

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MEDIDOR DE
VELOCIDAD DE AIRE UTILIZANDO EL PRINCIPIO
DE MANOMETRO TOROIDAL CON SISTEMA DE
ADQUISICION DE DATOS**

**CARLOS ALBERTO GOMEZ CASANOVA
JHON JAIRO QUINTERO TARAZONA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MEDIDOR DE
VELOCIDAD DE AIRE UTILIZANDO EL PRINCIPIO
DE MANOMETRO TOROIDAL CON SISTEMA DE
ADQUISICION DE DATOS**

**CARLOS ALBERTO GOMEZ CASANOVA
JHON JAIRO QUINTERO TARAZONA**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
JAVIER RUGELES PÉREZ
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

A Dios, quien me acompaña en todo momento e ilumina mis pasos,

A mi papá, de quien soy reflejo, que ha creído en mí en todo momento y a quien le debo todo lo que soy,

A mis hermanos, de quienes he recibido el mejor ejemplo como personas y como profesionales,

A mis tíos y primos de quienes siempre he recibido apoyo, comprensión y motivación.

A Lina, quien me ha dado todo su amor, comprensión, apoyo y felicidad en los momentos en los que más lo he necesitado.

Carlos Alberto Gómez Casanova

A, Dios por brindarme esta maravillosa oportunidad de ser lo que soy.

A mis padres; Ángel y Graciela por ser la fuente de motivación, superación y sacrificio, que dan sentido a mi vida.

A mis demás familiares, por su apoyo incondicional y sus ánimos de no claudicar ante este reto.

A Leidy, por todo su amor, comprensión, por ser el motor que genera todo mi deseo de seguir siempre adelante.

A mis amigos, por permitirme compartir esos bellos momentos de esta etapa de mi vida.

Jhon Jairo Quintero Tarazona

AGRADECIMIENTOS

A Javier Rúgeles Pérez, ingeniero mecánico, director del proyecto y gran consejero, por su paciencia, colaboración y gran espíritu de ayuda, por su apoyo y motivación permanente para hacer realidad este proyecto.

A Omar Gelves Arocha, ingeniero mecánico, profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su colaboración y facilitación de los recursos del laboratorio de transferencia de calor para la realización de este proyecto.

A Carlos Borrás Pinilla, ingeniero mecánico, profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica por su asesoría en materia de sensores y montajes electrónicos.

A Maria Juliana Álvarez, ingeniera electrónica, por su valiosa colaboración y asesoría en todo lo referente al montaje electrónico del aparato construido.

A nuestro gran amigo y colega Anderson Quiroga, por su inmensa colaboración en todo lo referente al laboratorio de mecánica de fluidos y sus gestiones en la adecuación y mantenimiento de todos los recursos necesarios del laboratorio para la realización de este proyecto.

Al nuestro amigo y colega Iván Darío Peñaloza, por su colaboración en lo relacionado al montaje electrónico del sistema de adquisición de datos

A nuestro amigo German Covelli, auxiliar del laboratorio de transferencia de calor aplicada por su colaboración y disponibilidad para acceder a los equipos del laboratorio.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEORICO	4
1.1 FLUJO INTERNO	7
1.1.1 Definición de caudal	8
1.1.2 Ecuación de continuidad	9
1.1.3 Ecuación de Bernoulli	10
1.1.4 Perfil de velocidad en tubería:	11
1.1.5 Perfil de velocidad en conducto anular	14
1.2 MEDICION DE VELOCIDAD Y PRESION	16
1.2.1 Manómetro diferencial tórico	16
1.2.2 Tubo Pitot	17
1.3 OBTENCION DE DATOS MEDIANTE UN PC	19
1.3.1 Transductores	20
1.3.2 Acondicionamiento de la señal	24
2. DISEÑO DEL MEDIDOR	27
2.1 BANCO DE FLUJOMETRO NEUMATICO	28
2.1.1 Tubo Venturi	29
2.1.2 Caja de control	32
2.2 DESCRIPCION DEL APARATO	34
2.2.1 Cuerpo del medidor	40
2.2.2 Cuerpo semiesférico	41
2.2.3 Tubo Pitot modificado	42

2.2.4 Conductos internos	43
2.2.5 Conductos de presión del manómetro	44
2.2.6 Anillo cilíndrico:	45
2.3 MODELO ESTÁTICO DEL MEDIDOR DE VELOCIDAD DE AIRE	46
2.3.1 Deducción del modelo matemático de velocidad	47
2.3.2 Estimación de dimensiones del medidor:	51
3. SIMULACION DEL FLUJO DE AIRE MEDIANTE FLUENT 6.1	59
3.1 MODELO MATEMÁTICO DE LA SIMULACIÓN	61
3.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO	67
3.2.1 Desarrollo del perfil de velocidad	68
3.2.2 Velocidad media a través de la sección anular	70
4. MODELAMIENTO DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL MEDIDOR IMPLEMENTADO EN SIMULINK®	74
4.1 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL MEDIDOR	74
4.2 ESTIMACIÓN DEL PAR DE ROZAMIENTO DEBIDO A LOS RODAMIENTOS	77
4.3 PAR DE ROZAMIENTO DEBIDO AL TRANSDUCTOR ROTATORIO	86
4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN SIMULINK	86
4.4.1 Bloque de función programable	88
4.4.2 Variables de entrada	91
4.4.3 Variable de salida	96
4.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	96
4.5.1 Medidor de aire con fricción seca nula	96
4.5.2 Medidor de aire con fricción seca diferente de cero	98
5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	102
5.1 TRANSDUCTOR ROTATORIO DE POSICIÓN	102
5.1.1 Descripción del transductor	102
5.1.2 Detección del sentido de giro del transductor	105

5.1.3 Montaje del sensor en el medidor	110
5.2 HARDWARE DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS	110
5.2.1 Descripción del hardware de adquisición de datos	111
5.2.2 Implementación del transductor en el hardware	112
5.3 SOFTWARE DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS	114
5.3.1 Descripción del entorno de programación:	114
5.3.2 Pantalla de presentación de la aplicación:	116
5.3.3 Programación del diagrama de bloques:	118
6. PRUEBAS DE COMPARACION	124
6.1 PATRONES	124
6.1.1 Patrones primarios	124
6.1.2 Patrones secundarios	125
6.2 TUBO VENTURI	125
6.3 COMPARACION CON EL TUBO VENTURI	128
6.3.1 Metodología de realización de las pruebas de comparación:	128
6.3.2 Resultados	131
CONCLUSIONES	136
RECOMENDACIONES	138
BIBLIOGRAFÍA	139
APÉNDICES	141
ANEXOS	159

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Caudal a través de una sección de control	8
Figura 2. Ecuación de continuidad	9
Figura 3. Parámetros de la ecuación de Bernoulli	11
Figura 4. Desarrollo del flujo laminar	12
Figura 5. Perfiles de velocidad en regimenes laminar y turbulento	14
Figura 6. Flujo laminar a través de un conducto anular	15
Figura 7. Principio de funcionamiento del manómetro diferencial tórico	17
Figura 8. Tubo Pitot	18
Figura 9. Tubo Prandtl	19
Figura 10. Evolución de la señal en un sistema de adquisición de datos	20
Figura 11. Encoder incremental	23
Figura 12. Encoder absoluto	24
Figura 13. Amplificación de la señal	25
Figura 14. Filtrado de señales	25
Figura 15. Linealización de señales	26
Figura 16. Elementos constituyentes del medidor	27
Figura 17. Banco de flujometro neumático	29
Figura 18. Tubo Venturi	30
Figura 19. Caja de control	32
Figura 20. Variador de velocidad	33
Figura 21. Tablero de control de temperatura	34
Figura 22. Medidor de velocidad de aire construido	34

Figura 23. Medidor de velocidad de aire dentro del tubo	37
Figura 24. Medidor de velocidad de aire fuera del tubo	38
Figura 25. Vista interna del medidor de velocidad de aire	39
Figura 26. Reducción de área debida al cuerpo tubular	40
Figura 27. Patrones de flujo debidos a la geometría del medidor	41
Figura 28. Tubos Pitot modificados	43
Figura 29. Conductos internos en los ejes	44
Figura 30. Conductos de presión del manómetro	45
Figura 31. Anillo cilíndrico	46
Figura 32. Modelo estático del manómetro diferencial cilíndrico	47
Figura 33. Centro de gravedad del anillo	48
Figura 34. Condición de rebose de liquido manométrico	54
Figura 35. Contrapeso	57
Figura 36. Dimensiones recomendadas del tubo Pitot	58
Figura 37. Puntos de medición de velocidad para el perfil de velocidad	66
Figura 38. Simulación en 3D del flujo de aire	68
Figura 39. Corte transversal de la simulación de flujo	69
Figura 40. Desarrollo del perfil de velocidad en el conducto anular	70
Figura 41. Exponente de la ecuación de velocidad media	72
Figura 42. Diagrama de cuerpo libre del medidor	75
Figura 43. Presión total incidente sobre el medidor	80
Figura 44. Fuerzas axiales sobre el cuerpo del medidor	81
Figura 45. Diagrama de bloques de Simulink	87
Figura 46. Diagrama de flujo del bloque de función.	91
Figura 47. Función rampa de la velocidad de aire	93
Figura 48. Bloque de función de aceleración anterior	94
Figura 49. Comparador de la aceleración anterior	95
Figura 50. Resultados de la simulación con fricción seca nula	97

Figura 51. Carácter oscilatorio de la posición angular	98
Figura 52. Posición angular a diferentes valores de fricción	100
Figura 53. Encoder armado	104
Figura 54. Terminales del encoder	105
Figura 55. Circuito de detección de giro	106
Figura 56. Flip Flop	107
Figura 57. Compuerta AND	107
Figura 58. Pulsos de salida del encoder	108
Figura 59. Pulsos emitidos por el circuito de detección de giro	109
Figura 60. Montaje del encoder	110
Figura 61. Field Point y modulo de contadores	112
Figura 62. Conexión Field Point – transductor	113
Figura 63. Panel frontal del entorno Labview	115
Figura 64. Diagrama de bloques del entorno Labview	116
Figura 65. Panel frontal para el medidor de velocidad de aire	118
Figura 66. Diagrama de bloques para caso 1 (true)	120
Figura 67. Diagrama de bloques para caso 1 (false)	121
Figura 68. Reducción de áreas en el tubo Venturi	126
Figura 69. Comportamiento del factor de comparación	135

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Mediciones para el perfil de velocidad	66
Tabla 2. Masa de los componentes del medidor	79
Tabla 3. Tabla de verdad de la compuerta AND	107
Tabla 4. Datos obtenidos del tubo Venturi	128
Tabla 5. Condiciones de medición dentro de un laboratorio	129
Tabla 6. Valores promedio obtenidos en las pruebas del medidor	133
Tabla 7. Factor de comparación para diferentes regimenes de flujo	134
Tabla 8. Incertidumbre estándar	135

LISTA DE APENDICES

	pág.
APENDICE A	142

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Catalogo del transductor rotatorio de posición	160
ANEXO B. Código de programación del bloque de función de Simulink®	172
ANEXO C. Planos del medidor de velocidad de aire	174
ANEXO D. Manual de uso del medidor	183
ANEXO E. Pruebas de funcionamiento del medidor	190

NOMENCLATURA O GLOSARIO

NOTACIÓN

A	Área, m ² .
B	Rata de caída de presión debido a la viscosidad
c	Velocidad isentrópica del sonido, m/s.
$C_{1\varepsilon}$	Constante experimental de la ecuación de Launder
$C_{2\varepsilon}$	Constante experimental de la ecuación de Launder
$C_{3\varepsilon}$	Constante experimental de la ecuación de Launder
C_0	Coefficiente estático del rodamiento
D	Diámetro del ducto, m.
D_h	Diámetro hidráulico, m.
D_{IP}	Diámetro interno del tubo Pitot, m.
dm	Diámetro medio del rodamiento, m.
D_p	Diámetro del tubo Pitot, m.
F	Fuerza gravitacional del cuerpo, N.
F_R	Fuerza radial sobre el rodamiento, kgf.
F_{AT}	Fuerza axial sobre el medidor, N.
F_A	Fuerza axial sobre el rodamiento, kgf.
f_0	Factor de tipo de rodamiento y lubricación
f_1	Factor de tipo de rodamiento para par de rozamiento debido a carga
G_k	Generación de energía cinética debido a gradientes de velocidad
G_b	Generación de energía cinética debido a flotación

g_1	Coeficiente de carga del rodamiento de acuerdo a tabla del fabricante
H_c	Altura del contrapeso, m.
h	Altura del cilindro manométrico, m.
I	Momento de inercia del medidor
I_l	Unidad tensora (Ecuación de Launder)
k	Energía cinética de turbulencia [KJ]
L	Distancia de ubicación del contrapeso, m.
L_c	Largo del contrapeso, m.
L_{HP}	Longitud horizontal del tubo Pitot, m.
L_{PP}	Longitud de la punta del tubo Pitot
M	Número de Mach
m_c	Masa del contrapeso, kg.
M_0	Par de rozamiento del rodamiento debido a la velocidad, N-m.
M_1	Par de rozamiento del rodamiento debido a la carga, N-m.
m_L	Masa del líquido manométrico, kg.
M_r	Par de rozamiento, N-m.
n	Velocidad angular de giro del rodamiento, RPM.
n_f	Exponente de la ecuación de flujo turbulento
p	Presión de la partícula de fluido, Pa.
p_T	Presión total o de estancamiento, Pa.
p_e	Presión estática, Pa.
P_0	Carga estática del rodamiento, kgf.
Q	Caudal, m^3/s
R	Radio medio del cilindro manométrico, m.

Re	Número de Reynolds
R_e	Radio externo del cilindro manométrico, m.
R_i	Radio interno del cilindro manométrico, m.
r_o	Radio de la tubería, m.
S	Gravedad específica del líquido manométrico
S_m	Masa adherida (Ecuación de Launder), kg.
S_k	Termino ajustable en la ecuación de Launder para energía cinética
S_ϵ	Termino ajustable en la ecuación de Launder para rata de disipación
u	Velocidad de la partícula de fluido, m/s.
V	Velocidad de flujo del aire, m/s.
V_o	Velocidad de la corriente imperturbada, m/s.
W_c	Peso del contrapeso, N.
W_L	Peso del líquido, N.
y	Distancia medida desde la pared del tubo, m.
Y_M	Rata de disipación debida a la dilatación fluctuante del fluido
\bar{y}	Centroide vertical de la columna de líquido, m.
z	Altura geodesica de la partícula de fluido, m.

LETRAS GRIEGAS

α	Aceleración angular del medidor, rad/s ² .
β	Angulo formado por la columna de líquido, grados o radianes.
ϵ	Rata de disipación de la energía cinética de turbulencia.
γ	Peso especifico del líquido, N/m ³ .
μ	Viscosidad dinámica, Kg.m/s.
ν	Viscosidad cinemática del lubricante del rodamiento, cSt.

ω	Vorticidad
θ	Ángulo, grados o radianes.
ρ	Densidad, kg/m ³ .
σ	Número de Prandtl
τ	Esfuerzo tensor
ζ	Coefficiente de viscosidad

SUBÍNDICES

1, 2	Aguas arriba y aguas abajo respectivamente.
air	Aire.
an	Anular
c	Contrapeso.
e	Externo.
H_2O	Agua.
i	Interno.
L	Líquido
k	Referente a la energía cinética de turbulencia.
man	Manométrico.
ε	Referente a la rata de disipación de energía cinética de turbulencia.

RESUMEN

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MEDIDOR DE VELOCIDAD DE AIRE UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE MANOMETRO TOROIDAL CON SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

AUTORES:

Carlos Alberto Gómez Casanova.
Jhon Jairo Quintero Tarazona. **

PALABRAS CLAVES:

Velocidad de aire, Manómetro toroidal, Tubo Pitot, Sistema de adquisición de datos.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir un aparato de medición de velocidad de aire para el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el cuál tendrá implementado un sistema de adquisición de datos para registrar y analizar en un computador las variables que se obtengan de dicho dispositivo.

El aparato de medición traduce la presión dinámica de un flujo de aire en una tubería en un ángulo de giro del instrumento y a partir de esta señal se determina la velocidad de flujo del gas. Adicionalmente un transductor de desplazamiento rotatorio registra el ángulo de giro del aparato y genera una señal digital que será registrada, procesada y analizada en un computador por medio de un sistema de adquisición de datos y un entorno programado por el usuario.

El resultado es un instrumento de medición de velocidad de aire nuevo en su tipo, que combina en uno solo, el uso de dos dispositivos de experimentación en la mecánica de fluidos: el manómetro diferencial tórico y el tubo Pitot, los cuales se fundamentan en la ecuación de Bernoulli, colocando a disposición de los estudiantes un nuevo aparato de medición que pueda ser utilizado como medidor de flujo de gases o como instrumento de calibración de otros medidores de este tipo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Javier Rugeles.

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A VELOCITY MEASURER OF AIR USING THE TORIC MANOMETER PRINCIPLE WITH DATA ACQUISITION SYSTEM*

AUTHORS:

Carlos Alberto Gómez Casanova.
Jhon Jairo Quintero Tarazona.**

KEY WORDS:

Velocity of air, Toric Manometer, Pitot Tube, Data Acquisition System.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to design and build a measurer device of velocity of air for the Mechanical of Fluids laboratory of the Mechanical Engineering School, which will have incorporate a data acquisition system to register and analyze in a computer the variables that will be obtained from that device.

The measurer device translates the dynamic pressure of an air flow in a pipe in a spin angle of the instrument and starting from that signal it's determined the velocity of the gas flow. Additionally, a rotational transducer of displacement registers the spin angle of the apparatus and generates a digital signal which will be registered, processed and analyzed in a computer by means of a data acquisition system and a programmed environment by the user.

The result is a measurer instrument of velocity or air, new in its type, which combines in one device the use of two different instruments of experimentation in flow mechanics: the toric differential manometer and the Pitot tube, which are based in the Bernoulli's equation, setting for the students a new measurer apparatus which can be used like a flow measurer of gas or calibration device of other measurer apparatus of this type.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Sciences Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Javier Rugeles.

INTRODUCCIÓN

El campo de la ingeniería es un universo inagotable debido a la ilimitada capacidad de innovación y mejoramiento de los recursos, técnicas, procedimientos y herramientas a disposición del ser humano, manteniendo siempre activo el espíritu creador del ingeniero, aún con la gran cantidad de innovaciones tecnológicas y herramientas de avanzada a disposición en la actualidad. De manera mas concreta, a pesar de la existencia de una variada gama de instrumentos de medición de flujo de gases tanto para aplicaciones industriales como académicas, se plantea la necesidad de crear nuevas herramientas de este tipo que permitan ampliar la variedad de instrumentos de medida de flujo, creando nuevos aparatos de aplicación industrial o académica.

Los aparatos de medición de flujo de gases son ampliamente usados en la industria en aplicaciones tales como el sector del gas donde es muy importante el monitoreo permanente de las variables de velocidad y presión de los gases que fluyen por diferentes puntos de una tubería, en aplicaciones aeronáuticas donde los medidores de velocidad de aire sirven para medir la velocidad del avión respecto de la velocidad del aire en que se mueve, en aplicaciones de automatización que dependan del flujo de un gas que debe ser monitoreado y controlado permanentemente en función de un determinado proceso de producción que se este llevando a cabo, o en aplicaciones académicas como la experimentación en bancos de prueba como el tubo Venturi, bancos de prueba de ventiladores o en la experimentación de los diferentes principios de la mecánica de fluidos tales como el flujo laminar

y turbulento por tubería, la ecuación de Bernoulli, la ecuación de continuidad, entre otros.

El presente proyecto es eminentemente de carácter investigativo ya que se propone el diseño de un dispositivo de medición nuevo en su tipo, sobre el cuál no hay investigaciones ni resultados previos en cuanto a su diseño y operación, haciendo que los resultados del presente proyecto de grado sean la base para la determinación de la factibilidad académica y luego industrial de la aplicación de este prototipo para la medición de velocidad de aire.

Como valor agregado al prototipo diseñado y construido se le implementará un sistema de adquisición de datos que permita a dicho prototipo hacer parte activa del inventario del laboratorio de mecánica de fluidos, tendiente a ser parte de la red de bancos interconectados en un sistema de adquisición de datos centralizado para el laboratorio, el cuál se encuentra en fase de implementación.

En el capítulo 1 se hará una mención sobre los aspectos más básicos de la hidrodinámica, de manera que se pueda ilustrar y en caso de ser necesario aclarar previamente al lector sobre ciertos conceptos de esta área de la física en los cuales está basado el presente proyecto de grado. En el capítulo 2 se hará una descripción detallada del diseño del aparato en cuanto sus componentes y dimensiones. En el capítulo 3 se realizará una simulación del flujo de aire a través del medidor mediante el software Fluent 6.1 de la firma Fluent Inc, para evaluar el comportamiento del flujo respecto a las variables de velocidad presentes en la zona de medición.

En el capítulo 4 se realizará un modelamiento matemático y posteriormente una simulación de la respuesta dinámica del equipo construido mediante Simulink 7.0. En el capítulo 5 se describirá el sistema de adquisición de datos en lo referente al sensor que registrará el ángulo de giro del medidor de acuerdo al tipo de transductor que se utilice, su funcionamiento y el tipo de señal que este genera. Posteriormente se hará una descripción detallada del módulo de adquisición y acondicionamiento de la señal en cuanto a su configuración y el tratamiento de ésta a la entrada y salida del sistema de adquisición de datos. Además se describirá el entorno programado por el usuario mostrando el esquema y lenguaje de programación y a partir de esto documentar el programa creado para el registro y análisis de los datos y su presentación en pantalla en cuanto a variables de entrada y variables de salida. Finalmente, en el capítulo 6, se documentarán las pruebas de funcionamiento del medidor y las pruebas de comparación con el tubo Venturi del laboratorio, las cuales permitirán establecer la confiabilidad en la medición del instrumento construido, de manera que se pueda concluir como fruto de esta investigación la conveniencia en el uso de este instrumento de medida.

1. MARCO TEORICO

Dentro de la mecánica de los fluidos, uno de los aspectos más importantes y sobre el cuál se centra la importancia del estudio de esta rama de la ciencia es la hidrodinámica, la cuál se define como la parte de la física que estudia el movimiento de los fluidos. Este movimiento está definido por un campo vectorial de velocidades correspondientes a las partículas del fluido y de un campo escalar de presiones, correspondientes a los distintos puntos del mismo.

Existen diversas clasificaciones del flujo de fluidos en la hidrodinámica, de acuerdo al tipo de fluido, su comportamiento rotacional o de traslación y a la configuración del medio a través del cuál fluyen, las cuales son descritas a continuación:

- ❖ Flujo incompresible o compresible: De mucha importancia para el análisis en el flujo de gases ya que señala el carácter constante o variable de la densidad del fluido. Sin embargo, este concepto de la incompresibilidad se relaciona en hidrodinámica con la variación de la densidad del fluido de acuerdo a la divergencia de la velocidad, es decir, que en un flujo incompresible puede haber cambios en la densidad si estos no son causados por la presión mecánica, en caso contrario se tiene un flujo compresible. De esta forma, el término incompresibilidad o compresibilidad se relaciona exclusivamente con las variaciones de la densidad debidas al efecto de la presión. Matemáticamente, la divergencia de la velocidad se expresa como:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Donde:

\vec{V} = Velocidad del fluido.

Para efectos prácticos se puede señalar que la compresibilidad en un flujo se determina de acuerdo al número de Mach al cuadrado:

$$\frac{dp}{d\rho} = M^2$$
$$M = \frac{u}{c}$$

Donde:

M = Número de Mach

u = Velocidad del fluido

c = Velocidad isentrópica del sonido

p = Presión del fluido

ρ = Densidad del fluido

Es decir, que para bajas velocidades de flujo, donde el número de Mach sea de valores muy pequeños (por ejemplo 0.1) se puede considerar un flujo incompresible ya que los cambios en la densidad debidos a la presión serán despreciables.

- ❖ Flujo viscoso y no viscoso: El carácter viscoso es definido por los esfuerzos cortantes presentes en el flujo, los cuales pueden ser

despreciados o no en virtud de realizar una simplificación válida del modelo matemático. Analíticamente, la forma mas generalizada de la ecuación de movimiento de Navier-Stokes, para la cuál se tienen en cuenta los efectos viscosos es:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g - \nabla p + \zeta \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) + \eta \nabla^2 u$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido

∇p = Divergencia de la presión

$\nabla \cdot \vec{V}$ = Divergencia de la velocidad

η = Viscosidad cinemática del fluido

ζ = Segundo coeficiente de viscosidad, muy difícil de medir y para la cuál no existe un valor conocido en la mayoría de los fluidos.

Tomando la ecuación anterior se puede obtener el modelo de un flujo en el cuál los efectos de la viscosidad no se tienen en cuenta, para la cuál se eliminan los dos términos finales que cuantifican dicho efecto, de manera que para un flujo no viscoso, el modelo matemático llamado "ecuación de Euler" se expresa:

$$\frac{du}{dt} = g - \frac{\nabla p}{\rho}$$

- ❖ Flujos rotacionales e irrotacionales: Esta clasificación se da de acuerdo a la vorticidad del flujo, la cual refleja el hecho de que un flujo está

sometido a esfuerzos normales (presión) y esfuerzos cortantes (viscosidad), estos últimos hacen que una partícula fluida en el seno de un medio fluido rote sobre alguno de sus ejes. La velocidad angular es particular para cada uno de dichos ejes, de manera que la combinación de esas velocidades angulares originan que la partícula rote en el espacio con mayor o menor rapidez o que no rote. Si dichas partículas no rotan, se dirá entonces que se trata de un flujo irrotacional pero si alguna de las partículas rota en alguno de dichos ejes entonces se dirá que se trata de un flujo rotacional. Analíticamente el vector vorticidad, que es el operador rotacional del campo de velocidades se expresa:

$$\omega = \nabla \times \vec{u}$$

Si $\omega = 0$ entonces se dirá que se tiene un flujo irrotacional.

1.1 FLUJO INTERNO

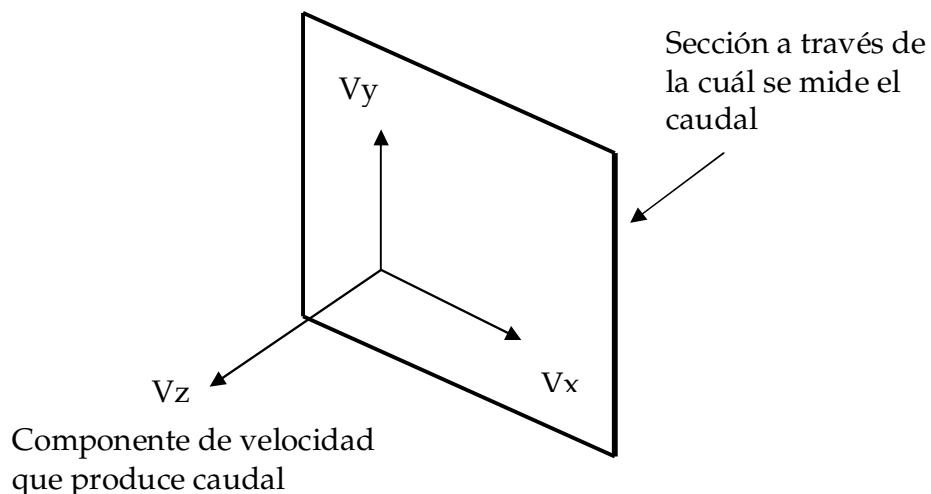
En general se distinguen dos tipos de flujo de fluidos en cuanto a la configuración del medio a través del cuál fluyen: el flujo externo y el flujo interno. Como objeto de nuestro análisis solo será de interés el flujo interno ya que el prototipo de medición que se ha elaborado en este proyecto funciona solo mediante este tipo de flujo.

Se entiende por flujo interno aquel que se desarrolla dentro de fronteras físicas de interés claramente definidas tales como ductos o tuberías. Los

aspectos fundamentales a señalar en el análisis de flujos internos se presentan a continuación.

1.1.1 Definición de caudal. El caudal se define como el volumen de fluido por unidad de tiempo que pasa a través de una sección de control. Es importante señalar que en un flujo que tenga componentes de velocidad en los 3 ejes (x,y,z) , solo produce caudal la componente de velocidad que sea perpendicular al plano de la sección.

Figura 1. Caudal a través de una sección de control



Llamando dA al elemento infinitesimal de área y siendo V la velocidad normal a la sección transversal, se tiene como definición matemática del caudal:

$$dQ = V \cdot dA$$

1.1.2 Ecuación de continuidad. De acuerdo al principio de conservación de la masa, se tiene que en un hilo de corriente, se cumple lo siguiente:

- ❖ No entra ni sale fluido lateralmente porque la velocidad es tangencial a las líneas de corriente que forman la pared lateral del hilo.
- ❖ No se crea ni se destruye masa, ni puede haber concentración o dilución de masa en ninguna sección del mismo, luego la masa que entra en el tubo infinitesimal es igual a la masa que sale, por lo tanto:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = \text{Constante}$$

Donde:

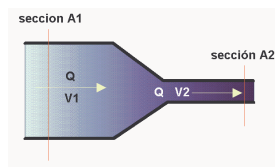
ρ = Densidad del fluido

A = Área de sección para el paso del flujo

v = Velocidad del flujo dentro de la tubería.

La ecuación de continuidad es una consecuencia del principio de conservación de la masa. Para un flujo permanente, la masa del fluido que atraviesa cualquier sección de una corriente de fluido por unidad de tiempo es constante.

Figura 2. Ecuación de continuidad



1.1.3 Ecuación de Bernoulli: La ecuación de Bernoulli tradicionalmente utilizada en la mecánica de fluidos no es más que un modelo matemático que describe el principio de conservación de la energía. Dentro de dicho modelo se encuentran implícitas una serie de simplificaciones y supuestos que harán que el modelo quede expresado en términos de la presión, la velocidad y la altura geodésica de una partícula de fluido. Tales simplificaciones son:

- ❖ Se tratara como un fluido ideal, en el cuál no hay viscosidad.
- ❖ No existe rozamiento, por lo cuál no habrá transformación de energía hidráulica en energía térmica.
- ❖ La partícula de fluido no recibe energía de una fuente externa tal como una bomba ni cede energía a un receptor externo.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, el modelo matemático conocido como “Ecuación de Bernoulli”, que describe la ley de conservación de la energía viene dada por:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

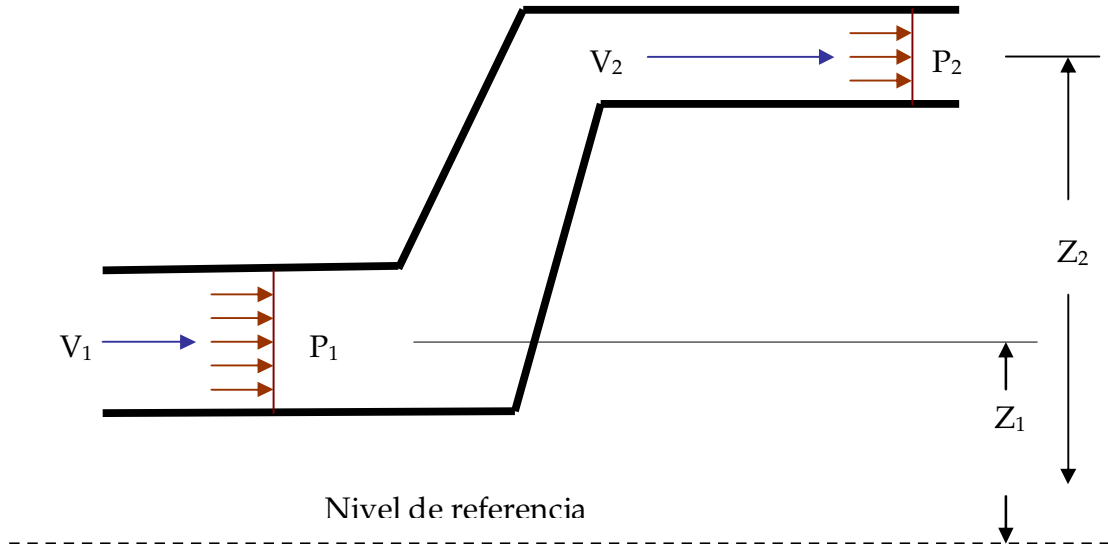
Donde:

p=Presión de la partícula de fluido

z=Altura geodésica de la partícula de fluido

V=Velocidad de la partícula de fluido.

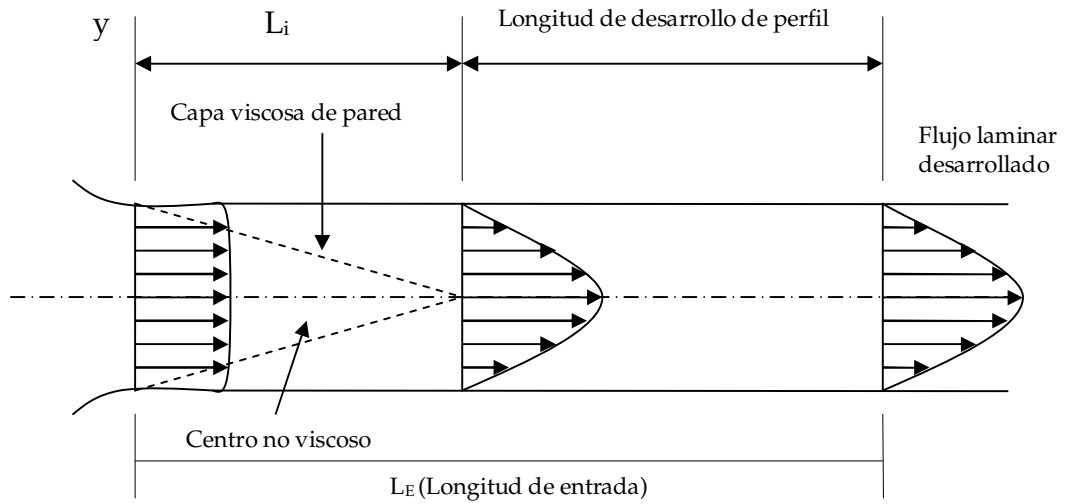
Figura 3. Parámetros de la ecuación de Bernoulli



1.1.4 Perfil de velocidad en tubería: Al considerar el flujo de fluidos dentro de una tubería, en general se tienen dos tipos de flujo, el flujo laminar y el flujo turbulento. En la presente sección se examinará el perfil de velocidad para cada uno de estos flujos.

❖ **Flujo laminar:** Al considerar flujos internos nos interesan primordialmente los flujos desarrollados dentro de conductos. Concentremos primero nuestra atención en el flujo laminar. Se produce un flujo desarrollado cuando el perfil de velocidad deja de cambiar en la dirección de flujo. En la región de entrada de un flujo laminar, el perfil de velocidad cambia en la dirección del flujo, como se aprecia en la figura 4.

Figura 4. Desarrollo del flujo laminar



El flujo idealizado desde un depósito se inicia en la entrada como flujo uniforme, luego la capa de pared viscosa crece a lo largo de la longitud de centro viscoso L_i , hasta que los esfuerzos viscosos dominan toda la sección transversal; después, el perfil sigue cambiando en la región de desarrollo del perfil a causa de los efectos viscosos hasta que se logra un flujo desarrollado. De esta forma, el perfil de velocidad en flujo laminar ($Re < 2300$) en un ducto viene dado por:

$$V_{(r)} = \frac{\beta}{4\mu} \times \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right)$$

En términos del cambio de presión, se puede expresar el perfil de velocidades de la siguiente manera:

$$V_{(r)} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu L} \times \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right)$$

Donde:

μ = Viscosidad del fluido

D = Diámetro del ducto

$\beta = -\frac{dp}{dz}$ = Rata de caída de presión debido a la viscosidad

p_1 = Presión aguas arriba

p_2 = Presión aguas abajo

❖ **Flujo turbulento:** En el caso del flujo turbulento ($Re < 10000$), se obtiene la distribución de la velocidad de flujo en una tubería mediante el perfil de la ley de potencia, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\max}} = \left(\frac{y}{r_o} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Donde:

y = Distancia medida desde la pared del tubo

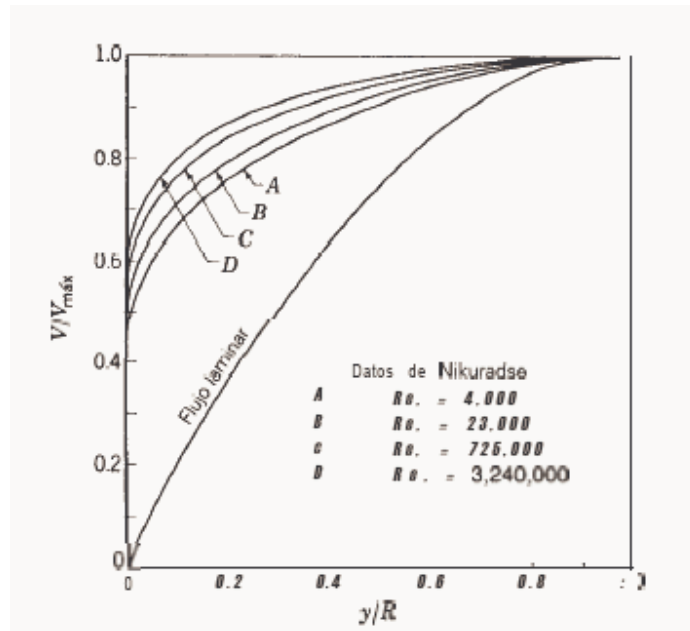
r_o = Radio de la tubería

El valor de n en el exponente se relaciona con el factor de fricción f por la expresión empírica:

$$n = \frac{1}{\sqrt{f}}$$

La constante n varía entre 5 y 10 dependiendo del número de Reynolds y de la aspereza de la pared de la tubería e/D . De acuerdo a los estudios experimentales de Nikuradse, que estudio regimenes turbulentos a números de Reynolds relativamente bajos para tuberías lisas, se obtuvo la siguiente curva mostrada en la figura 5.

Figura 5. Perfiles de velocidad en regimenes laminar y turbulento



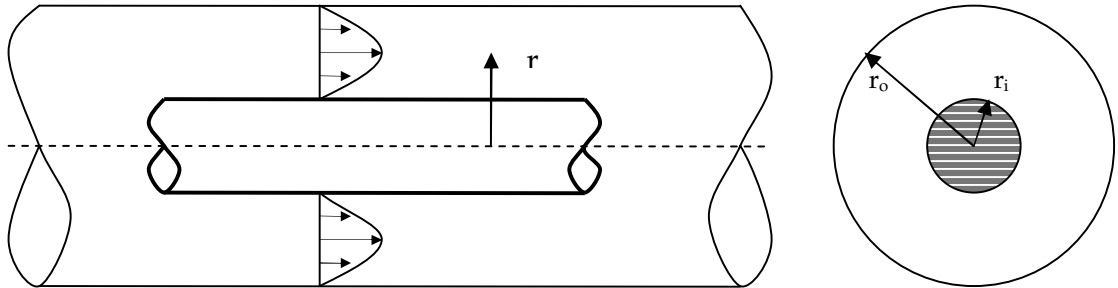
Fuente: Mecánica de Fluidos. Irving Shames.

1.1.5 Perfil de velocidad en conducto anular: Como punto de partida para analizar el flujo en una sección anular se considerara un flujo laminar incompresible. De manera similar a como el perfil de velocidad en un flujo de tubería es simétrico, el flujo por un conducto anular también es simétrico. De acuerdo a la ley de viscosidad de Newton y luego del reordenamiento matemático se obtiene:

$$V_z = \frac{\beta}{4\mu} r^2 + C_1 r + C_2$$

Esta ecuación será aplicable al conducto anular, de acuerdo a los parámetros señalados en la figura 6.

Figura 6. Flujo laminar a través de un conducto anular



Para la determinación de las constantes de esta ecuación diferencial se tienen las siguientes condiciones de frontera:

$$V_z = 0 \text{ cuando } r=r_i$$

$$V_z = 0 \text{ cuando } r=r_o$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene el perfil de velocidad para un conducto anular, el cuál se muestra de la siguiente forma:

$$V_z = \frac{\beta}{4\mu} \left[-r^2 + r_o^2 + \frac{r_o^2 - r_i^2}{\ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right)} \ln \frac{r}{r_o} \right]$$

La rata de caída de presión debida a la viscosidad puede expresarse de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{\frac{8\mu q}{\pi}}{\left[r_0^4 - r_i^4 - \frac{(r_0^2 - r_i^2)^2}{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)} \right]}$$

De esta forma, la rata de caída de presión en la tubería queda expresada en función del caudal, la viscosidad dinámica del fluido y de la geometría del conducto anular.

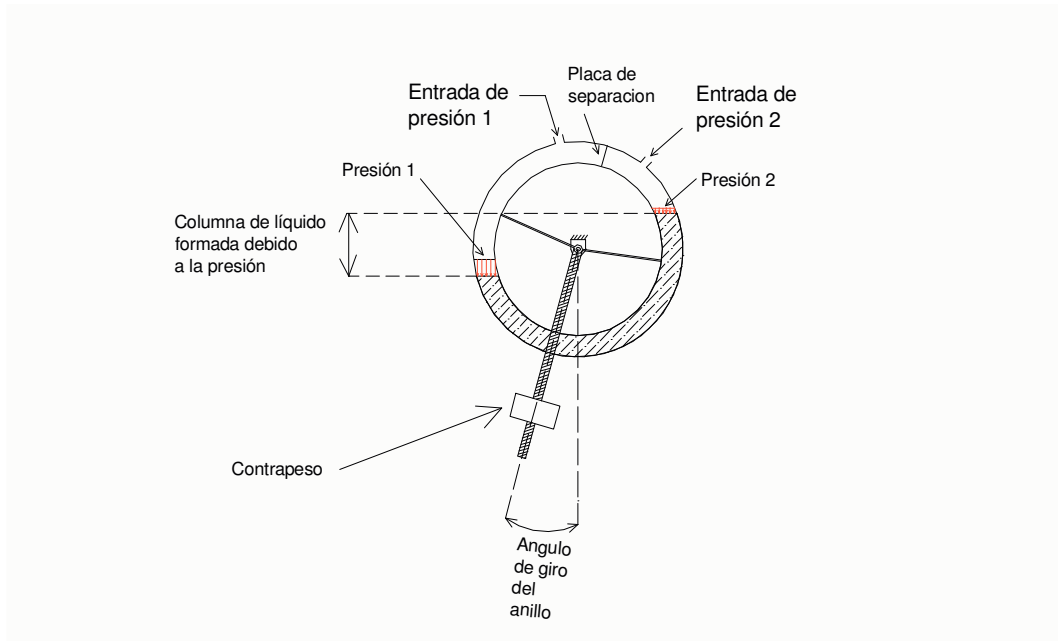
1.2 MEDICION DE VELOCIDAD Y PRESION

La medición de velocidad del flujo de gas relaciona directamente los parámetros de velocidad y presión por medio de la ecuación de Bernoulli previamente reseñada, haciendo del aparato de medida a diseñar una combinación de varios tipos de medición de estas variables. A continuación se hará la reseña de estos métodos de medición, que combinados comprenderán un solo instrumento de medición de velocidad de aire.

1.2.1 Manómetro diferencial tórico: Un manómetro diferencial tórico es un instrumento de medida de presión compuesto por un anillo toroidal dividido por una placa separadora en la parte superior, la cuál aísla el toroide internamente, de manera que por un lado registre una presión y por el otro lado registre otra presión, haciendo que la resultante que actúa sobre el aparato sea una presión diferencial de ambas presiones actuantes sobre el interior del toroide. Dicha presión diferencial hace girar el toroide sobre su eje central un ángulo determinado, el cuál tiene una proporcionalidad con

dicho diferencial de presión. La figura 7 ilustra el principio de manómetro diferencial tórico.

Figura 7. Principio de funcionamiento del manómetro diferencial tórico



Un contrapeso que viene agregado al toroide por medio de un soporte fijado a su eje tiene el objeto de equilibrar el giro del toroide una vez se encuentre sometido a las fuerzas de presión, haciendo que el peso de líquido haga girar el dispositivo hacia un lado y el contrapeso genere un momento de giro en el sentido contrario, de manera que establezca el giro del dispositivo y lo haga girar el ángulo proporcional al diferencial de presión.

1.2.2 Tubo Pitot: El tubo Pitot es una de las herramientas más comúnmente utilizadas en la mecánica de fluidos en la medición de flujos al interior de una tubería, el cuál provee una medida de gran fidelidad, por medio del registro de presiones diferenciales que actuarán sobre un manómetro que sea configurado a él. Con el tubo Pitot puede encontrarse la velocidad de un

flujo por medio de la medición de la presión total de este en un punto llamada presión de estancamiento (la suma de presión estática y la dinámica). Para la figura 8, en la embocadura del tubo (A) se forma un “punto de estancamiento”, en el cuál la velocidad se reduce a 0 y la presión aumenta de acuerdo a:

$$\frac{p_t}{\rho g} = \frac{p_T}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{V_o^2}{2g}$$

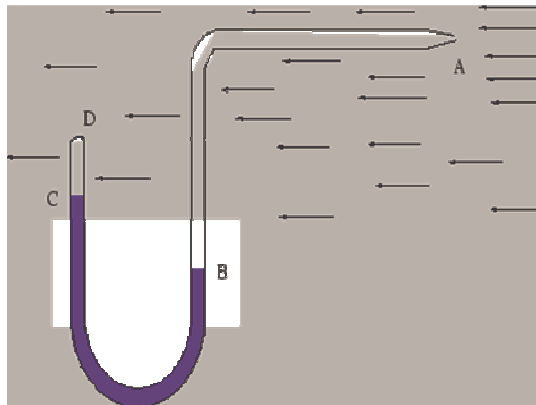
Donde:

p_T = Presión total o de estancamiento

p_0 , V_o = Presión y velocidad de corriente inperturbada

De acuerdo a la figura, un tubo Pitot sencillo registra la presión total, es decir la suma de las presiones estática y dinámica ($p_t = p_e + p_d$)

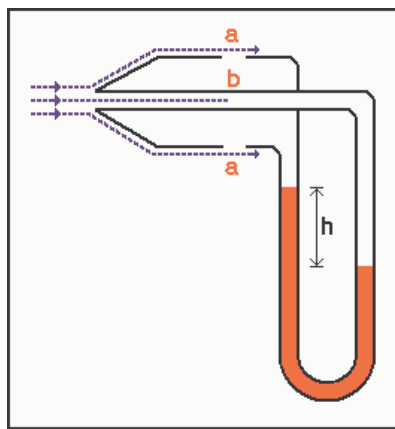
Figura 8. Tubo Pitot



Existe una variación del tubo Pitot llamada “tubo Prandtl”, el cuál funciona bajo el mismo principio del Pitot con la diferencia de que el tubo Prandtl registra la presión dinámica en vez de la presión total. De acuerdo a la figura 9, por medio de la adición de un conducto lateral (a), que permite sensar la

presión estática, el manómetro registra por un lado la presión total (punta del tubo) y por el otro lado la presión estática (a), de manera que la presión dinámica será la diferencia de ambas ($p_d = p_t - p_e$), siendo la presión dinámica la debida a la velocidad del flujo $\left(p_d = \frac{\rho V^2}{2g} \right)$.

Figura 9. Tubo Prandtl

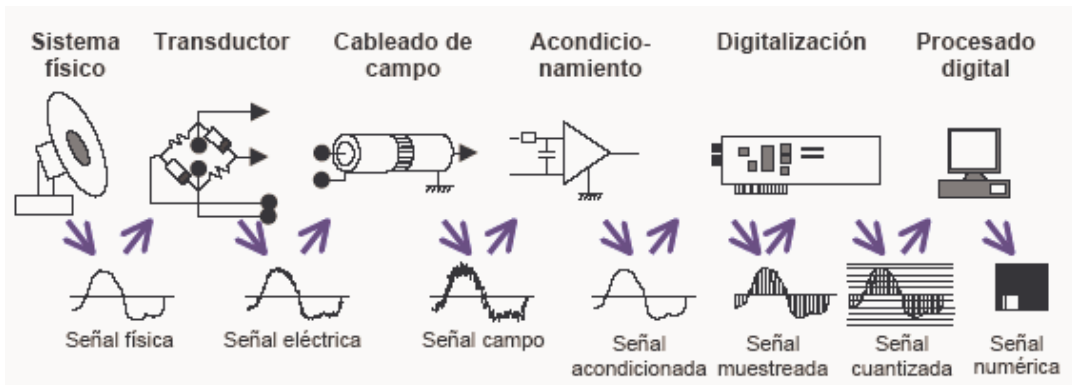


1.3 OBTENCION DE DATOS MEDIANTE UN PC

Los sistemas de adquisición de datos (DAQ) basados en PC y dispositivos insertables son usados en un amplio rango de aplicaciones en los laboratorios, y en gran variedad de aplicaciones industriales. Típicamente, los dispositivos DAQ insertables son instrumentos de propósito general diseñados para medir señales de voltaje. El propósito de estos dispositivos es obtener una variable física y convertirla en una señal eléctrica, para luego ser enviada a una unidad de procesamiento para ser leída y analizada. Básicamente en un sistema de adquisición de datos se pueden encontrar 4 fases que tiene la señal desde que mide el evento físico hasta que ha sido analizada y registrada por un computador, las cuales son: transformación de la señal física en señal

eléctrica por medio de un transductor, acondicionamiento previo de la señal eléctrica producida, adquisición de la señal acondicionada y análisis de dicha señal.

Figura 10. Evolución de la señal en un sistema de adquisición de datos



1.3.1 Transductores: Un transductor o sensor es un instrumento que permite medir un fenómeno físico. Normalmente convierte o traduce el fenómeno a medir en una señal eléctrica, que por medio de un sistema de adquisición de medidas, se traduce a gráficas y tablas mediante software. Existen una enorme variedad de transductores de acuerdo a la clase de magnitudes físicas que se pretende medir. Algunas de esas variables físicas son:

- Posición lineal o angular
- Movimiento
- Velocidad
- Aceleración
- Fuerza
- Torque
- Temperatura
- Humedad

- Presión
- Caudal
- Luz
- Acústica
- Corriente

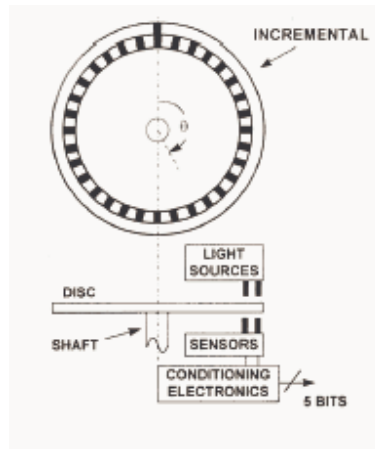
De acuerdo al propósito del presente proyecto, solo será de interés describir en detalle los sensores de posición o desplazamiento angular. Los transductores de posición pueden dar según su construcción o montaje, una posición lineal o angular. Dichos sensores se clasifican básicamente en:

- Electromecánicos: Formados por los finales de carrera o microinterruptores. Se sitúan en puntos estratégicos a detectar.
- Magnéticos: Lo forman los detectores de proximidad magnéticos, que pueden ser los de efecto Hall y los resistivos, típicos en aplicaciones industriales.
- Inductivos: Formado por los detectores de proximidad inductivos, los sincros y revolvers, los LVDT (Lineal Variable Differential Transformer) y los RVDT (Rotatory Variable Differential Transformer).
- Potenciométricos: Lo forman los potenciómetros lineales o circulares.
- Ópticos: Lo forman las células fotoeléctricas y los encoders

❖ **Transductor de posición óptico (Encoder):** Un sensor óptico se basa en el aprovechamiento de la interacción entre la luz y la materia para determinar las propiedades de ésta. Un encoder es básicamente un dispositivo provisto de un disco que tiene dibujados segmentos para ser detectados por los sensores. Existen dos clases de encoders de acuerdo a su configuración y funcionamiento: encoders incrementales y encoders absolutos. A continuación se hará una breve descripción de cada uno de estos.

a-.) Encoder incremental: En este tipo de encoder, un sensor óptico detecta el número de segmentos de que dispone el disco y otro sensor detecta la posición cero de dicho disco. Los codificadores ópticos o encoders incrementales constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma correcta, y de un elemento fotorreceptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición, a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese cada marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Figura 11. Encoder incremental

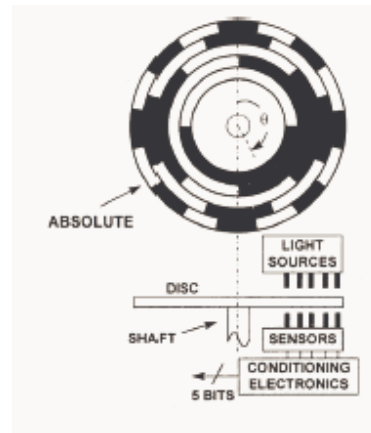


Fuente: Silica. An Avnet Division.

Según se ve en la figura, un encoder incremental utiliza al menos 2 elementos generadores de señal (pistas), de las cuales una detecta la dirección de giro y la otra hace el registro de los pulsos (medida del ángulo). Es importante resaltar que en caso de suspenderse la energía, se pierde la medida, es decir que un encoder incremental no memoriza.

b-.) Encoder absoluto: Permiten conocer la posición exacta en cada momento sin tener que dar una vuelta entera para detectar el punto cero del disco. La única diferencia es que necesita varios sensores ópticos y el disco debe tener una codificación tipo Manchester, de acuerdo a lo mostrado en la figura 12. Un encoder absoluto entrega una palabra digital donde cada posición tiene una posición única o absoluta. La señal de salida no es dependiente del almacenamiento de pulsos, de manera que si la energía se suspende, el disco se devuelve y luego de retornar la energía el sistema entregara una nueva posición única sin necesidad de retornar a cero.

Figura 12. Encoder absoluto

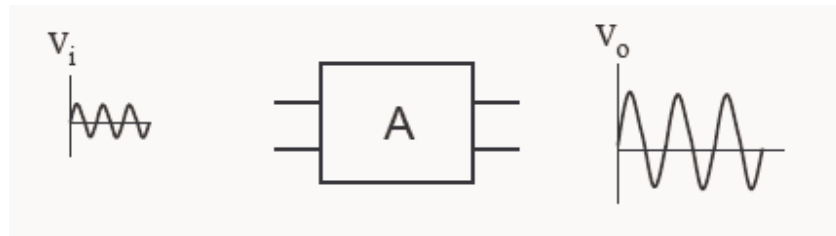


Fuente: Silica. An Avnet Division.

1.3.2 Acondicionamiento de la señal: En el acondicionamiento de la señal se llevan a cabo todas las transformaciones que deben llevarse a cabo en las señales eléctricas que resulten en la salida del transductor, las cuales son previas al procesado de manera que se extraiga adecuadamente la información que se mida o evalúe. Los procesos de amplificación de una señal en un sistema de adquisición de datos son los siguientes:

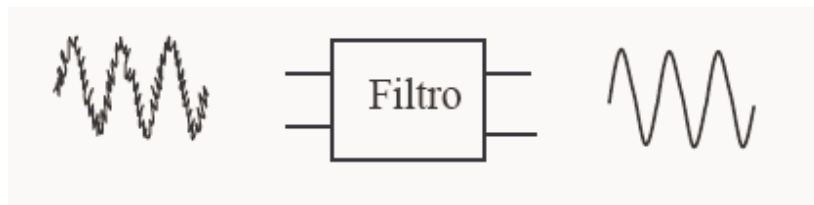
a-.) Amplificación de señales: Este acondicionamiento de señal debe realizarse cuando se considera que el nivel típico de salida de un sensor es demasiado bajo. Cuanto antes podamos elevar los niveles de las señales tanto mejor porque los posibles ruidos que se introduzcan en el circuito resultarán cuantitativamente menores.

Figura 13. Amplificación de la señal



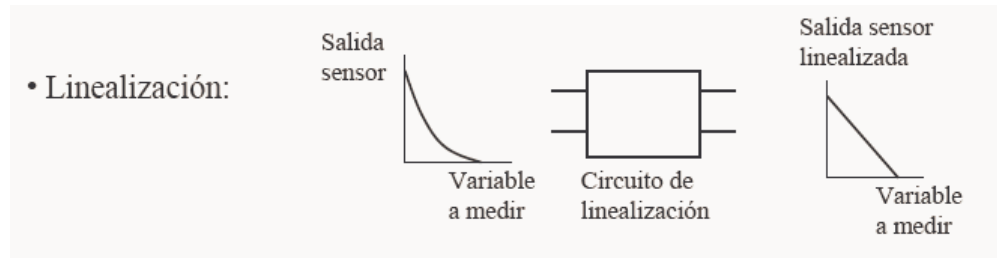
b-.) Filtrado de señales: Consiste en eliminar cierta banda de frecuencias dentro de ellas. El intervalo de frecuencias que deja pasar un filtro es la banda de paso, el que no se deja pasar es la banda de rechazo y los límites entre ambos intervalos son las frecuencias de corte.

Figura 14. Filtrado de señales



c-.) Linealización: Consiste en obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se desea medir. Un caso bastante frecuente es el de un sensor donde la salida es exponencial con respecto a la variable a medir.

Figura 15. Linealización de señales



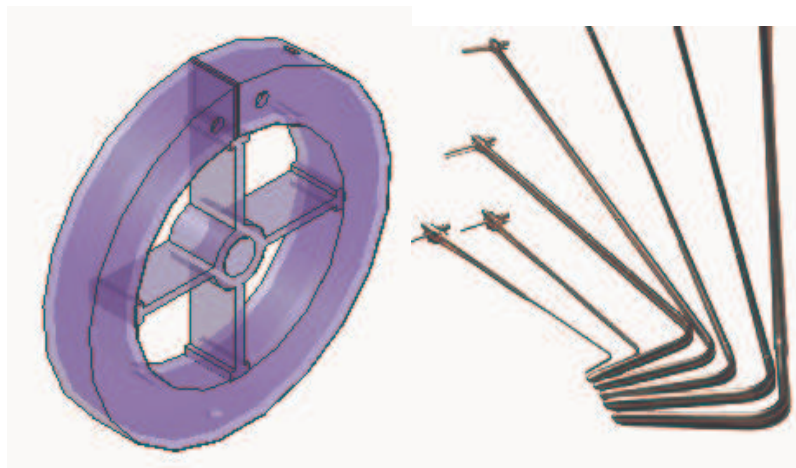
d-.) Conversión de señal: La conversión de señal se requiere cuando es necesario convertir un tipo de variación eléctrica en otro. Así, un gran número de sensores varían su resistencia como consecuencia de la variación de la variable a medir. En estos casos se requiere un circuito que convierta estos cambios de resistencia en una tensión o en una corriente. Es bastante frecuente también en la transmisión de una señal (sobre todo a largas distancias) la necesidad de realizar una conversión de tensión a corriente y viceversa.

1.3.3 Procesamiento de la señal: Incluye el conjunto de transformaciones a que debe ser sometida la señal eléctrica a fin de extraer de ella la información que se busca. El procesamiento de la señal suele contener muy diversas operaciones, ya sean lineales, no lineales, de composición de múltiples señales, o de procesado digital de dichas señales.

2. DISEÑO DEL MEDIDOR

El diseño del medidor de velocidad de acuerdo al principio de manómetro toroidal es una combinación de dos diferentes instrumentos de medición de laboratorio: el manómetro diferencial tórico y el tubo Pitot modificado. La razón de integrar estos dos instrumentos es construir un dispositivo que traduzca una señal de velocidad de flujo de aire en un ángulo de giro, de acuerdo a un modelo matemático previamente deducido con base en los principios de la ecuación de Bernoulli, la ecuación de continuidad, el manómetro toroidal y el tubo Pitot.

Figura 16. Elementos constituyentes del medidor



Manómetro toroidal

Tubo Pitot

Por medio de la unión de estos dos elementos se configura un medidor de velocidad de aire que sensa una presión diferencial que opera sobre el toroide y lo hace girar, de manera que el ángulo de giro producido por esa presión

diferencial, de acuerdo a un modelo matemático establecido por el análisis de la ecuación de Bernoulli para flujo incompresible, representa una velocidad de dicha corriente de aire dentro de un ducto cerrado. Sin embargo, para integrar el dispositivo se requiere una configuración específica que permita al tubo Pitot registrar el diferencial de presión y comunicarlo al manómetro toroidal.

2.1 BANCO DE FLUJOMETRO NEUMATICO

El medidor de velocidad de aire fue diseñado específicamente para ser implementado en el banco de flujometro neumático del laboratorio de mecánica de fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Este banco de pruebas, mostrado en la figura 17, está compuesto de una serie de elementos que permiten crear un flujo a través de una tubería, el cuál puede ser variado para analizar las condiciones de flujo a diferentes velocidades de aire a través del flujometro, analizar las condiciones de la ecuación de Bernoulli en la evaluación de velocidades a través de los diferenciales de presión producidos por el cambio de sección del tubo Venturi, establecer experimentalmente los perfiles de velocidad de la corriente del gas a través de la tubería y el establecimiento de diferentes condiciones de temperatura del flujo.

Figura 17. Banco de flujometro neumático



2.1.1 Tubo Venturi: El tubo Venturi es un dispositivo diseñado para medir la velocidad de un fluido aprovechando el efecto Venturi, el cuál consiste en que la corriente de un fluido dentro de un conducto cerrado disminuye la presión del fluido al aumentar la velocidad cuando pasa por una zona de sección menor. El tubo Venturi presente en el banco de flujometro neumático se diseño y construyó de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASME PTC 19.5, referentes a las dimensiones recomendadas para el tubo.

Figura 18. Tubo Venturi



Los componentes del flujometro neumático son:

- ❖ Motoventilador: Se encuentra ubicado aguas arriba del tubo Venturi. Consiste de un motor conectado directamente a un ventilador y operado por un variador de velocidad Siemens Micromaster 440. El motoventilador provee diferentes velocidades de flujo de aire para el análisis de diferentes velocidades de aire a través del equipo
- ❖ Resistencias eléctricas: A un lado del motoventilador han sido ubicadas 3 resistencias eléctricas que proveen 3 niveles diferentes de temperatura para la corriente de aire a través del tubo Venturi, las cuales son operadas directamente desde la caja de control en tres niveles: bajo, medio y alto.

- ❖ **Linealizadores:** Se encuentran ubicados a la salida del motoventilador pero dentro de la tubería. Debido a la alta turbulencia generada por el ventilador a la salida, la cual genera grandes fluctuaciones en la medida, se recomienda por medio de la norma ASME PTC 19.5 la instalación de un linealizador. Un linealizador es una serie de tubos conectados unos al lado de otros dentro de la tubería principal, de manera que se normalice el flujo de aire. En el caso de este banco de pruebas se utiliza un linealizador tubular compuesto por tubos de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y una longitud de 12".

- ❖ **Tubería de desarrollo:** Es una tubería que la norma ASME PTC 19.5 recomienda sea colocada después del linealizador para permitir que se forme el perfil de velocidad de la corriente de aire. La tubería de desarrollo dispuesta es de 48" de longitud.

- ❖ **Entrada convergente (estrechamiento de sección):** Es el componente fundamental del Venturi ya que provee la reducción de área en torno a la cuál se va a medir el diferencial de presión respecto de la sección principal. Antes de comenzar la reducción de área se ubican las tomas de presión de sección mayor.

- ❖ **Garganta:** Es la zona de área reducida en torno a la cuál se instalan las tomas de presión de esta sección.

- ❖ **Salida divergente (aumento de sección):** Es la salida que aumenta la sección al nivel inicial.

- ❖ Tubería final: Es la tubería de sección constante a la cuál se le instalará el medidor construido. El diámetro de esta tubería es de 152.4 mm, diámetro en torno al cuál se diseño y construyó el medidor de velocidad de aire.

2.1.2 Caja de control: A un lado del tubo Venturi se encuentra ubicada una caja de control en la cuál se ha realizado toda la instalación eléctrica del banco, la cuál consiste en los interruptores de encendido y apagado, el variador de velocidad del motoventilador, el tablero de control de temperatura con su respectiva termocupla conectada al tubo Venturi y el interruptor de las resistencias eléctricas. A continuación se enumeran los componentes de la caja de control con su respectiva función.

Figura 19. Caja de control



- ❖ Variador de velocidad: Se ha dispuesto para el banco de flujometro neumático un variador de velocidad Siemens Micromaster 440, el cuál controla la velocidad del motor por medio de la variación de

frecuencia, proporcionando de acuerdo a los parámetros internos programados en el variador una gama de velocidades para un rango de frecuencias de 0 a 60 Hz, lo cuál en el flujómetro, para la sección de tubería desarrollada provee una gama de velocidades de aire de 0 a 13 m/s.

Figura 20. Variador de velocidad



- ❖ Sensor e indicador de temperatura de proceso: Se trata de un tablero Love Controls serie PP451, el cuál limita la temperatura a 45° haciendo una visualización de la temperatura por medio de una termocupla tipo J conectada a él y por medio de un display indica en todo momento la temperatura que registra dicha termocupla.

Figura 21. Tablero de control de temperatura



2.2 DESCRIPCION DEL APARATO

El medidor se ha diseñado específicamente para ser instalado en el banco de flujometro neumático del laboratorio de mecánica de fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para el cuál se ha adaptado un ducto prolongado a él dentro del cuál irá instalado el medidor. El propósito es tomar el flujo de aire que produce el banco de flujometro neumático para instalar, calibrar y operar el dispositivo construido. La figura 22 muestra el medidor construido y ensamblado.

Figura 22. Medidor de velocidad de aire construido



El medidor está compuesto por los siguientes elementos:

- ❖ Un cuerpo tubular externo
- ❖ Un cuerpo semiesférico que se ensambla a un extremo del cuerpo tubular
- ❖ Un manómetro cilíndrico instalado en el extremo opuesto al cuerpo semiesférico
- ❖ Un contrapeso sujetado al eje de soporte, el cuál equilibrará las fuerzas de giro producidas por el efecto de la presión sobre el líquido manométrico al interior del cilindro manométrico.
- ❖ 4 tubos Pitot modificados separados entre ellos a 90° , que capten la presión total del flujo en el área anular existente entre el aparato de medición y la tubería.
- ❖ 4 conductos para el registro de la presión estática, separados entre ellos a un ángulo de 90° .
- ❖ Un eje de soporte, el cuál tiene taladrado unos conductos para el registro de la presión estática
- ❖ Un eje secundario, concéntrico al eje principal y al cuál se le ha taladrado un conducto interno que permiten el registro de la presión total de la corriente de aire

- ❖ Soportes internos circulares que permitan sujetar el cuerpo tubular al eje del aparato
- ❖ Conductos que comunican las presiones estática y dinámica desde los ejes-conducto hasta el manómetro cilíndrico.
- ❖ Un transductor de desplazamiento angular que registra el ángulo de giro del dispositivo de acuerdo a la velocidad de flujo de aire registrada por el aparato.
- ❖ Un tubo externo conectado por medio de una brida al flujometro neumático del laboratorio de mecánica de fluidos (carcasa del equipo).

Las figuras 23, 24 y 25 reseñan esquemáticamente cada uno de los componentes previamente descritos.

Figura 23. Medidor de velocidad de aire dentro del tubo

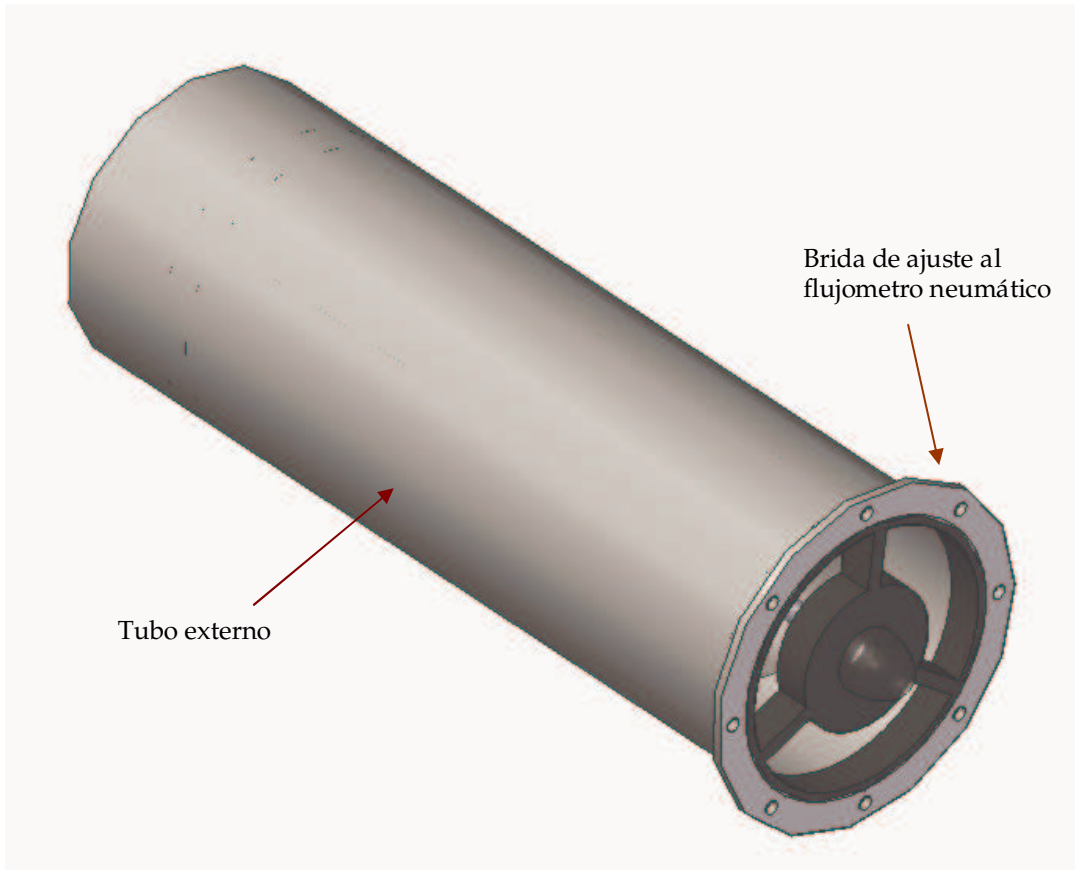


Figura 24. Medidor de velocidad de aire fuera del tubo

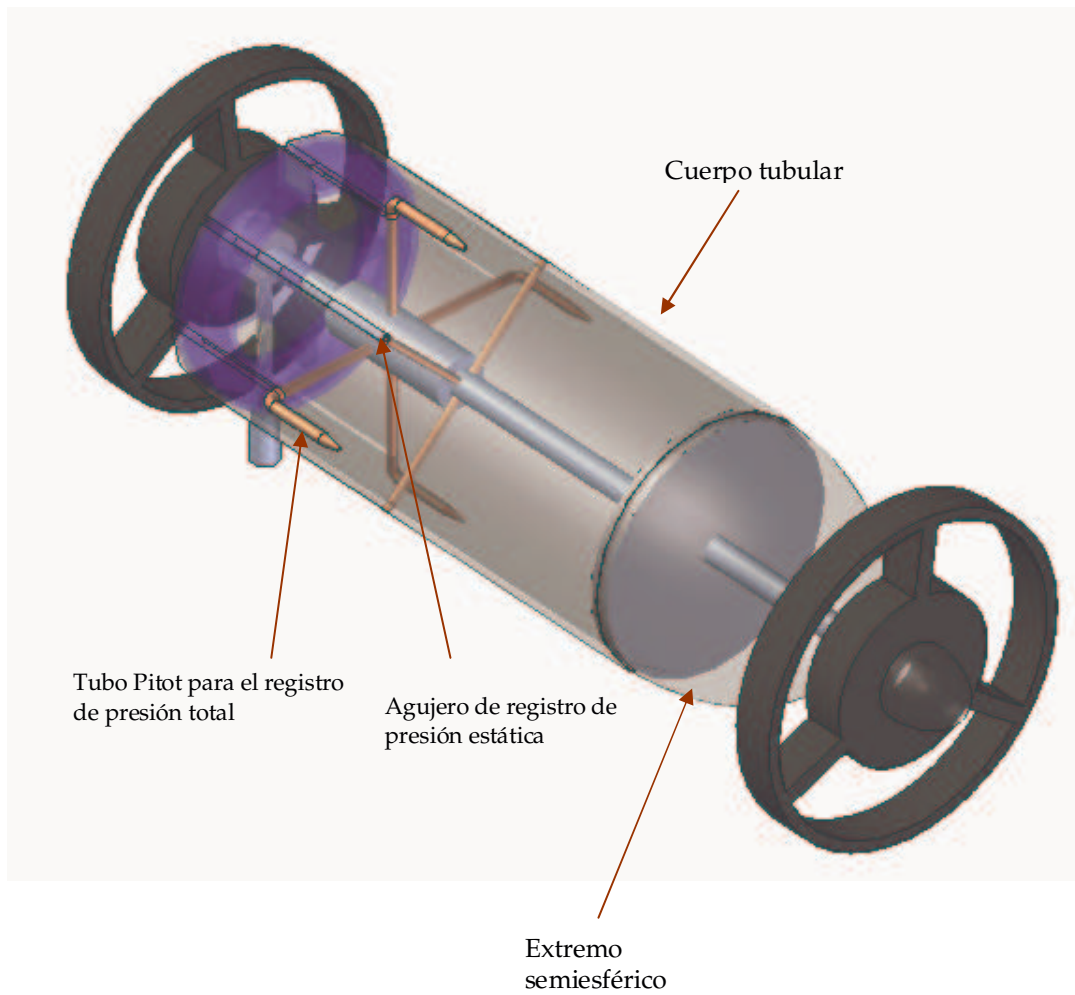
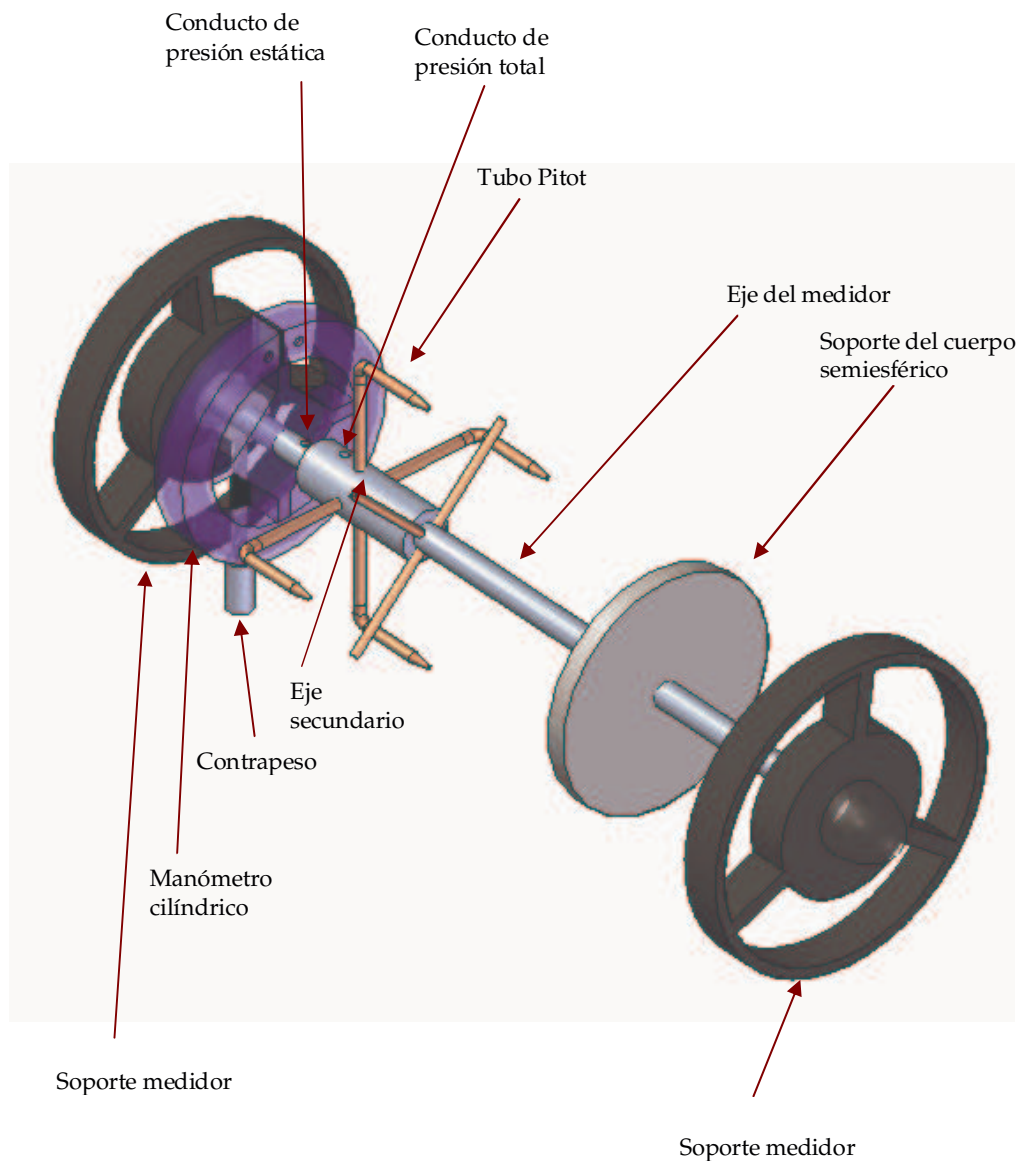


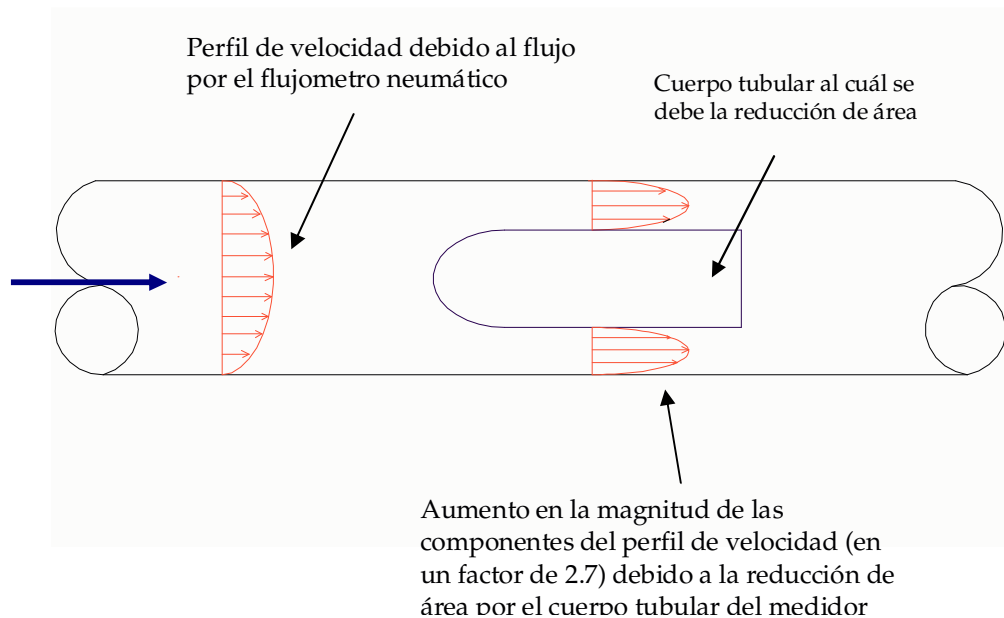
Figura 25. Vista interna del medidor de velocidad de aire



2.2.1 Cuerpo del medidor: Se ha optado por darle una configuración tubular al cuerpo del aparato con el propósito de obtener una reducción de área, pasando de un flujo por el ducto circular de área igual a 18241.5 mm^2 a la salida del tubo Venturi a un flujo por el conducto anular que se forma entre el medidor y la prolongación del tubo Venturi de área igual a 6742.45 mm^2 , aumentando la velocidad de aire (en un factor de 2.7), ampliando considerablemente la sensibilidad del medidor. Además provee una característica adicional que consiste en la incorporación de 4 tubos Pitot modificados que captan la máxima presión de estancamiento (o presión total), la cuál se forma debido a la máxima componente de velocidad en el conducto anular.

La figura 26 ilustra el propósito del cuerpo tubular dentro de la tubería para la configuración del medidor

Figura 26. Reducción de área debida al cuerpo tubular



2.2.2 Cuerpo semiesférico: En el extremo del cuerpo tubular se conecta un cuerpo semiesférico hueco que estará en contacto directo con la corriente de aire que suministra el flujometro neumático. El objeto de esta forma geométrica es proveer al dispositivo una corriente de flujo uniforme en la reducción de área del anillo tubular, evitando los remolinos que puede causar el contacto de la corriente de aire con vértices rectos, los cuales generan desorden en el flujo y la formación de un perfil de velocidad irregular en la sección anular. Realizando la simulación de las condiciones de flujo para el medidor se demostró esta condición de uniformidad suministrada por esta punta, como se observa en la figura 27.

Figura 27. Patrones de flujo debidos a la geometría del medidor



Patrón de flujo debido al cuerpo semiesférico



Patrón de flujo sin el cuerpo semiesférico

Fuente: Fluent 6.1. Fluent Inc.

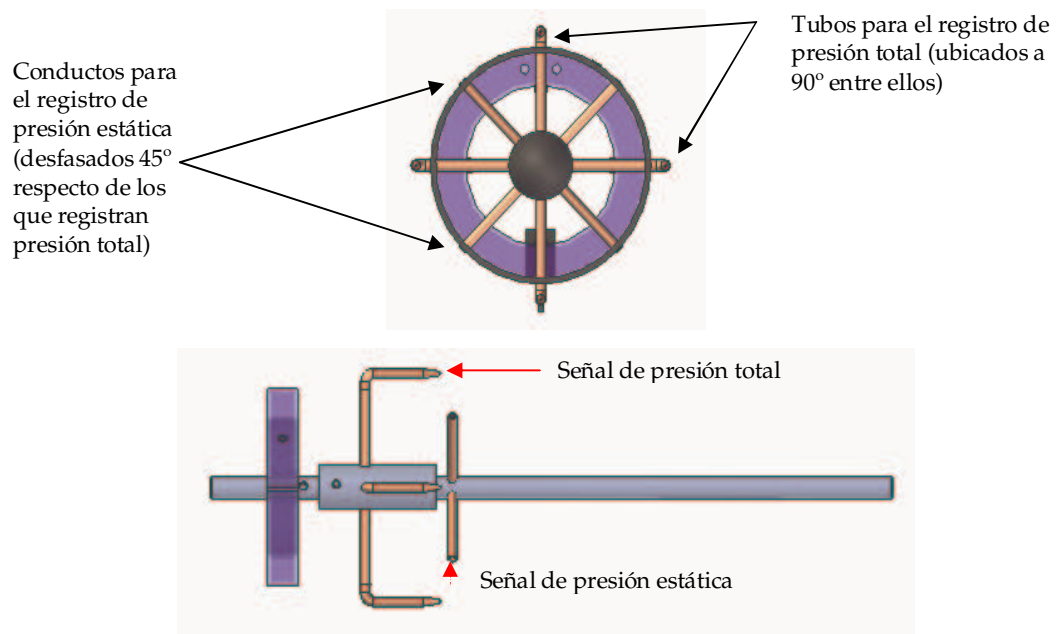
De acuerdo a la simulación del flujo a través del medidor realizada mediante el software Fluent 6.1*, se pudo ver que la tendencia en el flujo alrededor del cuerpo cilíndrico en presencia del extremo semiesférico proporciona un flujo ordenado, en el cuál el perfil de velocidad se desarrolla rápidamente, mientras que en la ausencia del extremo semiesférico, según se observa en la gráfica inferior de la figura 27, muestra un perfil de velocidad desordenado a través del conducto anular, lo cuál constituye una fuente de imprecisión en el registro de las presiones diferenciales.

2.2.3 Tubo Pitot modificado: Se ha tomado como referencia el tubo Pitot – Prandtl, el cuál tiene un orificio central y perpendicular al flujo para sensar la presión total o de estancamiento y un orificio lateral paralelo al flujo para registrar la presión estática. Cada una de estas señales se lleva a su respectivo puerto en el manómetro cilíndrico el cual mide el diferencial de presión entre ambas, o presión dinámica del flujo, de acuerdo a lo explicado previamente en el marco teórico.

En este caso se ha realizado una modificación importante al tubo Pitot, consistente en que las tomas de presión total y estática se han separado, de manera que por un conducto se registra la presión total y por otro se registra la presión estática, insertando 4 tomas diferentes para el registro promedio de la presión total y 4 tomas para la presión estática.

* Ver sección 2.4

Figura 28. Tubos Pitot modificados



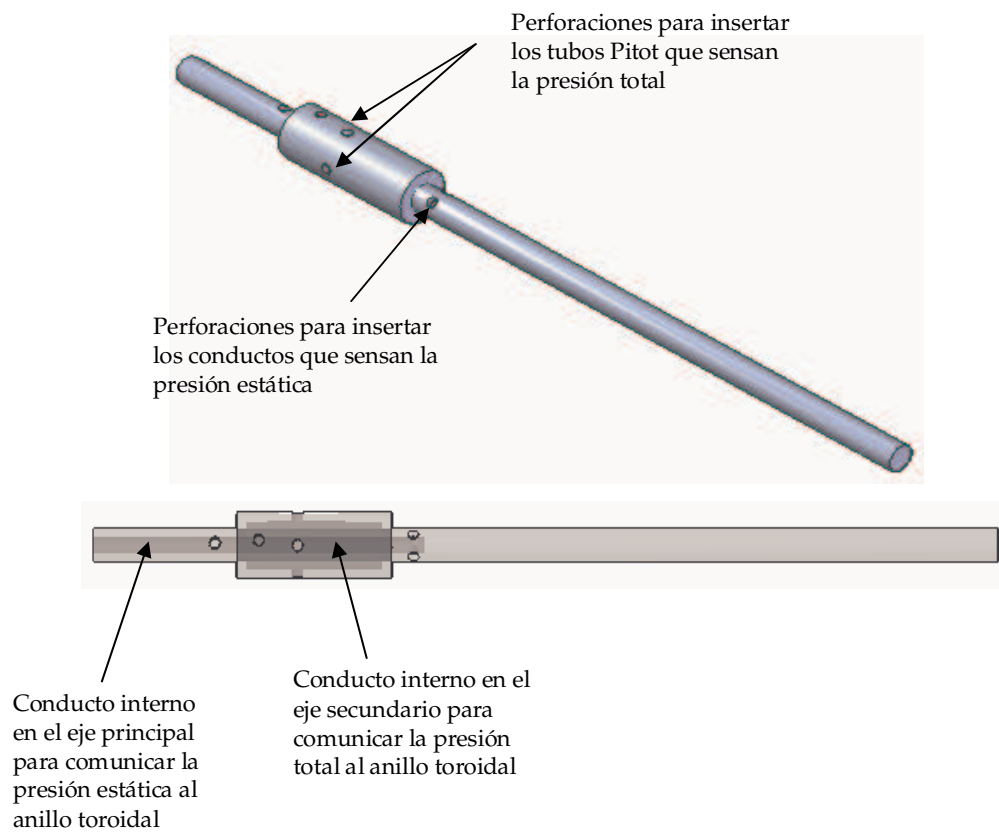
2.2.4 Conductos internos: El propósito de los conductos internos es comunicar las tomas de presión total y estática al manómetro cilíndrico. Se ha optado por utilizar los ejes de soporte del medidor para este fin haciéndoles una perforación interna. De esta forma, los ejes tendrán una doble función:

- ❖ Soportar el medidor de velocidad de aire
- ❖ Conducir la presión total y estática

Para esto se ha hecho una adaptación especial que consiste en taladrar el eje principal de manera concéntrica al eje mismo a una profundidad determinada y se han taladrado 4 huecos adicionales sobre su superficie para insertar los tubos que registrarán la presión estática. Adicionalmente se ha construido un eje secundario que es de mayor diámetro que el eje principal y

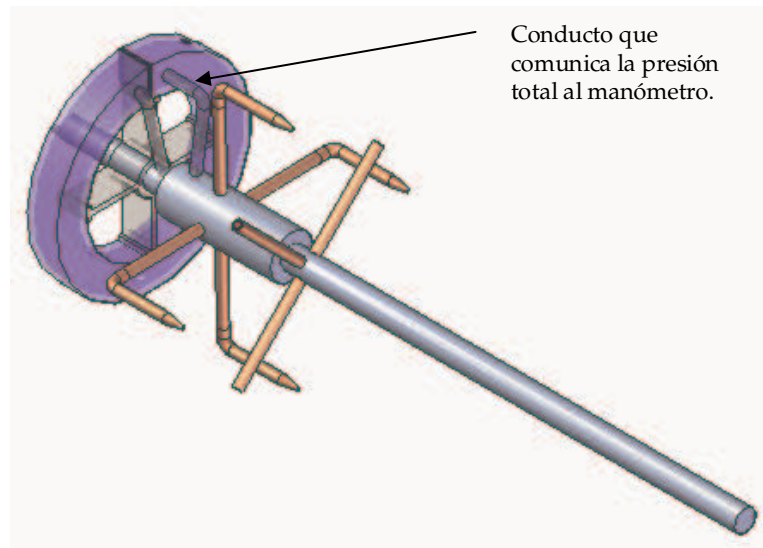
concéntrico a este, de forma que se establezca un conducto interno entre ambos ejes para la presión total. La figura 29 ilustra lo anterior expresado.

Figura 29. Conductos internos en los ejes



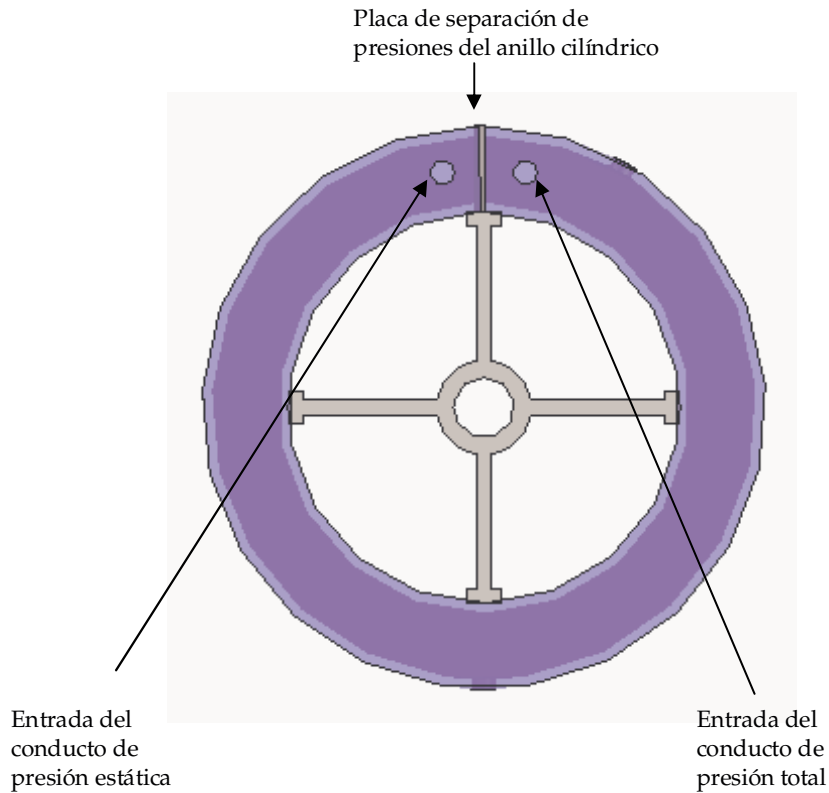
2.2.5 Conductos de presión del manómetro: Se colocarán unos conductos que se conectarán desde la perforación del eje hasta el manómetro, de manera que éste reciba la presión sensada desde los tubos de registro y comunicada a través de los ejes taladrados internamente.

Figura 30. Conductos de presión del manómetro



2.2.6 Anillo cilíndrico: El anillo cilíndrico es el componente mas importante del medidor ya que en el se va a medir el diferencial de presión que causará el giro de todo el dispositivo debido al momento generado en torno al centro del medidor por el peso de líquido formado. El anillo cilíndrico tiene en la parte superior una placa de separación, que aísla las dos tomas de presión (total y estática), haciendo que pueda formarse una diferencia de presiones (presión dinámica), con la cuál se calcula la velocidad del aire, de acuerdo al modelo matemático deducido para este dispositivo.

Figura 31. Anillo cilíndrico



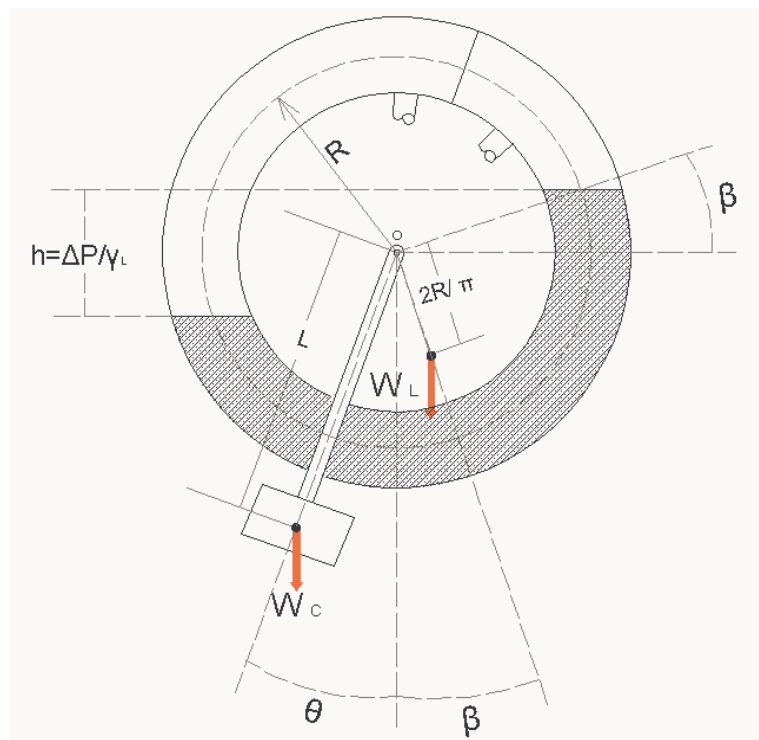
2.3 MODELO ESTÁTICO DEL MEDIDOR DE VELOCIDAD DE AIRE

El principio de funcionamiento del manómetro cilíndrico en cuanto al registro de la presión diferencial y el subsecuente giro debido al desbalance de la columna de líquido, el cuál será la variable primordial a registrar para obtener la velocidad de flujo de aire es analizado a continuación. Inicialmente es necesario mediante la técnica del diagrama de cuerpo libre del medidor, en cuanto a su equilibrio de momentos respecto al centro del manómetro para evidenciar las componentes de las fuerzas que causen giro, establecer el modelo matemático que relacione la variable de velocidad del aire con el ángulo girado por el medidor. Posteriormente se realizará la

estimación de dimensiones significativas de los componentes del medidor de acuerdo al modelo matemático de velocidad establecido por las ecuaciones estáticas para posteriormente hacer una simulación de las condiciones de flujo del aparato y un análisis dinámico del modelo para verificar la respuesta dinámica del medidor.

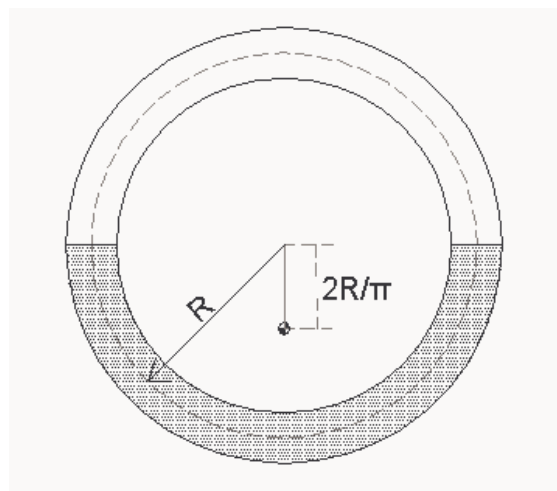
2.3.1 Deducción del modelo matemático de velocidad: La figura 32 ilustra el diagrama de cuerpo libre para el manómetro cilíndrico, en el cuál se han considerado las fuerzas que causarán el momento de giro. Las fuerzas de presión sobre el líquido manométrico y sobre la placa separadora se consideran fuerzas internas, por lo cuál no se tendrán en cuenta en el análisis del diagrama de cuerpo libre.

Figura 32. Modelo estático del manómetro diferencial cilíndrico



En este modelo se toma el diámetro medio del anillo cilíndrico para el cálculo del centro de gravedad del líquido manométrico introducido. Es decir, que el centro de gravedad vertical del líquido manométrico se calculará con el radio medio del anillo.

Figura 33. Centro de gravedad del anillo



$$\sum M_o = 0$$

$$\left[W_c \times \text{sen}(\theta) \times L \right] - \left[W_L \times \text{sen}(\beta) \times \frac{2R}{\pi} \right] = 0$$

$$\text{Como: } \text{sen}(\beta) = \frac{h}{2R}$$

$$\text{sen}(\beta) = \frac{\Delta P}{2R \times \gamma_L}$$

Donde:

L = Distancia del contrapeso

R = Radio medio del anillo cilíndrico

W_c = Peso del contrapeso

W_L = Peso de la columna de líquido

θ = Angulo de giro del medidor

β = Angulo de la columna de líquido

γ_L = Peso específico del líquido manométrico

ΔP = Diferencial de presión

Entonces:

$$W_c \times \text{sen}(\theta) \times L = W_L \times \frac{\Delta P}{2\gamma_L R} \times \frac{2R}{\pi}$$

$$\Delta P = \frac{\pi \times \gamma_L \times W_c \times L \times \text{sen}(\theta)}{W_L}$$

Sea: $W_c = m_c \times g$

$$W_L = m_L \times g = S \times \rho_{H_2O} \times \forall \times g$$

$$\forall = \frac{\pi \times h \times (R_e^2 - R_i^2)}{2}$$

Volumen del líquido dentro del manómetro

(Volumen achurado en la figura 33)

Donde:

m_c = Masa del contrapeso

m_L = Masa de la columna de líquido

S = Peso específico del líquido manométrico

ρ_{H_2O} = Densidad del agua

R_e = Radio externo del manómetro cilíndrico

R_i = Radio interno del manómetro cilíndrico

h = Profundidad del manómetro cilíndrico

Introduciendo los parámetros anteriores y reordenando la ecuación obtenemos:

$$\Delta P = \frac{2 \times m_c \times L \times g}{h \times (R_e^2 - R_i^2)} \times \text{sen}(\theta)$$

Téngase en cuenta que ΔP es el diferencial de presión (presión dinámica) que se obtiene del manómetro cilíndrico y que está directamente relacionado con la velocidad de flujo de aire.

Aplicando la ecuación de Bernoulli simplificada a las condiciones de flujo existentes dentro del flujometro neumático para condiciones de flujo incompresible tenemos que:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_{air} \times V^2$$

Donde:

ρ_{air} = Densidad del aire

V = Velocidad de flujo del aire

Introduciendo el valor de la presión en función de la velocidad de la corriente de aire obtenemos que:

$$\frac{2 \times m_c \times g \times L}{h \times (R_e^2 - R_i^2)} \times \text{sen}(\theta) = \frac{1}{2} \rho_{air} \times V^2$$

Reordenando la ecuación obtenemos la ecuación que relaciona la velocidad de flujo de aire con el ángulo girado por el manómetro toroidal, el cuál será la variable a capturar por medio del sistema de adquisición de datos, de esta forma:

$$V = \sqrt{\frac{4 \times m_c \times g \times L}{h \times \rho_{air} \times (R_e^2 - R_i^2)} \times \text{sen}(\theta)}$$

Esta expresión constituye el modelo matemático que relaciona el ángulo de giro del medidor (variable de medición) con la velocidad de flujo de aire (variable a determinar).

2.3.2 Estimación de dimensiones del medidor: La estimación de las dimensiones importantes del prototipo se hizo de acuerdo a una serie de consideraciones, entre las cuales se pueden contar:

- ❖ Se considerará flujo incompresible para la corriente de aire
- ❖ Se asume la distancia del centroide vertical del líquido manométrico de acuerdo al modelo de centroide de arco circular con diámetro de hilo despreciable $\bar{y} = \frac{2R}{\pi}$

- ❖ Se asume un ángulo de giro máximo del medidor de 40° para evitar el rebose del líquido manométrico por los conductos de presión estática y dinámica
- ❖ De acuerdo a las especificaciones del flujometro neumático se dispone de una velocidad máxima a través de su tubería de desarrollo de 13 m/s, correspondiente al máximo parámetro de velocidad que se puede fijar al motoventilador
- ❖ El medidor de velocidad de aire se diseño para ser ajustado dentro de una tubería de 152.4 mm, la cuál es acorde con la tubería final del flujometro

Se asume para el manómetro cilíndrico $R_e = 57\text{mm}$, $R_i = 43\text{mm}$ y profundidad $h=15\text{ mm}$.

La velocidad por el conducto anular formado entre el medidor y la tubería se calcula de acuerdo a la ecuación de continuidad:

$$V_1 A_{tubo} = V_2 A_{anular}$$

$$V_2 = \frac{V_1 A_{tubo}}{A_{anular}}$$

$$V_2 = \frac{13 \times \pi \times 152.4^2}{\frac{4}{13 \times \pi \times (152.4^2 - 121^2)}} = 35.17 \text{ m/s}$$

❖ **Estimación de dimensiones principales:** Para las condiciones previamente establecidas:

$$V = 35.17 \text{ m/s}$$

$$\theta_{\max} = 40^\circ$$

$$R_e = 57 \text{ mm} = 0.057 \text{ m}$$

$$R_i = 43 \text{ mm} = 0.043 \text{ m}$$

$$h = 15 \text{ mm} = 0.015 \text{ m}$$

Asumiendo $m_c = 25 \text{ gramos}$

De acuerdo a la ecuación de velocidad:

$$V = \sqrt{\frac{4 \times m_c \times g \times L}{h \times \rho_{\text{air}} \times (R_e^2 - R_i^2)}} \times \text{sen}(\theta)$$

Entonces:

$$L = \frac{h \times V^2 \times \rho_{\text{air}} \times (R_e^2 - R_i^2)}{4 \times m_c \times g \times \text{sen}(\theta)}$$

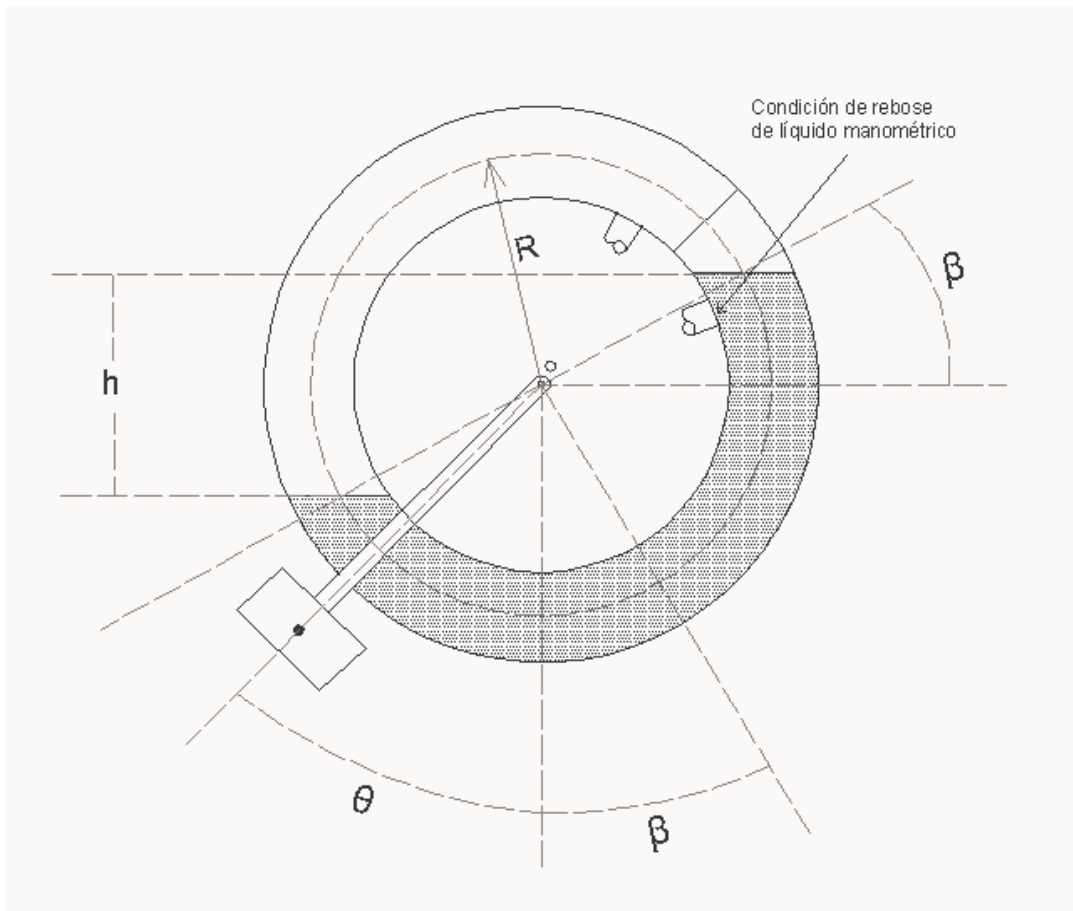
$$L = \frac{0.015 \times 35.17^2 \times 1.1774 \times (0.057^2 - 0.043^2)}{4 \times 0.025 \times 9.81 \times \text{sen}(40)}$$

$$L = 48.5 \text{ mm}$$

❖ **Estimación del ángulo máximo de giro del medidor:** Para comprobar la condición de ángulo máximo de giro que evite el rebose de líquido manométrico, según se ilustra en la figura 34, se retoma la ecuación de presión diferencial deducida previamente:

$$\Delta P = \frac{2 \times m_c \times L \times g}{h \times (R_e^2 - R_i^2)} \times \text{sen}(\theta)$$

Figura 34. Condición de rebose de líquido manométrico



Se establece como condición necesaria para evitar rebose, que el ángulo θ siga el siguiente parámetro:

$$\beta < 90 - (\theta + 10)$$

De acuerdo a los valores previamente determinados:

$$\begin{aligned}
m_c &= 25 \text{ g} = 0.025 \text{ Kg} \\
L &= 48.5 \text{ mm} = 0.0485 \text{ m} \\
R &= 50 \text{ mm} = 0.05 \text{ m} \\
R_e &= 57 \text{ mm} = 0.057 \text{ m} \\
R_i &= 43 \text{ mm} = 0.043 \text{ m} \\
h &= 15 \text{ mm} = 0.015 \text{ m} \\
\theta &= 40^\circ
\end{aligned}$$

$$\Delta P = \frac{2 \times 0.025 \times 0.0485 \times 9.81}{0.015 \times (0.057^2 - 0.043^2)} \times \text{sen}(40)$$

$$\Delta P = 728.16 \text{ Pa}$$

Sea:

$$\text{sen}(\beta) = \frac{h}{2R} = \frac{\Delta P}{2R \times \gamma_L}$$

Se consideraran 3 líquidos manométricos diferentes para comprobar el más conveniente:

a.-) Agua:

$$\gamma_L = \rho g = 1000 \times 9.81 = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\beta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{728.16}{2 \times 9810 \times 0.05} \right) = 47.9^\circ$$

Como $\beta = 47.9^\circ > \beta_{\text{requerido}} = 40^\circ$ el líquido se rebosa.

b.-) Mercurio:

$$\gamma_L = \rho g = 13600 \times 9.81 = 133416 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\beta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{728.16}{2 \times 133416 \times 0.05}\right) = 3.12^\circ$$

Como $\beta = 3.12^\circ < \beta_{\text{requerido}} = 40^\circ$ el líquido no rebosa, pero el ángulo de medición es muy pequeño.

c.-) Etilenglicol:

$$\gamma_L = \rho g = 1111.26 \times 9.81 = 10901.5 \frac{N}{m^3}$$

$$\beta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{728.16}{2 \times 10901.5 \times 0.05}\right) = 41^\circ$$

$\beta = 41^\circ \cong \beta_{\text{requerido}}$. Así, se puede concluir el líquido no rebosa y el ángulo de líquido tiene un amplio rango de medición, por lo tanto se selecciona.

❖ **Estimación de dimensiones del contrapeso:** Se diseñará un contrapeso cilíndrico. Se harán las siguientes suposiciones:

Material: Acero

$$\rho = 7830 \frac{kg}{m^3}$$

$$\nabla = \frac{m}{\rho} = \frac{25 \times 10^{-3}}{7800} = 3194.84 \text{ mm}^3$$

$$\nabla = \frac{\pi \times d_c^2}{4} \times h_c$$

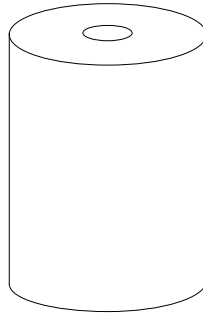
Se asume que:

$$d_c = \frac{1}{2} \text{ in} = 12.7 \text{ mm}$$

Así:

$$h = \frac{4 \times 3194.84}{\pi \times 12.7^2} = 25.22 \text{ mm}$$

Figura 35. Contrapeso



De esta forma quedan definidas las siguientes dimensiones para el contrapeso:

$$h = 25.22 \text{ mm}$$

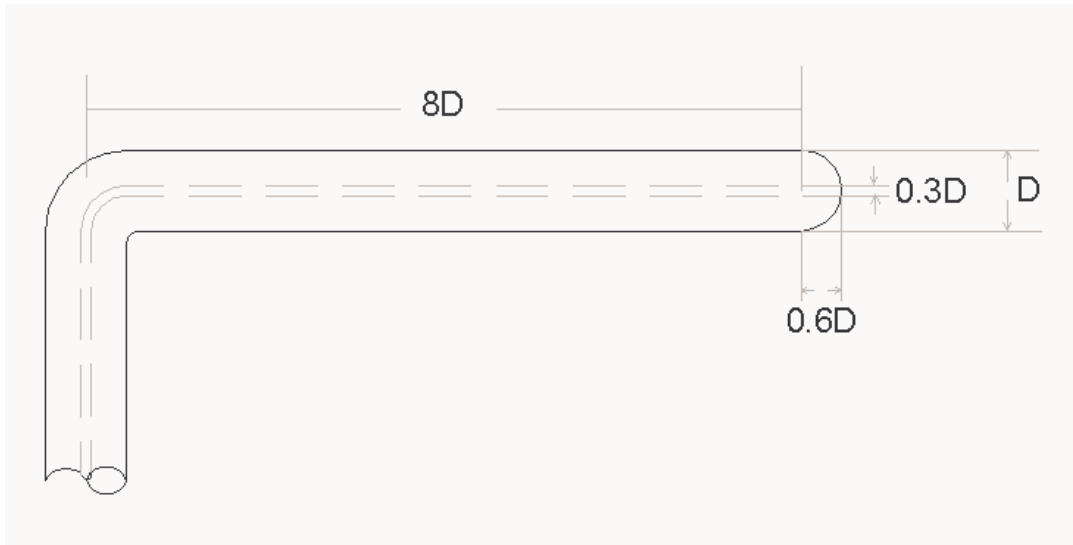
$$d_c = 12,7 \text{ mm}$$

❖ **Diseño del tubo Pitot:** Según se muestra en la figura 36, para tomar las presiones en diferentes puntos alrededor de la sección anular se ha propuesto la toma de 4 tubos Pitot separados a 90° , de manera que su disposición genere una geometría simétrica que permita el balanceo de todo el medidor. Así mismo se ha dispuesto la toma de presión estática a través de 4 conductos, separados también a 90° entre ellos y desfasados a 45° de las tomas de presión total (tubos Pitot).

Para el diseño del tubo Pitot se han seguido las recomendaciones del U.S National Physical Laboratory, consignadas en el libro "The Measurement of

Air Flow” del miembro de dicho laboratorio E. Ower e ilustradas en la figura 27.

Figura 36. Dimensiones recomendadas del tubo Pitot



Se toma: $D = 5 \text{ mm}$

Longitud horizontal Pitot $L_{HP} = 8D = 40 \text{ mm}$

Diámetro interno del tubo Pitot $D_{IP} = 0.3D = 1.5 \text{ mm}$

Longitud de la punta del tubo Pitot $L_{PP} = 0.6D = 3 \text{ mm}$

3. SIMULACION DEL FLUJO DE AIRE MEDIANTE FLUENT 6.1

El proceso de diseño se ha realizado asumiendo ciertas condiciones en cuanto al flujo de aire a través del tubo Venturi y luego a través del medidor. Como se expuso previamente, el propósito de diseñar un medidor en forma de bala es crear un espacio anular entre el medidor y el tubo a través del cuál fluye el aire, el cuál incrementa la velocidad del aire, de manera que se aumente el rango de medición (figura 26). Sin embargo se plantea la necesidad de corroborar estas afirmaciones teóricas por medio de una simulación del flujo a través de la tubería y el medidor.

Por dicha razón se ha implementado una simulación del flujo de aire por medio del software Fluent 6.1 creado por la compañía Fluent Inc. Este software es un programa de cómputo sobre el estado del arte en modelamiento de flujo de fluidos y transferencia de calor. Este software provee una gran flexibilidad en enmallado de elementos finitos, el cuál puede ser generado en base a geometrías complejas con relativa facilidad.

El procedimiento para llevar a cabo la simulación fue el siguiente:

- ❖ Crear la geometría deseada para el análisis dentro del software auxiliar Gambit 2.0

- ❖ Generar el enmallado de la geometría previamente creada de acuerdo a los parámetros requeridos de la simulación con Gambit 2.0. Se ha seleccionado un enmallado tetraédrico para un volumen en 3D, el

cuál consta de 44881 celdas, 9780 nodos, 432 caras triangulares de celda en la condición de frontera de velocidad de entrada de aire y 164 caras triangulares en la condición de frontera de presión de salida.

- ❖ Crear las condiciones de frontera para la geometría enmallada, que en este caso serán: superficie de velocidad de entrada de aire (velocity inlet) y superficie de salida de aire (outflow). El resto de condiciones de frontera como condiciones de pared, de fluido e internas son creadas automáticamente por el programa.

- ❖ Inicializar Fluent 6.1 y cargar la geometría enmallada

- ❖ Definir el fluido para el cuál se llevará a cabo el análisis. En nuestro análisis el fluido es aire y se definen las propiedades de fluido a 27°C, las cuales son: densidad $\rho_{air} = 1.1774 \frac{kg}{m^3}$ y viscosidad dinámica $\mu = 1.8462 \times 10^{-5} \frac{kg}{m-s}$

- ❖ Definir el modelo de flujo viscoso. Como se tiene un flujo turbulento se escogerá, de acuerdo a la literatura del programa el modelo de viscosidad $k - \epsilon$, el cuál es ampliamente utilizado en la ingeniería y se explicará mas adelante.

- ❖ Se selecciona como presión atmosférica de operación la presión barométrica de Bucaramanga que es igual a 90600 Pa.

- ❖ Se fijan las condiciones de frontera para el problema. Las condiciones de frontera de interés para este análisis son las condiciones en el puerto de entrada (velocidad de entrada) y las condiciones en el puerto de salida (presión de salida).
- ❖ Se dan las condiciones de iteración y se calculan todas las variables de flujo para todos los elementos finitos del volumen enmallado
- ❖ Se presentan los resultados en forma gráfica.

3.1 MODELO MATEMÁTICO DE LA SIMULACIÓN

En la consideración del modelo matemático utilizado para la simulación se tiene presente que se debe simular de acuerdo al modelo de transporte apropiado y para las condiciones de modelo viscoso de acuerdo a las condiciones del flujo en consideración. Las condiciones de flujo que se simularon fueron las siguientes:

- ❖ Flujo incompresible, dado que el rango de velocidades de flujo (0-35 m/s) son significativamente inferiores a la velocidad del sonido (340 m/s), para las cuales la consideración de flujo incompresible proporciona una buena exactitud en los cálculos.
- ❖ Flujo estable, es decir que las condiciones de flujo se pueden considerar estables en el tiempo.
- ❖ Flujo turbulento debido a los elevados números de Reynolds que se tienen no solo en la tubería del banco de flujometro neumático

(Re=2940 a velocidades bajas y Re=171511 a máxima velocidad del motor) sino en el conducto anular formado por el medidor (Re=10000 a velocidades bajas y Re=70000 a velocidades altas)

❖ **Ecuaciones de continuidad y conservación de momento:** Inicialmente se consideran las ecuaciones de conservación de la masa y conservación de momento para un marco de referencia inercial (no acelerado). De esta forma, se tiene para la conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m$$

que es la forma mas generalizada de la ecuación de conservación de la masa, la cuál es valida tanto para flujo incompresible como para flujo compresible, ρ es la densidad del fluido y S_m es la masa adherida a la masa continua debido al cambio de fase (por ejemplo en el caso de vaporización). Como en este caso no existe cambio de fase este componente de la ecuación no se tiene en cuenta en la solución.

Así mismo se tiene para la conservación de momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Donde p es la presión estática, $\rho \vec{g}$ y \vec{F} son la fuerza gravitacional de cuerpo y la fuerza externa del cuerpo respectivamente. El parámetro $\vec{\tau}$ es el esfuerzo tensor, el cuál puede expresarse como sigue:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I_1 \right]$$

Donde μ es la viscosidad molecular, I_1 es la unidad tensora y el término de la derecha es el efecto de dilatación de volumen. El significado físico de lo anterior es que se expresa la viscosidad efectiva del fluido en términos de su viscosidad interna molecular y sus efectos de dilatación volumétrica, los cuales son equivalentes de acuerdo a como se expresa en la ecuación al esfuerzo tensor del fluido, para el cuál su gradiente hace parte de la ecuación de momento.

❖ **Ecuaciones de transporte para el modelo viscoso:** Ahora se considera el modelo de viscosidad aplicable al modelo de flujo que consideramos para el medidor. Previamente se indico que el flujo de aire a través del flujometro neumático en la zona de mayor diámetro y en el conducto anular formado entre la tubería y el medidor es de carácter turbulento, conclusión que se obtiene dados los elevados números de Reynolds que se obtienen a partir de las velocidades medidas para ambos conductos. De acuerdo a esto, se realizará la simulación de acuerdo al modelo de viscosidad $k - \varepsilon$ (energía cinética de turbulencia k - rata de disipación ε), el cuál es un modelo semiempírico basado en las ecuaciones de transporte para energía cinética de turbulencia y su rata de disipación. En dicho modelo se asume que el flujo es totalmente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. Las ecuaciones de transporte utilizadas en este modelo, propuestas por Launder y Spalding, consisten en un modelo matemático de dos ecuaciones, las cuales permiten que la velocidad en turbulencia y las escalas de longitud sean independientemente determinadas. Dichas ecuaciones son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

En estas ecuaciones, G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debida a los gradientes de velocidad significativa, G_b es la generación de energía cinética de turbulencia debida a la flotación, Y_M representa la contribución a la tasa de disipación debida a la dilatación fluctuante del fluido; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ son constantes definidas, σ_k y σ_ε son los números de Prandtl de turbulencia para k (energía cinética de turbulencia) y ε (rata de disipación de energía). S_k y S_ε son términos que pueden ser definidos por el usuario para ajustar la ecuación

La viscosidad turbulenta μ_t se computa mediante la combinación de k y ε de la siguiente forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Donde C_μ es una constante.

Las constantes del presente modelo matemático son las siguientes:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.92$$

$$C_\mu = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3$$

Dichas constantes han sido determinadas mediante la experimentación con aire y con agua para flujos turbulentos. Sin embargo estas constantes pueden ser cambiadas en la ventana de usuario del programa si son encontradas otras constantes aplicables al modelo. Para la simulación realizada se dejaron dichas constantes.

❖ **Perfil de velocidad a la entrada del medidor:** Como la tubería en la que se ha dispuesto el medidor es una prolongación del tubo Venturi, se tiene que el perfil de velocidad a la entrada del medidor es el mismo perfil a la salida del tubo Venturi, por lo tanto mediante la medición experimental se obtuvo el perfil de velocidad a la salida del tubo Venturi. Con el anemómetro de hilo caliente se realizaron mediciones de velocidad a diferentes puntos en el diámetro de la tubería de salida. La figura 37 ilustra los puntos de medición a través del diámetro de la tubería y la tabla 1 registra los valores de dichas mediciones.

Figura 37. Puntos de medición de velocidad para el perfil de velocidad

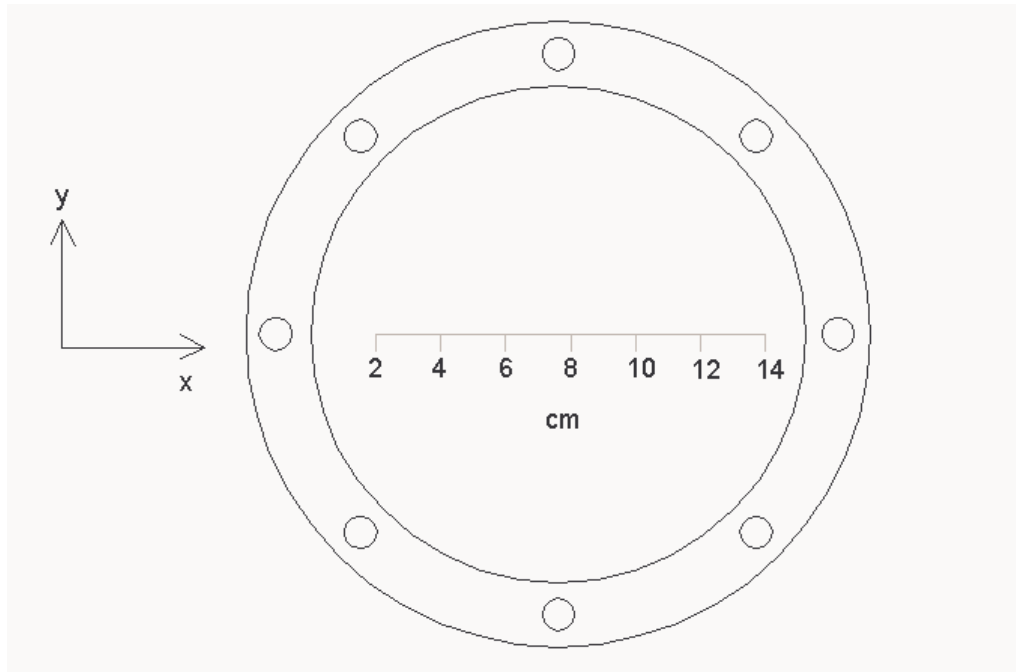


Tabla 1. Mediciones para el perfil de velocidad

Distancia de medición [cm]	Velocidad medida [m/s]
2	12,5
4	15,1
6	16,3
8	16
10	14,7
12	12,9
14	11,1

Por regresión cuadrática se obtiene el perfil de velocidad para la salida del tubo Venturi, el cuál es:

$$V_{(y)} = 10.29 + 1.24y + 0.066y^2 - 0.023y^3 + 0.000932y^4$$

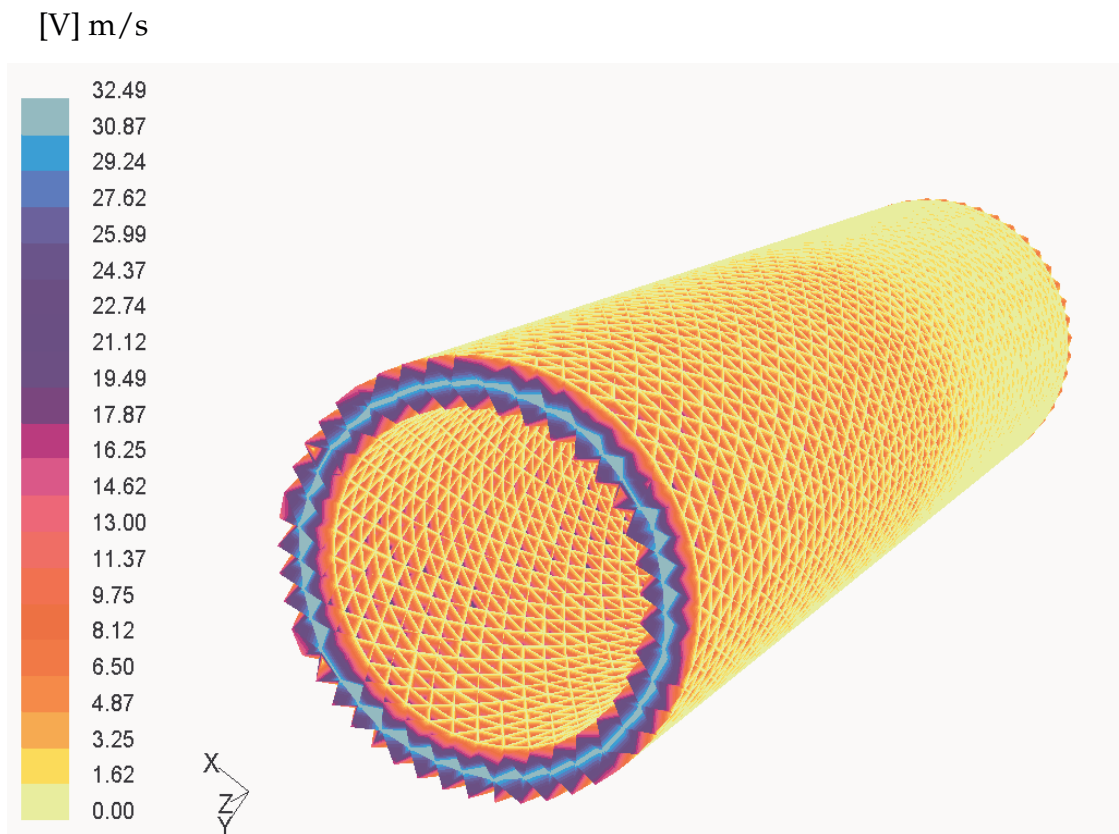
Este perfil de velocidad es introducido al programa en un archivo UDF (User Defined Function) o función definida por el usuario, el cuál se programa en lenguaje C y luego Fluent interpreta el archivo, de manera que en la definición de condiciones de frontera la velocidad de entrada (velocity inlet) sea fijada de acuerdo al perfil de velocidad.

3.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO

Luego de haber fijado todos los parámetros y condiciones de frontera previamente descritos, el programa itera la solución para todos los puntos del enmallado (celdas). En este caso, la solución convergió tras 120 iteraciones del programa.

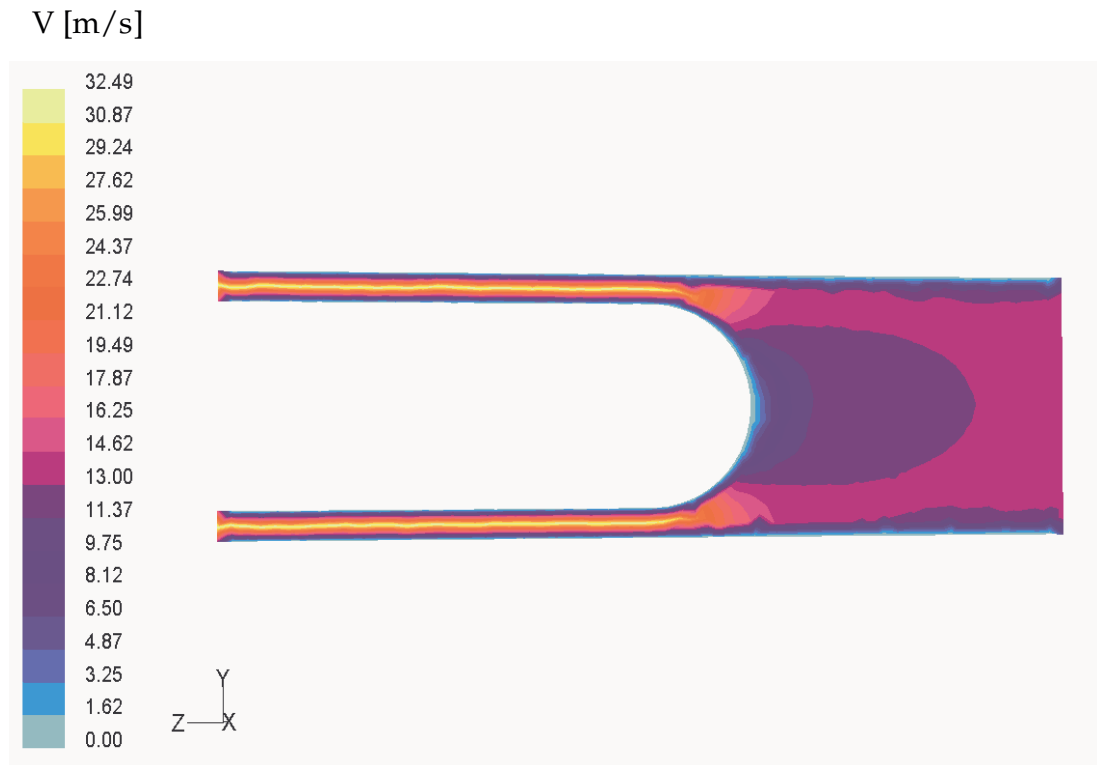
Según se muestra en la figura 38, el volumen que se enmalla y para el cuál se calcularon las iteraciones es el volumen que ocupa el aire dentro de la tubería antes del medidor y luego en el conducto anular, es decir, la sustracción del volumen del tubo completo y el volumen total ocupado por el medidor de velocidad de aire.

Figura 38. Simulación en 3D del flujo de aire



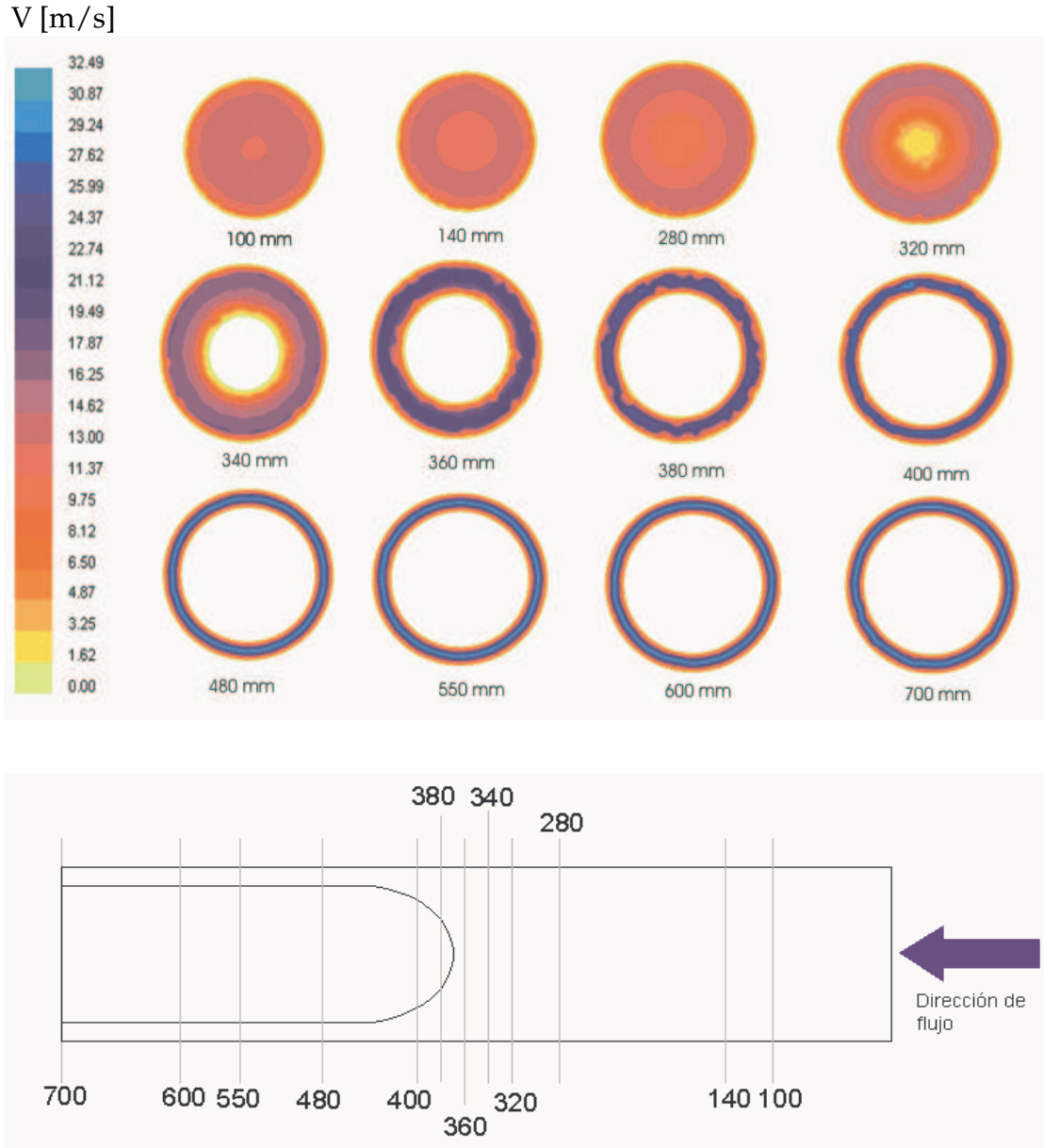
3.2.1 Desarrollo del perfil de velocidad: En primer término se desea conocer la forma del flujo a través del conducto anular y se ha encontrado que dada la geometría curva del medidor se ha formado un perfil de velocidad desarrollado con regularidad casi desde el inicio del conducto anular. La figura 39 ilustra el flujo a través del conducto anular por medio de un corte

Figura 39. Corte transversal de la simulación de flujo



En cuanto a las condiciones de diseño esto me indica que debido a que el flujo se desarrolla y se dispone de manera uniforme desde el inicio del conducto anular, los tubos Pitot pueden colocarse en cualquier punto a lo largo del conducto anular. Por conveniencia, se establece la ubicación de los tubos Pitot en un punto cercano al final de la longitud del conducto anular, de manera que se registre la velocidad de aire en un punto donde se asegure que el perfil de velocidad se haya desarrollado. La figura 40 indica una serie de cortes frontales que se han hecho a través del conducto anular para ilustrar la forma como se va desarrollando el perfil de velocidad a través de la sección transversal en diferentes secciones a partir del medidor.

Figura 40. Desarrollo del perfil de velocidad en el conducto anular



3.2.2 Velocidad media a través de la sección anular: Es de suma importancia conocer la velocidad media o significativa que se tendrá a través de la sección anular, ya que la señal proveniente del medidor es relativa a la velocidad máxima del perfil de velocidad, dado que los tubos Pitot del dispositivo son

ubicados en la línea media de la sección anular, es decir, el punto en el cuál la velocidad es máxima para el perfil de velocidad.

Para el dispositivo construido se tiene un rango de medición de velocidades de 0 a 35 m/s, para el cuál se tiene un número de Reynolds de la siguiente forma:

$$Re = \frac{V_{\max} \times D_h}{\nu} = \frac{V_{\max} \times (D_e - D_i)}{\nu}$$

Donde:

V_{\max} = Velocidad máxima del perfil de velocidad

D_h = Diámetro hidráulico de la sección anular

D_e = Diámetro externo de la sección anular

D_i = Diámetro interno de la sección anular

ν = Viscosidad cinemática del aire @ 27° C

Así:

$$Re = \frac{V_{\max} \times (0.156 - 0.121)}{15.69 \times 10^{-6}} = 2230.72 \times V_{\max}$$

Para el medidor de velocidad de aire incorporado al banco de flujometro neumático se tendrán los siguientes regimenes de flujo:

- Flujo laminar: Para velocidades de aire de 0 a 1 m/s
- Zona de transición: Para velocidades de aire de 1 a 5 m/s
- Flujo turbulento: Para velocidades de aire de 5 a 35 m/s

Lo anterior nos permite concluir que el medidor en la mayor parte de su rango de medición registrará velocidad de aire en flujo turbulento, para el cuál se tiene la siguiente ecuación de velocidad promedio (\bar{V}):

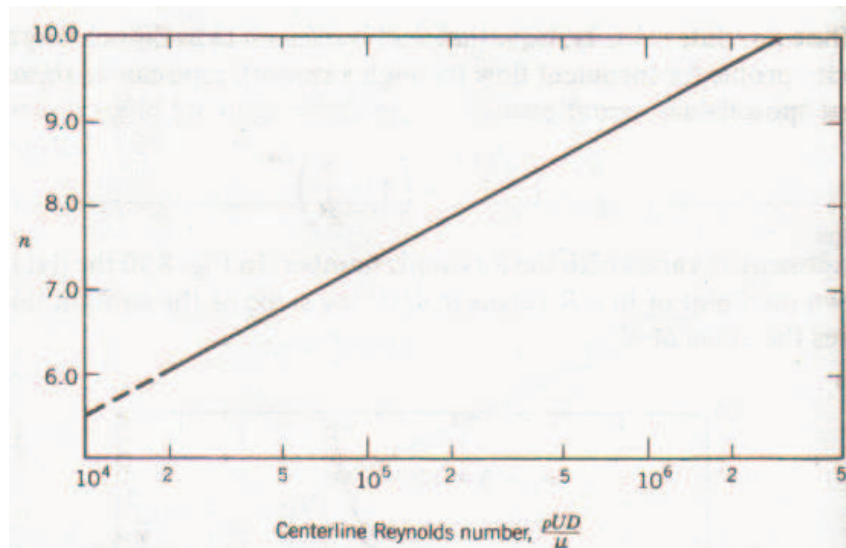
$$\bar{V} = V_{\max} \times \frac{2n^2}{(n+1) \times (2n+1)}$$

Donde:

n = exponente dado en función del número de Reynolds.

De acuerdo a la ley de potencia para perfiles de velocidad se tiene que el exponente n , expresado en función del número de Reynolds viene dado de acuerdo a la figura 41.

Figura 41. Exponente de la ecuación de velocidad media



Fuente: Mecánica de Fluidos. Robert Fox.

De acuerdo a la figura 39, se tiene que en la línea media la velocidad máxima del perfil de velocidad en la zona anular es de 32.49 m/s, con el flujometro neumático funcionando a máxima velocidad. Para dicha velocidad, el número de Reynolds es:

$$Re = 2230.72 \times V_{\max}$$

$$Re = 72476.09$$

De acuerdo a la figura 41 se tiene para este Reynolds un coeficiente $n = 7$, así:

$$\bar{V} = 32.49 \times \frac{2 \times (7)^2}{(7+1) \times ((2 \times 7) + 1)}$$

$$\bar{V} = 26.53 \text{ m/s}$$

Esta es la velocidad significativa que registraría el medidor a máxima velocidad del ventilador del flujometro neumático.

4. MODELAMIENTO DE LA RESPUESTA DINAMICA DEL MEDIDOR IMPLEMENTADO EN SIMULINK®

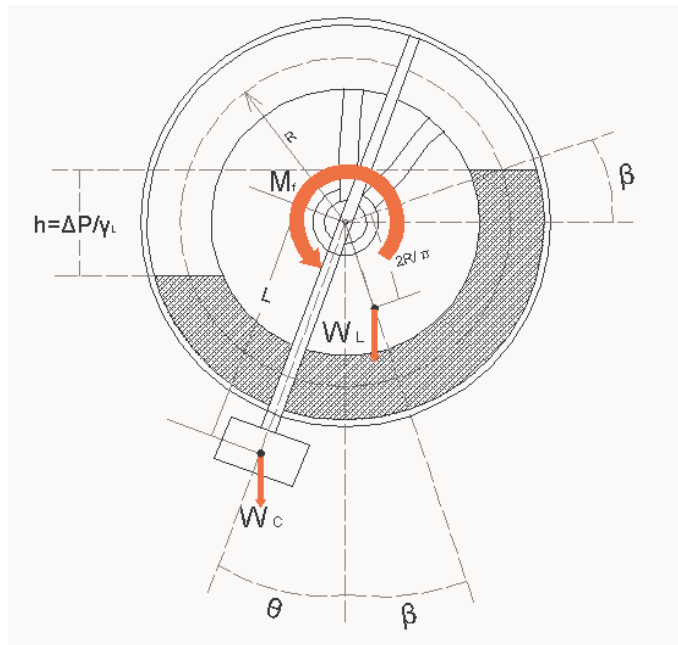
El modelo estático del medidor, tal y como se dedujo previamente, en la sección 2.3, determina la escala angular para la medición de velocidad considerando una respuesta estable del dispositivo. Sin embargo para alcanzar dicha estabilidad el medidor pasa por una perturbación tipo rampa, a partir del momento en que el ventilador empieza a enviar el flujo de de aire. Identificar el tipo de respuesta dinámica del dispositivo durante la fase transitoria de la medición es una necesidad para el correcto dimensionamiento del mismo, ya que la inercia de las partes del dispositivo así como factores de amortiguamiento que se pueden presentar en rodamientos y en el encoder de desplazamiento rotatorio determinan la calidad de la respuesta dinámica del medidor.

Para realizar un modelamiento del comportamiento dinámico del medidor, en procura de comprobar el correcto diseño del dispositivo, de manera que este sea lo mas exacto y fiable posible, se ha recurrido a la herramienta computacional Simulink® Versión 6.0 (R14), el cuál hace parte de Matlab 7.0 (R14), desarrollado por la firma The MathWorks Inc.

4.1 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL MEDIDOR

Inicialmente se deben identificar todas los momentos de torsión que inciden sobre el giro del medidor y de acuerdo a los cuales funcionará. La figura 42 muestra todas las fuerzas y momentos que se aplican sobre el medidor.

Figura 42. Diagrama de cuerpo libre del medidor



Como puede verse en la figura, existen una serie de fuerzas que generan momento de torsión y un momento de rozamiento resultante, los cuales definen el comportamiento estático y dinámico del medidor. Dichas fuerzas y momentos se enumeran a continuación:

- ❖ Una fuerza W_L causada por el peso del líquido manométrico que genera un momento de torsión en sentido horario, el cuál hace girar el medidor en este sentido
- ❖ Una fuerza W_C debida al contrapeso que genera un momento de torsión en sentido contrario (antihorario), balanceando el giro del dispositivo de manera que no rote permanentemente.

- ❖ Un momento de rozamiento resultante (M_r), el cuál es la suma de los momentos de rozamientos generados por los dos rodamientos del medidor y el momento de rozamiento del transductor rotatorio de posición: $M_r = M_{r \text{ encoder}} + M_{r \text{ rodamientos}}$

Así, se plantea como modelo matemático de comportamiento dinámico del medidor de velocidad de aire:

$$\sum M_o = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$$\left[W_L \times \text{sen}(\beta) \times \frac{2R}{\pi} \right] - [W_c \times \text{sen}(\theta) \times L] - M_r = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$$\left[W_L \times \text{sen}(\beta) \times \frac{2R}{\pi} \right] - [W_c \times \text{sen}(\theta) \times L] - M_r = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Como: $\text{sen}(\beta) = \frac{h}{2R} \Rightarrow \text{sen}(\beta) = \frac{\Delta P}{2R \times \gamma_L}$

$$M_r = M_{r \text{ encoder}} + M_{r \text{ rodamientos}}$$

$$W_L = \pi \times \rho_{man} \times g \times \frac{h \times (R_e^2 - R_i^2)}{2}$$

$$W_c = m_c \times g$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_{air} \times V^2$$

$$\left[\pi \times \rho_{man} \times g \times \frac{h \times (R_e^2 - R_i^2)}{2} \times \frac{2R}{\pi} \times \frac{\Delta p}{2 \times R \times \rho_{man} \times g} \right] - [m_c \times g \times L \times \text{sen}(\theta)]$$

$$-M_{r \text{ encoder}} - M_{r \text{ rodamientos}} = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Despejando $\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ se obtiene:

$$\alpha = \frac{\frac{\rho_{air} \times h \times (R_e^2 - R_i^2) \times V^2}{4} - m_c \times g \times L \times \text{sen}(\theta) - M_{r \text{ encoder}} - M_{r \text{ rodamientos}}}{I}$$

4.2 ESTIMACIÓN DEL PAR DE ROZAMIENTO DEBIDO A LOS RODAMIENTOS

De acuerdo al catalogo de rodamientos SKF, la estimación del momento de rozamiento en un rodamiento se lleva a cabo mediante la siguiente fórmula:

$$M_{r \text{ rodamiento}} = M_0 + M_1$$

Donde: M_0 es el par de rozamiento debido a la velocidad

M_1 es el par de rozamiento debido a la carga

Para el cálculo de los pares de rozamiento presentes en los rodamientos se requiere conocer las cargas actuantes sobre estos, las cuales serán determinadas a continuación.

❖ **Estimación de cargas en los rodamientos:** Sobre cada uno de los rodamientos existen 2 cargas actuantes diferentes, las cuales son carga radial y carga axial.

a-.) Carga radial: Esta fuerza es debida al peso del medidor. Utilizando el CAD software Solid Edge 16 se estimo la masa total del medidor, de acuerdo a los datos de densidad de cada uno de los materiales utilizados en la construcción del medidor, los cuales son:

$$\text{Acrílico: } \rho = 1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Acero 1020: } \rho = 7830 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Cobre: } \rho = 8950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Plástico: } \rho = 910 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

De acuerdo a lo anterior, la masa de cada uno de los componentes del medidor construido es la mostrada en la tabla 2.

Tabla 2. Masa de los componentes del medidor

Componente	Masa [Kg]	Material
Cuerpo tubular	0,446	Fibra de vidrio
Extremo semiesférico	0,197	Fibra de vidrio
Manómetro cilíndrico	0,064	Fibra de vidrio
Soporte cilindro manométrico	0,018	Fibra de vidrio
Soporte extremo semiesférico	0,173	Fibra de vidrio
Eje principal	0,368	Acero 1020
Eje secundario concéntrico	0,12	Acero 1020
Contrapeso	0,05	Acero 1020
Soporte del contrapeso	0,013	Acero 1020
Tubo Pitot	4 x 0,0162	Cobre
Tubo presión estática	4 x 0,005	Cobre
Manguera presión total	0,001	Plástico
Manguera presión estática	0,001	Plástico
Líquido manométrico	0,037	Etilenglicol
TOTAL	1,5651	

Además de la masa de los componentes, se estimo el momento de inercia de masa del medidor en su eje longitudinal, el cual es $0.00288723 \text{ kg} - m^2$.

El peso del medidor se calcula de acuerdo a:

$$Peso = m_{medidor} \times g$$

$$Peso = 1.5651 \times 9.81$$

$$Peso = 15.35 \text{ N} = 1.535 \text{ kgf}$$

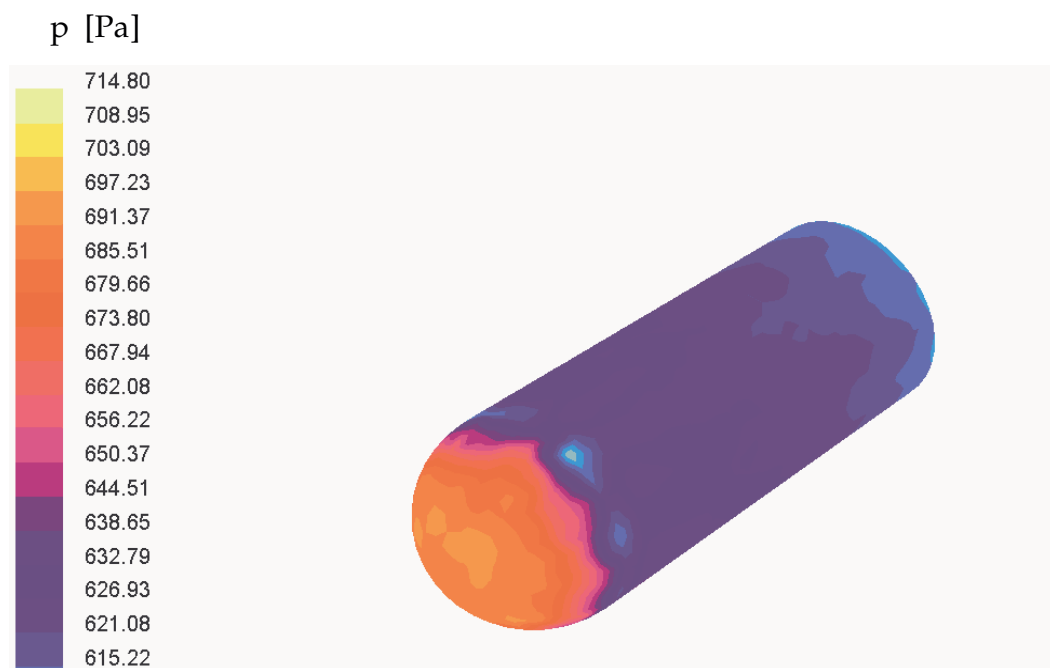
La fuerza radial debida al peso se distribuye entre ambos rodamientos, de manera que la fuerza radial en cada rodamiento es:

$$F_R = \frac{Peso}{2} = 0.7676 \text{ kgf}$$

b-.) Carga axial: Esta carga es debida a la suma de la presión actuante sobre el cuerpo del medidor y la fuerza axial debida a la fricción que el aire ejerce sobre el medidor, tal y como se muestra en la figura 44, la cuál deberá ser absorbida por los rodamientos.

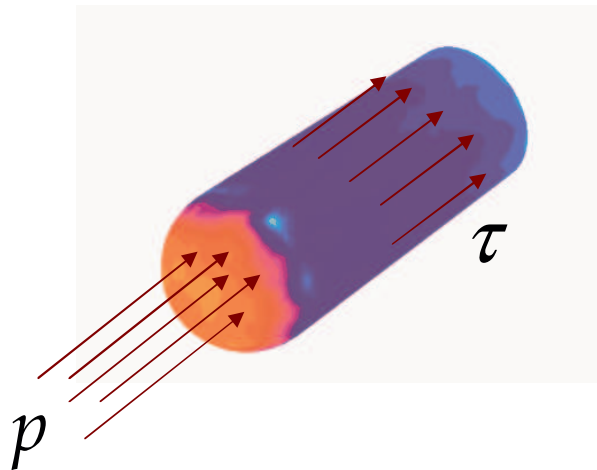
De acuerdo a la simulación en Fluent 6.1 del flujo a través del medidor, se obtiene la presión actuante sobre el extremo semiesférico. La figura 43 muestra la presión total actuante sobre el medidor.

Figura 43. Presión total incidente sobre el medidor



De acuerdo a la simulación, la presión actúa de manera casi regular sobre toda la cabeza semiesférica, así que para calcular la fuerza axial producida por esta presión se hace una proyección circular del área sobre la cuál actúan las componentes axiales de la presión y se multiplica por la presión.

Figura 44. Fuerzas axiales sobre el cuerpo del medidor



En la figura 44 se pueden visualizar las fuerzas actuantes sobre el medidor, las cuales se expresan de la siguiente manera:

$$F_{AT} = (p \times A) + (\tau \times A_i) = \left(p \times \frac{\pi \times d_{medidor}^2}{4} \right) + (\tau \times \pi \times d_i \times h_{cil})$$

Donde:

F_{AT} = Fuerza axial total sobre el medidor

p = Presión actuante sobre la cabeza semiesférica

A = Área proyectada de la cabeza semiesférica

τ = Esfuerzo incidente sobre la superficie del medidor

A_i = Área de superficie del medidor

h_{cil} = Largo del medidor

Para estimar el esfuerzo incidente sobre la superficie externa del medidor se tiene que:

$$p_{an} \times A_{an} = \tau \times (A_e + A_i)$$

Así:

$$\tau = \frac{p_{an} \times A_{an}}{A_e + A_i} = \frac{p_{an} \times \frac{\pi}{4} \times (d_e^2 - d_i^2)}{\pi \times h_{cil} \times (d_e + d_i)}$$

Donde:

p_{an} = Presión en el área anular

A_{an} = Area de la sección anular

A_e = Area de superficie interna del tubo bridado

d_e = Diámetro externo del anillo circular

d_i = Diámetro interno del anillo circular

De acuerdo a los resultados de la simulación se tiene que la presión actuante sobre la cabeza semiesférica es de 685.51 Pa y la presión actuante sobre el área anular es de 630.15 Pa, así que:

$$\tau = \frac{630.15 \times \frac{\pi}{4} \times (0.156^2 - 0.121^2)}{\pi \times 0.26 \times (0.156 + 0.121)}$$

$$\tau = 21.2 \text{ Pa}$$

Presión actuante sobre la cabeza semiesférica = 685.51 Pa

$$F_{AT} = \left(685.51 \times \frac{\pi \times 0.121^2}{4} \right) + (21.2 \times \pi \times 0.121 \times 0.26)$$

$$F_{AT} = 9.97 \text{ N} = 1.0172 \text{ kgf}$$

Esta es la fuerza axial total a la que está sometido el medidor cuando el motor del flujometro neumático está a la máxima velocidad. Esta fuerza es soportada por cada uno de los dos rodamientos del medidor, de manera que la fuerza axial soportada por cada rodamiento es:

$$F_A = \frac{F_{AT}}{2} = \frac{1.0172}{2}$$

$$F_A = 0.5086 \text{ kgf}$$

Para estimar la carga estática presente en el rodamiento se tiene que:

$$P_0 = 0.6F_R + 0.5F_A$$

$$P_0 = (0.6 \times 0.7676) + (0.5 \times 0.5086)$$

$$P_0 = 0.7148 \text{ kgf}$$

Como $P_0 < F_R$, de acuerdo al catalogo de rodamientos se toma como carga estática $P_0 = F_R = 0.7676 \text{ kgf}$

❖ **Estimación de los pares de rozamiento de los rodamientos:** Previamente se explicó que el par de rozamiento de un rodamiento es la suma del par debido a la velocidad de giro (M_0) y el par debido a la carga (M_1). Dichos pares de rozamiento vienen dados de la siguiente forma:

a.-) Par de rozamiento debido a la velocidad: El par de rozamiento debido a la velocidad se calcula de acuerdo a:

$$M_0 = f_0 \times 10^{-7} \times (v \times n)^{2/3} \times dm^3$$

Donde:

f_0 = factor de tipo de rodamiento y lubricación (dado por tabla de fabricante)

v = Viscosidad de servicio del lubricante $\left[\frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right]$

n = Velocidad angular de giro del rodamiento $\left[\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right]$

$$dm = \frac{(D + d)}{2} = \frac{(28 + 12)}{2} = 20 \text{ mm} \quad \text{Diámetro medio del rodamiento.}$$

De acuerdo al catalogo de rodamientos SKF, para un rodamiento de bolas de 12 mm de diámetro interno y 28 mm de diámetro externo, con $f_0 = 1.5$, un lubricante de 15 cSt (15 mm² /s) y diámetro medio de 20 mm, se tiene que:

$$M_0 = 1.5 \times 10^{-7} \times (15 \times n)^{2/3} \times 20^3$$

$$M_0 = 7.29 \times 10^{-3} \times n^{2/3} \text{ [N-mm]}$$

$$M_0 = 7.29 \times 10^{-6} \times n^{2/3} \text{ [N-m]} \quad \text{para } n = \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right]$$

Debido a que Simulink opera la ecuación en rad/s, es necesario hacer la respectiva conversión, de forma tal que:

$$M_0 = 3.28 \times 10^{-5} \times n^{2/3} \text{ [N-m]} \quad \text{para } n = \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

b-.) Par de rozamiento debido a la carga: El par de rozamiento debido a la carga se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_1 = f_1 \times g_1 \times P_0 \times d_m$$

Donde:

$$f_1 = 0.0009 \times \left(\frac{P_0}{C_0} \right)^{0.55} \quad \text{para rodamiento r\u00edgido de bolas}$$

$$g_1 \cdot P_0 = 3F_A - 0.1F_R \quad \text{para rodamiento r\u00edgido de bolas}$$

$$P_0 = 0.7676 \text{ Kgf}$$

$$C_0 = 176$$

As\u00ed:

$$M_1 = 9.4 \times 10^{-7} \text{ N-m}$$

Finalmente, la suma de los pares de rozamiento debido a carga y velocidad para cada uno de los rodamientos viene dada por:

$$M_{r \text{ rodamiento}} = (3.28 \times 10^{-5}) n^{2/3} + (9.4 \times 10^{-7}) \text{ [N-m]}$$

Esta ecuaci\u00f3n es el modelo matem\u00e1tico del par de rozamiento de cada rodamiento, el cu\u00e1l es dependiente de la velocidad de giro del medidor

medida en [rad/s] y para el cuál ha sido calculado el modelo de respuesta dinámica en Simulink.

4.3 PAR DE ROZAMIENTO DEBIDO AL TRANSDUCTOR ROTATORIO

En procura de darle la mayor precisión al medidor se ha seleccionado un transductor rotatorio sin fricción, el cual realiza la detección del ángulo de giro en un dispositivo que no presenta contacto físico entre sus componentes (el integrado fijo que posee el emisor y el detector luminoso) y el componente móvil (el disco codificado) cuyas marcas indicaran la posición angular desplazada. Para lo anterior se ha seleccionado el encoder incremental Hewlett Packard HDES 5540, cuya catalogo se encuentra en el Anexo A.

Conceptualmente hablando, el momento de fricción resultante que se opone al movimiento del medidor es la sumatoria de los momentos de fricción debido a los rodamientos y al transductor rotatorio $M_r = M_{r \text{ encoder}} + M_{r \text{ rodamientos}}$, sin embargo tal y como se señaló previamente no existe momento de fricción del encoder, así que en la simulación se indicara que:

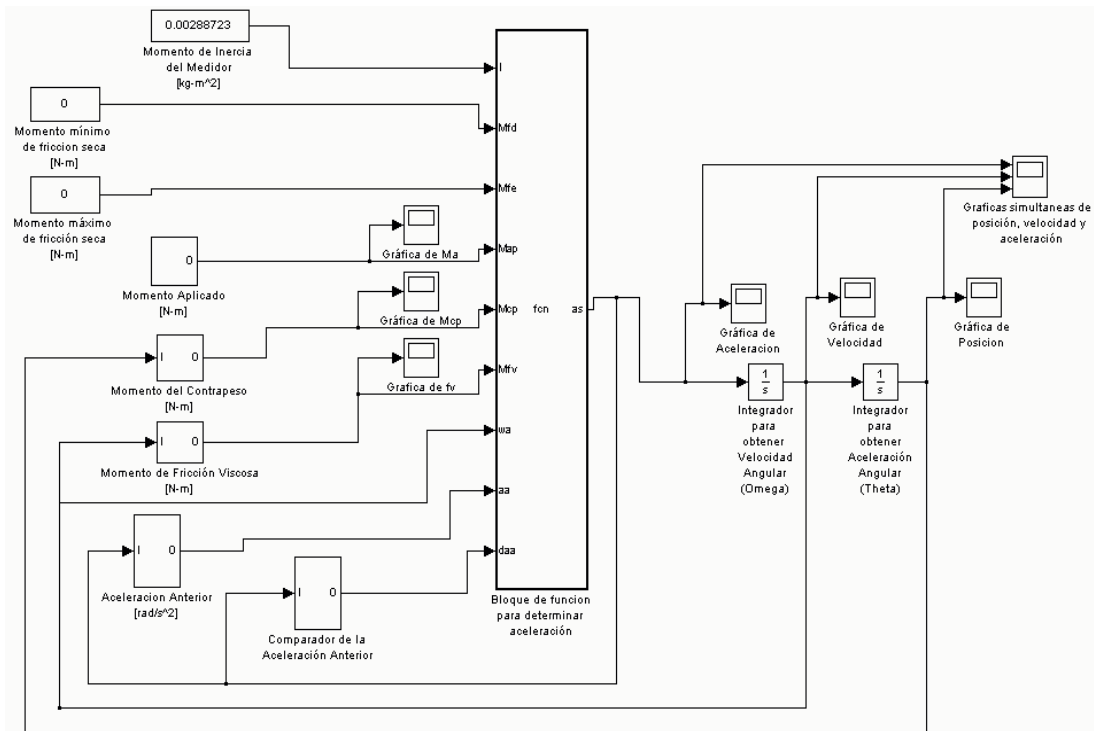
$$M_{r \text{ encoder}} = 0$$

4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN SIMULINK

Para la implementación del modelo matemático de la respuesta dinámica del medidor se requiere no solo ingresar la ecuación de comportamiento deducida en la sección 4.1 sino también introducir una serie de condicionales que reproduzcan lo más fielmente posible el comportamiento real del

medidor en su funcionamiento. Por lo anterior se ha dispuesto de un bloque de funciones programables dentro del cual se ingresan tanto la ecuación de comportamiento como los condicionales de dicha ecuación.

Figura 45. Diagrama de bloques de Simulink



De acuerdo a lo mostrado en la figura 45, se tiene un bloque de función en el cual se realiza internamente toda la programación de las ecuaciones y sus respectivos condicionales y para el cual vienen dadas unas variables de entrada (bloques conectados a la izquierda) y una variable de salida conectada hacia la derecha (aceleración angular), para la cual se implementan dos integradores, uno para estimar la velocidad angular y otro para estimar la posición angular.

4.4.1 Bloque de función programable: Previamente se indicó de acuerdo al diagrama de cuerpo libre del medidor, el modelo matemático de funcionamiento del aparato a simular para establecer el comportamiento dinámico, el cuál es:

$$M_a - M_{cp} - M_r = I \times \alpha$$

Donde

M_a = Momento aplicado por el desbalance de la columna de líquido

M_{cp} = Momento debido al contrapeso del medidor

M_r = Momento debido a la fricción en el instrumento

I = Momento de inercia del medidor

α = Aceleración angular del medidor

Incluyendo las variables del medidor en la ecuación, se obtiene:

$$\left[\pi \times \rho_{man} \times g \times \frac{h \times (R_e^2 - R_i^2)}{2} \times \frac{2R}{\pi} \times \frac{\Delta p}{2 \times R \times \rho_{man} \times g} \right] - [m_c \times g \times L \times \text{sen}(\theta)]$$

$$-M_{r \text{ encoder}} - M_{r \text{ rodamientos}} = I \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

De acuerdo a lo indicado en las secciones anteriores en la determinación de los pares de rozamiento de los rodamientos y del encoder, se tiene que la ecuación matemática del medidor es:

$$\alpha = \frac{\frac{\rho_{air} \times h \times (R_e^2 - R_i^2) \times V^2}{4} - m_c \times g \times L \times \text{sen}(\theta) - M_r \text{ encoder} - M_r \text{ rodamientos}}{I}$$

Esta ecuación será introducida en Simulink, de forma tal que a partir de la aceleración angular $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ se realice una doble integración, en la cuál se determine tanto la velocidad como la posición angular en cualquier instante del tiempo. La figura 45 muestra el esquema de programación de la doble integración en función de las variables presentes en la ecuación del medidor.

Además de la implementación de la ecuación de comportamiento se requiere introducir una serie de condicionales que reflejan el comportamiento real de las variables que intervienen en el funcionamiento del medidor. Dichos condicionales son:

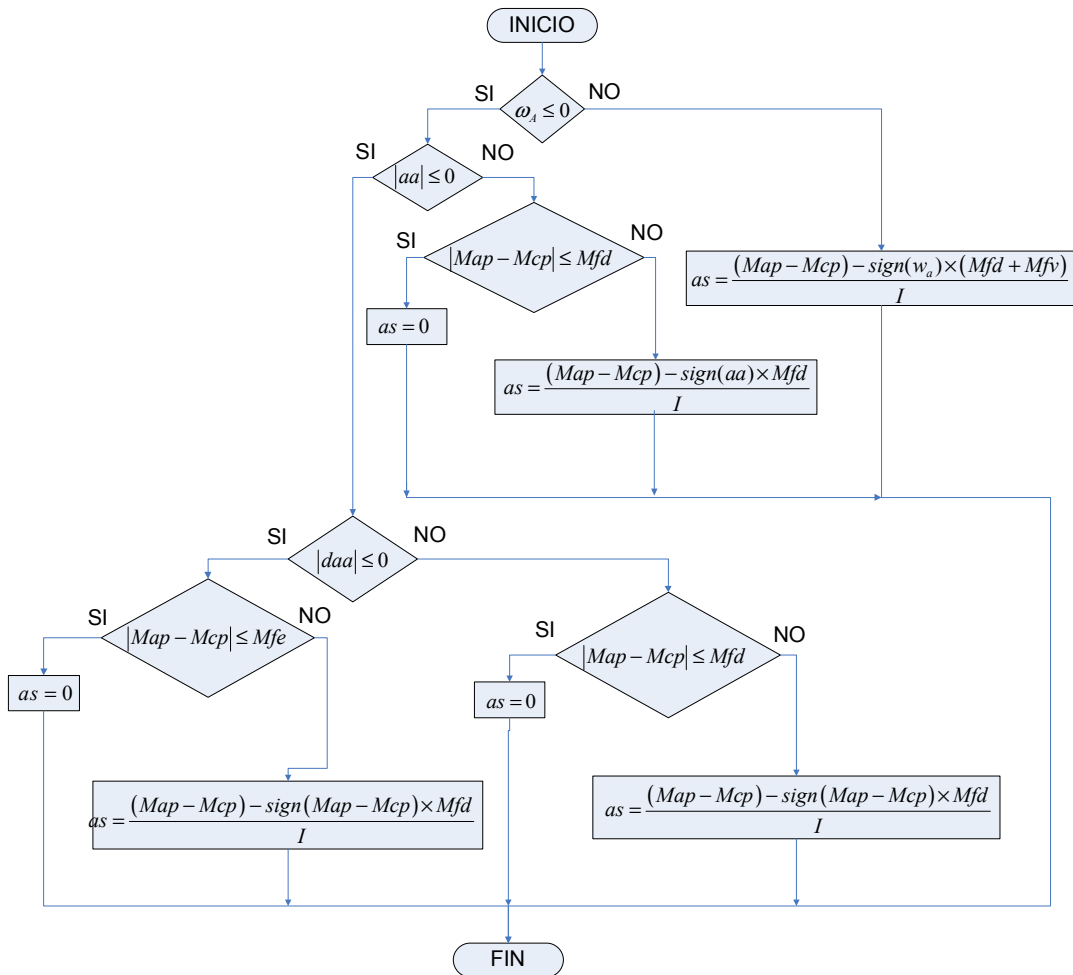
- ❖ Si el medidor está en rotación: Si la velocidad angular es $\omega = 0$ se dirá que el medidor no está en rotación, pero si la velocidad es $\omega \neq 0$ se dirá que el medidor está en rotación.
- ❖ Si el medidor esta en condición de giro o detención inminente: Si la aceleración es cero ($aa = 0$) y $\omega = 0$, se dirá que el medidor no esta en condición de giro inminente pero al cambiar la aceleración a un valor diferente de cero se tendrá condición de giro inminente.
- ❖ Si el medidor está detenido instantáneamente: Existe la posibilidad de que el medidor presente una aceleración instantánea de 0 y en el instante siguiente la aceleración sea diferente de 0, por lo que es

necesario introducir una derivada de la aceleración $\left(\frac{daa}{dt}\right)$ para saber si la aceleración es permanentemente nula $\left(\frac{daa}{dt}=0\right)$ o instantáneamente nula $\left(\frac{daa}{dt}\neq 0\right)$.

- ❖ Si el momento motriz vence la fricción máxima: Los transductores poseen una fricción máxima en la arrancada que es denominada por el fabricante como “starting torque”, la cual se ha determinado experimentalmente que es el doble de la fricción en régimen de giro, por lo cual es necesario definir en el instante inicial una fricción máxima de giro del sensor. Si el momento motriz no vence la fricción máxima se dirá que $|M_{ap} - M_{cp}| \leq M_{fe}$, donde M_{fe} se refiere al momento de fricción estática que se compara con la diferencia de los momentos del liquido manométrico y del contrapeso (momento motriz).
- ❖ Si el momento motriz vence la fricción mínima: Se refiere al momento de fricción presente en el sensor después de iniciar el giro, de manera que $|M_{ap} - M_{cp}| \leq M_{fd}$, donde M_{fd} se refiere al momento de fricción dinámica comparado con el momento motriz.

Dichos condicionales serán introducidos en el bloque de función siguiendo el diagrama de flujo ilustrado en la figura 46.

Figura 46. Diagrama de flujo del bloque de función.



El código de programación del bloque de función para la presente simulación, representado por el diagrama de bloques anterior, se ubica en el apéndice B.

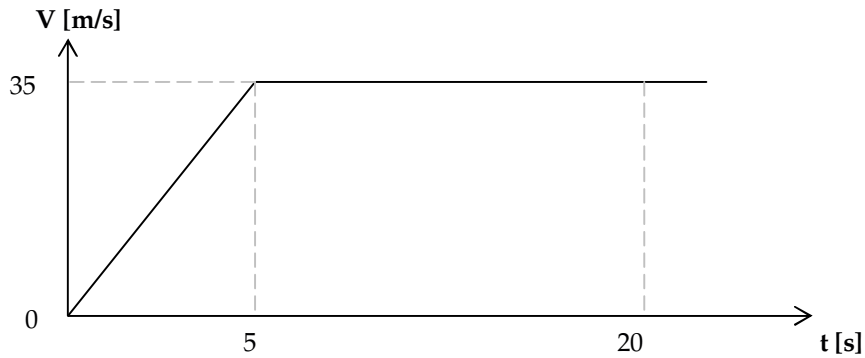
4.4.2 Variables de entrada: Las variables de entrada al bloque de función se refieren a todos los parámetros del modelo matemático del comportamiento dinámico del medidor necesarios para la determinación de la aceleración

angular de este (M_{ap}, M_{cp}, M_r, I) , las cuales se encuentran ubicadas en el lado izquierdo del diagrama de la figura 45. Dichas variables se han dispuesto de la siguiente forma:

❖ Momento aplicado: El momento aplicado que genera el movimiento del medidor se ha colocado dentro de un subsistema en el cual se han implementado las variables que intervienen en él. Las variables de este subsistema de entrada se presentan de dos formas:

- Variables constantes: Son los parámetros geométricos del medidor como radios externo e interno del manómetro (R_e y R_i) y profundidad del manómetro (h), además de la densidad del aire de la corriente (ρ_{air}). Los datos introducidos en el bloque fueron: $R_e = 0.057 \text{ m}$, $R_i = 0.043 \text{ m}$, $h = 0.015 \text{ m}$ y $\rho_{air} = 1.1774 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.
- Variable tipo rampa: Esta variable es la velocidad de aire, la cual el medidor tiene el propósito de determinar. Para modelar esta variable se introduce una función tipo rampa que represente su comportamiento a través del tiempo de la simulación, en la cual se tendrá un incremento de la velocidad de 0 a 35 m/s en un tiempo de 5 segundos, tal y como se muestra en la figura 47.

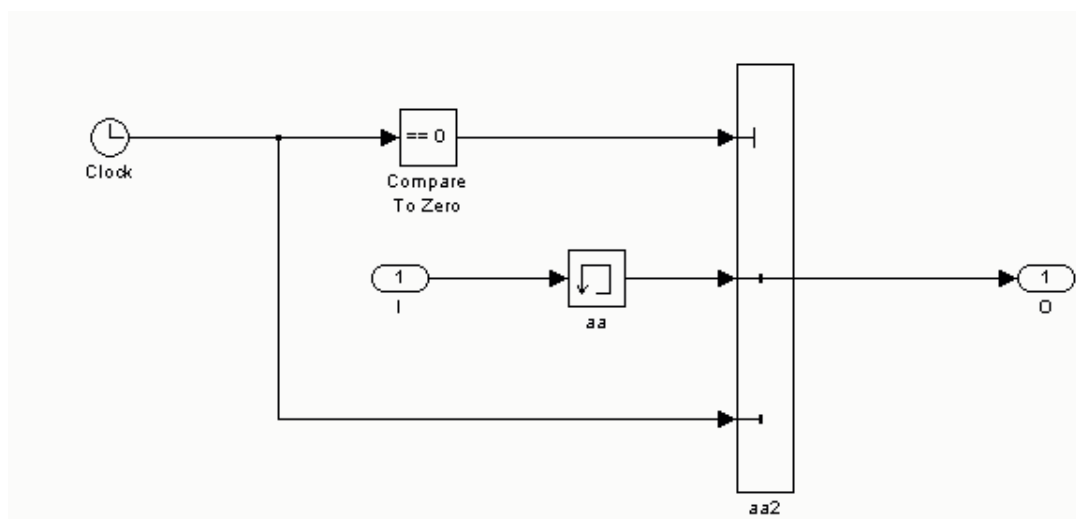
Figura 47. Función rampa de la velocidad de aire



- ❖ Momento del contrapeso: En este subsistema de entrada se encuentran las variables que intervienen en el momento de torsión generado por el contrapeso, como la masa del contrapeso (M_c), gravedad (g), distancia del brazo del contrapeso (L) y el ángulo de giro del contrapeso (θ). Los valores implementados en la simulación fueron $M_c = 0.025$ kg, $L = 0.048$ m y $g=9.81$ m/s².
- ❖ Momento de fricción viscosa: En este subsistema se ha programado la fricción viscosa presente en los rodamientos que apoyan el medidor, la cual viene dada en función de la velocidad angular de este mediante la relación $3.28 \times 10^{-5} \times \omega^{2/3}$.
- ❖ Momento de fricción máxima: Se refiere al momento de fricción estática del encoder, llamado por el fabricante “starting torque”, el cual es constante. Se implementaron varios valores que serán descritos en la sección 4.5.

- ❖ Momento de fricción mínima: Es el momento de fricción dinámico que se presenta en el encoder al estar en movimiento, el cual se puede expresar como la mitad del momento de fricción estático.
- ❖ Momento de inercia: Es el momento de inercia en el eje longitudinal del medidor, calculado en Solid Edge para todos los componentes del aparato.
- ❖ Aceleración anterior: En este bloque se le agrega una variable adicional a la programación del bloque de función, la cual es el valor de la aceleración en el instante inmediatamente anterior a la aceleración angular determinada en el último cálculo. Dicha variable servirá para verificar que no se presente una aceleración nula instantánea que se confunda con aceleración nula estable.

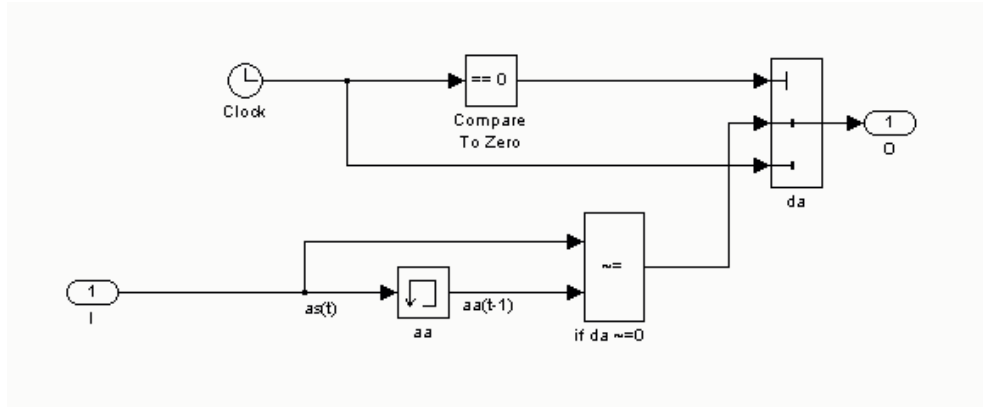
Figura 48. Bloque de función de aceleración anterior



Este bloque es un selector, en el cuál, en el instante $t=0$ la aceleración anterior es cero y en cualquier otro instante se toma el penúltimo valor de aceleración angular calculado.

- ❖ Comparador de la aceleración anterior: En este bloque se establece internamente un comparador de los dos últimos valores calculados de la aceleración angular del medidor, de manera que al verificarse que en ambos valores la aceleración es nula se comprobará que el medidor se ha detenido, pero si se verifica que ambos valores no son nulos se comprobará que el medidor aún se encuentra en movimiento pero con una aceleración instantánea igual a 0.

Figura 49. Comparador de la aceleración anterior



En este bloque se puede ver en la parte inferior que la aceleración siguiente (último valor calculado) y la aceleración anterior (penúltimo valor calculado) se comparan, de manera que se establezca si ambos valores son nulos (aceleración permanentemente nula), o uno de ellos nulo (aceleración instantáneamente nula) o si ninguno de ellos es nulo (aceleración diferente de 0).

4.4.3 Variable de salida: Según se ve al lado derecho del bloque de función en la figura 45, la variable de salida es la aceleración angular, la cual esta conectada a dos integradores que determinaran en primera instancia la velocidad angular y luego la aceleración angular.

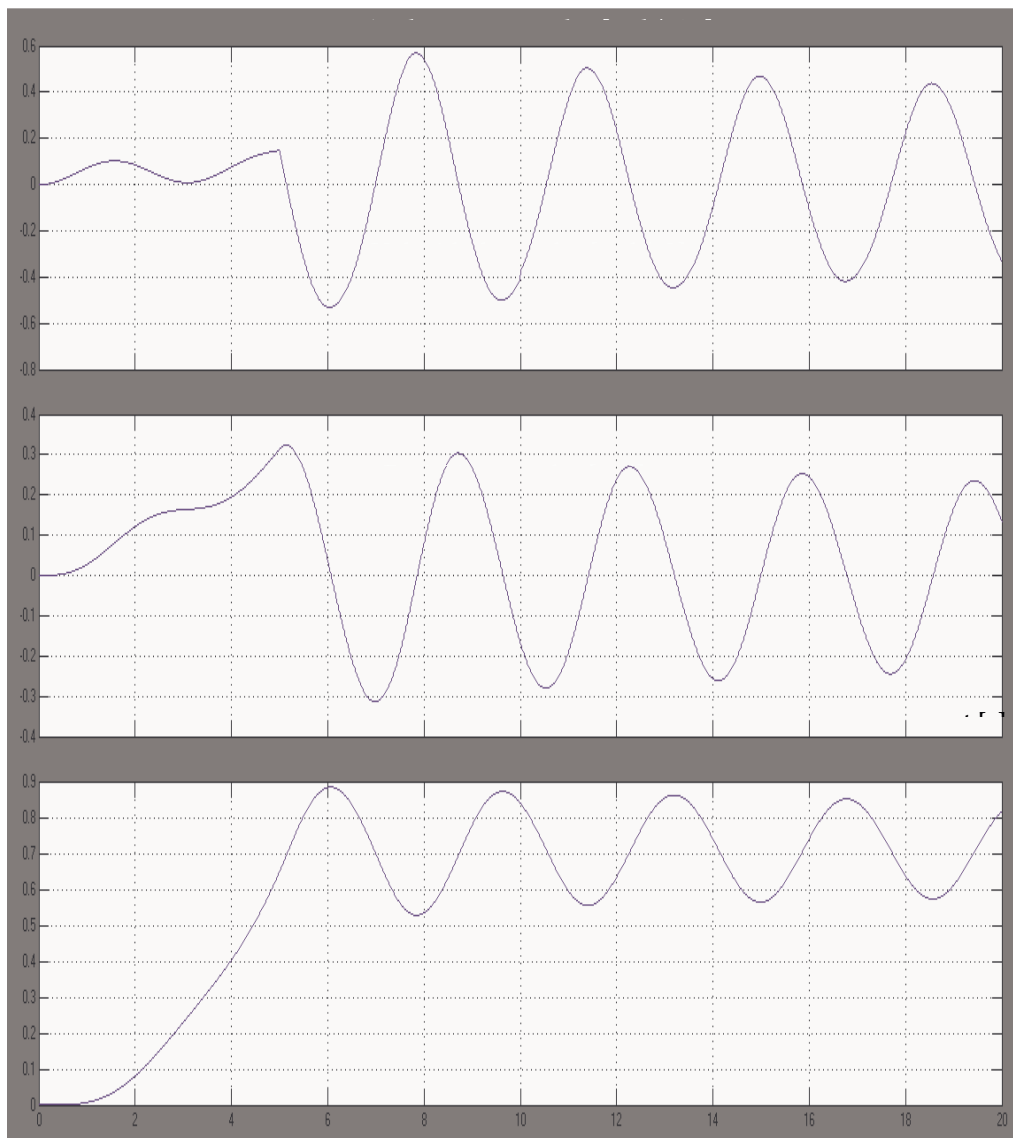
4.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Se ajusto un tiempo de 20 segundos para el cálculo de la aceleración, velocidad y posición angular teniendo en cuenta que la variación de la velocidad es de 0 a 35 m/s en un periodo de tiempo de 5 segundos, de manera que en los 15 segundos restantes se tiene una velocidad de flujo de aire máxima y constante.

4.5.1 Medidor de aire con fricción seca nula: Dado que el sensor utilizado no es de contacto físico, tal y como se ha señalado previamente, se tiene que la fricción seca proveniente de este dispositivo es nula, así que la única componente de fricción seca presente en el modelo matemático es la fricción seca de los rodamientos (estática en inminencia de giro y dinámica en movimiento del medidor). Sin embargo dicha componente de fricción seca es tan pequeña (9.4×10^{-7} N-m) que es valido asumirla nula para efecto de los cálculos, así que se asume nula.

Los resultados gráficos del comportamiento dinámico del medidor (aceleración, velocidad y posición angular) solo bajo la acción de la fricción viscosa de los rodamientos se ilustran en la figura 50.

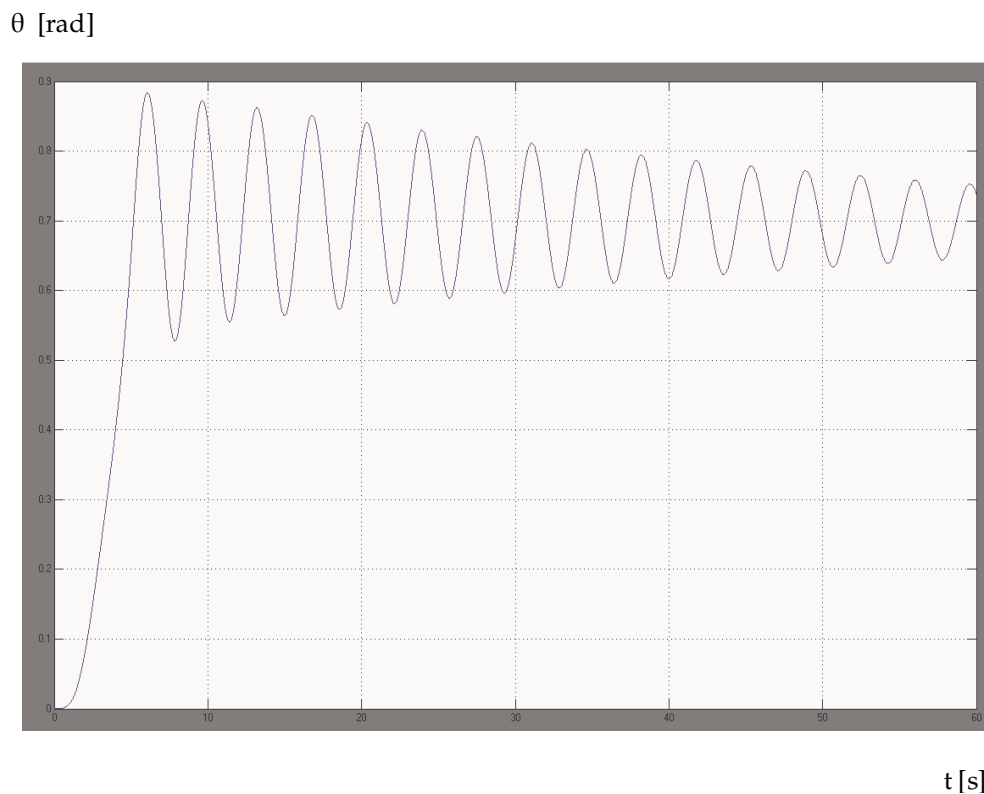
Figura 50. Resultados de la simulación con fricción seca nula



Según puede verse en la figura 50, la posición angular (mostrada en la gráfica inferior) comienza a incrementarse en la medida en que se aumenta la velocidad de la corriente de aire desde el instante inicial hasta los 6 segundos. A partir de este momento se deja la velocidad de flujo del aire constante, de

manera que la posición angular del medidor se torna en un carácter oscilatorio que se va reduciendo muy lentamente durante los 15 segundos restantes de la simulación; de igual manera se puede observar un carácter oscilatorio tanto en la velocidad como en la aceleración angular. Ampliando el tiempo de desarrollo de la simulación a 60 segundos puede observarse con más amplitud la continuidad del carácter oscilatorio del medidor bajo la suposición de inexistencia total de fricción seca.

Figura 51. Carácter oscilatorio de la posición angular



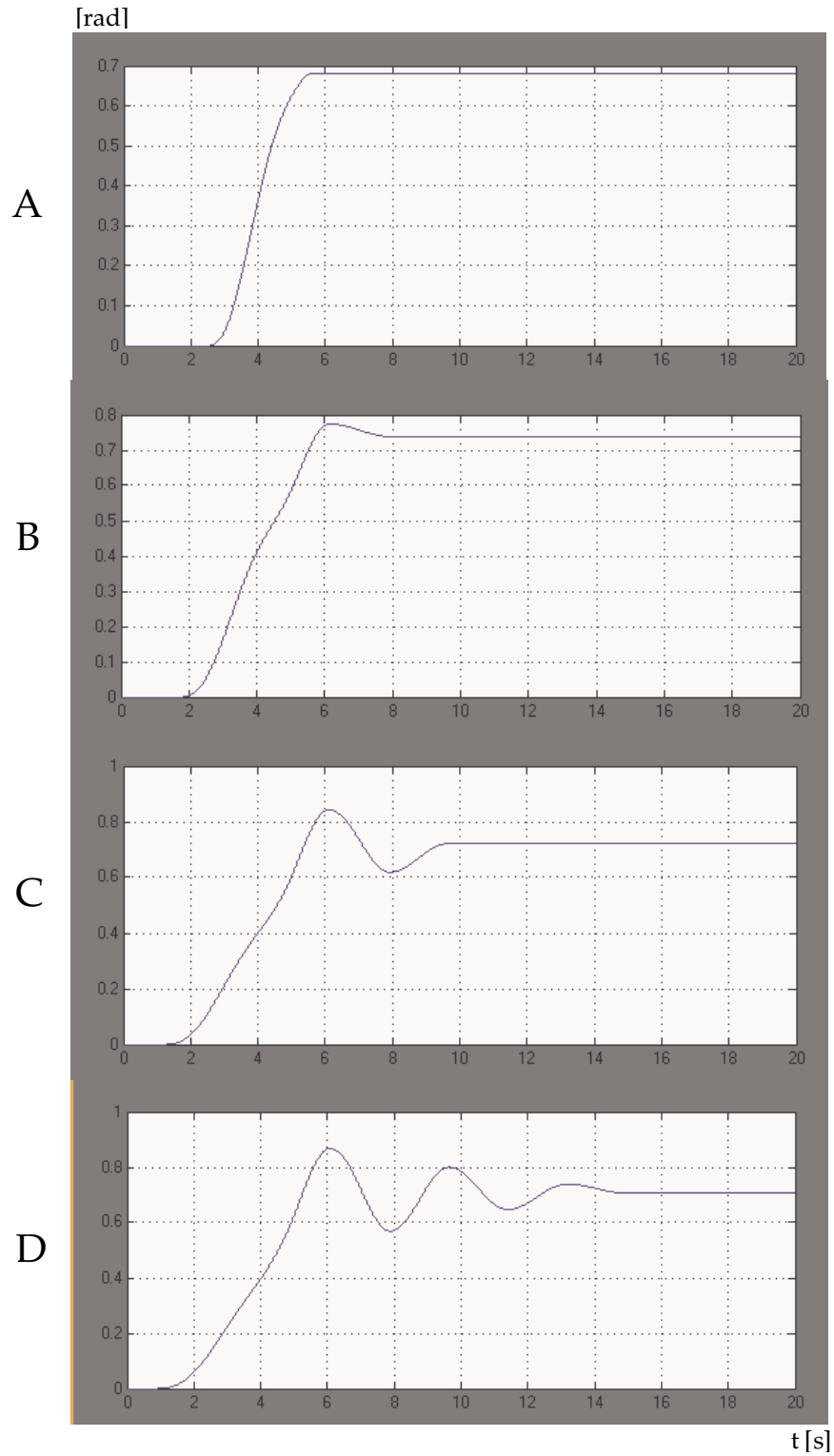
4.5.2 Medidor de aire con fricción seca diferente de cero: La situación ilustrada previamente corresponde a una idealización (simplificación) del modelo matemático del comportamiento dinámico del medidor ya que todo sistema rotatorio apoyado en cojinetes tiene en la realidad una serie de

momentos de fricción no viscosos que amortiguan la oscilación angular del aparato construido, tal y como se ha comprobado en las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio. Sin embargo determinar la magnitud exacta de estos momentos de fricción es una tarea muy complicada ya que hay una serie de factores que inciden sobre el medidor, que hacen incrementar la magnitud de dicho momento. Algunos de esos factores son:

- ❖ Lubricación de los rodamientos
- ❖ Presencia de mugre en los rodamientos
- ❖ Desbalanceo del cuerpo del medidor
- ❖ Efectos del flujo de aire en contacto con el cuerpo del medidor durante la medición

Debido a esto se ha simulado el comportamiento dinámico del aparato para diferentes valores de fricción seca, de manera que puedan estimarse los valores óptimos de momento de fricción estática y dinámica. Se ha establecido para el presente modelo que la fricción estática es el doble de la fricción dinámica $M_{fe} = 2M_{fd}$. Las figuras 52, 53, 54 y 55 muestran el resultado de la posición angular para diferentes valores de momento de fricción estática y dinámica.

Figura 52. Posición angular a diferentes valores de fricción



En esta figura pueden verse 4 gráficas correspondientes a 4 valores de momento de fricción estática y dinámica, de manera que:

- ❖ Gráfica A: Se calculó con momento de fricción estática $M_{fe}=0.002$ N-m y momento de fricción dinámica $M_{fd} = 0.001$ N-m .
- ❖ Gráfica B: Se calculó con momento de fricción estática $M_{fe}=0.001$ N-m y momento de fricción dinámica $M_{fd} = 0.0005$ N-m .
- ❖ Gráfica C: Se calculó con momento de fricción estática $M_{fe}=0.0005$ N-m y momento de fricción dinámica $M_{fd} = 0.00025$ N-m .
- ❖ Gráfica D: Se calculó con momento de fricción estática $M_{fe}=0.00025$ N-m y momento de fricción dinámica $M_{fd} = 0.000125$ N-m .

Según lo ilustrado en la gráfica 52, la gráfica B es la que refleja el comportamiento más óptimo del medidor ya que la fricción elimina el carácter oscilatorio del medidor sin frenarlo o restringir su rango de medición, de manera que las magnitudes de momento de fricción seca con los cuales se calcularon los valores de la gráfica B son los más óptimos para la operación del medidor, de manera que:

Momento óptimo de fricción dinámica: 0.00025 N-m

Momento óptimo de fricción estática: 0.0005 N-m

5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos es el medio a través del cuál se comunica el medidor de velocidad de aire construido con el computador. La variable producida por el dispositivo (ángulo de giro) se pueda traducir en velocidad de aire por medio de la ecuación de funcionamiento del aparato deducida en la sección 2.3.1 e implementada en el entorno programado de Labview, de forma tal que puedan obtenerse en tiempo real la velocidad de flujo del gas que fluye a través del medidor.

5.1 TRANSDUCTOR ROTATORIO DE POSICION

Tal como se indicó en el marco teórico, el transductor rotatorio de posición es un sensor de naturaleza digital que registra el ángulo girado por el medidor por medio de la emisión de un número determinado de pulsos eléctricos que son proporcionales a dicho ángulo. A continuación se hará una descripción detallada de la naturaleza y el funcionamiento del sensor, así como el circuito requerido para que el sensor pueda reconocer el sentido de giro del medidor y finalmente la forma como se ha realizado el montaje mecánico del mismo.

5.1.1 Descripción del transductor: Uno de los aspectos más críticos en el funcionamiento del medidor es el manejo de la fricción rotatoria que se manifiesta en un momento de rozamiento que tiende a frenar el giro del medidor. Como la señal mecánica que produce el desbalance del líquido dentro del manómetro cilíndrico es pequeña (0.008 N-m), es de vital importancia reducir al máximo los niveles de fricción, de manera que la

medida sea lo más precisa posible. Por lo anterior se ha decidido incorporar al medidor de velocidad de aire un transductor rotatorio de posición sin fricción mecánica, el cuál no oponga resistencia alguna al giro del aparato construido.

El sensor implementado es el encoder incremental HP HEDS 5540, cuya hoja técnica se encuentra en el anexo A. Se trata de un sensor compuesto básicamente de 3 elementos físicos que deben ensamblarse por el usuario de acuerdo a la aplicación deseada, los cuales son:

- ❖ Un circuito óptico: Se trata de un cuerpo con una ranura dentro de si mismo, en la cuál por una cara se ubica un emisor de luz y por la otra cara se ubica un receptor de dicha señal luminosa. En la parte inferior se encuentran 5 terminales eléctricos correspondientes a la alimentación de sensor, la conexión a tierra, dos terminales de fase de pulsos y una fase para pulso de referencia.
- ❖ Un disco codificado: Se trata de un disco con marcas oscuras radiales a través de toda su circunferencia, el cuál gira con una porción de su cuerpo dentro de la ranura del circuito óptico, de manera que dichas marcas oscuras interrumpan el haz de luz entre el emisor y el receptor luminoso a medida que vaya girando el disco, produciendo un tren de pulsos eléctricos que permita estimar el ángulo de dicho giro.
- ❖ Carcasa del encoder: Es un cuerpo dentro del cuál se insertan y ensamblan tanto el disco codificado como el circuito óptico del

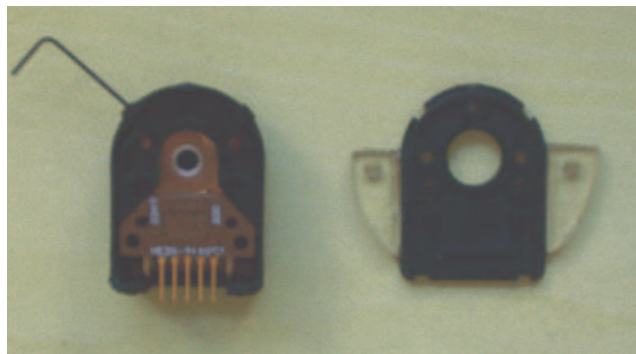
encoder, de manera que proteja dichos componentes y permita fijarlos al medidor de velocidad de aire.

Entre los datos técnicos más revelantes se señalan:

- ❖ Voltaje de alimentación: -0.5 a 7 V. Se recomienda alimentar a 5 V
- ❖ Voltaje de salida: -0.5 a 7 V, de acuerdo al voltaje escogido para la alimentación del sensor
- ❖ Corriente de salida: -1 mA a 5 mA
- ❖ Resolución: 500 pulsos/rev
- ❖ Diámetro para el eje de acople al disco codificado: 3.5 mm

La figura 53 ilustra el encoder armado y listo para acoplarse al medidor de velocidad de aire.

Figura 53. Encoder armado

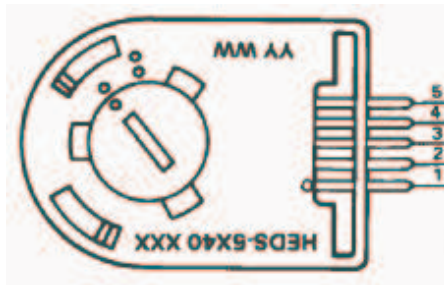


De acuerdo a lo indicado en la figura 54, el encoder consta de 5 terminales eléctricos que se disponen de la siguiente forma:

- ❖ Terminal 1: Conexión a tierra (GND)

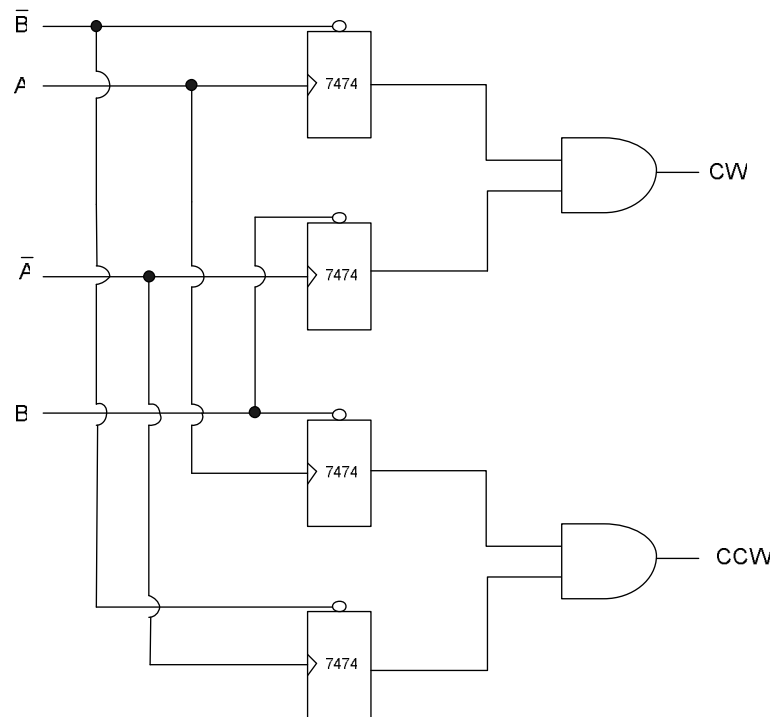
- ❖ Terminal 2: Canal de referencia a una revolución
- ❖ Terminal 3: Canal A, por el cuál se emite el tren de pulsos
- ❖ Terminal 4: Alimentación del encoder (Vcc). Se recomienda alimentar el sensor a 5 V
- ❖ Terminal 5: Canal B, por el cuál se emite el tren de pulsos desfasados con la fase A en 90°

Figura 54. Terminales del encoder



5.1.2 Detección del sentido de giro del transductor: Un encoder incremental tiene dos fases de salida por medio de las cuales emite unos trenes de pulsos desfasados entre uno y otro 90°. Sin embargo este tipo de encoder es incapaz por si mismo de detectar el sentido de su giro, de manera que al girar el sensor para un lado o para el otro siempre estará sumando pulsos, lo cuál significa que si el encoder se gira en un sentido y luego en un sentido contrario, dichos ángulos de giro no se restan sino que se suman, dándole una lectura errónea al sensor. Por esto se hace necesaria la implementación de un circuito de compuertas lógicas que por medio de la lectura de flancos positivos y negativos permita contar pulsos en una dirección y descontarlos en la dirección contraria.

Figura 55. Circuito de detección de giro

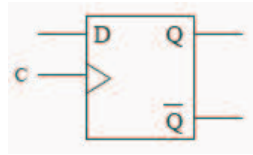


FUENTE: Control numérico computarizado de un torno. Omar Armando Gelves

El circuito previamente mostrado está compuesto por los siguientes elementos:

- ❖ 4 Flip Flops (7474): Un flip flop es un dispositivo de almacenamiento temporal de dos estados (alto y bajo), cuya salida adquiere el valor de la entrada D cuando se activa la entrada de sincronismo o de reloj (CLK)

Figura 56. Flip Flop



- ❖ Un inversor de señal: el propósito del inversor de señal es transformar un estado alto en bajo y viceversa. Así, si en un instante determinado la fase A del encoder está en nivel alto, el inversor la transforme en nivel bajo para llevarla al flip flop correspondiente.
- ❖ 2 compuertas AND: Esta puerta lógica realiza la función booleana de producto lógico, en la cuál para obtener una señal alta en su salida (AB) se requiere que sus dos entradas A y B sean altas también, según se puede ver en la tabla.

Figura 57. Compuerta AND

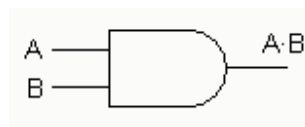
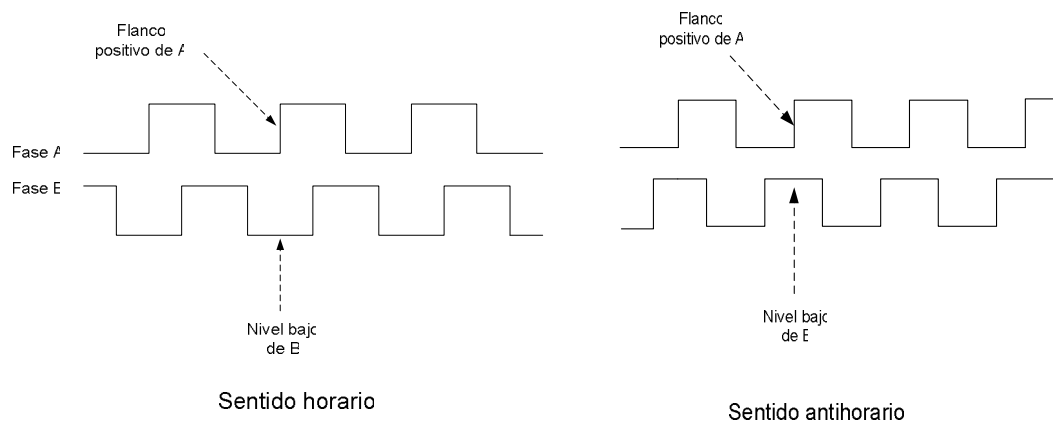


Tabla 3. Tabla de verdad de la compuerta AND

Entrada A	Entrada B	Salida AB
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

La lógica propuesta por el circuito indicado en la figura 55 está basada en los valores relativos que tienen los dos canales dependiendo del sentido de giro del encoder. Así por ejemplo, se da el caso en que al girarse el encoder en el sentido de las manecillas del reloj (CW), el flanco positivo (cambio de 0 a 1) del canal A del encoder coincide temporalmente con un nivel bajo en el canal B y que si giramos en sentido contrario, el flanco positivo del canal A coincide temporalmente con un nivel alto en el canal B.

Figura 58. Pulsos de salida del encoder



Estas relaciones entre el canal A y el canal B se pueden expresar en términos de algebra booleana para indicar un sentido de giro horario (CW) o antihorario (CCW) mediante las ecuaciones:

$$CW = A \uparrow \cdot \bar{B} + A \downarrow \cdot B + B \uparrow \cdot A + B \downarrow \cdot \bar{A}$$

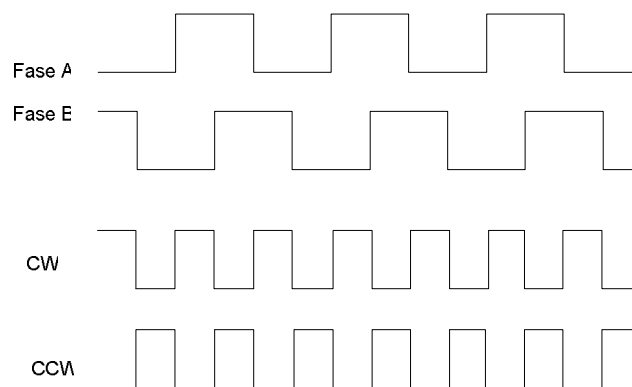
$$CCW = A \uparrow \cdot B + A \downarrow \cdot \bar{B} + B \uparrow \cdot \bar{A} + B \downarrow \cdot A$$

Donde:

- $A \uparrow$ = Flanco positivo de A (cambio de 0 a 1)
- $A \downarrow$ = Flanco negativo de A (cambio de 1 a 0)
- $B \uparrow$ = Flanco positivo de B
- $B \downarrow$ = Flanco negativo de B
- A = Nivel alto de A (1)
- \bar{A} = Nivel bajo de A (0)
- B = Nivel alto de B (1)
- \bar{B} = Nivel bajo de B (0)

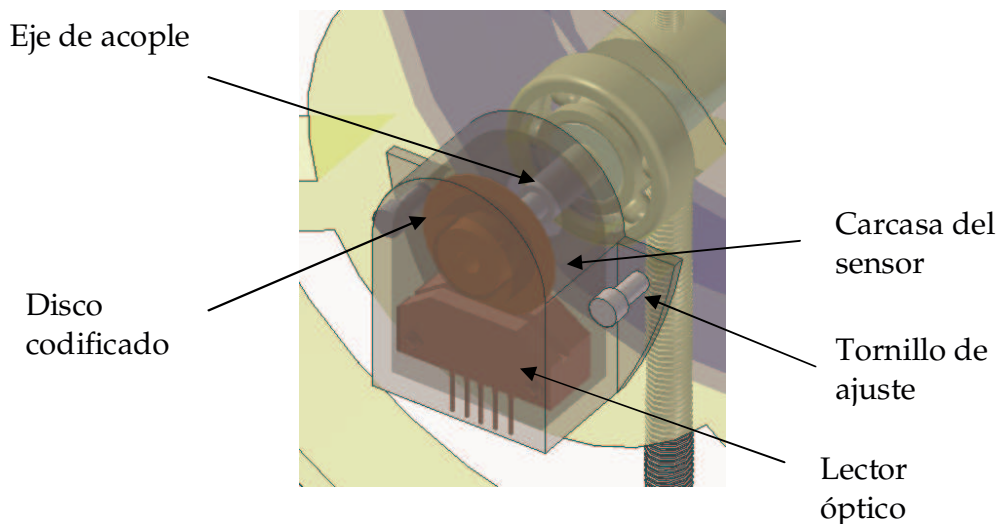
La figura 59 muestra la salida de pulsos del circuito de detección de giro en los puntos de salida CW (sentido horario) y salida CCW (sentido antihorario) obtenidos por la lógica digital señalada en las ecuaciones booleanas. Al girar en sentido horario se activa la salida de pulsos CW y se inactiva la salida de pulsos CCW; de igual manera, al girar el encoder en sentido antihorario se activa la salida de pulsos CCW y se inactiva la salida CW.

Figura 59. Pulsos emitidos por el circuito de detección de giro



5.1.3 Montaje del sensor en el medidor: Como se señaló en la sección 5.1.1, el encoder utilizado es completamente desarmable, de manera que su disco codificado puede conectarse directamente a un eje de acople de dos secciones de diámetro: por un lado se tiene una sección de 3.5 mm que se conecta al disco codificado y por el otro lado se tiene una sección de ¼ " (6.35 mm) que se conecta al taladro del eje principal del medidor, tal como se muestra en la figura 60.

Figura 60. Montaje del encoder



5.2 HARDWARE DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

Una vez implementado el sensor que registra el ángulo de giro del medidor se debe implementar el sistema de adquisición de datos propiamente dicho, es decir, el dispositivo electrónico que va a recibir las señales digitales provenientes del transductor para leerlas e interpretarlas. A continuación se describe dicho dispositivo y la forma como se ha implementado.

5.2.1 Descripción del hardware de adquisición de datos: Para la selección del dispositivo de adquisición de datos más apropiado para esta aplicación se debe reconocer el tipo de señales que maneja. Usualmente cualquier transductor que registra una variable física maneja dos tipos de señales: análogas y digitales. En este caso, el sensor implementado fue un encoder, el cuál es de naturaleza digital, dado que emite un tren de pulsos, los cuales solo manejan dos estados: alto y bajo. Ahora, dado que se tiene un transductor que genera un número finito de pulsos y que a través de ellos va a determinar el ángulo girado, necesitaremos de un sistema de adquisición de datos con un contador interno de pulsos, el cuál lea dichos pulsos y los cuente.

El sistema de adquisición de datos utilizado para la realización de este proyecto es el National Instruments Field Point FP 1000, el cuál es un sistema compuesto de un módulo de red y un módulo de adquisición de datos. La comunicación de este hardware con el computador es por medio del puerto RS-232.

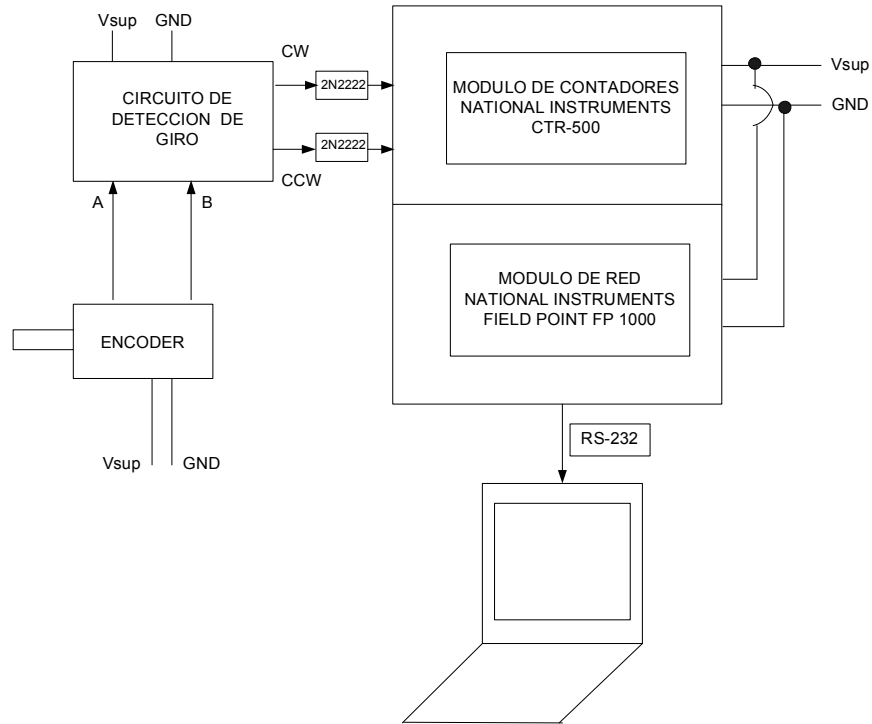
Para la aplicación concerniente a este proyecto, se ha incorporado al modulo de comunicaciones principal (FP 1000) un módulo de contadores National Instruments CTR-500, el cuál es un dispositivo con 8 contadores de 16 bits, 4 compuertas de entrada (gate-inputs) y 4 canales de salidas digitales, alimentado en un rango de 12 a 24 VDC y cuyos canales de entrada y salida manejan el mismo voltaje al cuál el módulo este alimentado. La figura 61 ilustra el modulo de red y el módulo de contadores conectados entre si para su funcionamiento.

Figura 61. Field Point y modulo de contadores



5.2.2 Implementación del transductor en el hardware: Como se explico anteriormente, el encoder tiene dos salidas de señal (fase A y fase B) a través de las cuales emite un número determinado de pulsos de acuerdo al ángulo girado. Dichas fases han sido conectadas al circuito de detección de giro mostrado en la figura 55 y luego las salidas de dicho circuito se han conectado a dos canales del módulo de contadores.

Figura 62. Conexión Field Point – transductor



Cada componente del circuito electrónico requiere su alimentación para funcionar. Tanto para el encoder como para el circuito de detección de giro se fija una alimentación de 5 VDC suministrados por una fuente de poder. Paralelamente se suministra una alimentación de 15 VDC tanto al módulo de red como al módulo de contadores CTR-500. Debido a que a la entrada del modulo de contadores se requiere que la señal de entrada sea de 15 VDC pero a la salida del circuito de detección de giro se tienen 5 VDC, se requiere instalar un transistor 2N2222 entre la salida del circuito de detección de sentido de giro y el módulo de contadores CTR, de manera que el voltaje sea elevado de 5 VDC a 15 VDC.

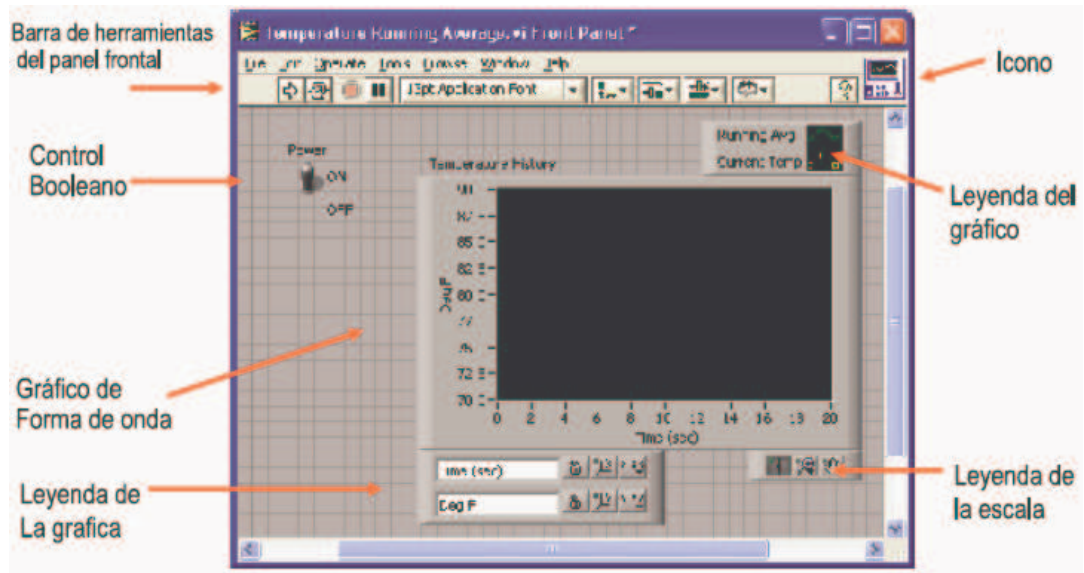
5.3 SOFTWARE DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

Para la realización del entorno programable de la aplicación se utilizó el software National Instruments Labview 8.0 (edición estudiantil), el cuál es un lenguaje de programación gráfico que utiliza iconos en vez de líneas de programación para crear aplicaciones. En contraste con los lenguajes basados en texto en los cuales las instrucciones determinan el orden de ejecución del programa, Labview utiliza programación de flujo de datos, en la cuál el flujo de los datos a través de los nodos en el diagrama de bloques determina el orden de ejecución del programa y sus diferentes funciones.

5.3.1 Descripción del entorno de programación: Labview es un entorno de programación que maneja instrumentos virtuales, es decir, un entorno que emula un tablero de instrumentos con indicadores, interruptores, números de control, entre muchos otros, los cuales controlan un proceso y para los cuales hay un procesamiento de acuerdo a los parámetros de entrada, de manera que se obtenga unos datos de salida. Este lenguaje de programación maneja 2 componentes fundamentales:

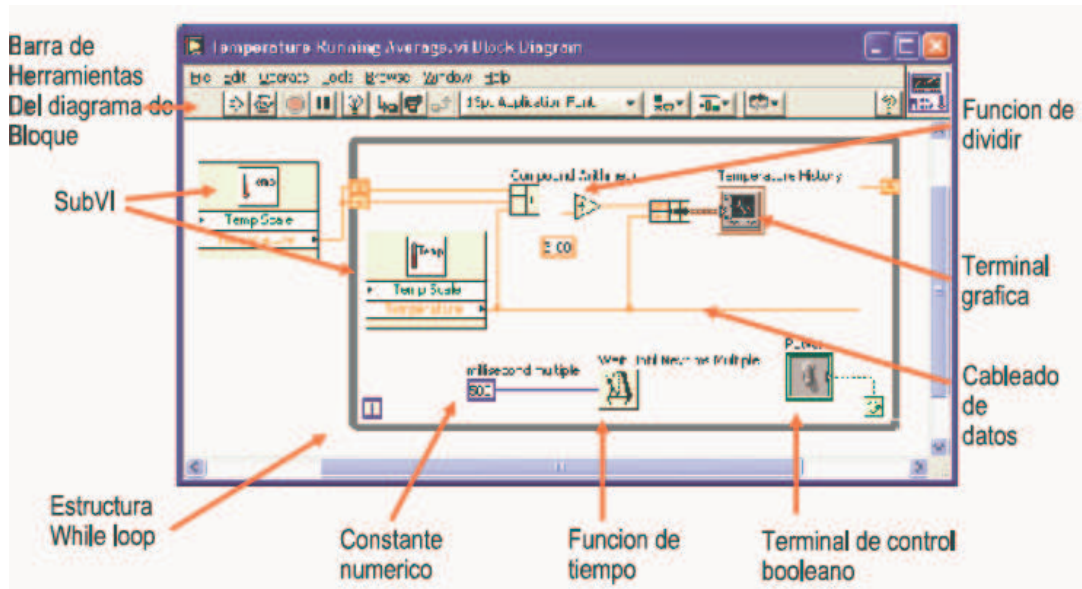
- ❖ **Panel frontal:** El panel frontal es utilizado para interactuar con el usuario cuando el programa está corriendo. Los usuarios pueden controlar el programa, cambiar entradas y ver datos actualizados en tiempo real. Es importante resaltar que todos los controles (switches de encendido o apagado, botones de empuje, selectores de valor, perillas de selección, entre otros) son usados como datos de entrada mientras que los indicadores (termómetros, luces, tacómetros, etc) son los datos de salida del programa.

Figura 63. Panel frontal del entorno Labview



- ❖ Diagrama de bloques: El diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico. Los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloque. Adicionalmente, el diagrama de bloques contiene funciones y estructuras incorporadas en las librerías de Labview. El flujo de datos se da entre nodos y funciones por medio de la interconexión de cables que conectan cada uno de estos componentes y funciones, de acuerdo al programa planteado para una determinada aplicación.

Figura 64. Diagrama de bloques del entorno Labview



A cada uno de los paneles previamente explicados hay una paleta de controles y funciones (librerías del programa), las cuales ponen a disposición del usuario todos los controles, indicadores, funciones de programación y control y herramientas adicionales que permiten crear cualquier tipo de lenguaje programado que controle una aplicación determinada.

5.3.2 Pantalla de presentación de la aplicación: Para la implementación del sistema de adquisición de datos del medidor de velocidad de aire construido se ha dispuesto de un entorno programado en el cuál se encuentran los siguientes elementos:

- ❖ Un cuadro de texto numérico: Este cuadro numérico es una variable de control (variable de entrada) en el cuál se pueden ajustar el número de pulsos por revolución que emite el encoder (resolución), de manera que la aplicación es ajustable a diferentes transductores.

Por defecto este valor se ha ajustado a 500 pulsos por revolución, ya que esta es la resolución del sensor implementado en el medidor.

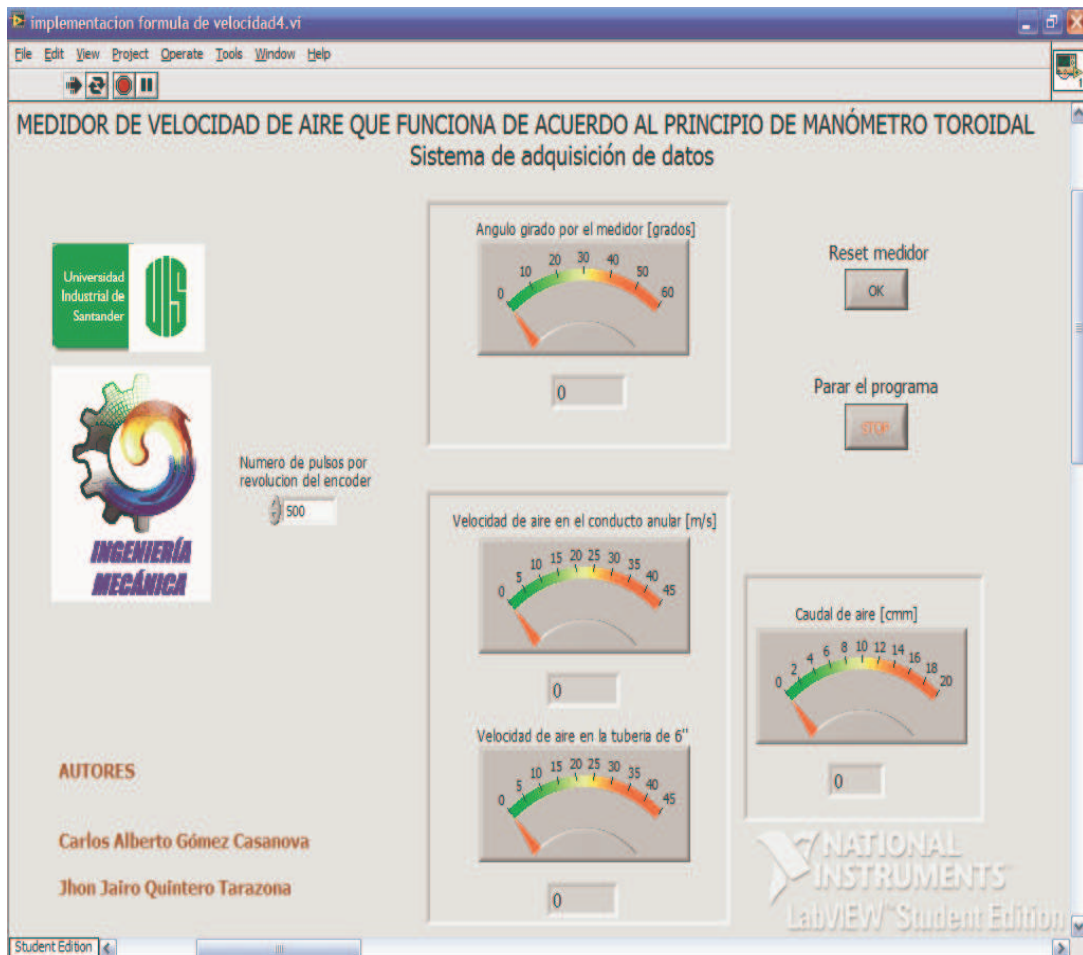
- ❖ Un indicador de aguja que registra el ángulo: Este indicador es una variable de salida del programa, en la cuál se puede visualizar en pantalla la posición angular del medidor en cualquier instante del tiempo durante la ejecución del programa. A este indicador de aguja viene asociado en su parte inferior un indicador numérico que registra en valores de 4 cifras significativas dicho ángulo.

- ❖ Un indicador de aguja que registra la velocidad de aire en el conducto anular: Este indicador es otra variable de salida del programa, en la cuál se ha obtenido la velocidad de flujo del aire por el conducto anular de acuerdo a la ecuación de funcionamiento del medidor. A este indicador de aguja viene asociado en su parte inferior un indicador numérico de 4 cifras significativas.

- ❖ Un indicador de aguja que registra la velocidad de aire en la tubería de desarrollo del tubo Venturi: Se trata de la velocidad de aire a la entrada del dispositivo, en la cuál el diámetro de tubería es de 6". A este indicador de aguja también viene asociado un indicador numérico de 4 cifras significativas que muestra al usuario el valor marcado por la aguja.

- ❖ Un indicador de aguja que registra el caudal: En este indicador se visualiza el caudal que fluye a través del medidor de velocidad de aire. De manera similar a los demás indicadores, este también tiene un indicador numérico de 4 cifras significativas.

Figura 65. Panel frontal para el medidor de velocidad de aire



Adicionalmente se tiene un botón de control de reset, el cuál reinicia el registro de datos en la pantalla colocando todos los indicadores (de agujas y numéricos) en cero.

5.3.3 Programación del diagrama de bloques: Como se indico en la sección anterior, el diagrama de bloques es la programación del panel frontal (tablero de instrumentos virtuales), en el cuál se realiza el procesamiento de las

variables de entrada para obtener las variables de resultado del medidor. Los elementos constituyentes de este panel son los siguientes:

- ❖ Datos de entrada: Los datos de entrada del programa, los cuales se encuentran a la izquierda en la figura 66 son: canal 0 (pulsos de incremento en el ángulo de giro) y canal 1 (pulsos de disminución en el ángulo de giro) del modulo de contadores CTR 500 del Field Point y el número de pulsos por revolución (resolución) del encoder.
- ❖ Funciones de procesamiento: Se dispone de una estructura case (cuadro central en la figura 66) en la cuál se programa que el medidor señale los valores de medición obtenidos y procesados cuando la diferencia en el conteo entre ambos canales sea mayor a 0 (case true). En caso de que el medidor llegue a marcar posiciones negativas del ángulo de giro, se ha programado que al hacerse la diferencia en el conteo entre los canales menor a 0, entonces el medidor marque 0 (case false), tal como se ilustra en la figura 67, de manera que en pantalla no se visualicen valores negativos de ángulo, velocidad y caudal, los cuales serían erróneos.
- ❖ Datos de salida: Los datos de salida son todos los indicadores de aguja (indicador de ángulo girado, indicador de velocidad en la sección de 6", indicador de velocidad en la sección anular del medidor e indicador de caudal para la corriente de aire que fluya a través del flujometro neumático en el momento de medición), y sus indicadores numéricos asociados de 4 cifras significativas, los cuales se encuentran ubicados a la derecha del cuadro de estructura case, de acuerdo a lo indicado en las figuras 66 y 67.

Figura 66. Diagrama de bloques para caso 1 (true)

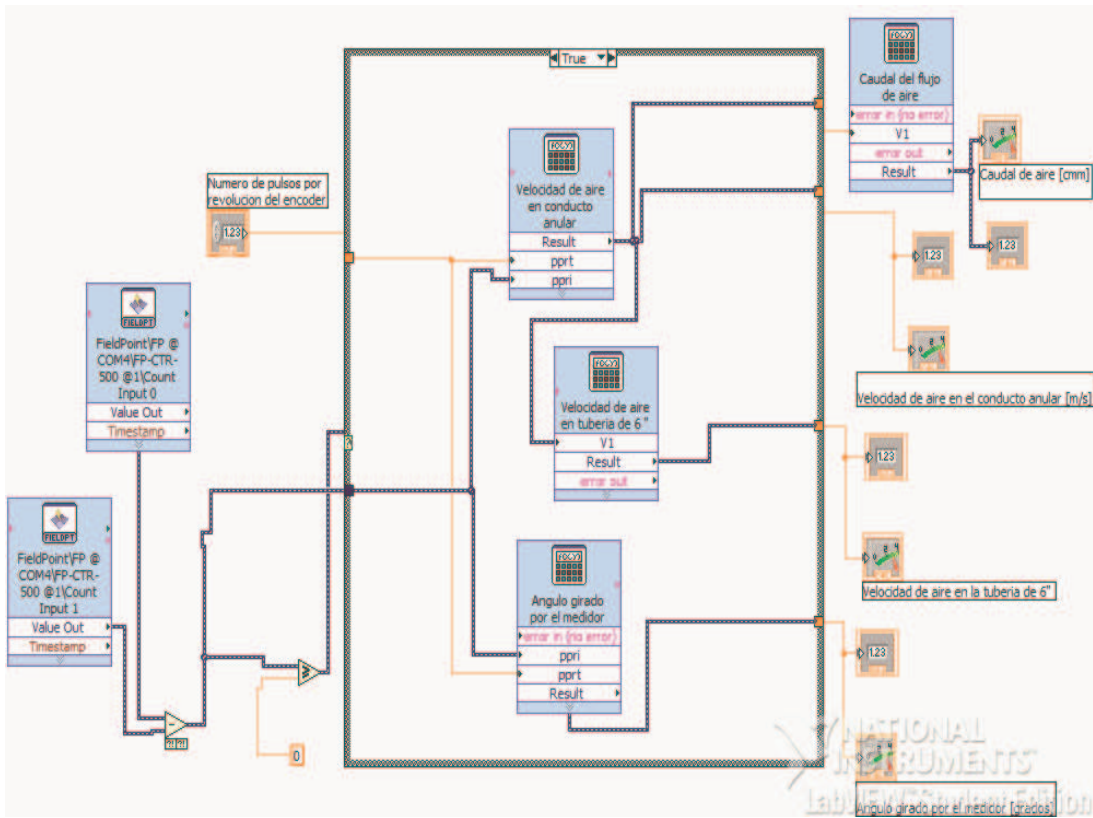
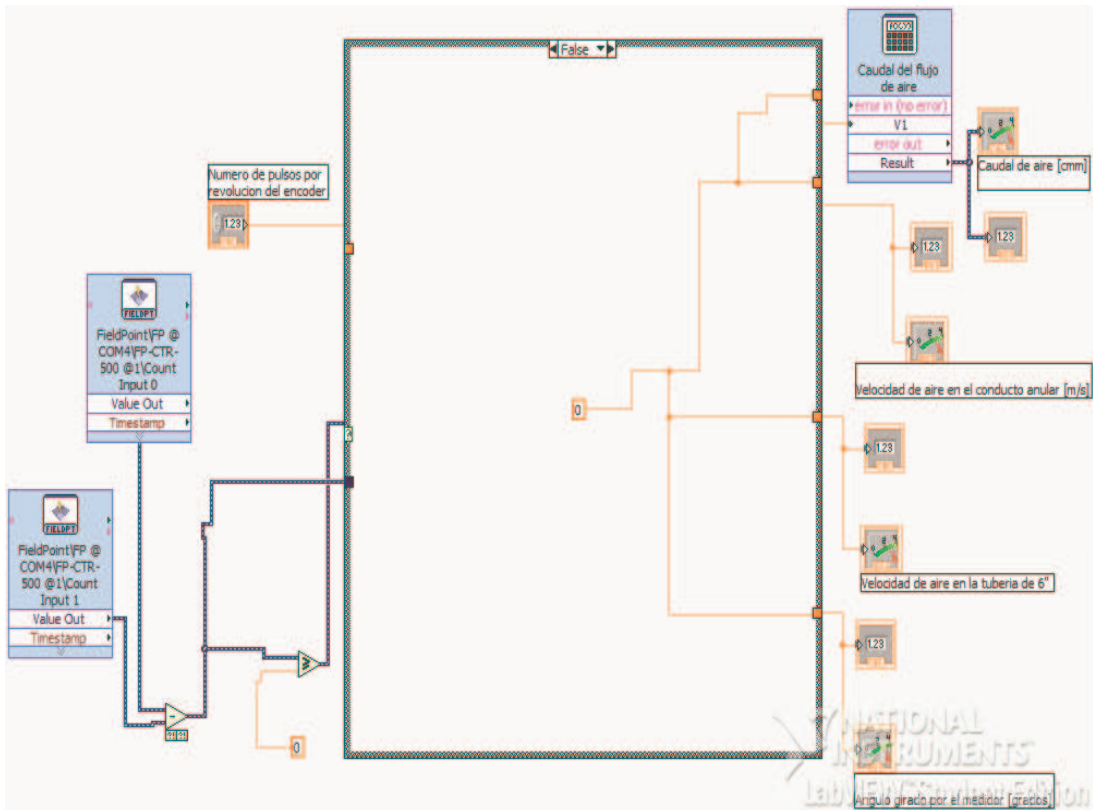


Figura 67. Diagrama de bloques para caso 1 (false)



De acuerdo a lo mostrado en la figura 66, se tienen 3 cuadros de formula dentro de la estructura case y otro cuadro de formula a la salida del cuadro case (lado derecho), los cuales se han programado de la siguiente forma:

- ❖ Angulo girado por el medidor: El ángulo girado por el medidor, el cuál es la variable que traduce la velocidad del flujo de aire se obtiene mediante la ecuación:

$$\theta = \frac{360 \times c}{ppr}$$

Donde:

c = Diferencia entre pulsos de incremento y disminución, obtenida del encoder

ppr = pulsos por revolución (resolución) del encoder

- ❖ Velocidad en la sección anular: La velocidad traducida por el ángulo de giro, la cuál se obtiene por medio de la ecuación del medidor deducida en la sección 2.3.1 se ha programado de la siguiente manera:

$$V_{an} = 43.6535 \times \sqrt{\text{sen}(\theta)}$$

- ❖ Velocidad de aire en la tubería de 6": La velocidad de flujo en la sección de desarrollo del tubo Venturi, con la cuál se van a contrastar los resultados obtenidos en la medición del aparato y que se obtiene por medio de la relación de áreas entre secciones, viene dada de acuerdo a:

$$V = \frac{1}{2.7}$$

- ❖ Caudal de aire: El caudal se obtiene con la velocidad en la sección anular (velocidad sensada por el aparato), determinado en cmm (metros cúbicos por minuto), el cuál se expresa como:

$$Q = 60 \times V \times \frac{\pi \times (D_i^2 - D_m^2)}{4}$$

Donde:

D_{it} = Diámetro interno del tubo bridado

D_m = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico del medidor

6. PRUEBAS DE COMPARACION

La realización de las pruebas de comparación es de gran importancia, ya que se hace necesario verificar que la diferencia entre el valor indicado por el instrumento y el valor real de la señal medida es mínimo. En principio, es posible trabajar con un instrumento que presente grandes errores si se corrigen los valores que indique el instrumento por medio del factor de comparación de éste con un patrón de referencia de valor conocido. Por el contrario, incluso si un instrumento es “confiable” (por ejemplo porque es nuevo), pero no ha sido comparado, el usuario no puede estar seguro de que sus indicaciones son correctas.

6.1 PATRONES

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

6.1.1 Patrones primarios: El patrón primario es aquel que posee las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor se acepta sin referenciarlo a otros patrones de la misma magnitud. Este tipo de patrones se encuentran disponibles solo en laboratorios certificados, en los cuales por medio de una serie de metodologías e instrumentos se establecen dichos patrones primarios. En el caso de la medición de flujo de gases existen una serie de patrones primarios como la campana gasométrica o el banco gravimétrico del CDT del gas, o los patrones de placa de orificio, de tipo pistón o probador

volumétrico bidireccional del Centro Nacional de Metrología de México (CENAM), por citar algunos de ellos.

6.1.2 Patrones secundarios: Un patrón secundario es aquel cuyo valor se establece por comparación de un patrón primario de la misma magnitud, en otras palabras, es un medidor que al ser verificado previamente por un patrón principal presenta porcentajes de error e incertidumbre bastante bajos y que por lo tanto puede utilizarse como patrón para calibrar otros instrumentos de medición.

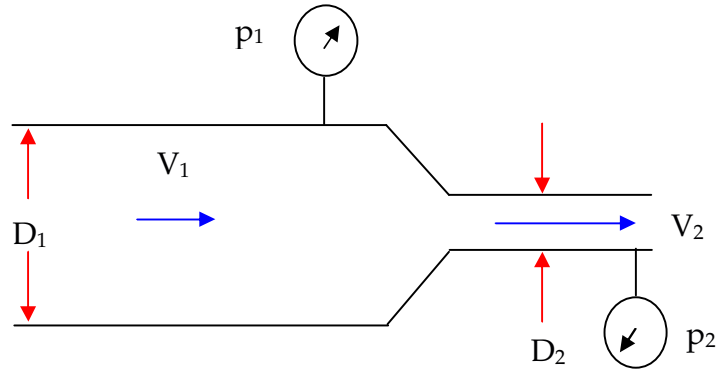
En nuestro caso el medidor cuya señal se va a utilizar como referencia es el tubo Venturi montado en el banco de flujometro neumático, de acuerdo a la norma ASME PTC 19.5, el cual tiene un rango de precisión (definido como el doble de la desviación estándar) de 1.1% a 4% en flujo turbulento.*

6.2 TUBO VENTURI

El banco de flujometro neumático al cual se le implementó el medidor de velocidad de aire diseñado y construido, descrito en capítulo 2, tiene un tubo Venturi instalado en el cual un manómetro registra la presión diferencial en dos secciones transversales diferentes para la determinación de la velocidad del flujo. Además posee una termocupla tipo J que registra la temperatura del aire en la corriente del gas a través del tubo Venturi, de manera que pueda estimarse la densidad del aire a la temperatura exacta a la que el aire fluya durante el tiempo que se desarrollen las pruebas.

* **DIAZ, Alejandro.** Adecuación, instalación y montaje del laboratorio de mecánica de fluidos adscrito a la Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

Figura 68. Reducción de áreas en el tubo Venturi



Aplicando la ecuación de Bernoulli, la ecuación de continuidad y según se indica en la norma ASME PTC 19.5, el caudal de aire que se presenta en un tubo Venturi viene dado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = 0.000034572 \times K \times Y \times d^2 \times F_a \times \sqrt{\frac{h_w}{\rho_1}}$$

Donde:

Q = Caudal de aire $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

K = Coeficiente de flujo

Y = Factor de expansión

d = Diámetro en la sección menor del Venturi [cm]

h_w = Presión diferencial en el tubo Venturi [cm H₂O]

ρ = Densidad del aire

Para la determinación de los factores de la ecuación se tiene que:

$$K = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

Donde:

c = Coeficiente de descarga. La norma ASME PTC 19.5 indica que $c = 0.984$ para Venturi clásico: $4 \text{ in} \leq D \leq 32 \text{ in}$, $0.3 \leq \beta \leq 0.75$ y $2 \times 10^5 \leq Re \leq 2 \times 10^6$

β = Relación de diámetros = 0.5

Así:

$$K = 1.0162$$

$Y=0.868$, el cual se obtiene de manera grafica bajo el concepto de la norma.

$$d = 3 \text{ in} = 7.62 \text{ cm}$$

$F_a = 1.0005$, el cual se obtiene mediante grafica bajo el concepto de la norma, para las siguientes consideraciones: $T = 86^\circ F$ y para tubo de acero.

$$\rho = 0.0011774 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Utilizando los factores previamente determinados y aplicando la ecuación de caudal de la norma ASME PTC 19.5 se calculan los caudales de aire para las diferentes frecuencias de operación del motoventilador.

Tabla 4. Datos obtenidos del tubo Venturi

Frecuencia del motor [Hz]	Diferencial de presión [cm H ₂ O]	Caudal [m ³ /s]	Velocidad en tubo de D = 6" [m/s]
30	1.5	0.063231585	3.466365427
35	2.3	0.078298305	4.292325348
40	3.2	0.092355641	5.062950766
45	4.4	0.108296589	5.936836016
50	5.8	0.124337588	6.816206071
55	7.2	0.138533462	7.594426148
60	8.7	0.152281823	8.348113428

6.3 COMPARACION CON EL TUBO VENTURI

El propósito fundamental de las pruebas de comparación del medidor de velocidad de aire con el tubo Venturi es determinar el coeficiente de comparación del valor dado por la ecuación de funcionamiento del medidor cuando se introducen los valores de ángulo girado por la acción de un flujo de aire determinado y el valor dado por el Venturi, correspondiente a este flujo. Además se realizó la determinación de la desviación e incertidumbre estándar para el número de medidas realizadas por el instrumento.

6.3.1 Metodología de realización de las pruebas de comparación: De acuerdo a lo señalado en la norma NTC 3529-3, se indican como factores importantes en la medición de laboratorio:

- ❖ Mediciones realizadas al mismo tiempo: Se refiere a las mediciones realizadas en el menor tiempo factible con el fin de reducir al mínimo los cambios en las condiciones de medición tales como las ambientales. En nuestro caso se ha podido determinar que las

condiciones de temperatura ambiental en el intervalo de tiempo de realización de las pruebas es variable en un rango de 3°, por lo cuál se ha considerado a ésta una condición variable en el tiempo.

- ❖ Calibración: Se refiere al proceso de calibración que ocurre a intervalos regulares entre grupos de mediciones dentro del laboratorio. En nuestro caso se tiene que no hay calibración entre mediciones.
- ❖ Operador: Las pruebas se han realizado por los mismos operadores todo el tiempo.
- ❖ Equipo: Las pruebas de comparación se han realizado con el mismo equipo.

La tabla 5 ilustra la clasificación de las condiciones de medición.

Tabla 5. Condiciones de medición dentro de un laboratorio

Factor	Condiciones de medición dentro del laboratorio	
	Condición 1 (igual)	Condición 2 (diferente)
Tiempo	Mediciones hechas al mismo tiempo	Mediciones hechas en momentos diferentes
Calibración	No hay calibración entre mediciones	Calibración llevada a cabo entre mediciones
Operador	El mismo operador	Diferentes operadores
Equipo	El mismo equipo	Diferente equipo

Para condiciones de precisión intermedia, uno o más factores se encuentran en la condición 2 de la tabla 5 y se especifican como “condiciones de precisión con factores M diferentes”, en donde M es el número de factores en la condición 2.

De acuerdo a lo anterior, para un estudio de las medición de precisión intermedia se tiene un procedimiento consistente en tomar una muestra (en nuestro caso el aparato de medición construido) y llevar a cabo una serie de n mediciones con un cambio de factor(es) entre cada medición. La norma NTC 3529-3 recomienda realizar un mínimo de 15 mediciones basándose en un enfoque sencillo para el análisis de precisión intermedia. Las tablas con los datos obtenidos de cada una de estas mediciones se encuentran en el Anexo E.

Experimentalmente se observó que se requiere de una frecuencia mínima en el motoventilador de 35 Hz para obtener alguna respuesta del aparato, ya que por debajo de este régimen de flujo el medidor permanece estático (zona muerta), lo cual se esperaba de acuerdo a los resultados de la simulación del modelo teórico realizados en Simulink (sección 4.5.2), en los cuales se encontró que existían unos momentos de fricción existentes en la operación del aparato del orden de 0.001 N-m. Así pues, las pruebas se llevaron a cabo fijando el rango de operación del motoventilador desde 35 Hz hasta 60 Hz, con incrementos de 5 Hz.

6.3.2 Resultados

Debido a que el medidor construido registra la velocidad en la sección anular, se debe señalar la relación de áreas entre la sección anular y la sección de entrada al medidor, de manera que:

$$V_1 \times A_1 = V_{an} \times A_{an}$$

La relación de áreas que se tiene es la siguiente:

$$\frac{A_1}{A_{an}} = \frac{\frac{\pi}{4} \times 0,1524^2}{\frac{\pi}{4} \times 0,1524^2 - 0,121^2} = 2.7$$

Así que:

$$V_{an} = 2.7 \times V_1$$

Donde:

A_1 = Area de sección a la entrada del medidor

A_{an} = Area de la sección anular

V_1 = Velocidad del aire a la entrada del medidor

V_{an} = Velocidad del aire en la sección anular

Dado que el medidor construido registra la velocidad de aire en la sección anular, la relación de áreas entre la sección anular y el área de flujo del tubo

Venturi es necesaria para estimar el factor de comparación entre el valor registrado por el medidor y valor de velocidad de aire hallado con la norma ASME. La tabla 6 muestra los valores promedio de las pruebas del instrumento construido (Ver Anexo E).

Por medio de la experimentación se pudo establecer que el cuerpo del medidor causa una resistencia al flujo, la cual hace disminuir el caudal de circulación a través del aparato en un 40% aproximadamente, reduciendo la resolución de medida (ángulo girado). Para corregir esta situación se redujo la masa del contrapeso, de manera que:

$m_{dis} = 25 \text{ g}$ Esta es la masa de diseño del medidor

$m_{exp} = 9 \text{ g}$ Esta es la masa con la que se realizaron las mediciones

Este cambio de masas hace que se tenga que agregar un factor de corrección a las lecturas de las medidas realizadas. Con este nuevo valor de la masa del contrapeso y de acuerdo a la relación anterior se corrige la ecuación de funcionamiento para el cálculo de la velocidad de aire. Dado que la velocidad de aire es proporcional a la raíz de la masa del contrapeso ($V \propto \sqrt{m_c}$), la estimación del factor de corrección se obtiene de acuerdo a:

$$\frac{V_{med}}{V_{corr}} = \frac{\sqrt{m_{dis}}}{\sqrt{m_{exp}}} \frac{\sqrt{25}}{\sqrt{9}} = 1.666$$

Donde:

m_{dis} = Masa de diseño

m_{exp} = Masa con la cual se realizaron las pruebas

V_{med} = Velocidad de aire estimada sin la corrección

V_{corr} = Velocidad de aire

Tabla 6. Valores promedio obtenidos en las pruebas del medidor

Frecuencia [Hz]	Angulo girado [grados]	Velocidad en conducto anular [m/s]	Velocidad en ducto de D= 6" [m/s]	Caudal [GPM]
35	9.6	10.6032	4.0392	1150.3524
40	15.168	13.3796	5.0968	1451.2832
45	21.792	15.9476	6.0888	1733.3736
50	27.792	17.8716	6.8084	1938.5292
55	33.84	19.508	7.4376	2117.2384
60	40.704	21.1436	8.0556	2293.9392

Para la obtención de la tabla 6 se llevo a cabo el siguiente procedimiento:

1. Para cada frecuencia de motoventilador se realizaron 15 mediciones
2. Se registraron los valores de ángulo girado por el medidor, velocidad en el conducto anular, velocidad en el tubo Venturi y caudal.
3. Se realizó el cálculo de los respectivos valores promedio para cada una de las variables.

Para los datos de experimentación obtenidos se calculó el factor de comparación entre la velocidad de aire determinada con el medidor y la velocidad de aire medida con el tubo Venturi, de manera que:

$$F_c = \frac{V_{corr}}{V_{vent}}$$

Los resultados obtenidos del factor de comparación se muestran en la tabla 7.

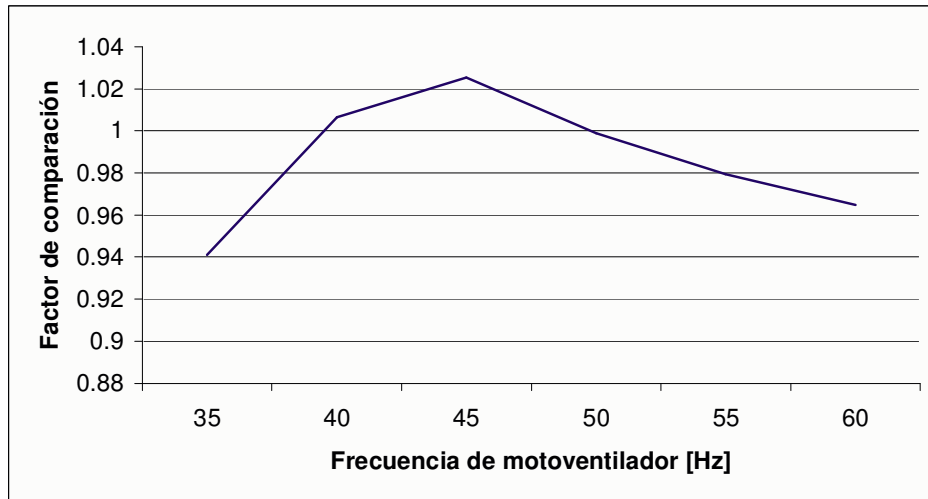
Tabla 7. Factor de comparación para diferentes regimenes de flujo

Frecuencia del motor [Hz]	Velocidad de aire en ducto de D = 6" [m/s]	Velocidad en Venturi V_c [m/s]	Factor de comparacion F_c	Re
35	4.039216157	4.292325348	0.941032152	39258.70806
40	5.096820387	5.062950766	1.0066897	49537.97366
45	6.088824355	5.936836016	1.025600899	59179.64488
50	6.808427234	6.816206071	0.998858773	66173.74429
55	7.437629751	7.594426148	0.979353753	72289.20752
60	8.055632223	8.348113428	0.964964395	78295.81318

En la tabla anterior se puede observar que los valores de número de Reynolds indican que el flujo de aire se encuentra en la zona de flujo turbulento, coincidiendo con la condición de diseño del medidor, para todas las pruebas realizadas.

Los valores de factor de comparación obtenidos con las pruebas del medidor nos permiten concluir que la ecuación de funcionamiento del aparato construido tiene alta exactitud con respecto a la referencia (tubo Venturi) ya que sus valores son cercanos a la unidad, siendo menos exactos los valores extremos de caudal de prueba, tal como puede verse en la figura 69.

Figura 69. Comportamiento del factor de comparación



Finalmente se estimaron las desviaciones e incertidumbres estándar para cada uno de los caudales de prueba del medidor de acuerdo a lo señalado en el Apéndice A, tal y como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Incertidumbre estándar

Frecuencia del motor [Hz]	Velocidad de aire en area de D=6" [m/s]	Caudal de aire [GPM]	Desviacion estandar [m/s]	Incertidumbre estandar [m/s]	Incertidumbre estandar [%]
35	4.0392	1150.3524	0.527	0.136	3.369
40	5.0968	1451.2832	0.231	0.060	1.170
45	6.0888	1733.3736	0.17	0.044	0.721
50	6.8084	1938.5292	0.179	0.046	0.679
55	7.4376	2117.2384	0.335	0.086	1.163
60	8.0556	2293.9392	0.118	0.030	0.378

CONCLUSIONES

- Se dotó al laboratorio de mecánica de fluidos de un dispositivo de medición de caudal de aire cuyo principio de funcionamiento es único, basado en la creación de un diferencial de presión mediante un manómetro toroidal, generando una nueva herramienta de confrontación del conocimiento teórico adquirido por parte del estudiante en la asignatura de mecánica de fluidos.
- El medidor presenta una zona muerta que abarca aproximadamente la mitad de los caudales que pueden ser fijados por el motoventilador del banco de flujometro neumático (rango de frecuencias del motor de 0 a 35 Hz), por lo cual se recomienda reducir al máximo los niveles de fricción seca en los rodamientos, con el fin de ampliar el rango útil de medida.
- Al comparar los resultados en la medición de velocidad de aire entre el tubo Venturi (referencia) y el medidor diseñado y construido, se aprecia que la medición realizada por este último es exacta debido a que los valores del factor de comparación a todos los caudales de prueba son cercanos a la unidad. Sin embargo la ecuación de funcionamiento del medidor ajusta bien los resultados en el rango medio de los caudales de prueba, mientras que a caudales mínimo y máximo la comparación muestra una mayor diferencia entre el valor teórico y el valor experimental. Variables como la fricción (a caudal

mínimo) y la turbulencia (a caudal máximo) son la causa de la desviación de los resultados en estos valores extremos.

- El comportamiento dinámico del aparato construido es óptimo ya que no presenta un carácter oscilatorio en su señal de salida (ángulo de giro que se traduce en velocidad de aire de acuerdo a la ecuación de funcionamiento del medidor), permitiendo una medición con valores estables por medio del sistema de adquisición de datos.
- Debido a que el funcionamiento del medidor es por medio de la rotación de un cuerpo cilíndrico, la construcción y configuración de cada uno de sus componentes debe realizarse lo más simétricamente posible, de manera que el medidor no quede desbalanceado en su rotación.
- Durante el proceso de construcción del medidor, los desbalances que persistan en el funcionamiento de éste una vez sus componentes han sido construidos y ensamblados, deben ser corregidos por medio de la adición de masas de balanceo, mediante un procedimiento de balanceo estático.
- Se considera que el prototipo de medidor diseñado y construido en este proyecto de grado se encuentra en una fase inicial de desarrollo, en la cual solo tendría aplicaciones académicas. Sin embargo, el perfeccionamiento de este prototipo en cuanto a su diseño, procesos de fabricación de sus componentes y montaje de los mismos, lo harían apropiado para ser usado como medidor de flujo en aplicaciones industriales.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un mantenimiento periódico del medidor construido en general y específicamente se debe evaluar el funcionamiento de ciertos componentes críticos como los rodamientos, los cuales pueden generar inexactitud, en la medida en que no estén apropiadamente lubricados y se encuentren funcionando en presencia de partículas abrasivas que se acumulan con el tiempo.
- El montaje y desmontaje del encoder debe realizarse con especial cuidado, de manera que el eje de este sensor se coloque perfectamente alineado con el eje del medidor, ya que la desalineación de estos componentes impide al sensor óptico del transductor registrar el ángulo de giro.
- Se recomienda someter las versiones mejoradas del medidor a pruebas de calibración de un laboratorio especializado y certificado para este tipo de pruebas, de manera que pueda establecerse la trazabilidad de este instrumento a un patrón primario reconocido internacionalmente.

BIBLIOGRAFÍA

DIAZ, Alejandro. Adecuación, instalación y montaje del laboratorio de mecánica de fluidos adscrito a la Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2000. 84 p.

DOEBELIN, Ernest. Measurement systems; Application and design. New York: Mc Graw Hill. 2004. 1078 p.

FOX, Robert. Introducción a la mecánica de fluidos. México: Mc Graw Hill. 1989. 750 p.

GELVES, Omar Armando. Control numérico computarizado de un torno. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 1993. 163 p.

MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. New York: Harper & Row Publishers Inc. 1970. 582p.

OWER, E. The measurement of air flow. London: Pergamon press. 1966. 367 p.

POTTER, Merle. Mecánica de fluidos. México: Prentice Hall. 1997. 769 p.

SHAMES, Irving. Mecánica de fluidos. México: Mc. Graw Hill. 1995. 829 p.

Guía para estimar la incertidumbre en la medición. México: CENAM. 2000. 27p.

Interim supplement 19.5 on instruments and apparatus; Application part II of fluid meters. New York: ASME. 1971. 270 p.

Norma técnica colombiana NTC 3529-3 "Exactitud (veracidad y precisión) de los métodos y resultados de las mediciones". Bogotá: Icontec. 1999. 38 p.

APÉNDICES

APENDICE A

METROLOGIA

La metrología es la ciencia encargada de determinar el valor cualitativo y cuantitativo de una magnitud, la cual incluye los aspectos teóricos y prácticos relacionados con las mediciones, cualquiera que sea su incertidumbre y cualquiera que sea el campo de la ciencia o de la tecnología al cual se aplica. De hecho, podría decirse que la metrología es la columna vertebral de todas las disciplinas científicas.

Una de las dificultades con las que se enfrenta la metrología al tratar de comunicar un concepto relacionado con las mediciones es el vocabulario técnico utilizado, el cual posee significados muy precisos y hace uso de las palabras que en el lenguaje común no necesariamente se emplean con el mismo propósito. Aún en los medios técnicos existía una falta de consenso sobre el significado de los términos empleados en metrología hasta la publicación en 1993 del Internacional Vocabulary of Basis and General Terms in Metrology (VIM), publicada por la ISO a nombre de siete organizaciones internacionales cuya traducción al español se encuentra en la norma NTC 2194.

A continuación se presenta la definición de algunos términos metrológicos que son de utilidad en el desempeño en la ciencia de la metrología:

- Medición: Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud
- Magnitud: Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.
- Mensurado: Magnitud particular sujeta a medición
- Instrumento de medición: Dispositivo destinado para efectuar mediciones solo o en conjunto con uno o varios dispositivos adicionales.

A.1 PROPIEDADES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICION

A continuación se presentan algunos términos relacionados con los instrumentos de medición en general. Estos son de especial importancia cuando se consideran las propiedades de los medidores.

A.1.1 Repetibilidad y reproductibilidad

En la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición. Las condiciones de repetibilidad incluyen:

- El mismo procedimiento de medición
- El mismo observador
- El mismo instrumento de medición

- El mismo lugar
- Repetición en un corto periodo de tiempo

Un término relacionado con la repetibilidad es la reproducibilidad. Este término se traduce en la capacidad que un instrumento posee de lograr el mismo resultado cuando es utilizado para medir la misma magnitud en momentos diferentes y bajo condiciones diferentes. Este factor es importante por ejemplo para la evaluación de la susceptibilidad de un determinado medidor a las condiciones de instalación.

A.1.2 Precisión

Es una expresión cualitativa de la repetibilidad, no debe asociársele ningún valor numérico y no debe ser usada como sinónimo de la palabra exactitud. La precisión indica tan solo cuantas cifras decimales podemos leer, pero ella nada dice respecto a en cuantas de esas cifras decimales de ellas podemos confiar.

Por medio de un acuerdo internacional, la palabra “precisión” es utilizada para describir que tan discriminadamente un instrumento puede medir. Por ejemplo, la precisión de un cronometro digital electrónico con lectura en milisegundos es una centena de veces mayor del cronometro manual con graduación en décimas de segundo.

A.1.3 Exactitud

Si la repetibilidad es la capacidad de un instrumento de “contar siempre la misma historia”, exactitud es la medida de su capacidad de “decir la verdad”.

En general, la buena repetibilidad de un medidor depende de un buen diseño y de una fabricación cuidadosa, así mismo, una buena exactitud depende de los dos requisitos mencionados anteriormente, y de una calibración cuidadosa contra un patrón. Por eso, cuando necesitamos mantener continuamente una alta exactitud de un medidor, el mismo debe recalibrarse regularmente.

Es importante resaltar que la palabra exactitud es una palabra cualitativa y no debe ser utilizada para cuantificar un determinado parámetro porque ella posee varios significados.

La repetibilidad es confundida frecuentemente con exactitud, pero son dos conceptos diferentes. La figura A.1 ilustra esta diferencia conceptual.

Figura A.1 Diferencia entre exactitud y repetibilidad



Si un instrumento posee una repetibilidad pobre, tendrá también una exactitud pobre. Por otro lado, un factor de un medidor que presente una

buena repetibilidad no significa necesariamente que presente también una buena exactitud (aunque la pueda tener), ya que puede estar presentando el mismo valor incorrecto repetidamente.

A.1.4 Incertidumbre

Actualmente, el término internacionalmente aceptado para expresar la exactitud o inexactitud de una medición es el término incertidumbre. Este es un parámetro asociado a los resultados de una medición, que caracteriza a la dispersión de los valores que en forma razonable se le podrían atribuir a la magnitud por medir.

A.2 ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE

Siempre que se realiza una medición se considera que se lleva a cabo con la mejor estimación posible y que la incertidumbre que se le asocia proviene de efectos aleatorios tales como los componentes asociados a correcciones, a las incertidumbres de los parámetros que afectan a los patrones que se utilizan, etc.

El resultado final de una medida Y se expresa como la mejor estima del valor de la magnitud que se mide Y_c , junto con el intervalo de incertidumbre que resulta I , y la indicación del nivel de confianza k que se utiliza, de manera que:

$$Y = Y_c + I(k)$$

Cuando el proceso de medida consiste en la realización de una medida singular $Y_m (N_m)$, se tiene que:

$$Y_c = Y_m$$

Si el proceso de medida consiste en la realización de N_m medidas Y_i , el mejor valor estimado Y_c habitualmente es el valor medio de las medidas realizadas, de manera que:

$$Y_c = \bar{Y} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} Y_i$$

La incertidumbre de una medida se caracteriza cuantitativamente por una desviación estándar o un múltiplo de esta que corresponda a la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza preestablecido, así que:

$$I = \pm kU$$

Donde U es la desviación estándar global que corresponde a la composición de las diferentes componentes que aportan incertidumbre a la medida y el factor k de incertidumbre que indica el nivel de confianza con la que se expresa la incertidumbre, de acuerdo con la tabla 1. Lo normal es utilizar un nivel de confianza del 95 %, o k=2, que es lo mismo.

Tabla A.1 Relación del factor de incertidumbre

K	Confianza [%]
1	66
2	95
3	99

A.2.1 Cuantificación

En la literatura se distinguen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El método de evaluación basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones y el método de evaluación que comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre.

Cabe mencionar que esta clasificación no significa que exista alguna diferencia en la naturaleza de los componentes que resultan de cada uno de los dos tipos de evaluación puesto que ambos tipos están basados en distribuciones de probabilidad. La única diferencia es que en las evaluaciones de análisis estadístico se estima esta distribución basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de medición mientras que en el otro tipo de evaluación se supone una distribución con base en la experiencia o información externa al metrologo.

En la práctica esta clasificación no tiene consecuencia alguna en las etapas para obtener una estimación de la incertidumbre combinada.

- método de evaluación basado en análisis estadístico (tipo 1): La incertidumbre de una magnitud de entrada y_i , obtenida a partir de

observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad se estima con base en la dispersión de los resultados individuales. Si Y_i se determina por n mediciones independientes, resultando en valores q_1, q_2, \dots, q_n , el mejor estimado y_i para el valor Y_i es la media de los resultados individuales, así:

$$y_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

La dispersión de los resultados de la medición q_1, q_2, \dots, q_n para la magnitud de entrada Y_i se expresa por su desviación estándar experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}$$

La incertidumbre estándar $u(y_i)$ de Y_i se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media, de manera que:

$$u(y_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de Y_i :

$$u(y_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}$$

Para una medición que se realiza por un método bien caracterizado y bajo condiciones controladas, es razonable suponer que la distribución (dispersión) de q_i no cambia, o sea que se mantiene prácticamente igual para mediciones realizadas en diferentes días por diferentes metrologos (esto es que la medición está bajo control estadístico). En este caso esta componente de la incertidumbre puede ser más confiablemente estimada con la desviación estándar s_p obtenida de un solo experimento anterior, que con la desviación estándar experimental $s(q)$ obtenida por un número n de mediciones casi pequeño. La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por:

$$u(y_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}}$$

No se puede dar una recomendación general para el número ideal de las repeticiones n , ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica. Es necesario considerar que:

- Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre de análisis estadístico, la cual es proporcional a $\frac{1}{\sqrt{n}}$
- Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, lo cual puede ser contraproducente si las condiciones

ambientales y otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.

- En pocos casos se recomienda o se requiere n mayor a 10
- Para determinar el impacto que tiene n en la incertidumbre expandida hay que estimar su influencia en el número de grados efectivos de libertad.

Otras fuentes de incertidumbre que se evalúan con este método son la reproductibilidad y las obtenidas al hacer una regresión lineal.

➤ método de evaluación referente a información externa al metrologo (tipo 2): Las fuentes de incertidumbre tipo 2 son cuantificadas usando información externa u obtenida por la experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración
- Manuales del instrumento de medición o especificaciones del mismo
- Normas o literatura
- Valores de mediciones anteriores
- Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición

Los métodos no estadísticos que suelen utilizarse están dados en función de la naturaleza de las componentes. Los criterios de

estimación de las componentes en función de su naturaleza o de la información que sobre ellas se disponga son:

a)-. Si no se dispone de ninguna información: Se estimará la incertidumbre máxima de la componente y se evalúa su contribución u_i como:

$$u_i = \frac{\text{Incertidumbre máxima de la componente}}{\sqrt{3}}$$

b)-. Se dispone de un certificado de calibración para la componente, en la que se establece su incertidumbre para un nivel de confianza k . En este caso se evalúa su contribución como:

$$u_i = \frac{\text{Incertidumbre certificada}}{k}$$

c)-. El fabricante establece la exactitud de la componente definida como la máxima variación de su valor a lo largo de un tiempo establecido, así que:

$$u_i = \frac{\text{Exactitud de la componente}}{k}$$

d)-. El fabricante establece la repetibilidad o resolución de la componente, definida como una desviación estándar asociada a sucesivas medidas hechas en un corto periodo de tiempo, de manera que:

$$u_i = \frac{\text{Desviación estándar de la componente}}{\sqrt{3}}$$

e)-. La inestabilidad del parámetro, definida como variaciones del valor que se obtiene en sucesivas medidas. En estos casos se considera como u_i :

$$u_i = \frac{\text{Rango en el que fluctúa la componente}}{2\sqrt{3}}$$

La estimación de la incertidumbre de una medida es un proceso abierto a diferentes interpretaciones y en consecuencia no exacta, por ello es muy importante disponer siempre de un procedimiento que explique las componentes que se han considerado así como el criterio de cálculo de su influencia que se ha utilizado.

A.2.2 Distribuciones de probabilidad

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son:

- **Distribución normal:** Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal. Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida U , como los presentados por

ejemplo en certificados de calibración, se divide U entre el factor de cobertura k, obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado, de manera que:

$$u(y_i) = \frac{U}{k}$$

- Distribución rectangular: Es una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. Ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular. Si la magnitud de entrada Y_i tiene una distribución rectangular con el límite superior a^+ y el límite a^- , el mejor estimado para el valor de Y_i está dado por:

$$y_i = \frac{a^+ - a^-}{2}$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(y_i) = \frac{a^+ - a^-}{\sqrt{12}} = \frac{a/2}{\sqrt{3}}$$

O por:

$$u(y_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}}$$

Donde $a/2$ es el semiancho del intervalo a con:

$$a = a^+ - a^-$$

- Distribución triangular: Como en una distribución rectangular, para una magnitud de entrada Y_i que tiene una distribución triangular con los límites a^+ y a^- , el mejor estimado para el valor de Y_i está dado por:

$$y_i = \frac{a^+ - a^-}{2}$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(y_i) = \frac{a^+ - a^-}{\sqrt{12}} = \frac{a/2}{\sqrt{6}}$$

A.2.3 Combinación

Es el resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$, el cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando Y . La contribución $u_i(y)$ de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar $u(y_i)$ de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Es posible encontrar que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando y viceversa. Se determina $u_i(y)$ por el producto de la

incertidumbre estándar $u(y_i)$ y su coeficiente de sensibilidad c_i (o factor de sensibilidad), de manera que:

$$u_i(y) = u(y_i) \times c_i$$

El coeficiente de sensibilidad describe que tan sensible es el mensurando con respecto a variaciones de la magnitud de entrada correspondiente. Para su determinación existen 2 métodos:

a)-. Determinación a partir de una relación funcional: Si el modelo matemático para el mensurando $Y = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$ describe la influencia de la magnitud de entrada Y_i suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se calcula por la derivada parcial de f con respecto a Y_i .

$$c_i = \frac{\partial f(Y_1, \dots, Y_N)}{\partial Y_i} \Big|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N}$$

b)-. Otros métodos de determinación: Si la influencia de entrada Y_i en el mensurando Y no está representada por una relación funcional, se determina el coeficiente de sensibilidad c_i por una estimación del impacto de una variación de Y_i en Y según:

$$c_i = \frac{\Delta Y}{\Delta Y_i}$$

Esto es, manteniendo constantes las demás magnitudes de entrada se determina el cambio del mensurando (Y) producido por un cambio en la magnitud de entrada Y_i por una medición o a partir de la información disponible (una gráfica o tabla).

Existen otros parámetros cuantitativos descriptivos de la contribución a la incertidumbre, como los enunciados a continuación:

- Porcentaje de contribución: El porcentaje de contribución (% c_i) es otra manera de expresar la contribución $u_i(y)$ de cada fuente sobre la incertidumbre total o combinada, mediante la fórmula:

$$\%C = \sum_{i=1}^N [u_i(y)]^2$$

Este valor no es tenido en cuenta durante la estimación de la incertidumbre, pero representa de una mejor manera la contribución de cada variable frente a la incertidumbre total.

- Propagación de la incertidumbre: Considerando los métodos de combinación y los coeficientes de sensibilidad, se tiene que:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \times u(y_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial Y_i} \times u(y_i) \right]^2}$$

A.2.4 Incertidumbre expandida

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se comunica simplemente como la incertidumbre estándar combinada, otras ocasiones como un cierto número de veces tal incertidumbre, algunos casos requieren que se exprese en términos de un nivel de confianza dado, etc. En cualquier caso, es indispensable comunicar sin ambigüedades la manera en que la incertidumbre está expresada.

- Factor de cobertura y nivel de confianza: La incertidumbre estándar u_c representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurado que contiene el valor verdadero con una probabilidad p de 68 % aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurado siguen una distribución normal. Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida U , de manera que:

$$U = k \times u_c$$

La incertidumbre expandida U indica entonces un intervalo que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mensurado. El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia. En el medio industrial, a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponda a un factor

de cobertura como un número interno de desviaciones estándar en una distribución normal.

ANEXOS

ANEXO A. Catalogo del transductor rotatorio de posición

HEDM-550x/560x Quick Assembly Two and Three Channel Optical Encoders

AVAGO
TECHNOLOGIES

Data Sheet



HEDM-550x/560x HEDS-550x/554x, HEDS-560x/564x

Description

The HEDS-5500/5540, HEDS-5600/5640, and HEDM-5500/5600 are high performance, low cost, two and three channel optical incremental encoders. These encoders emphasize high reliability, high resolution, and easy assembly.

Each encoder contains a lensed LED source, an integrated circuit with detectors and output circuitry, and a codewheel which rotates between the emitter and detector IC. The outputs of the HEDS-5500/5600 and HEDM-5500/5600 are two square waves in quadrature. The HEDS-5540 and 5640 also have a third channel index output in addition to the two channel quadrature. This index output is a 90 electrical degree, high true index pulse which is generated once for each full rotation of the codewheel.

The HEDS series utilizes metal codewheels, while the HEDM series utilizes a film codewheel allowing for resolutions to 1024 CPR. The HEDM series is nont available with a third channel index.

These encoders may be quickly and easily mounted to a motor. For larger diameter motors, the HEDM-5600, and HEDS-5600/5640 feature external mounting ears.

The quadrature signals and the index pulse are accessed through five 0.025 inch square pins located on 0.1 inch centers.

Standard resolutions between 96 and 1024 counts per revolution are presently available. Consult local Avago sales representatives for other resolutions.

Features

- Two channel quadrature output with optional index pulse
- Quick and easy assembly
- No signal adjustment required
- External mounting ears available
- Low cost
- Resolutions up to 1024 counts per revolution
- Small size
- -40°C to 100°C operating temperature
- TTL compatible
- Single 5 V supply

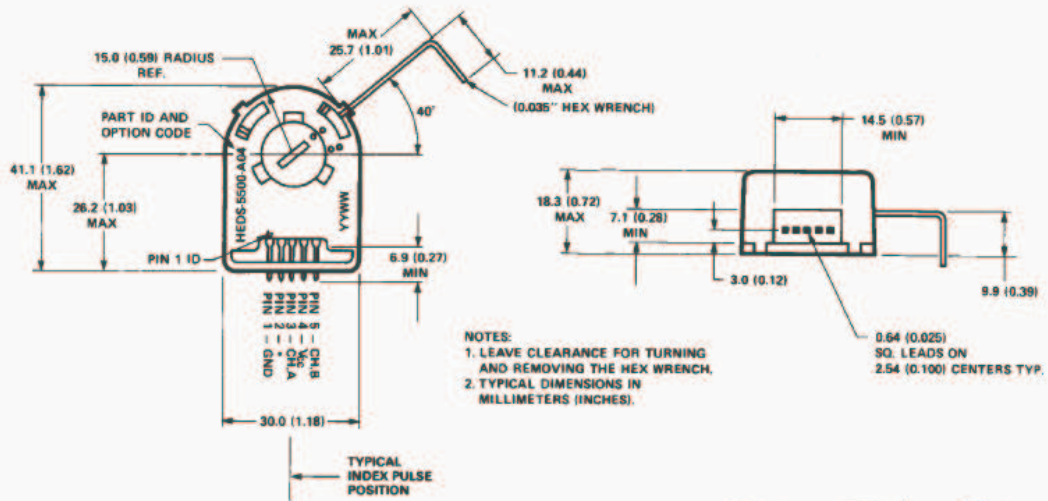
Applications

The HEDS-5500, 5540, 5600, 5640, and the HEDM-5500, 5600 provide motion detection at a low cost, making them ideal for high volume applications. Typical applications include printers, plotters, tape drives, positioning tables, and automatic handlers.

Note: Avago Technologies encoders are not recommended for use in safety critical applications. Eg. ABS braking systems, power steering, life support systems and critical care medical equipment. Please contact sales representative if more clarification is needed.

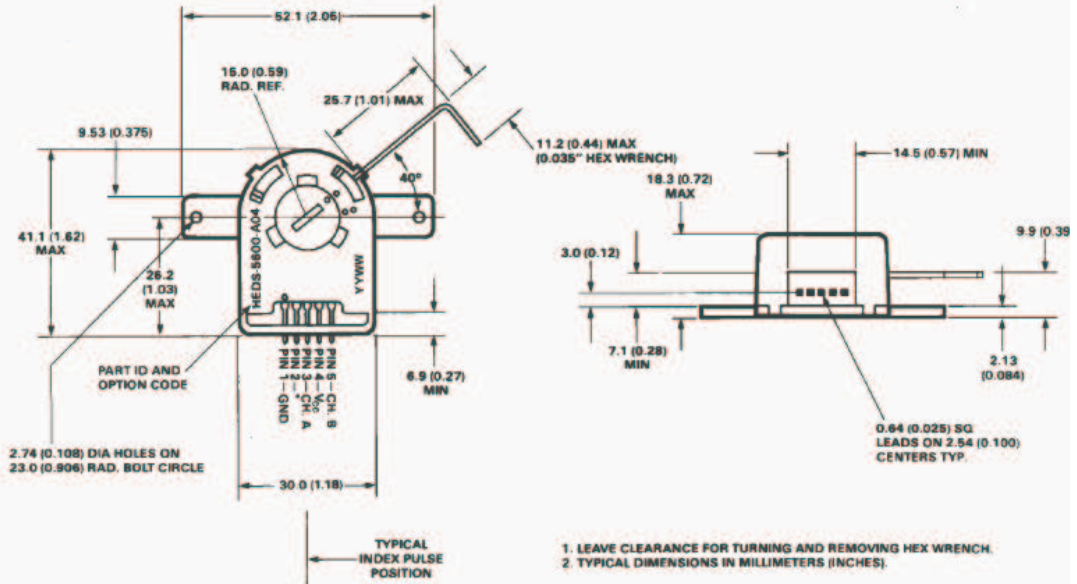
Package Dimensions

HEDS-5500/5540, HEDM-5500



*Note: For the HEDS-5500 and HEDM-5500, Pin #2 is a No Connect. For the HEDS-5540, Pin #2 is CH. I, the index output.

HEDS-5600/5640, HEDM-5600



*Note: For the HEDS-5600 and HEDM-5600, Pin #2 is a No Connect. For the HEDS-5640, Pin #2 is CH. I, the index output.

Theory of Operation

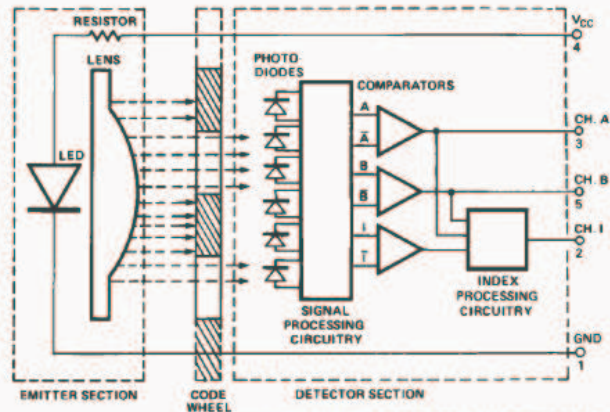
The HEDS-5500, 5540, 5600, 5640, and HEDM-5500, 5600 translate the rotary motion of a shaft into either a two- or a three-channel digital output.

As seen in the block diagram, these encoders contain a single Light Emitting Diode (LED) as its light source. The light is collimated into a parallel beam by means of a single polycarbonate lens located directly over the LED. Opposite the emitter is the integrated detector circuit. This IC consists of multiple sets of photodetectors and the signal processing circuitry necessary to produce the digital waveforms.

The codewheel rotates between the emitter and detector, causing the light beam to be interrupted by the pattern of spaces and bars on the codewheel. The photodiodes which detect these interruptions are arranged in a pattern that corresponds to the radius and design of the codewheel. These detectors are also spaced such that a light period on one pair of detectors corresponds to a dark period on the adjacent pair of detectors. The photodiode outputs are then fed through the signal processing circuitry resulting in A, \bar{A} , B and \bar{B} (also I and \bar{I} in the HEDS-5540 and 5640). Comparators receive these signals and produce the final outputs for channels A and B. Due to this integrated phasing technique, the digital output of channel A is in quadrature with that of channel B (90 degrees out of phase).

In the HEDS-5540 and 5640, the output of the comparator for I and \bar{I} is sent to the index processing circuitry along with the outputs of channels A and B.

Block Diagram



NOTE: CIRCUITRY FOR CH. I IS ONLY IN HEDS-5540 AND 5640 THREE CHANNEL ENCODERS.

The final output of channel I is an index pulse P_0 which is generated once for each full rotation of the codewheel. This output P_0 is a one state width (nominally 90 electrical degrees), high true index pulse which is coincident with the low states of channels A and B.

Definitions

Count (N): The number of bar and window pairs or counts per revolution (CPR) of the codewheel.

One Cycle (C): 360 electrical degrees ($^\circ$), 1 bar and window pair.

One Shaft Rotation: 360 mechanical degrees, N cycles.

Position Error ($\Delta\theta$): The normalized angular difference between the actual shaft position and the position indicated by the encoder cycle count.

Cycle Error (ΔC): An indication of cycle uniformity. The difference between an observed shaft angle which gives rise to one electrical cycle, and the nominal angular increment of $1/N$ of a revolution.

Pulse Width (P): The number of electrical degrees that an output is high during 1 cycle. This value is nominally 180° or $1/2$ cycle.

Pulse Width Error (ΔP): The deviation, in electrical degrees, of the pulse width from its ideal value of 180° .

State Width (S): The number of electrical degrees between a transition in the output of channel A and the neighboring transition in the output of channel B. There are 4 states per cycle, each nominally 90° .

State Width Error (ΔS): The deviation, in electrical degrees, of each state width from its ideal value of 90° .

Phase (ϕ): The number of electrical degrees between the center of the high state of channel A and the center of the high state of channel B. This value is nominally 90° for quadrature output.

Phase Error ($\Delta\phi$): The deviation of the phase from its ideal value of 90° .

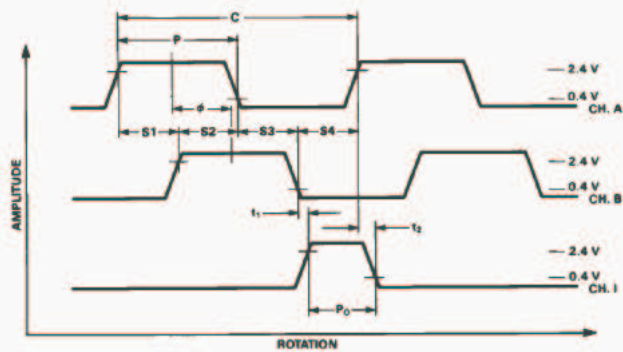
Absolute Maximum Ratings

Parameter	HEDS-55XX/56XX	HEDM-550X/560X
Storage Temperature, T_S	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C
Operating Temperature, T_A	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C
Supply Voltage, V_{CC}	-0.5 V to 7 V	-0.5 V to 7 V
Output Voltage, V_O	-0.5 V to V_{CC}	-0.5 V to V_{CC}
Output Current per Channel, I_{OUT}	-1.0 mA to 5 mA	-1.0 mA to 5 mA
Vibration	20 g, 5 to 1000 Hz	20 g, 5 to 1000 Hz
Shaft Axial Play	± 0.25 mm (± 0.010 in.)	± 0.175 mm (± 0.007 in.)
Shaft Eccentricity Plus Radial Play	0.1 mm (0.004 in.) TIR	0.04 mm (0.0015 in.) TIR
Velocity	30,000 RPM	30,000 RPM
Acceleration	250,000 rad/sec ²	250,000 rad/sec ²

Direction of Rotation: When the codewheel rotates in the counter-clockwise direction (as viewed from the encoder end of the motor), channel A will lead channel B. If the codewheel rotates in the clockwise direction, channel B will lead channel A.

Index Pulse Width (P_O): The number of electrical degrees that an index output is high during one full shaft rotation. This value is nominally 90° or 1/4 cycle.

Output Waveforms



Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Notes
Temperature HEDS Series	T _A	-40		100	°C	
Temperature HEDM Series	T _A	-40		70	°C	non-condensing atmosphere
Supply Voltage	V _{CC}	4.5	5.0	5.5	Volts	Ripple < 100 mV _{P-P}
Load Capacitance	C _L			100	pF	2.7 kΩ pull-up
Count Frequency	f			100	kHz	Velocity (rpm) x N/60
Shaft Perpendicularity Plus Axial Play (HEDS Series)				± 0.25 (± 0.010)	mm (in.)	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Eccentricity Plus Radial Play (HEDS Series)				0.04 (0.0015)	mm (in.) TIR	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Perpendicularity Plus Axial Play (HEDM Series)				± 0.175 (± 0.007)	mm (in.)	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Eccentricity Plus Radial Play (HEDM Series)				0.04 (0.0015)	mm (in.) TIR	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface

Note: The module performance is guaranteed to 100 kHz but can operate at higher frequencies. 2.7 kΩ pull-up resistors required for HEDS-5540 and 5640.

Encoding Characteristics

Encoding Characteristics over Recommended Operating Range and Recommended Mounting Tolerances unless otherwise specified. Values are for the worst error over the full rotation.

Part No.	Description	Sym.	Min.	Typ.*	Max.	Units	
HEDS-5500 HEDS-5600 (Two Channel)	Pulse Width Error	ΔP		7	45	°e	
	Logic State Width Error	ΔS		5	45	°e	
	Phase Error	Δφ		2	20	°e	
	Position Error	Δθ		10	40	min. of arc	
	Cycle Error	ΔC		3	5.5	°e	
HEDM-5500 HEDM-5600 (Two Channel)	Pulse Width Error	ΔP		10	45	°e	
	Logic State Width Error	ΔS		10	45	°e	
	Phase Error	Δφ		2	15	°e	
	Position Error	Δθ		10	40	min. of arc	
	Cycle Error	ΔC		3	7.5	°e	
HEDS-5540 HEDS-5640 (Three Channel)	Pulse Width Error	ΔP		5	35	°e	
	Logic State Width Error	ΔS		5	35	°e	
	Phase Error	Δφ		2	15	°e	
	Position Error	Δθ		10	40	min. of arc	
	Cycle Error	ΔC		3	5.5	°e	
	Index Pulse Width	P _O	55	90	125	°e	
	CH. I rise after CH. A or CH. B fall		-40°C to +100°C	t ₂	-300	100	250
CH. I fall after CH. B or CH. A rise		-40°C to +100°C	t ₂	70	150	1000	ns

Note: See Mechanical Characteristics for mounting tolerances.
*Typical values specified at V_{CC} = 5.0 V and 25°C.

Electrical Characteristics

Electrical Characteristics over Recommended Operating Range.

Part No.	Parameter	Sym.	Min.	Typ.*	Max.	Units	Notes
HEDS-5500 HEDS-5600	Supply Current	I_{CC}		17	40	mA	$I_{OH} = -40 \mu A$ max. $I_{OL} = 3.2$ mA
	High Level Output Voltage	V_{OH}	2.4			V	
	Low Level Output Voltage	V_{OL}			0.4	V	
	Rise Time	t_r		200		ns	$C_L = 25$ pF $R_L = 11$ k Ω pull-up
	Fall Time	t_f		50		ns	
HEDS-5540 HEDS-5640 HEDM-5500 HEDM-5600	Supply Current	I_{CC}	30	57	85	mA	$I_{OH} = -200 \mu A$ max. $I_{OL} = 3.86$ mA
	High Level Output Voltage	V_{OH}	2.4			V	
	Low Level Output Voltage	V_{OL}			0.4	V	
	Rise Time	t_r		180		ns	$C_L = 25$ pF $R_L = 2.7$ k Ω pull-up
	Fall Time	t_f		40		ns	
HEDM-5500 HEDM-5600	Supply Current	I_{CC}	30	57	85	mA	$I_{OH} = -40 \mu A$ max. $I_{OL} = 3.86$ mA
	High Level Output Voltage	V_{OH}	2.4			V	
	Low Level Output Voltage	V_{OL}			0.4	V	
	Rise Time	t_r		180		ns	$C_L = 25$ pF $R_L = 3.2$ k Ω pull-up
	Fall Time	t_f		40		ns	

*Typical values specified at $V_{CC} = 5.0$ V and 25°C.

Mechanical Characteristics

Parameter	Symbol	Dimension	Tolerance ^[1]	Units
Codewheel Fits These Standard Shaft Diameters		2 3 4 5 6 8	+0.000 -0.015	mm
		5/32 1/8 3/16 1/4	+0.0000 -0.0007	in
Moment of Inertia	J	0.6 (8.0 x 10 ⁻⁶)		g-cm ² (oz-in-s ²)
Required Shaft Length ^[2]		14.0 (0.55)	± 0.5 (± 0.02)	mm (in.)
Bolt Circle ^[3]	2 screw mounting	19.05 (0.750)	± 0.13 (± 0.005)	mm (in.)
	3 screw mounting	20.90 (0.823)	± 0.13 (± 0.005)	mm (in.)
	external mounting ears	46.0 (1.811)	± 0.13 (± 0.005)	mm (in.)
Mounting Screw Size ^[4]	2 screw mounting	M 2.5 or (2-56)		mm (in.)
	3 screw mounting	M 1.6 or (0-80)		mm (in.)
	external mounting ears	M 2.5 or (2-56)		mm (in.)
Encoder Base Plate Thickness		0.33 (0.130)		mm (in.)
Hub Set Screw		(2-56)		(in.)

Notes:

1. These are tolerances required of the user.
2. The HEDS-55X5 and 56X5, HEDM-5505, 5605 provide an 8.9 mm (0.35 inch) diameter hole through the housing for longer motor shafts. See Ordering Information.
3. The HEDS-5540 and 5640 must be aligned using the aligning pins as specified in Figure 3, or using the alignment tool as shown in "Encoder Mounting and Assembly". See also "Mounting Considerations."
4. The recommended mounting screw torque for 2 screw and external ear mounting is 1.0 kg-cm (0.88 in-lbs). The recommended mounting screw torque for 3 screw mounting is 0.50 kg-cm (0.43 in-lbs).

Electrical Interface

To insure reliable encoding performance, the HEDS-5540 and 5640 three channel encoders require 2.7 kΩ (± 10%) pull-up resistors on output pins 2, 3, and 5 (Channels I, A, and B) as shown in Figure 1. These pull-up resistors should be located as

close to the encoder as possible (within 4 feet). Each of the three encoder outputs can drive a single TTL load in this configuration.

The HEDS-5500, 5600, and HEDM-5500, 5600 two channel encoders do not normally require pull-up resistors. However, 3.2 kΩ

pull-up resistors on output pins 3 and 5 (Channels A and B) are recommended to improve rise times, especially when operating above 100 kHz frequencies.

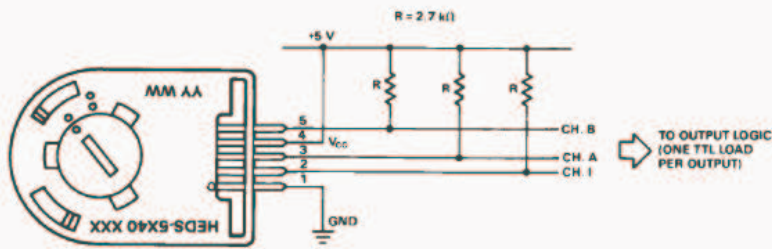


Figure 1. Pull-up Resistors on HEDS-5X40 Encoder Outputs.

Mounting Considerations

The HEDS-5540 and 5640 three channel encoders and the HEDM Series high resolution encoders must be aligned using the aligning pins as specified in Figure 3, or using the HEDS-8910 Alignment Tool as shown in Encoder Mounting and Assembly.

The use of aligning pins or alignment tool is recommended but not required to mount the HEDS-5500 and 5600. If these

two channel encoders are attached to a motor with the screw sizes and mounting tolerances specified in the mechanical characteristics section without any additional mounting bosses, the encoder output errors will be within the maximums specified in the encoding characteristics section.

The HEDS-5500 and 5540 can be mounted to a motor using either the two screw or three screw

mounting option as shown in Figure 2. The optional aligning pins shown in Figure 3 can be used with either mounting option.

The HEDS-5600, 5640, and HEDM-5600 have external mounting ears which may be used for mounting to larger motor base plates. Figure 4 shows the necessary mounting holes with optional aligning pins and motor boss.

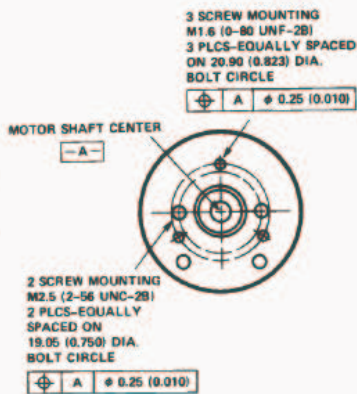


Figure 2. Mounting Holes.

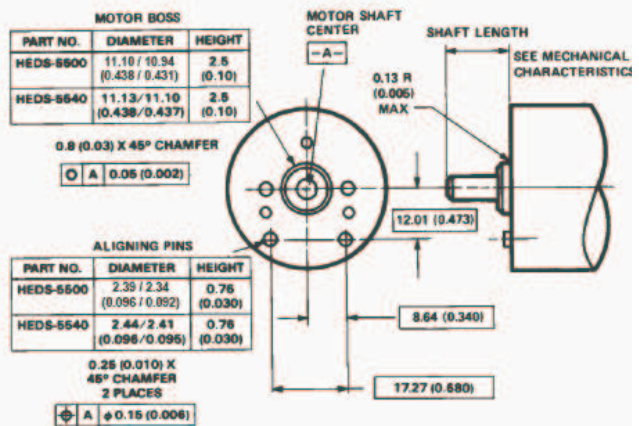


Figure 3. Optional Mounting Aids.

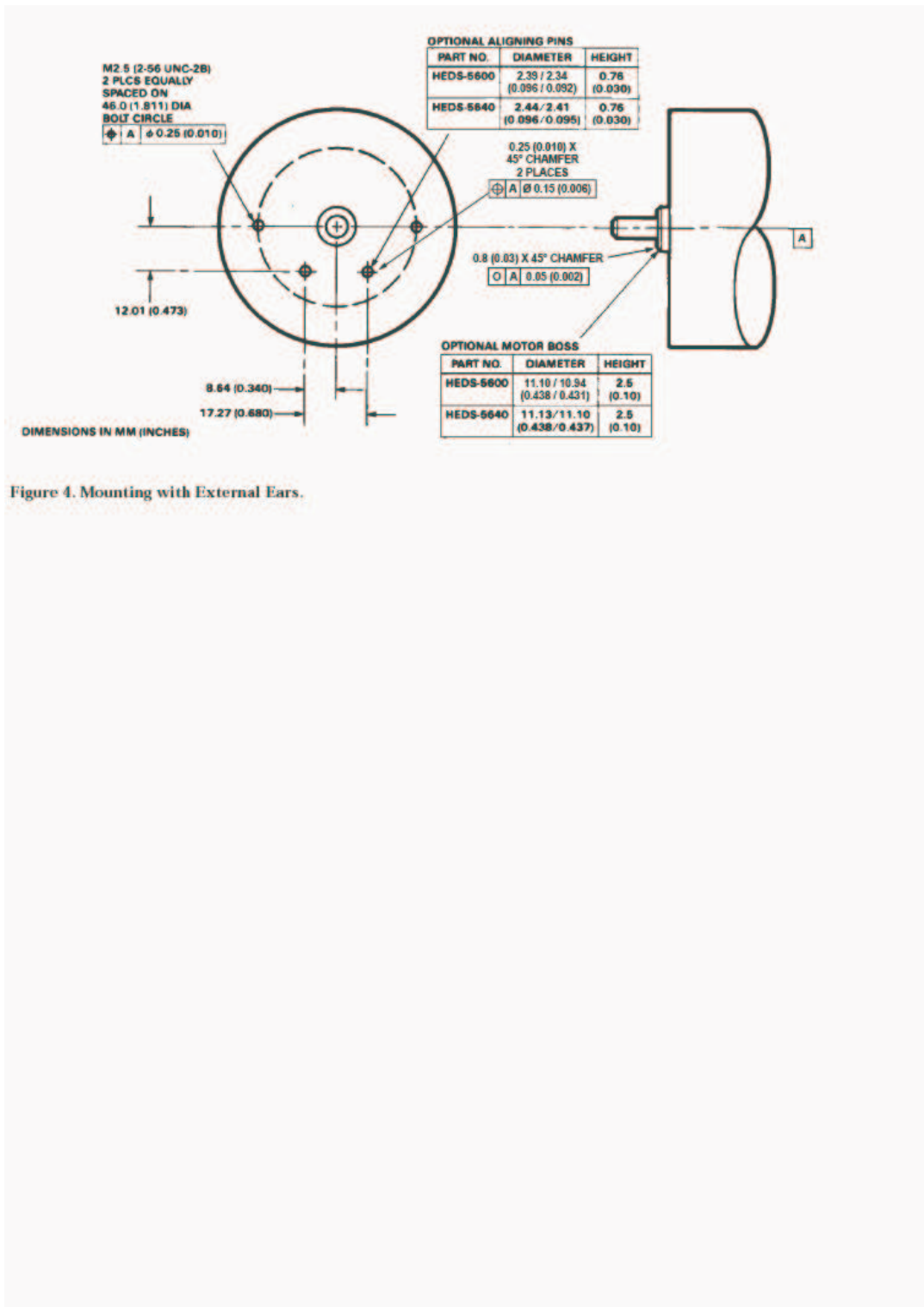
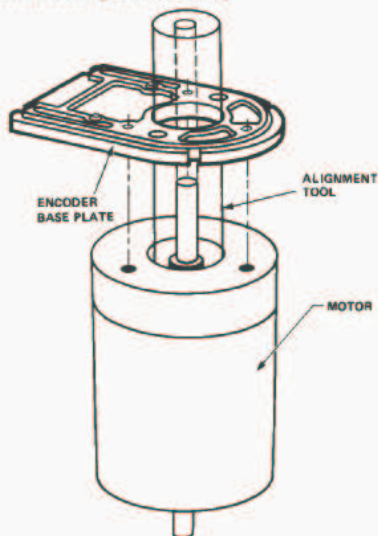


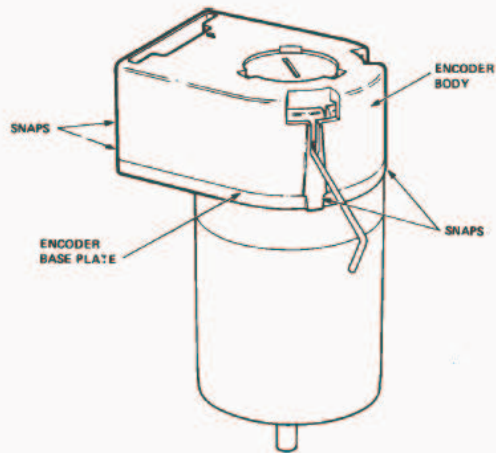
Figure 4. Mounting with External Ears.

Encoder Mounting and Assembly

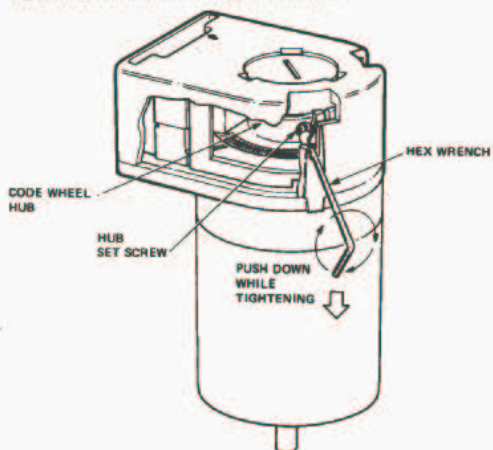


1. For HEDS-5500 and 5600: Mount encoder base plate onto motor. Tighten screws. Go on to step 2.

1a. For HEDS-5540, 5640 and HEDM-5500, 5600: Slip alignment tool onto motor shaft. With alignment tool in place, mount encoder baseplate onto motor as shown above. Tighten screws. Remove alignment tool.

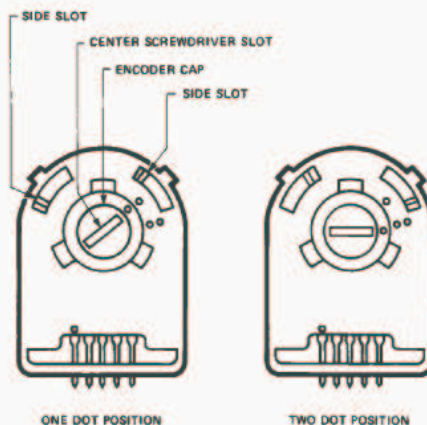


2. Snap encoder body onto base plate locking all 4 snaps.



3a. Push the hex wrench into the body of the encoder to ensure that it is properly seated into the code wheel hub set screws. Then apply a downward force on the end of the hex wrench. This sets the code wheel gap by levering the code wheel hub to its upper position.

3b. While continuing to apply a downward force, rotate the hex wrench in the clockwise direction until the hub set screw is tight against the motor shaft (The recommended torque to tighten the setscrew is 15-18 ozf.inch). The hub set screw attaches the code wheel to the motor's shaft.



3c. Remove the hex wrench by pulling it straight out of the encoder body.

4. Use the center screwdriver slot, or either of the two side slots, to rotate the encoder cap dot clockwise from the one dot position to the two dot position. Do not rotate the encoder cap counterclockwise beyond the one dot position.

The encoder is ready for use!

Connectors

Manufacturer	Part Number
AMP	103686-4 640442-5
Dupont/Berg	65039-032 with 4825X-000 term.
Avago (designed to mechanically lock into the HEDS-5XXX, HEDM-5X0X Series)	HEDS-8902 (2 ch.) with 4-wire leads HEDS-8903 (3 ch.) with 5-wire leads
Molex	2695 series with 2759 series term.

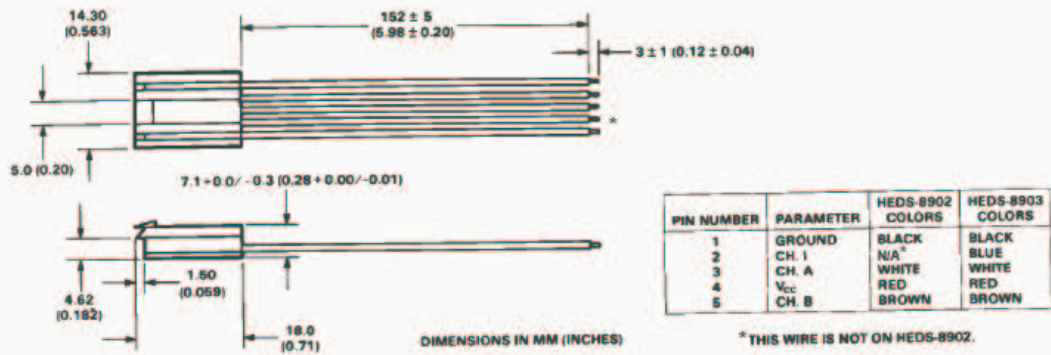
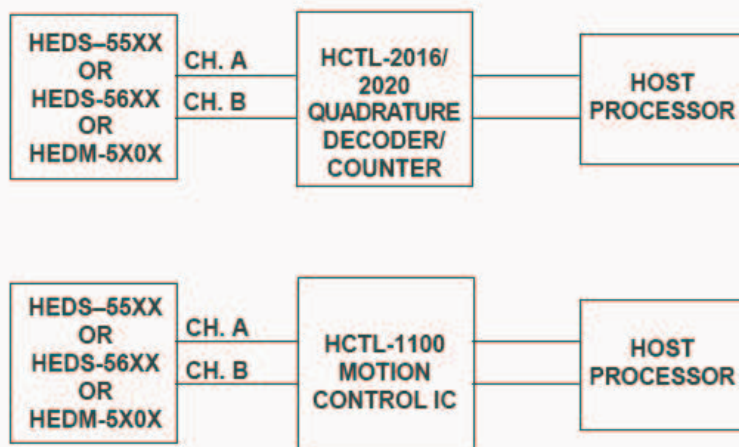


Figure 5. HEDS-8902 and 8903 Connectors.

Typical Interfaces



ANEXO B. Código de programación del bloque de función de Simulink®

```
function as = fcn(I, Mfd, Mfe, Map, Mcp, Mfv, wa, aa, daa)

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB
language.
% See the help menu for details.
% I : Segundo Momento inercia medidor.
% Mfd : Minimo Momento friccion seca (dinamico).
% Mfe : Maximo momento de friccion seca (estatico).
% Map : Momento aplicado.
% Mcp : Momento contrapeso.
% Mfv : Momento friccion viscosa.
% wa : velocidad angular medidor (anterior).
% as : aceleracion siguiente.
% aa : aceleracion anterior.
% saa : sobreaceleracion anterior.
zero = 1E-7;
if abs(wa) <= zero, % si w==0
    if abs(aa) <= zero, % y tambien alf == 0
        if abs(daa) <= eps, % y ademas d_alf == 0 :
medidor detenido (en reposo).
            if abs(Map-Mcp) <= Mfe, %el momento "motriz" no
vence la friccion Max.
                as = 0; %no aparece el giro.
            else % el momento "motriz" vence
la friccion Max.
                as = (Map-Mcp-sign(Map-Mcp)*Mfd)/I; % se
inicia aceleracion.
                % se asume aqui un cambio instantaneo de
los niveles de friccion.
            end
        else % medidor esta en movimiento con w = alf ==
0 pero d_alf ~=0.
            if abs(Map-Mcp) <= Mfd, %el momento "motriz" no
vence la friccion min.
                as = 0;
            else
```

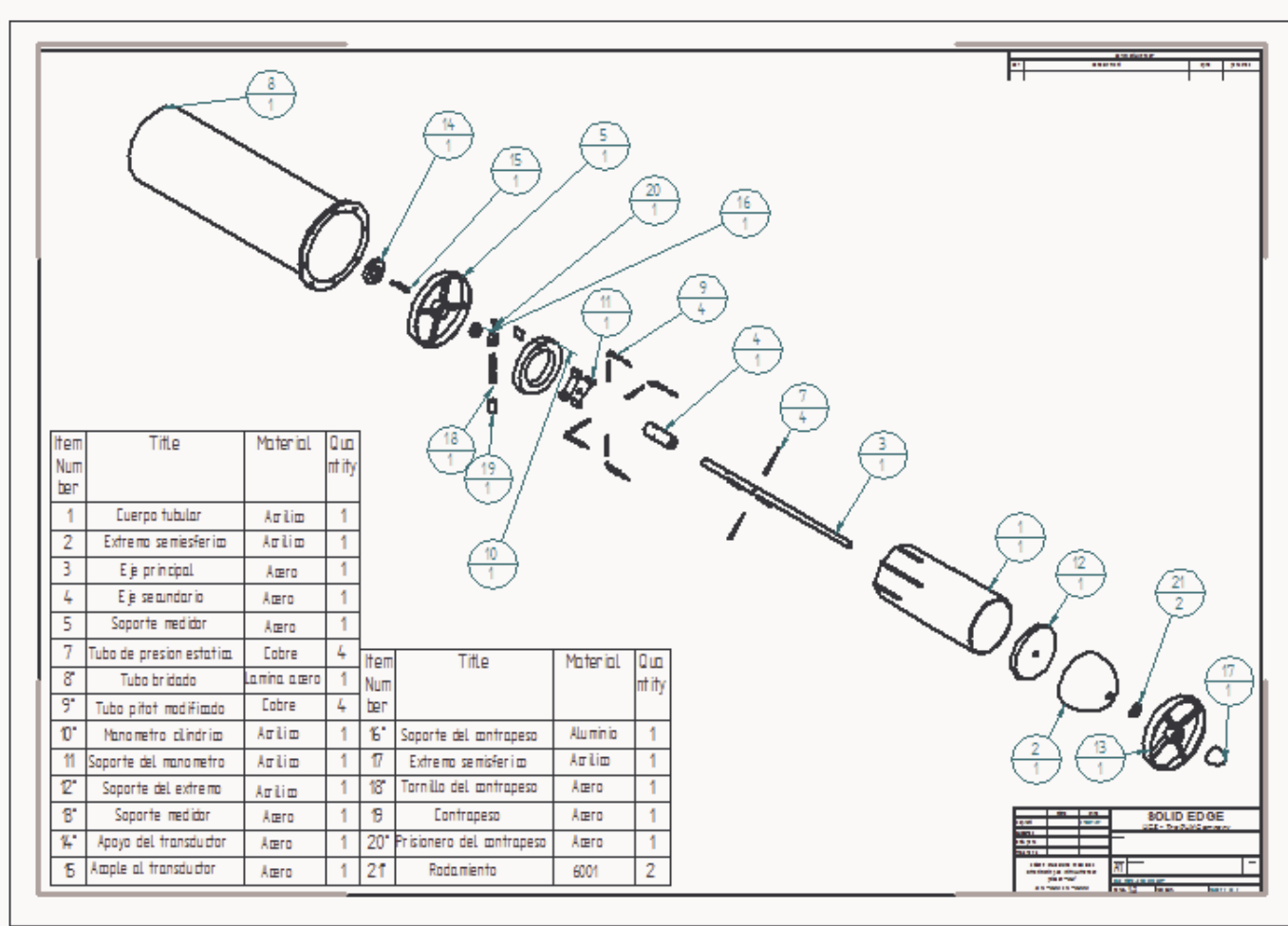
```

                as = (Map-Mcp-sign(Map-Mcp)*Mfd)/I; % se
inicia aceleracion.
            end
        end
    else % alf ~=0 : medidor en condicion inminente de
giro o detencion.
        if abs(Map-Mcp)<=Mfd, %el momento "motriz" no
vence la friccion min.
            as = 0; % medidor se detiene.
        else
            as = (Map-Mcp-sign(aa)*Mfd)/I; % continua
aceleracion.
        end
    end
else % w ~=0 : el medidor en rotacion.
    as = (Map-Mcp-sign(wa)*(Mfd+Mfv))/I;
end

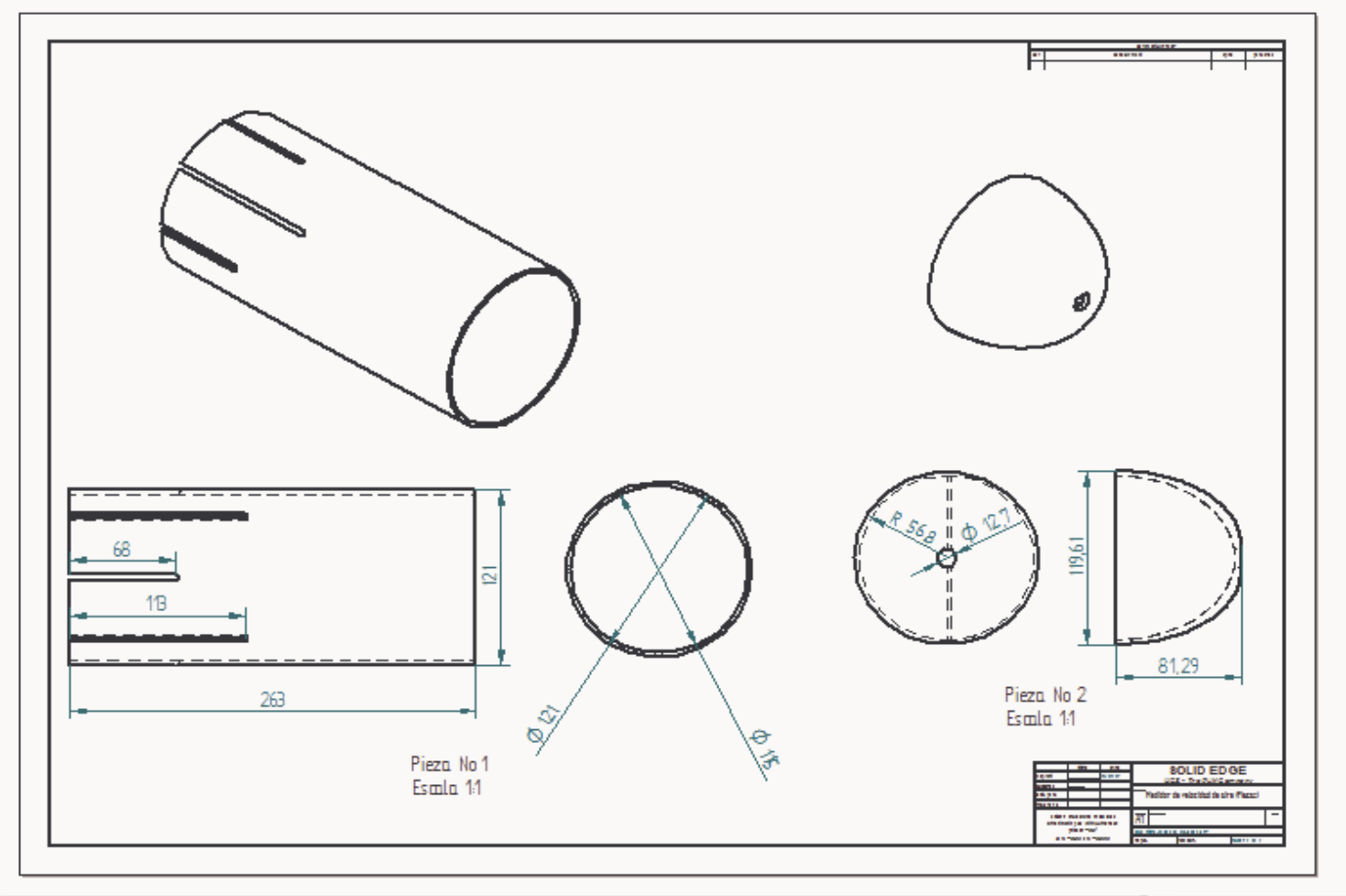
```

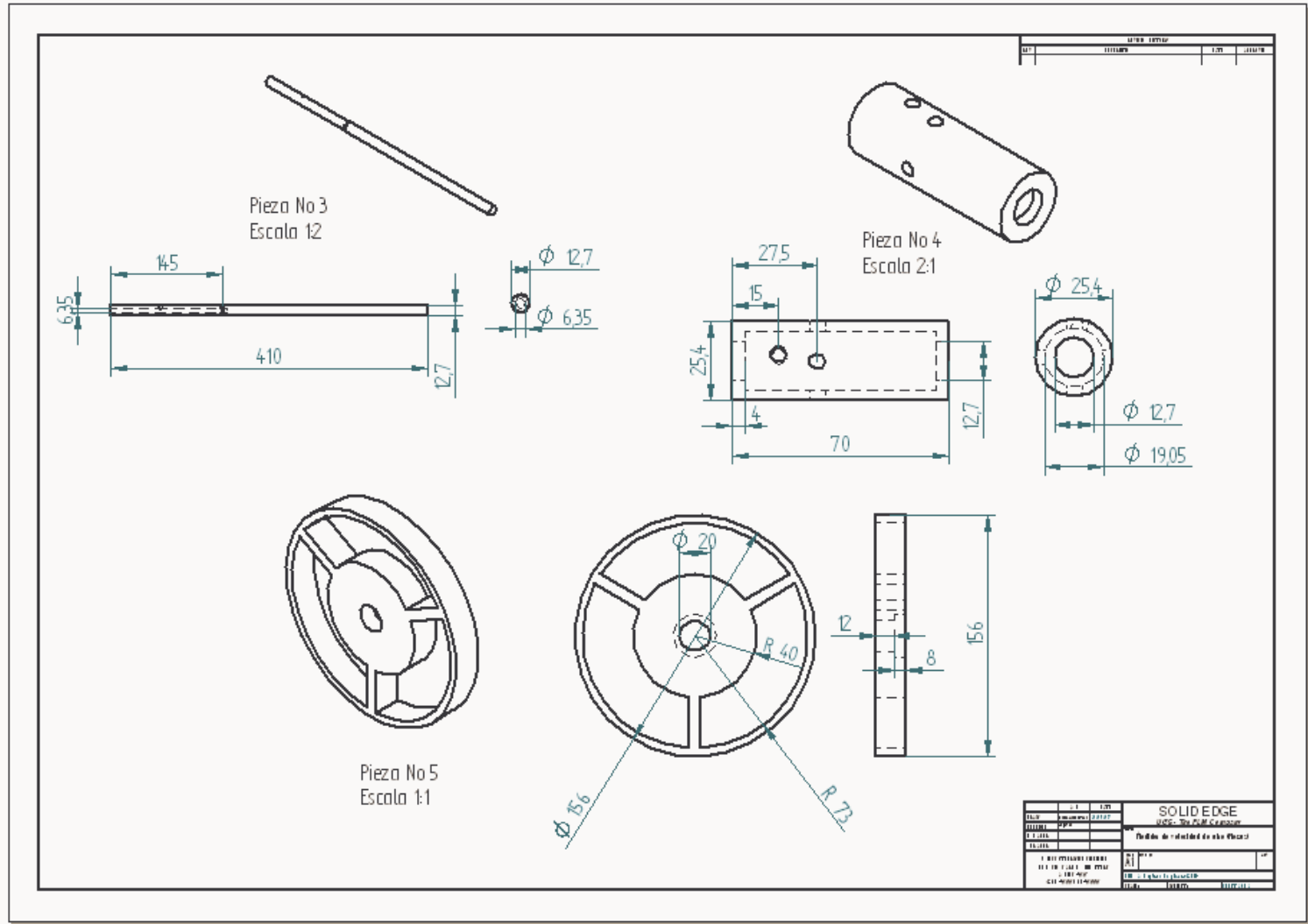
ANEXO C. Planos del medidor de velocidad de aire

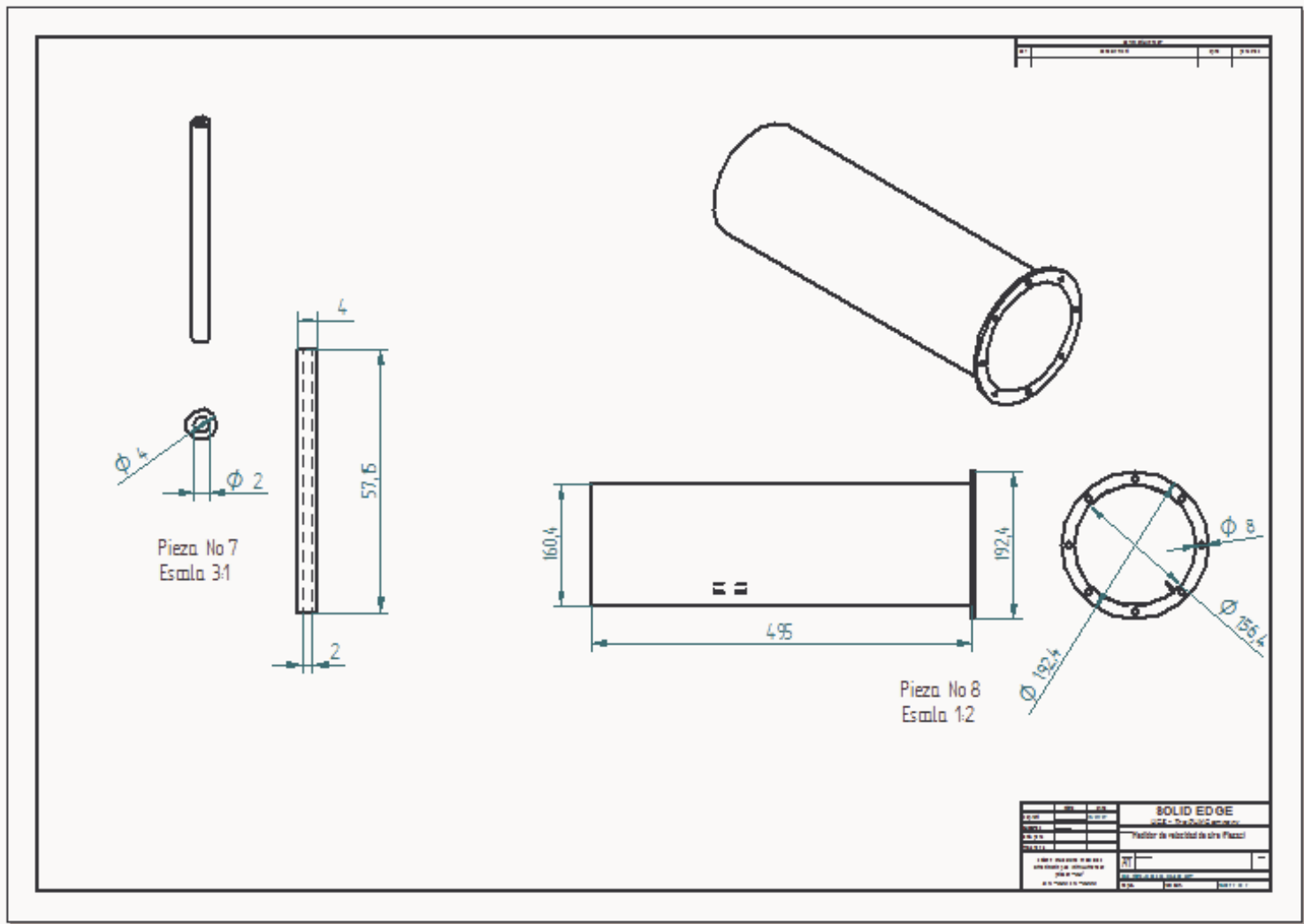
1. Plano de explosión

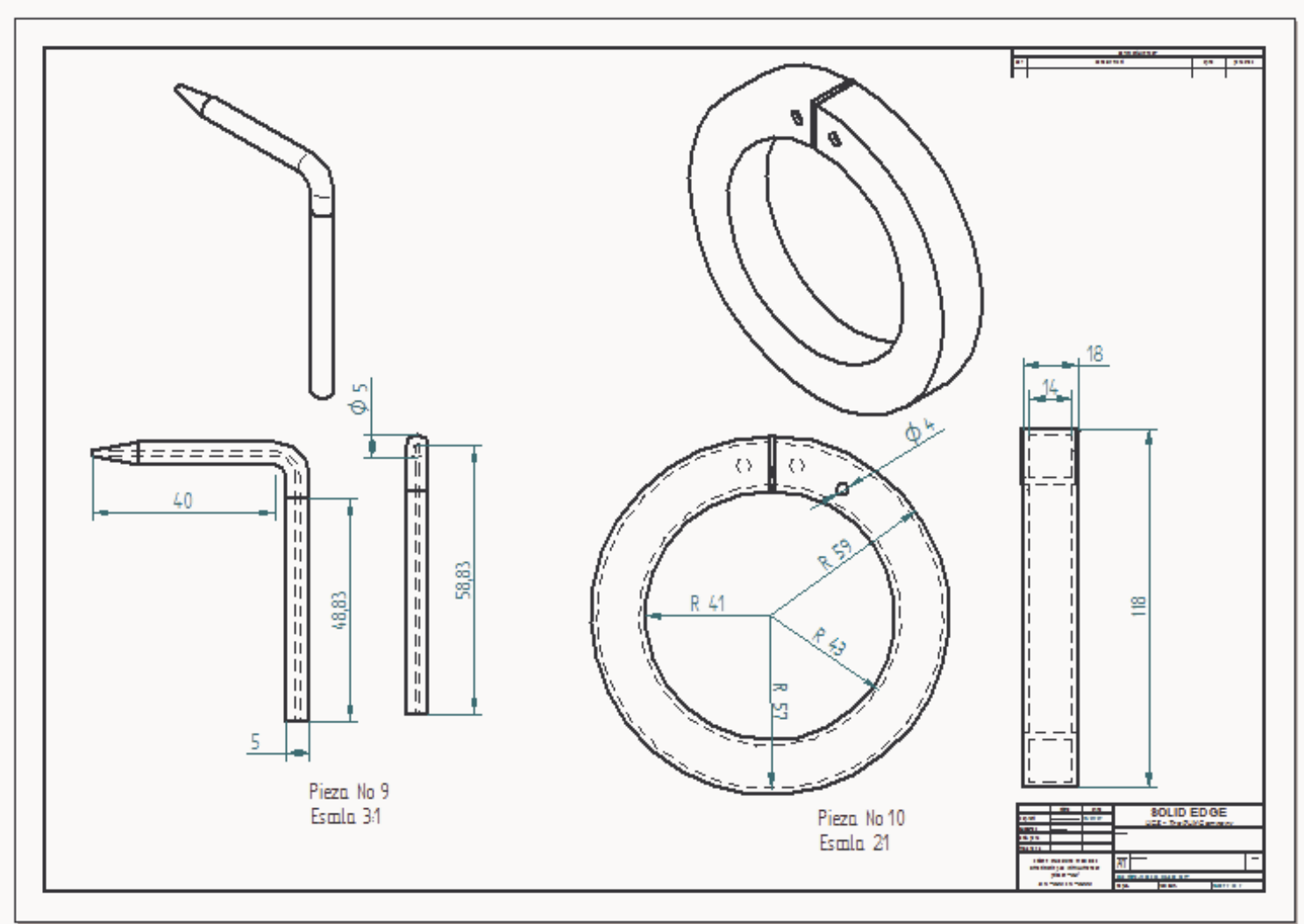


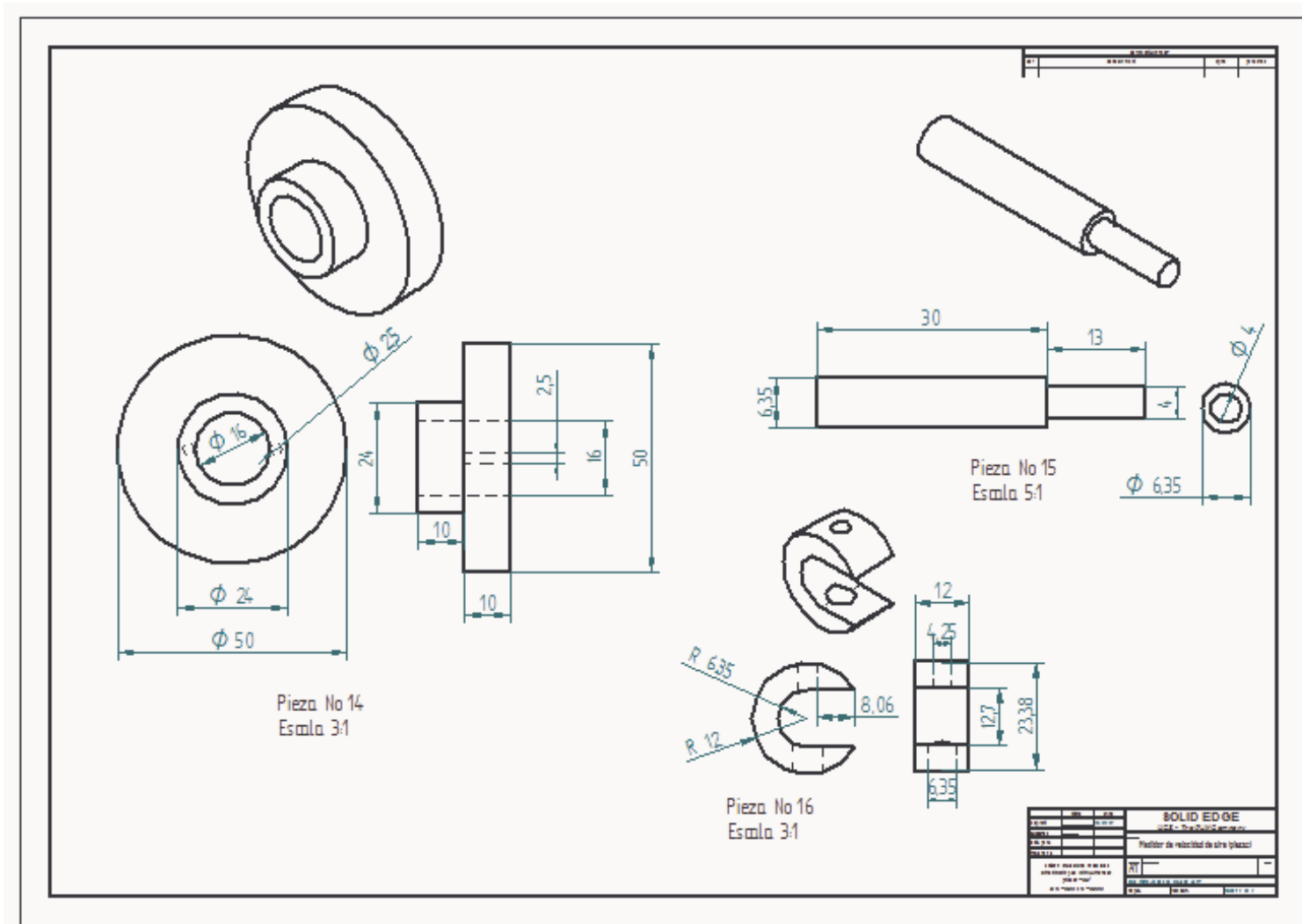
2. Planos de detalle

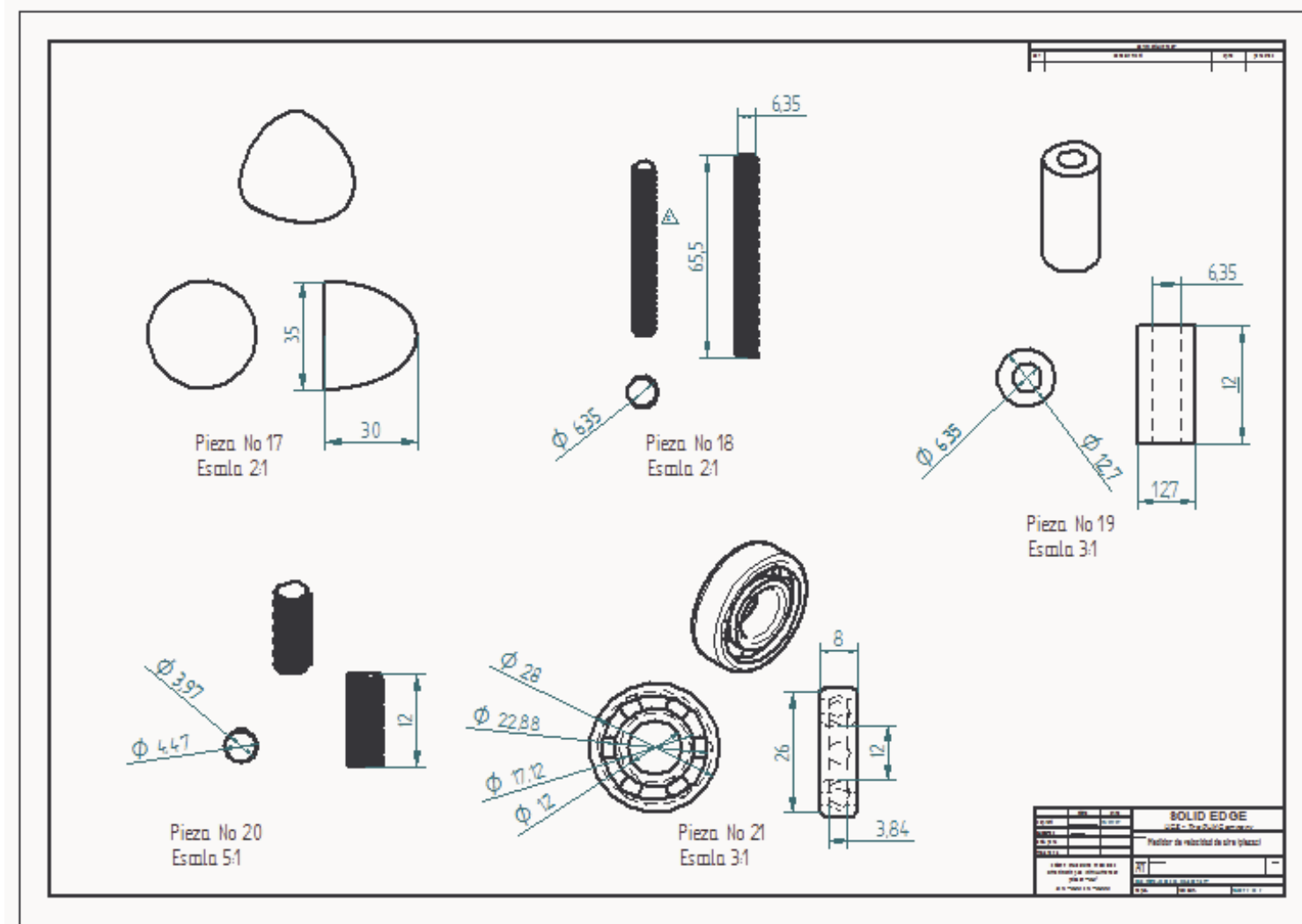






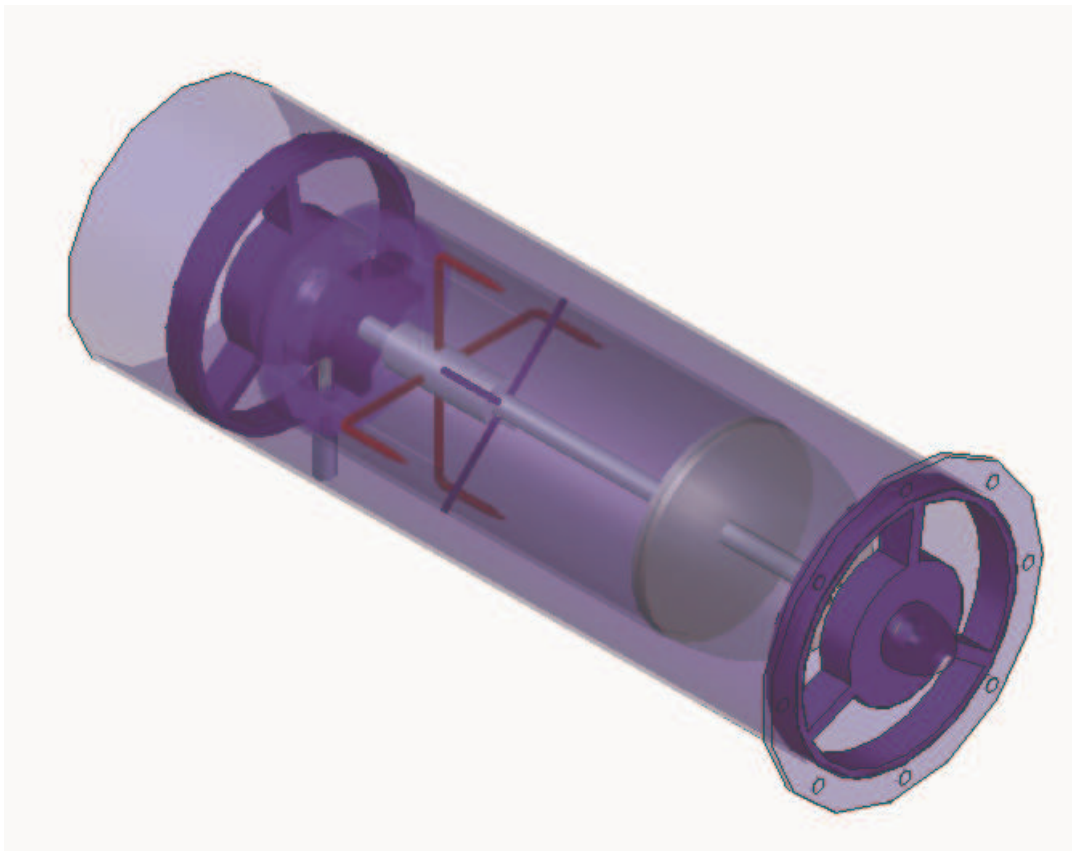






ANEXO D. Manual de uso del medidor

MANUAL DE MONTAJE



**MEDIDOR DE VELOCIDAD DE AIRE QUE FUNCIONA DE ACUERDO
AL PRINCIPIO DE MANOMETRO TOROIDAL CON SISTEMA DE
ADQUISICION DE DATOS**

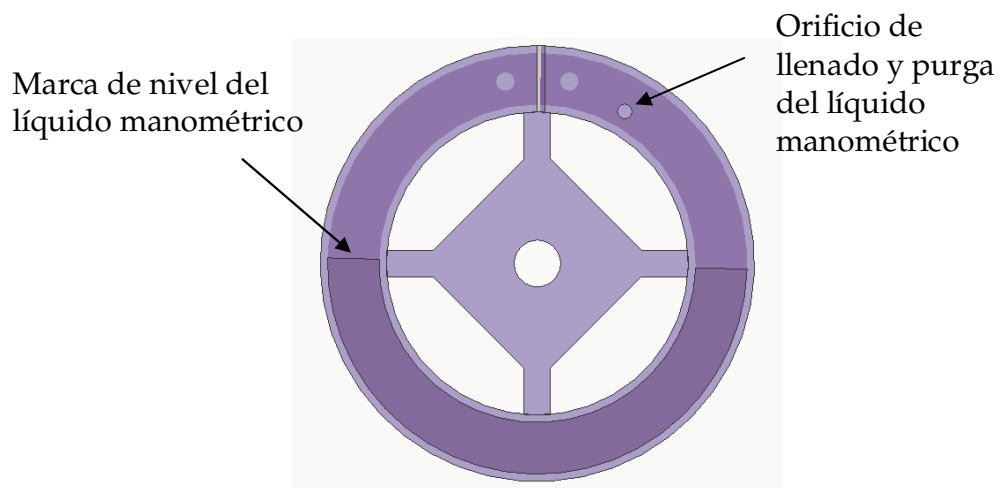
INSTRUCCIONES

1-. Llenar el manómetro cilíndrico con el líquido manométrico (etilenglicol) hasta las marcas indicadas en él.

a-. Retirar el tapón del manómetro que se encuentra en la cara posterior del manómetro

b-. Verter el líquido manométrico con ayuda de una jeringa hasta el límite de llenado (marcas de nivel)

Figura 1. Llenado de líquido manométrico



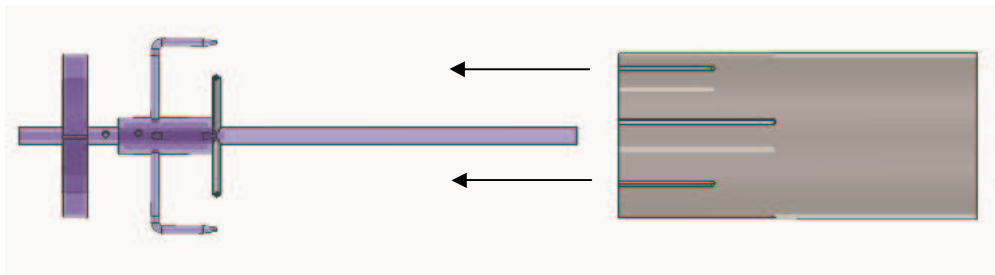
2-. Verificar el ajuste del soporte del manómetro al eje del medidor (recuerde que el manómetro se encuentra unido al eje del mismo mediante las mangueras que conducen la señal de presión total y la presión estática).

- Manguera azul: Presión estática
- Manguera roja: Presión total

El ajuste del manómetro cilíndrico se lleva a cabo mediante un prisionero (tornillo Bristol sin cabeza de diámetro 5/32").

3-. Insertar el medidor (eje + manómetro cilíndrico) al cuerpo del acrílico.

Figura 2. Montaje del eje al cuerpo cilíndrico



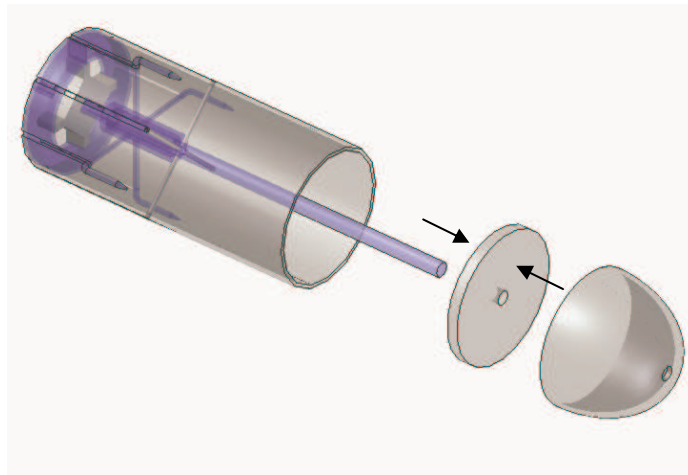
Para este montaje se tienen las siguientes recomendaciones:

- Tener en cuenta que para la correcta ubicación del cuerpo de acrílico, se requiere la concordancia de la respectiva numeración de los sensores de presión total (tubos Pitot) y presión estática.
- La numeración para los tubos Pitot (registro de presión total) está dada por los números 1 a 4 marcados en el cuerpo cilíndrico
- La numeración para los tubos de presión estática está dada por los números 1' a 4'

- El ensamble del cuerpo de acrílico con el eje del medidor se realiza deslizando los tubos sensores de presión (total y estática) en sus respectivas ranuras, de manera que concuerde la numeración de cada uno.

4-. Acoplar el extremo semiesférico al cuerpo del acrílico. En este caso hay que encajar tanto el extremo semiesférico como el cuerpo cilíndrico al soporte común.

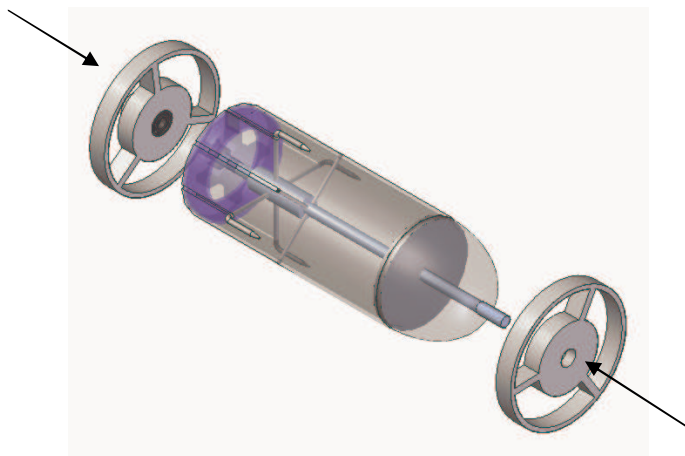
Figura 3. Acople del extremo semiesférico



5-. Acoplar todo el medidor a sus soportes. Para esto se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Revisar el excelente funcionamiento de los rodamientos
- Añadir método o forma de sujeción

Figura 4. Acople a los soportes del medidor



6-. Ubicar el soporte del contrapeso en el eje del medidor, el cuál se ubica en la zona libre del eje que está entre el manómetro y el soporte. Para llevar a cabo este paso se debe realizar lo siguiente:

- Ajustar el soporte con el prisionero de la parte superior del soporte mediante una llave Bristol de 3/16"
- Incorporar el tornillo del contrapeso enroscándolo por la parte inferior del soporte
- Alinear el eje vertical del tornillo del contrapeso con el eje vertical del manómetro cilíndrico

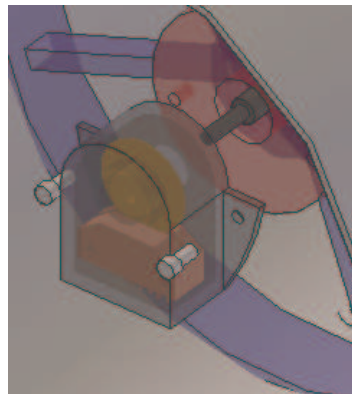
7-. Insertar el medidor armado al tubo Venturi. Es necesario ajustar los soportes del medidor al tubo Venturi.

8-. Revisar la condición de posición inicial del medidor, de manera que el eje vertical del medidor esté paralelo al eje vertical del tubo Venturi.

9-. Ajustar el contrapeso del medidor. En este paso se debe fijar la masa estimada en la longitud de brazo de contrapeso calculado.

10-. Acople el encoder al eje del medidor introduciendo el eje de acople al disco codificado y ajustando los tornillos al soporte del medidor. Posteriormente se introduce una llave Bristol de 0.035" al tornillo prisionero del disco codificado para fijarlo al eje de acople.

Figura 5. Acople del encoder al medidor



11-. Conecte el encoder por medio del terminal que contiene los cables a los pines del encoder.

12-. Conectar los cables del otro extremo del terminal de la siguiente forma:

- ❖ Cable marrón a la alimentación de 5 VDC

- ❖ Cable azul al común de la alimentación (GND)
- ❖ Cable verde, correspondiente a la fase A del encoder, al terminal de entrada A del circuito de detección de giro.
- ❖ Cable naranja, correspondiente a la fase B del encoder, al Terminal de entrada B del circuito de detección de giro.

13-. Conectar el sistema de detección de giro del encoder de la siguiente manera:

- ❖ Alimentación de 5 VDC
- ❖ Las 2 salidas del circuito de detección de giro a los terminales 1 y 2 del modulo del contadores CTR-500 del Field Point

14-. Alimentar el módulo de red y el modulo de contadores del Field Point a una fuente de 15 VDC.

15-. Correr el entorno programado en Labview®

16-. Realizar las mediciones de velocidad de aire para las diferentes velocidades de giro del motor del flujometro neumático

ANEXO E. Pruebas de funcionamiento del medidor

FRECUENCIA DEL MOTOVENTILADOR = 35 Hz					
Medición	Angulo girado [grados]	Velocidad en conducto anular [m/s]	Velocidad en Venturi [m/s]	Caudal [GPM]	Re
1	11.52	19.5	7.43	2115.51	72215.051
2	7.2	15.45	5.88	1675.9	57150
3	5.04	12.93	4.93	1403.1	47916.5816
4	12.96	20.67	7.87	2241.82	76491.5816
5	10.8	18.89	7.2	2049.17	69979.5918
6	6.48	14.65	5.58	1590.3	54234.1837
7	8.64	16.91	6.44	1834.79	62592.8571
8	6.48	14.65	5.58	1590.3	54234.1837
9	10.08	18.26	6.95	1980.44	67549.7449
10	10.8	18.89	7.2	2049.17	69979.5918
11	11.52	19.5	7.43	2115.51	72215.051
12	10.8	18.89	7.2	2049.17	69979.5918
13	10.8	18.89	7.2	2049.17	69979.5918
14	8.64	16.91	6.44	1834.79	62592.8571
15	12.24	20.09	7.65	2179.67	74353.3163
Promedio	9.6	17.672	6.732	1917.254	65430.9184

FRECUENCIA DEL MOTOVENTILADOR = 40 Hz					
Medición	Angulo girado [grados]	Velocidad en conducto anular [m/s]	Velocidad en Venturi [m/s]	Caudal [GPM]	Re
1	15.84	22.8	8.69	2473.19	84461.4796
2	12.96	20.67	7.87	2241.82	76491.5816
3	13.68	21.22	8.08	2302.13	78532.6531
4	18	24.26	9.24	2631.52	89807.1429
5	15.84	22.8	8.69	2473.19	84461.4796
6	15.12	22.29	8.49	2417.71	82517.602
7	13.68	21.22	8.08	2302.13	78532.6531
8	16.56	23.3	8.88	2527.27	86308.1633
9	12.96	20.67	7.87	2241.82	76491.5816
10	15.12	22.29	8.49	2417.71	82517.602
11	15.12	22.29	8.49	2417.71	82517.602
12	15.12	22.29	8.49	2417.71	82517.602
13	15.12	22.29	8.49	2417.71	82517.602
14	15.84	22.8	8.69	2473.19	84461.4796
15	16.56	23.3	8.88	2527.27	86308.1633
Promedio	15.168	22.29933333	8.494666667	2418.805333	82562.9592

FRECUENCIA DEL MOTOVENTILADOR = 45 Hz					
Medición	Angulo girado [grados]	Velocidad en conducto anular [m/s]	Velocidad en Venturi [m/s]	Caudal [GPM]	Re
1	20.88	26.06	10.09	2872.19	98068.6224
2	18.72	24.73	9.42	2681.82	91556.6327
3	22.32	26.9	10.25	2917.3	99623.7245
4	22.32	26.9	10.25	2917.3	99623.7245
5	20.16	25.62	9.76	2779.07	94861.2245
6	21.6	26.48	10.09	2872.19	98068.6224
7	22.32	26.9	10.25	2917.3	99623.7245
8	23.04	27.3	10.4	2961.49	101081.633
9	21.6	26.48	10.09	2872.19	98068.6224
10	21.6	26.48	10.09	2872.19	98068.6224
11	23.76	27.7	10.55	3004.81	102539.541
12	23.76	27.7	10.55	3004.81	102539.541
13	21.6	26.48	10.09	2872.19	98068.6224
14	20.88	26.06	10.09	2872.19	98068.6224
15	22.32	26.9	10.25	2917.3	99623.7245
Promedio	21.792	26.57933333	10.148	2888.956	98632.3469

FRECUENCIA DEL MOTOVENTILADOR = 50 Hz					
Medición	Angulo girado [grados]	Velocidad en conducto anular [m/s]	Velocidad en Venturi [m/s]	Caudal [GPM]	Re
1	28.08	29.94	11.41	3247.8	110898.214
2	23.76	27.7	10.55	3004.81	102539.541
3	26.64	29.23	11.13	3169.86	108176.786
4	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
5	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
6	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
7	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
8	28.08	29.94	11.41	3247.8	110898.214
9	25.92	28.86	10.99	3129.78	106816.071
10	28.08	29.94	11.41	3247.8	110898.214
11	25.92	28.86	10.99	3129.78	106816.071
12	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
13	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
14	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
15	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
Promedio	27.792	29.786	11.3473333	3230.882	110289.133

FRECUENCIA DEL MOTOVENTILADOR = 55 Hz					
Medición	Angulo girado [grados]	Velocidad en conducto anular [m/s]	Velocidad en Venturi [m/s]	Caudal [GPM]	Re
1	34.56	32.87	12.64	3597.65	122853.061
2	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
3	29.52	30.64	11.67	3322.91	113425.255
4	36.72	33.75	12.86	3660.42	124991.327
5	28.8	30.29	11.54	3285.7	112161.735
6	32.4	31.95	12.17	3465.19	118284.949
7	36.72	33.75	12.86	3660.42	124991.327
8	36	33.46	12.75	3629.31	123922.194
9	28.08	29.94	11.41	3247.8	110898.214
10	36	33.46	12.75	3629.31	123922.194
11	36	33.46	12.75	3629.31	123922.194
12	36	33.46	12.75	3629.31	123922.194
13	36	33.46	12.75	3629.31	123922.194
14	36	33.46	12.75	3629.31	123922.194
15	36	33.46	12.75	3629.31	123922.194
Promedio	33.84	32.51333333	12.396	3528.73067	120481.531

FRECUENCIA DEL MOTOVENTILADOR = 60 Hz					
Medición	Angulo girado [grados]	Velocidad en conducto anular [m/s]	Velocidad en Venturi [m/s]	Caudal [GPM]	Re
1	39.6	34.85	13.28	3779.46	129073.469
2	39.6	34.85	13.28	3779.46	129073.469
3	40.32	35.11	13.38	3807.9	130045.408
4	38.88	34.58	13.17	3750.49	128004.337
5	38.88	34.58	13.17	3750.49	128004.337
6	43.2	36.11	13.76	3916.67	133738.776
7	42.48	35.87	13.66	3890.22	132766.837
8	41.76	35.62	13.57	3873.28	131892.092
9	41.04	35.37	13.47	3835.84	130920.153
10	40.32	35.11	13.38	3807.9	130045.408
11	39.6	34.85	13.28	3779.46	129073.469
12	40.32	35.11	13.38	3807.9	130045.408
13	39.6	34.85	13.28	3779.46	129073.469
14	43.2	36.11	13.76	3916.67	133738.776
15	41.76	35.62	13.57	3873.28	131892.092
Promedio	40.704	35.23933333	13.426	3823.232	130492.5