incertidumbre De La Medición: parámetro, asociado con el resultado de una medición, que caracteriza a la dispersión de los valores que en forma razonable se le podrían atribuir a la magnitud por medir.

Instrumento de medición: dispositivo destinado a reproducir o suministrar, en forma permanente durante su uso, uno o más valores conocidos de una magnitud dada.

Metrología: ciencia de las mediciones y sus aplicaciones VIM 2.2.

Mensurando: Magnitud que redesea medir VIM 2.3.

Número de Mach: es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto. Dicha relación puede expresarse según la ecuación $M = v_p / \zeta_o$

Patrón primario: patrón que es designado o ampliamente reconocido como poseedor de las más altas cualidades petrológicas, y cuyo valor se acepta sin reverenciarlo a otros patrones de la misma magnitud.

Patrón Secundario: patrón cuyo valor se asigna mediante comparación con un patrón primario de la misma magnitud.

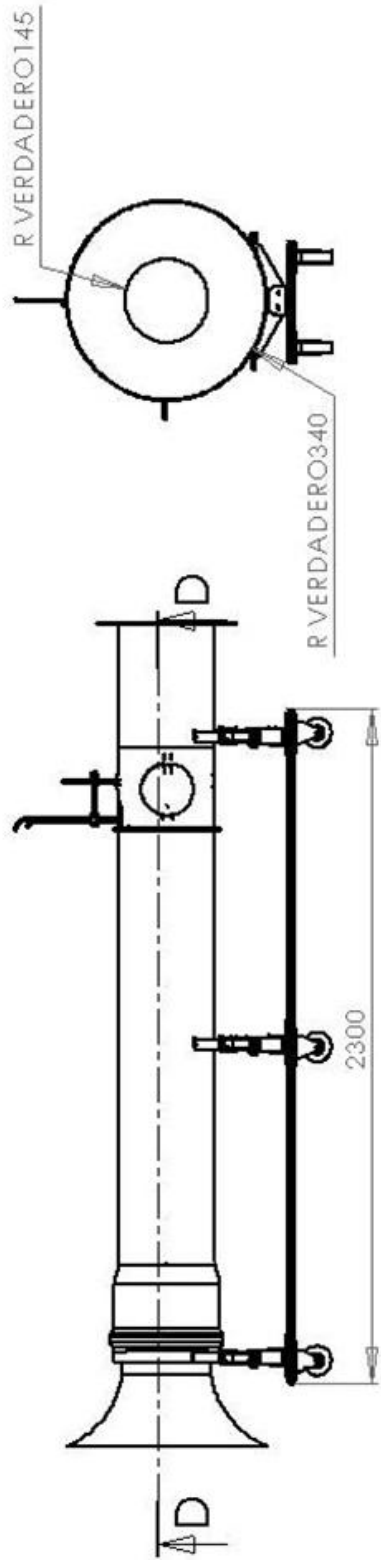
Sistema SAD puede definirse como: "Aplicación (hardware-software) especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores de control de producción". Esta aplicación se interconecta al proceso por medio de redes de comunicación y presenta de manera grafica el estado de las variables que intervienen en el proceso.

Trazabilidad: propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, en virtud de la cual ese resultado se puede relacionar con referencias estipuladas, generalmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones que tengan todas incertidumbres determinadas.

Túnel de viento: En ingeniería, un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos. Su objetivo es simular las condiciones experimentadas por el objeto en la situación real.

Tubo pitot: La función principal del tubo Pitot es la deducción de la velocidad de un fluido, mediante la medición de la diferencia de presión entre dos puntos. A pesar de ser altamente intrusivo, el tubo pitot sigue siendo utilizado en los laboratorios de mecánica de fluidos, gracias a su facilidad de manejo y a lo simple que resulta entender su funcionamiento.

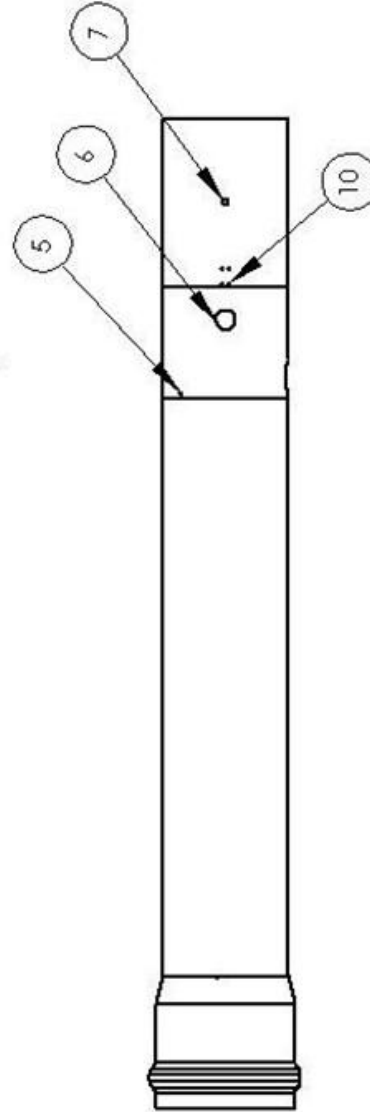
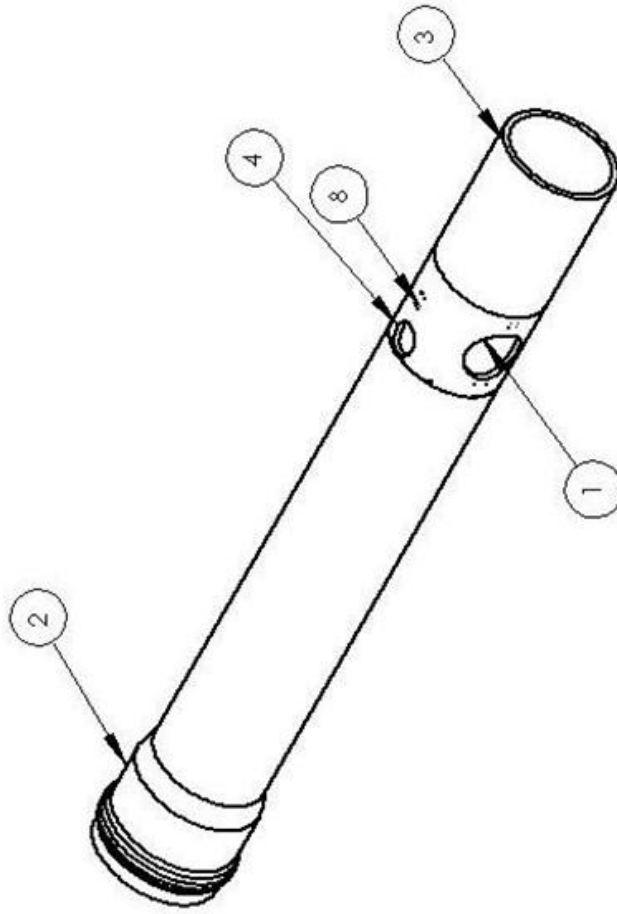
ANEXO 7. PLANOS



SECCIÓN D-D
ESCALA 1 : 20

| | | | |
|---|---|--|---------------------------------|
|  Corporación CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas | Dibujo: Jair Fernando Angarita Delgado | Reviso: Ing. Luis García Sánchez | Fecha: Diciembre de 2009 |
| | Nombre: Instalación para Calibración Medidas en: m m | Plano No. IC-2 Norma: DIM | Escala: 1:15 |

| N° | Nombre | Parametro |
|----|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | Ventana SP | Diametro de 160 |
| 2 | Expansión para sección de entrada | Diametro de 360 |
| 3 | Sección para Brida | Diametro de 324 |
| 4 | Orificio MUT | Diametro de 86 |
| 5 | Dos Orificios Acople Rapido | 1/8" BSPT |
| 6 | Orificio Patrón | Diametro de 50 |
| 7 | Orificio para RTD | 3/8" NPT |
| 8 | Rosca para soporte del MUT | M6x12 |
| 9 | Rosca para soporte del MUT | M6x12 |



Corporación CDT de GAS
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

Dibujo: **Jair Fernando Angarita Delgado**

Reviso: **Ing. Luis García Sánchez**

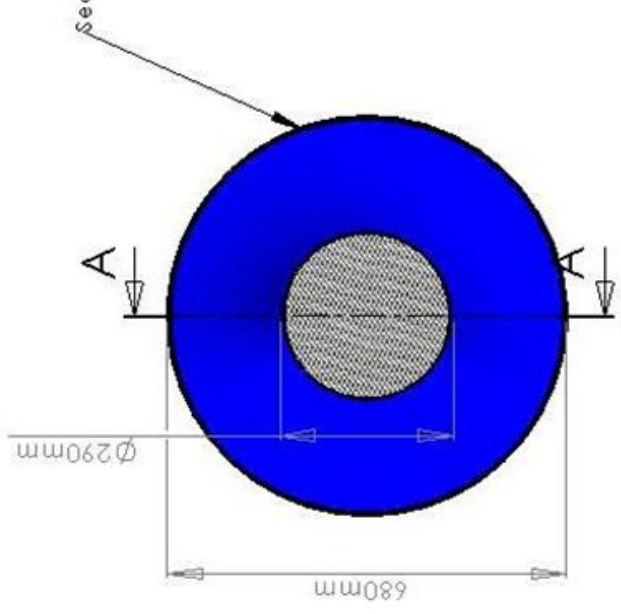
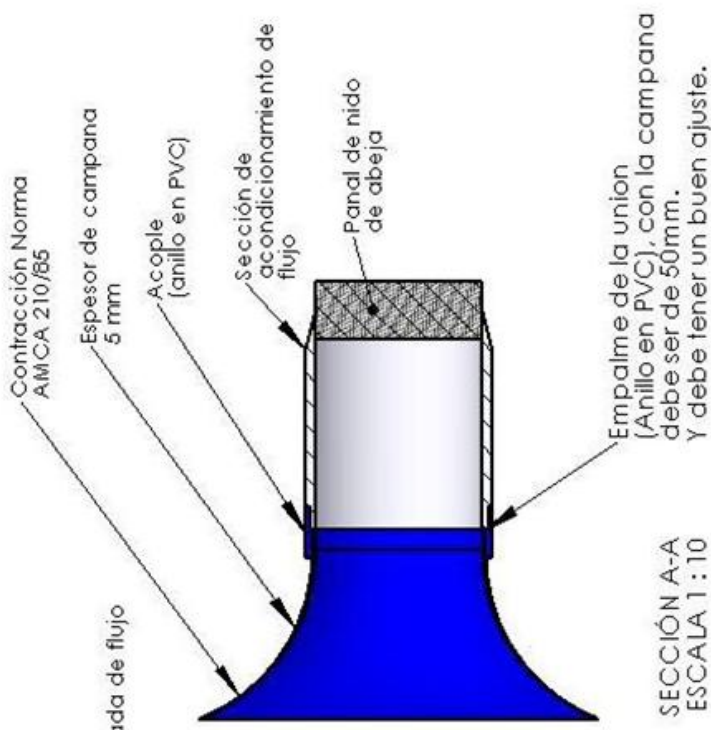
Fecha: **Diciembre de 2009**

INSTALACIÓN PARA MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE

Nombre: **Sección de Pruebas**

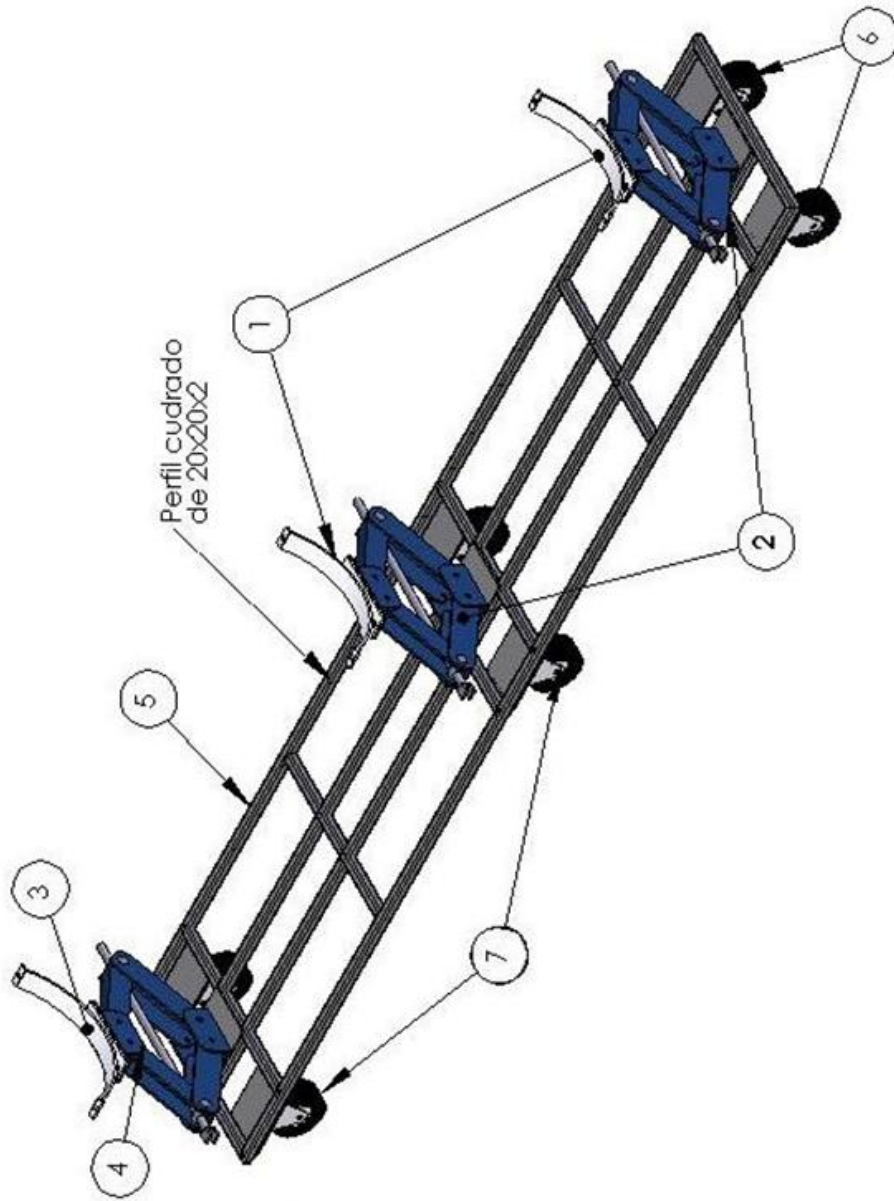
Piano No. **SP-1**
Medidas en: **mm**

Norma: **DIM**
Escala: **1:15**



Se proveera el anillo en PVC, para que ustedes nos hagan el favor de entregar la conexión del anillo con la campana, que fabricaran en Acrílico.

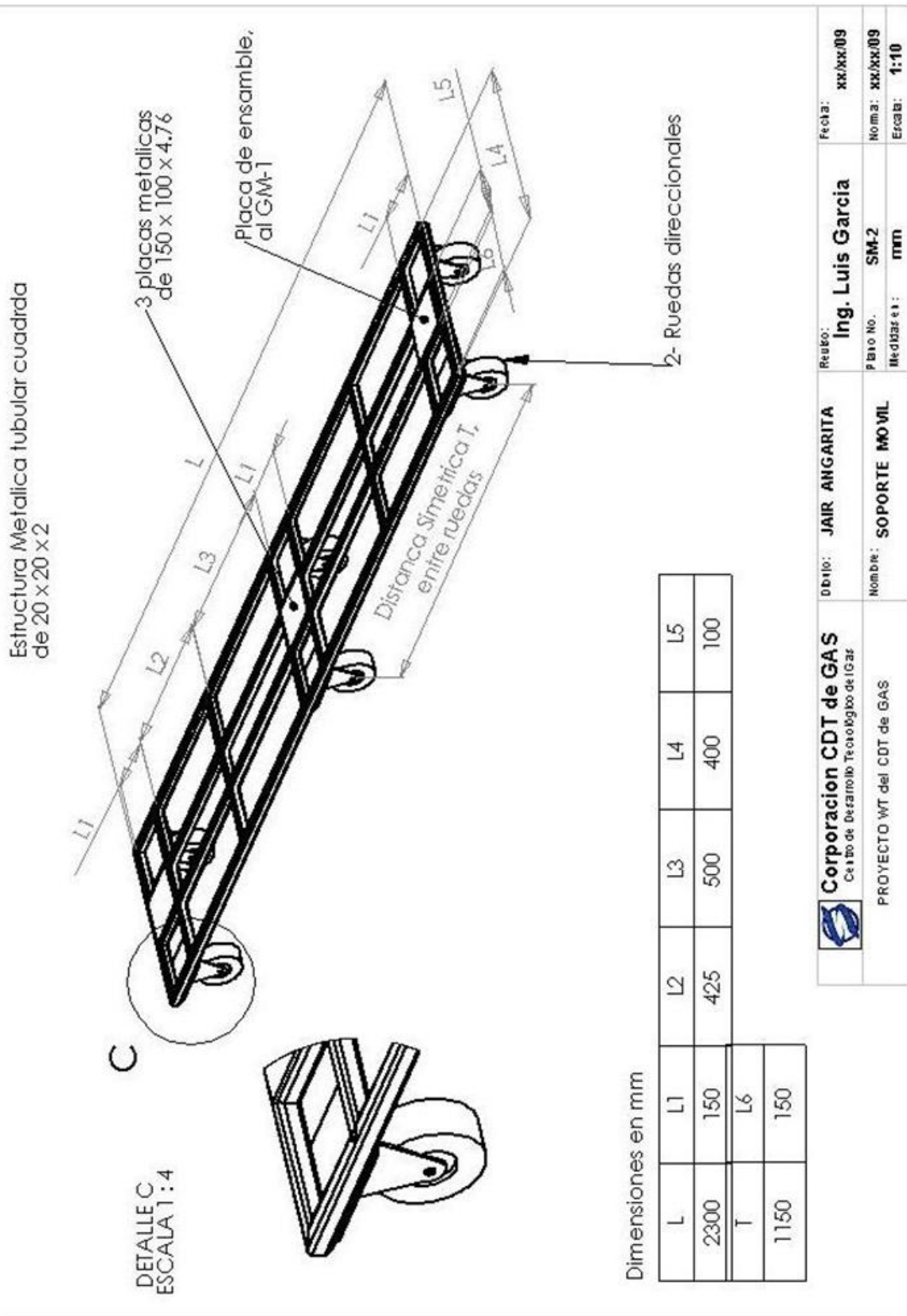
| | | | |
|---|---|---|---------------------------------|
|  Corporación CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas | Dibujo: Jair Fernando Angarita Delgado | Revisó: Ing. Luis García Sánchez | Fecha: Diciembre de 2009 |
| | Nombre: Ensamble Secciones | Plano No: SEC_1 | Norma: DIM |
| INSTALACIÓN PARA MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE | Medidas en: m m | Escala: 1:10 | |



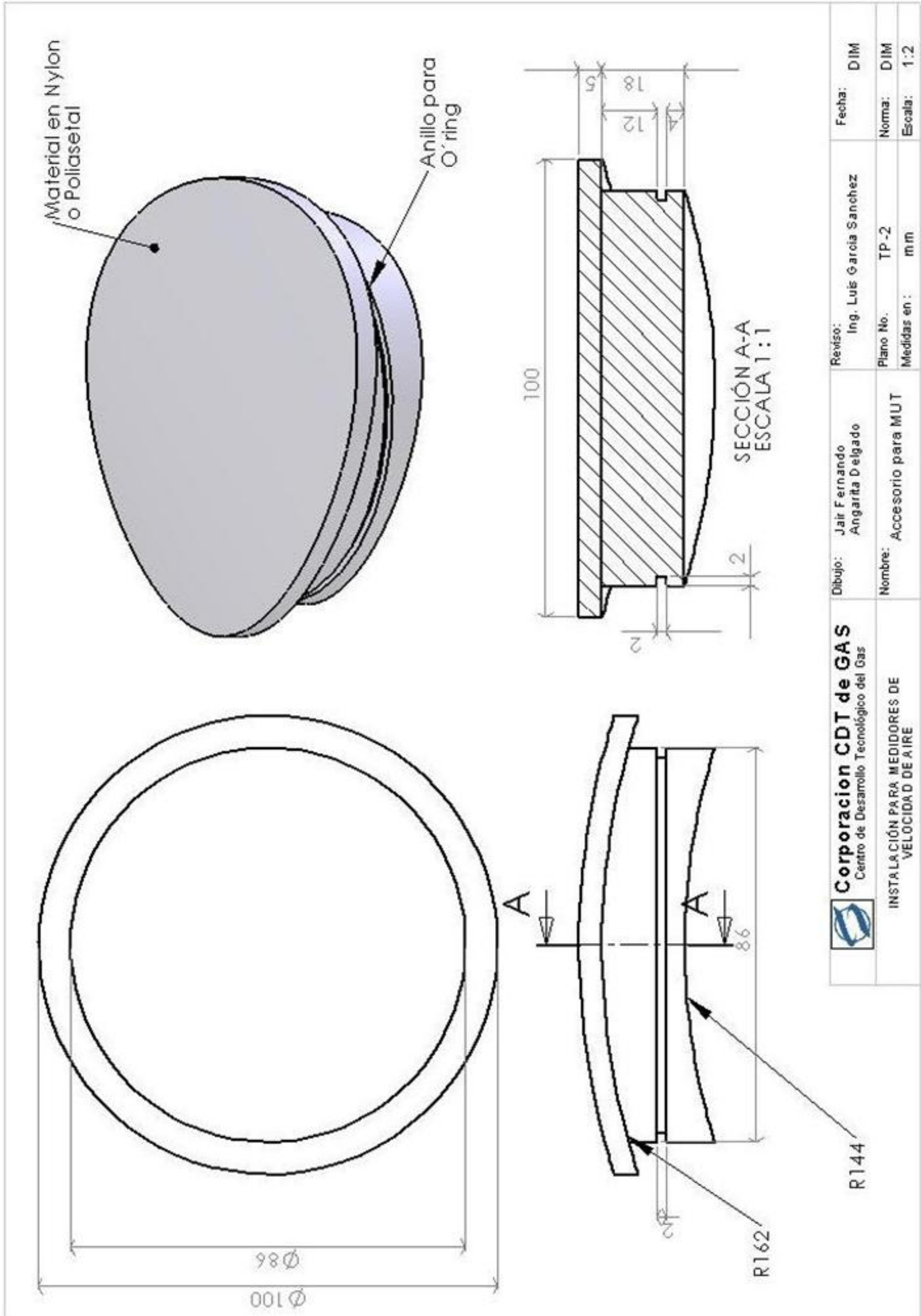
Perfil cuadrado de 20x20x2

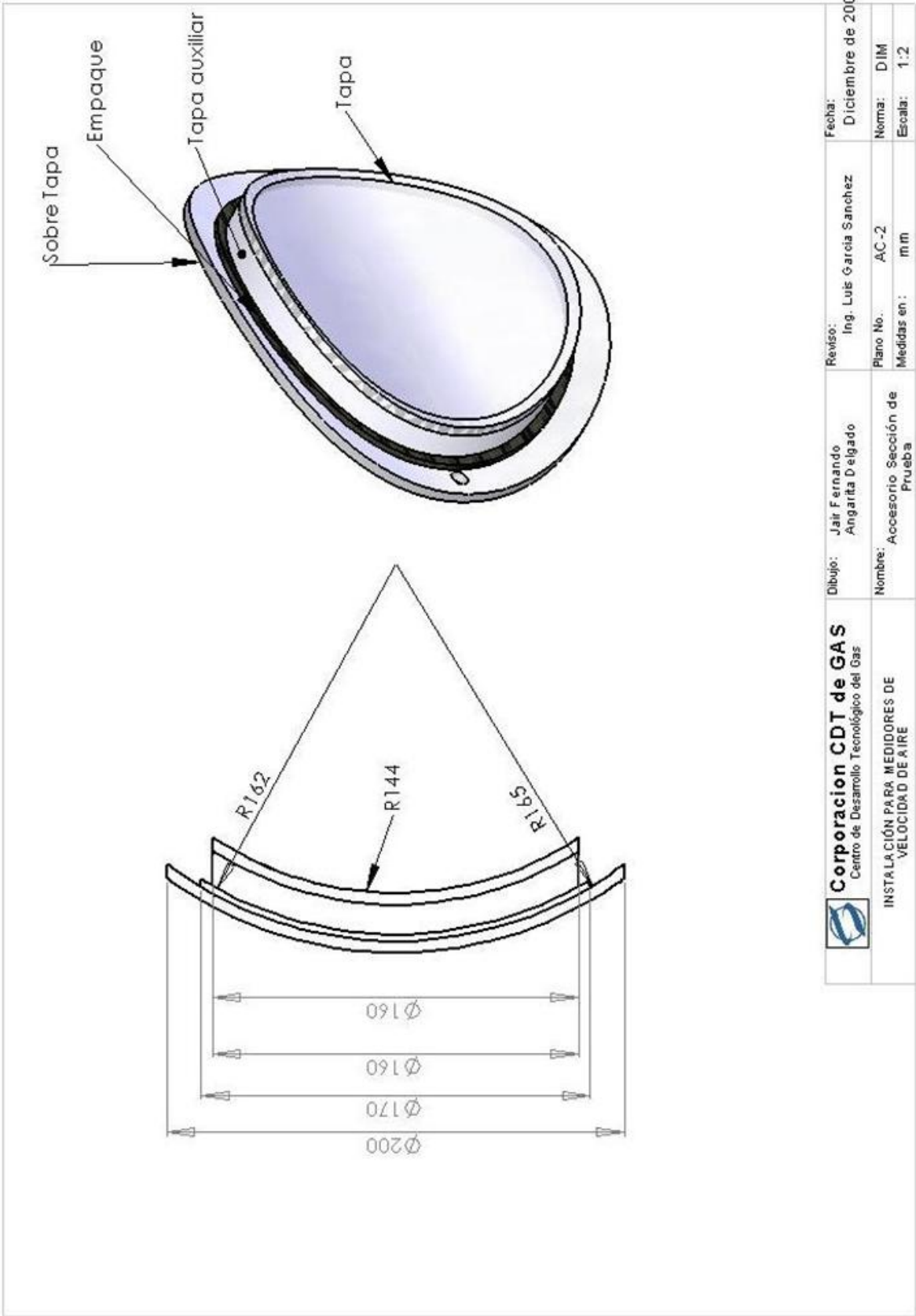
| Nº | Pieza | Cantidad |
|----|--------------------------|----------|
| 1 | Curva GM-2 | 2 |
| 2 | Gato mecánico-2 | 2 |
| 3 | Curva GM-1 | 1 |
| 4 | Gato Mecánico-1 | 1 |
| 5 | Estructura soporte móvil | 1 |
| 6 | Rueda Móvil IMSA-44 | 2 |
| 7 | Rueda Fija IMSA-44 | 4 |

| | | | |
|--|---|---|---------------------------------|
|  Corporación CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico de GAS | Dibujo: Jair Fernando Angarita Delgado | Reviso: Ing. Luis Garcia Sanchez | Fecha: Diciembre de 2009 |
| | Nombre: Soporte Móvil | Plano No. SM-1 | Norma: DIM |
| INSTALACION PARA MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE | Medidas: mm | Escala: 1:10 | |

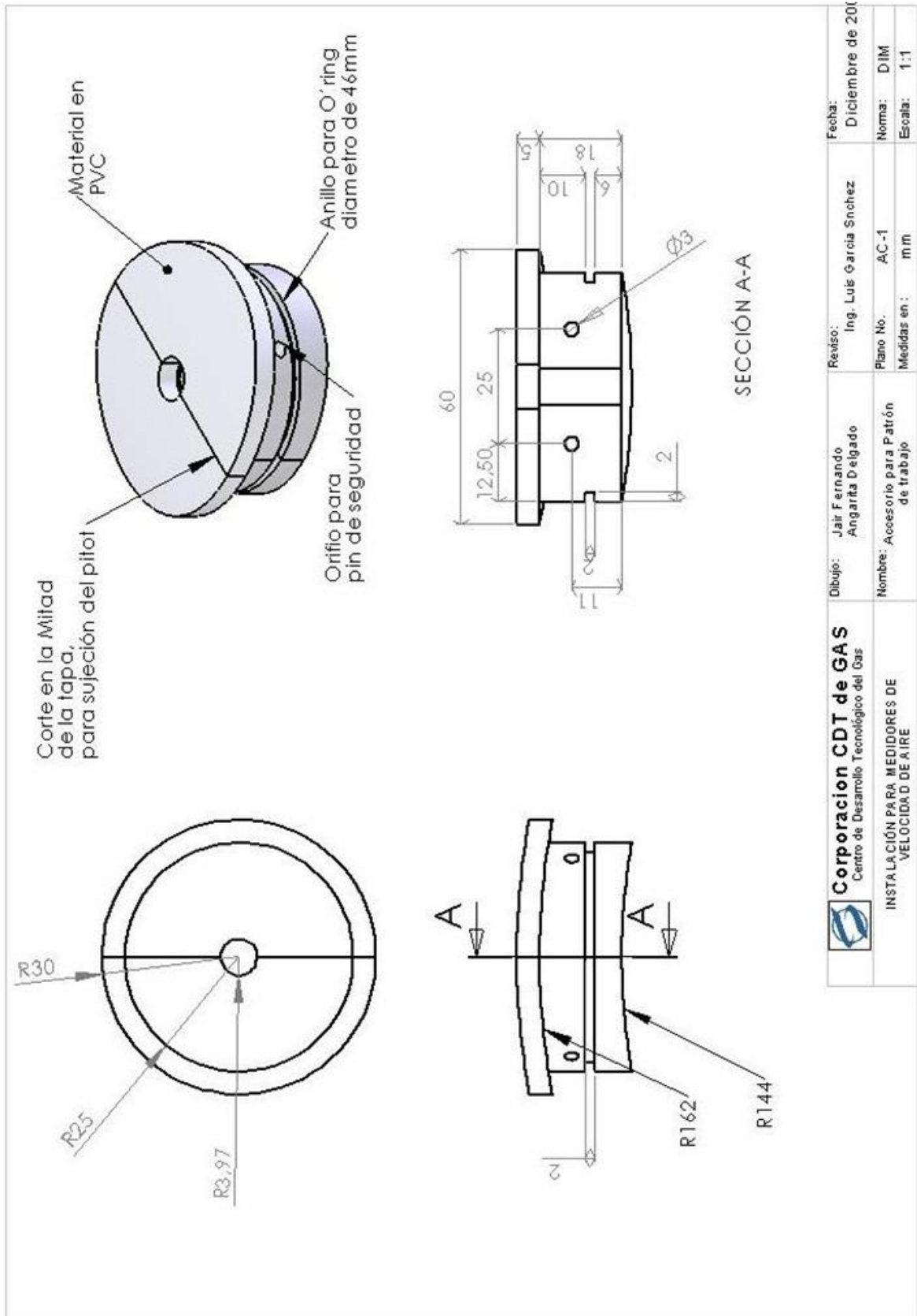



| | | | | |
|---|---|------------------------------|----------------------------------|------------------------|
|  | Corporacion CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico de IGAS | Objeto: JAIR ANGARITA | Revisor: Ing. Luis Garcia | Fecha: xx/xx/09 |
| PROYECTO WT del CDT de GAS | | Nombre: SOPORTE MOVIL | Plano No.: SM-2 | Norma: xx/xx/09 |
| | | Medidas a: mm | Escala: 1:10 | |

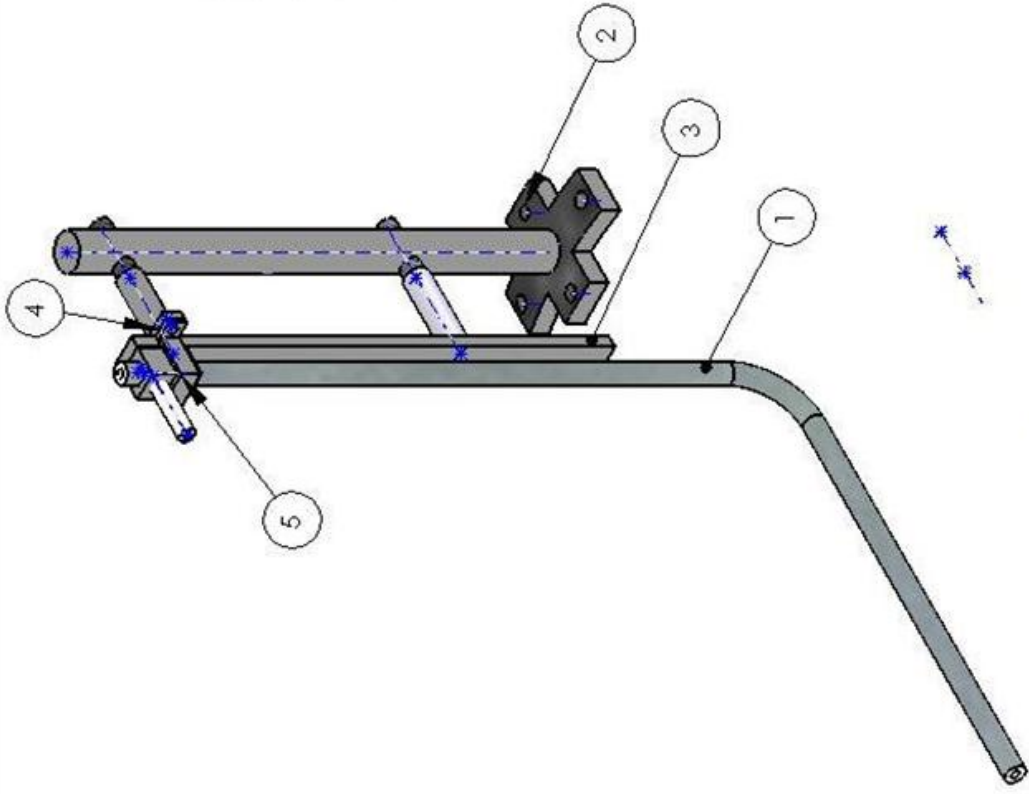




| | | | |
|---|---|--|---|
|  Corporación CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas | Dibujo: Jair Fernando Angarita Delgado | Reviso: Ing. Luis Garcia Sanchez | Fecha: Diciembre de 200 |
| | Nombre: Accesorio Sección de Prueba | Plano No. AC-2 Medidas en: mm | Norma: DIM Escala: 1:2 |



| | | | | | | |
|---|---|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------|------------------|
|  Corporación CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas | Dibujo: | Jair Fernando Angarita Delgado | Revisó: | Ing. Luis Garcia Sanchez | Fecha: | Diciembre de 201 |
| | INSTALACIÓN PARA MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE | Nombre: | Accesorio para Patrón de trabajo | Plano No.: | AC-1 | Norma: |
| | | | Medidas en: | m m | Escala: | 1:1 |



| N° | Pieza | Característica |
|----|----------------------|------------------|
| 1 | Tubo Pitot | Acero Inoxidable |
| 2 | Soporte del Pitot | Acero Comercial |
| 3 | Platina Guía | Acero Comercial |
| 4 | Abrazadera con rosca | Acero Comercial |
| 5 | Abrazadera sin rosca | Acero Comercial |

| | | | | | | |
|---|---|--------------------------------|--------------------|--------------------------|---------|-------------------|
|  Corporación CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas | Dibujo: | Jair Fernando Angarita Delgado | Reviso: | Ing. Luis Garcia Sánchez | Fecha: | Diciembre de 2009 |
| | INSTALACIÓN PARA MEDIDORES DE VELOCIDAD DE AIRE | Nombre: | Soporte Del Patrón | Plano No.: | SP-1 | Norma: |
| | | | Medidas en: | mm | Escala: | 1:2 |

