

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA CALIBRACIÓN DE
MEDIDORES DE GAS DE BAJO CAUDAL TIPO DIAFRAGMA

RAÚL ALONSO ANAYA BARAJAS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2010

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA CALIBRACIÓN DE
MEDIDORES DE GAS DE BAJO CAUDAL TIPO DIAFRAGMA

RAÚL ALONSO ANAYA BARAJAS

Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico

Director

JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ
Ingeniero Mecánico

Codirector

LUIS EDUARDO GARCÍA
Ingeniero Mecánico
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2010

DEDICATORIA

A Dios, por estar presente cada día de mi vida
Y permitirme culminar esta etapa,
A mis padres Alonso Anaya y Marleny Barajas
Por confiar en mí y darme todo el apoyo
Siempre respetando mis decisiones,
A mis hermanos por brindarme su apoyo
Y alentarme a seguir en los momentos difíciles.
A mis familiares quienes siempre estuvieron pendientes
Prestos a colaborarme y brindarme consejo.
A mis amigos y compañeros quienes me apoyaron
En toda mi carrera y con quienes compartí
Valiosos años de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Jabid Eduardo Quiroga Méndez, ingeniero mecánico y director del proyecto por la colaboración oportuna y respaldo en la elaboración de este proyecto.

A Luis Eduardo García Sánchez, ingeniero mecánico y jefe proyectos corporación CDT de GAS por su confianza, colaboración y dedicación para sacar adelante este proyecto.

Al personal del centro de desarrollo tecnológico del gas, por la oportunidad, colaboración y apoyo prestado durante todo el desarrollo del proyecto.

A todas las personas que de forma directa o indirecta hicieron posible la realización de este objetivo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES	3
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 CONDICIONES DE ESTANCAMIENTO	5
1.3 FLUJO UNIDIMENSIONAL E ISENTROPICO EN BOQUILLAS.....	5
1.4 TEORÍA DE FLUJO SÓNICO	6
1.4.1 Efectos de la variación del área de flujo.....	6
1.4.2 Determinación del caudal volumétrico.	8
1.4.3 Operación de las boquillas a presión positiva o vacío.....	9
1.4.3.1 Sistema operando a presión positiva	9
1.4.3.2 Sistema operando a vacío.....	10
1.4.4 Descripción y cálculo de los flujos en boquillas.	11
1.4.5 Metrología y boquillas sónicas.	12
1.5 REFERENCIAS NORMATIVAS.....	13
1.5.1 Requisitos ISO 9300:2005 “Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles”	13
1.5.1.1 Material.....	13
1.5.1.2 Acabado superficial en la garganta y en la entrada	14
1.5.1.3 Divergencia cónica.....	14
1.5.1.4 Diseño.....	14
1.5.1.5 Alcance de medición.....	15
1.5.1.6 Requerimientos de instalación	15
1.5.1.7 Medición de presión.....	16
1.5.1.8 Medida de temperatura	16

1.5.2	Reglamento de prueba del PTB Tomo 25.....	17
1.5.2.1	Relación de presión crítica.....	18
1.5.2.2	Diseños de bancos de pruebas.....	19
1.5.2.3	Condiciones para la instalación de componentes.....	19
1.5.3	NTC 2728:2005. Medidores de gas tipo diafragma.....	20
1.5.3.1	Errores máximos permisibles (5)	21
1.5.3.2	Pérdidas de presión (6).....	21
1.5.3.3	Verificación inicial (8)	22
1.5.3.4	Verificación posterior (9)	22
1.5.3.5	Medición de presión (B.1.3.2)	22
2.	DISEÑO DEL BANCO DE CALIBRACIÓN	23
2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	23
2.1.1	Análisis de requerimientos de la <i>facilidad tecnológica</i>	24
2.2	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO PATRÓN.....	25
2.2.1	Diseño y construcción de las boquillas	25
2.2.2	Diseño de los plenums.....	31
2.2.2.1	Alternativas de diseño.....	31
2.2.2.2	Recomendaciones	32
2.2.2.3	Selección del modelo.....	33
2.2.3	Montaje de las boquillas.....	34
2.2.4	Fabricación del banco de boquillas.....	35
2.3	INSTRUMENTACIÓN	38
2.3.1	Ubicación de los sensores y transmisores.....	39
2.3.2	Listado De Elementos Y Nomenclatura Utilizada.....	40
2.3.3	Sistema de adquisición de datos	46
2.4	LÍNEAS DE FLUJO Y ANÁLISIS DE PÉRDIDAS	46
2.4.1	Variación de la presión con la temperatura.....	49
2.4.2	Espacio físico del laboratorio	51
2.5	SISTEMA DE ACOPLAMIENTO MUT	51

2.5.1	Diseño sistema de acoplamiento	53
2.5.1.1	Platina soporte	54
2.5.1.2	Conector externo	54
2.5.1.3	Conector interno	55
2.5.1.4	Tornillo de ajuste.....	56
2.5.1.5	Elementos de sello.....	57
2.5.2	Fabricación Sistema De Acoplamiento	58
2.6	SISTEMA NEUMÁTICO.....	58
2.6.1	Requerimientos Del Sistema.....	59
2.6.2	Base medidores	60
2.7	GENERACIÓN DE FLUJO.....	60
2.7.1	Requerimientos del sistema.....	61
2.7.2	Selección del elemento generador de flujo	62
2.7.3	Verificación de capacidad de la bomba	63
2.7.4	Conexiones y ubicación en el banco de calibración.....	64
2.8	ESTRUCTURA	65
2.8.1	Dimensionamiento	66
2.8.1.1	Computador	66
2.8.2	Distribución de los elementos en el banco.....	67
2.8.3	Diseño De La Estructura.....	68
2.8.4	Fabricación Estructura	69
2.8.4.1	Esqueleto	70
2.8.5	Ensamble De Componentes	73
2.8.5.1	Montaje del sistema de Soporte y conexión de medidores	74
2.8.5.2	Montaje del banco patrón.....	75
2.8.5.3	Montaje del computador.....	75
3.	FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE CALIBRACIÓN	77
3.1	PFD Y DISTRIBUCIÓN POR ZONAS.....	77
3.1.1	Accionamiento de válvulas.....	77

3.1.2 Montaje De Los MUT	78
3.2 MEDIDORES SUSTITUTOS.....	79
3.2.1 Diseño Medidores Sustitutos	79
3.2.2 Fabricación Medidor Sustituto.....	80
3.3 CALIBRACIÓN BANCO PATRON	80
3.4 CALIBRACIÓN DE LAS BOQUILLAS.....	81
4. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS MUT.....	85
4.1 GENERALIDADES	85
4.1.1 Pasos generales del procedimiento de calibración:	85
4.1.2 Prueba De Fugas	87
4.1.2.1 Prueba de fugas inicial.....	87
4.1.2.2 Prueba de fugas en operación	87
4.2 PRUEBA CALIBRACIÓN MEDIDORES	89
4.2.1 Montaje prueba de calibración de medidores en la.....	89
4.2.2 Iniciación De La Prueba	90
4.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN	91
5. CONCLUSIONES	94
6. RECOMENDACIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	98
APENDICES	100
APENDICE A. MEDIDORES DE FLUJO DE GAS DISPONIBLES EN EL MERCADO Y SUS CARACTERÍSTICAS DE CALIBRACIÓN.	100
APENDICE B. ANÁLISIS INCERTIDUMBRE FACILIDAD TECNOLÓGICA	103
ANEXOS.....	111

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Errores Máximos Permisibles	21
Tabla 2. Pérdidas de Presión	21
Tabla 3. Caudales Nominales	26
Tabla 4. Caudales De Prueba	27
Tabla 5. Dimensiones De Las Boquillas	28
Tabla 6. Identificación De Las Boquillas.....	30
Tabla 7. Listado de Elementos Completa.....	40
Tabla 8. Características RTD'S	43
Tabla 9. Características Transmisor De Presión Diferencial	43
Tabla 10. Características Del Barómetro	44
Tabla 11. Características Higrómetro.....	45
Tabla 12. Características Sensor Óptico.....	45
Tabla 13. Análisis De Pérdidas	47
Tabla 14. Pérdidas Totales De Presión.....	48
Tabla 15. Condiciones Atmosféricas.....	49
Tabla 16. Variación de la Presión con la Temperatura	50
Tabla 17. Características de los Medidores	52
Tabla 18. Resultados De Las Pruebas.....	64
Tabla 19. Utilización De Los Medidores Sustitutos	79
Tabla 20. Relación De Bloqueo Y Control De Válvulas De Bypasss.....	82
Tabla 21. Resultados Calibración Boquillas	83
Tabla 22. Resultados MUT1.....	91
Tabla 23. Resultados MUT2.....	92
Tabla 24. Resultados MUT3.....	93
Tabla 25. Resultados MUT4.....	93
Tabla 26. Fuentes de Incertidumbre	107
Tabla 27. Coeficientes de Sensibilidad	110

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sección Transversal De Una Boquilla	7
Figura 2. Variación De Las Propiedades De Flujo En Boquillas Subsónicas Y Supersónicas	7
Figura 3. Sistema Operando A Presión Positiva	10
Figura 4. Sistema Operando A Vacío.....	10
Figura 5. Detalle De Perfil De Una Boquilla Toroidal, Según ISO 9300:200515	
Figura 6. Ejemplo De Configuración De Un Banco De Pruebas (Instalación Colectiva De Toberas)	20
Figura 7. Medidor De Diafragma.....	20
Figura 8. Geometría De Las Boquillas	28
Figura 9. Imagen CAD Boquilla Con Inserto	29
Figura 10. Identificación De Las Boquillas	30
Figura 11. Tipos De Plenum	31
Figura 12. Imagen CAD del Plenum In (Plenum de Boquillas)	33
Figura 13. Disposición de los elementos en el Plenum In.....	34
Figura 14. CAD Ensamble Banco Patrón.....	35
Figura 15. Brida y tapa del Plenum In.....	36
Figura 16. Alojamiento boquillas, baffle y cara posterior Plenum In.....	36
Figura 17. Fabricación Conectores	36
Figura 18. Fabricación Conectores	37
Figura 19. Plenum In y montaje de las boquillas.....	37
Figura 20. Plenum Out, Conectores Fler Y Válvulas.....	38
Figura 21. Contribución de los componentes.....	39
Figura 22. Esquema funcional	39
Figura 23. RTD	42
Figura 24. Transmisor de presión diferencial	43

Figura 25. Barómetro	44
Figura 26. Higrómetro	44
Figura 27. Sensor Óptico	45
Figura 28. PFD 3D De La Facilidat Tecnológica	47
Figura 29. Variación de la presión con la temperatura.....	51
Figura 30. Dimensiones de los medidores.....	52
Figura 31. CAD Platina Soporte.....	54
Figura 32. CAD Conector Externo	55
Figura 33. CAD Conectores.....	56
Figura 34. CAD Tornillo De Ajuste	56
Figura 35. CAD Sellos	57
Figura 36. CAD Ensamble Sistema de Acoplamiento.....	57
Figura 37. Fabricación Conectores	58
Figura 38. Montaje Sistema De Acoplamiento	58
Figura 39. Sistema Neumático.....	59
Figura 40. CAD Base Medidores	60
Figura 41. Montaje Base Medidor Y Sistema De Acople	60
Figura 42. Selección Bomba de Vacío.....	63
Figura 43. Montaje Prueba De Operación De La Bomba.....	63
Figura 44. Curva Q_v vs Vacío	64
Figura 45. Montaje De La Bomba De Vacío	65
Figura 46. CAD Brazo Monitor	67
Figura 47. CAD Distribución Elementos En El Banco	68
Figura 48. Imagen CAD Estructura Soporte	68
Figura 49. Imagen CAD Facilidat Tecnológica.....	69
Figura 50. Fabricación Estructura (Esqueleto).....	71
Figura 51. Ensamble Láminas Fijas.....	71
Figura 52. Montaje De Láminas Desmontables	72
Figura 53. Montaje De Puertas	72

Figura 54. Estructura Luego De La Pintura.....	73
Figura 55. Ensamble de la estructura completa.....	73
Figura 56. Montaje Del Sistema De Soporte Y Conexión De Medidores	74
Figura 58. Montaje Del Banco Patrón.....	75
Figura 59. Montaje Del Computador.....	76
Figura 60. Montaje Medidores Zona 1	78
Figura 61 Montaje Medidores Zona 1 Y Zona 2.....	78
Figura 62. CAD Medidor Sustituto	80
Figura 63. Medidor Sustituto.....	80
Figura 64. Calibración Banco Patrón Con Campana Gasométrica	81
Figura 65. Prueba De Fugas Con El ATeQ.....	87
Figura 66. Montaje Prueba De Calibración De Medidores En La Facilid Tecnológica.....	89
Medidor de diafragma.....	101

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Artículo Facilidad Tecnológica Para La Calibración De Medidores De Gas Tipo Diafragma.....	111
Anexo B. Planos Facilidad Tecnológica CDT de GAS – UIS.....	118

NOMENCLATURA

Q Caudal
 Q_v Caudal Volumétrico
 Q_m Caudal Másico
V Velocidad
A Área
m Masa
 p Presión
T Temperatura
 h_0 Entalpia de estancamiento
h Entalpia estática
 p_0 Presión de estancamiento
 T_0 Temperatura de estancamiento
 ρ_0 Densidad de estancamiento
 A_g Área de garganta
 T_g Temperatura de garganta
 P_g Presión de garganta
 ρ_g Densidad de garganta
k Coeficiente Isoentropico
k Compresibilidad del fluido
R y R_g Constante del gas
 C_d Coeficiente de descarga
 C_0 Coeficiente de Flujo Crítico
 P_2 y P_{out} Presión absoluta salida boquillas
 P_{in} Presión a la entrada de la boquilla
 C^* Función de flujo critico

d Diámetro de garganta
 K Factor de cobertura
 T_e Temperatura de entrada o ambiente
 P_e Presión de entrada o ambiente
 H_r Humedad relativa del aire
 u_i Incertidumbre
 u_c Incertidumbre combinada
 U Incertidumbre expandida

LETRAS GRIEGAS

β Coeficiente volumétrico de expansión térmica.
 \emptyset Ángulo, grados o radianes.
 ν Viscosidad dinámica.
 k Conductividad térmica del gas.
 ρ Densidad
 ∇ Volumen

GLOSARIO

METROLOGÍA: Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones.

MESURANDO: Magnitud que se desea medir.

ERROR DE MEDICIÓN: Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

INCERTIDUMBRE: Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mesurando, a partir de la información que se utiliza.

SENSOR: Elemento de un sistema de medición directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a medir.

PATRÓN: Realización de la definición de la magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medición asociada, tomada como referencia.

Vocabulario tomados de la GTC-ISO/IEC99 (ICONTEC, 2009)

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS DE BAJO CAUDAL TIPO DIAFRAGMA*.

AUTOR:

Raúl Alonso Anaya Barajas**

PALABRAS CLAVES

Incertidumbre, Calibración, Boquillas Sónicas, Medidor de Diafragma.

DESCRIPCIÓN

El proyecto consiste en el diseño y construcción de un banco para la calibración de medidores de gas de bajo caudal tipo diafragma basado en la tecnología de boquillas sónicas, las cuales cuentan a nivel mundial con un amplio reconocimiento en el ámbito metrológico para la calibración de medidores de gas.

Las boquillas sónicas son fundamentadas en la norma internacional ISO9300:2005 y PTB Tomo 25 y fabricadas con tecnología internacional. El diseño incluye un sistema de tuberías para la conducción del flujo de aire; un sistema computarizado con el cual el metrólogo opera el banco, almacena las variables de la calibración y genera un informe o certificado de calibración del medidor en prueba; un equipo generador de vacío encargado de generar el flujo necesario para la correcta operación del banco, dos zonas de medidores bajo prueba donde se pueden calibrar de 1 hasta 10 medidores de la misma denominación de forma consecutiva.

Las boquillas sónicas fueron calibradas con patrones primario tipo campana gasométrica y tipo pistón, en la corporación CDT de GAS; obteniéndose así bajos niveles de incertidumbre y trazabilidad a patrones nacionales e internacionales.

El proyecto fue desarrollado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas con el apoyo de Colciencias y la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de ampliar la infraestructura metrológica existente en Colombia para la calibración de medidores de gas tipo diafragma con designación G1.6 a G6.0 instalados y nuevos, que operen en un rango de 0,016 m³/h a 10 m³/h a una presión cercana a 905mbar y 22°C; garantizando el cumplimiento de las normas NTC2728:2005 y NTC-2826.

* Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Jabid Quiroga, Ing. Luis García.

SUMMARY

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FACILITY FOR THE CALIBRATION OF LOW FLOW RATE DIAPHRAGM-TYPE GAS METERS*

AUTHOR:

Raúl Alonso Anaya Barajas**

KEY WORDS:

Uncertainty, Calibration, Sonic Nozzle, Diaphragm Meter.

DESCRIPTION:

The project involves the design and construction of a facility for the calibration of low flow rate diaphragm-type gas meters based on the technology of sonic nozzles, technology counting with ample recognition worldwide in the context of metrology for gas meter calibration.

The sonic nozzles are based on the international standard ISO9300:2005 and PTB volume 25 and manufactured with international technology. The design includes a pipeline system for the conduction of the air flow; a computerized system with which the metrologist operates the facility, stores the variables of the calibration and generates a calibration report or certificate of the meter under test; a vacuum pump in charge of generating the critical flow necessary for the correct operation of the bench, two sections where the meters under test can be calibrated from 1 up to 10 meters of the same denomination consecutively.

The sonic nozzles were calibrated by primary standards: bell and piston type, in the laboratory of Corporation CDT de GAS; obtaining low levels of uncertainty and providing traceability to national and international standards.

The project was developed by the Center for Technological Development of Gas with the support of Colciencias and the School of Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander, in order to expand the existing metrological infrastructure in Colombia for the calibration of diaphragm type gas meters designated G1.6 to G6.0 new and in use operating within a range from 0.016m^3 to 10m^3 , at a pressure of about 905mbar and 22°C , ensuring compliance with NTC2728:2005 -2826.

*Degree Project.

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Ing. Jabid Quiroga, Ing. Luis García.

INTRODUCCIÓN

Una de las áreas de la industria que ha venido evolucionado durante los últimos años en Colombia es la del GAS; motivado por el aumento en la utilización de este recurso en los sistemas de transporte, la industria alimenticia y de los procesos industriales debido a las buenas características que presenta este elemento.

Luego de varios estudios realizados por la Corporación CDT de GAS en 2008 se concluyó la necesidad de contar con una solución integral, robusta, eficiente y de fácil aseguramiento metrológico para brindar y coayudar a garantizar la trazabilidad en las mediciones de gas residenciales y comerciales.

Para el caso específico de este estudio, el mayor problema radica en los desbalances ocasionados por el deterioro de los medidores instalados y la desviación de los medidores nuevos; la carencia en los laboratorios de patrones que permitan la calibración de grandes lotes de medidores tipo diafragma, que brinden aseguramiento metrológico de los sistemas de medición.

Con el objetivo de contribuir en la solución a esta problemática; la Corporación CDT de Gas y la Universidad Industrial de Santander, presentan este trabajo de grado con el que se fortalece la infraestructura metrológica de la industria regional y nacional en materia de mediciones de gas, y generar la capacidad de aseguramiento metrológico de sus medidores de gas tipo diafragma; y que le permiten al CDT de GAS tener mayor cobertura de calibración de equipos.

El resultado de este proceso es un banco para calibración de medidores de gas tipo diafragma con designación G1,6, G2,5, G4 y G6; que opera en un rango de 0,016 m³/h a 10 m³/h a 905mbar y 22°C y utiliza como patrón de calibración un banco de boquillas sónicas. Con niveles de incertidumbre relativa a la reproducción de volumen 0,35% (k=2) y relativa a la estimación del error en la lectura del medidor del 0,4%(k=2)¹.

¹ k=2. Factor de cobertura, corresponde a un nivel de confianza del 95,45%.

1. FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES

1.1 GENERALIDADES

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de un esfuerzo tangencial, sin importar la magnitud de este, y experimenta movimientos relativos entre sus partes elementales siempre que estos esfuerzos cortantes se encuentren presentes.

Cuando tomamos un punto o una sección transversal de referencia dentro de una tubería, el flujo se considera como la cantidad de fluido, expresada en masa o en volumen, que pasa por esa sección o punto en un lapso de tiempo. Por lo tanto, el parámetro “caudal” Q , se expresa en unidades de volumen o masa por unidad de tiempo (m^3/h ó kg/h). Podemos decir entonces que el caudal volumétrico de un fluido Q_v es igual al producto de la velocidad media del fluido por la sección transversal de la tubería, así:

$$Q_v = V_{media} * A_{transversal}$$

Al mismo tiempo, el caudal másico Q_m es igual al producto entre el caudal volumétrico y la densidad del fluido ρ .

$$Q_m = Q_v * \rho$$

Donde la densidad de un fluido ρ , es la relación entre su masa y su volumen ocupado.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La densidad puede expresarse como una función de la presión y la temperatura, a través de un manejo matemático es posible derivar dos términos (k y β) que representan la compresibilidad de un fluido en términos del cambio de la densidad con respecto a estas 2 propiedades, como sigue:

$$\rho = \rho(p, T)$$

Al derivar se obtiene,

$$d\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T * dp + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p * dT$$

Dividiendo la ecuación anterior por la densidad resulta,

$$\frac{d\rho}{\rho} = k * dp - \beta * dT$$

El parámetro (β) se denomina “coeficiente volumétrico de expansión térmica”, este coeficiente proporciona una medida de la cantidad por la cual cambia la densidad como respuesta a un cambio en la temperatura mientras la presión permanece constante, y se expresa como:

$$\beta = \left(-\frac{1}{\rho} * \frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p$$

La variable (k) representa la “compresibilidad del fluido”, relacionando el aumento o la disminución diferencial de su densidad ocasionada por un aumento unitario en la presión a temperatura constante, se expresa como:

$$k = \left(\frac{1}{\rho} * \frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T$$

Como en la práctica es difícil llevar a cabo la medición directa de la densidad del fluido, se realizan mediciones de temperatura y presión para inferir el valor de la densidad a partir de estas variables.

1.2 CONDICIONES DE ESTANCAMIENTO

Al analizar un volumen de control en un flujo a alta velocidad, generalmente se considera despreciable la energía potencial, mientras que la energía cinética adquiere gran importancia, por lo cual se considera conveniente combinar la energía cinética con la energía de flujo (entalpía) para representar la energía total del fluido, encontrándose la siguiente expresión:

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2} \quad \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

Donde h_0 se denomina entalpía de estancamiento y h entalpía estática.

Físicamente podemos decir que la entalpía de estancamiento representa la entalpía de un fluido cuando este se lleva al reposo adiabáticamente. Así mismo las propiedades de temperatura, presión y densidad del fluido al detenerse se denominan propiedades de estancamiento (P_0 , T_0 , ρ_0).

Es importante tener en cuenta que cuando el fluido se lleva al reposo, la energía cinética que poseía en el estado inicial, se transforma en entalpía (energía interna + energía de flujo), ocasionando que la temperatura y la presión aumenten hasta el estado de estancamiento.

1.3 FLUJO UNIDIMENSIONAL E ISENTROPICO EN BOQUILLAS

Durante el flujo de fluidos a través de muchos dispositivos, como boquillas, difusores y pasajes de los alabes de turbinas, las cantidades de flujo varían

principalmente solo en la dirección de flujo y el flujo se puede aproximar a un flujo unidimensional e isoentrópico con gran exactitud.

1.4 TEORÍA DE FLUJO SÓNICO

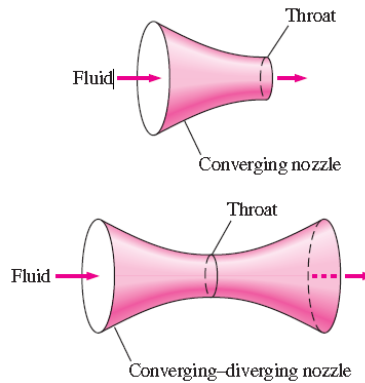
La teoría de flujo sónico trata los fenómenos que se presentan en el flujo de fluidos a alta velocidad, y plantea los modelos matemáticos que basados en las leyes de la mecánica de fluidos y en los principios termodinámicos, permiten conocer y aplicar estos fenómenos en los distintos campos de la ciencia.

1.4.1 Efectos de la variación del área de flujo.

Las boquillas sónicas son conductos convergente-divergentes como el mostrado en la figura 1, y es posible identificar tres zonas:

- Zona convergente: Es la entrada de la boquilla, la cual debe cumplir específicos requisitos de rugosidad y concentricidad, dado que es la encargada de recibir el flujo y de ella depende que se logren condiciones muy cercanas al flujo isoentrópico.
- Garganta: Mínima área de sección transversal en la boquilla. Es la zona donde el flujo alcanza la velocidad del sonido. El valor de área de esta sección determina para unas condiciones de presión y temperatura dadas, el caudal máximo que alcanza el flujo a través de la boquilla.
- Zona divergente: Es la región de salida de la boquilla y su objetivo principal es la recuperación de presión.

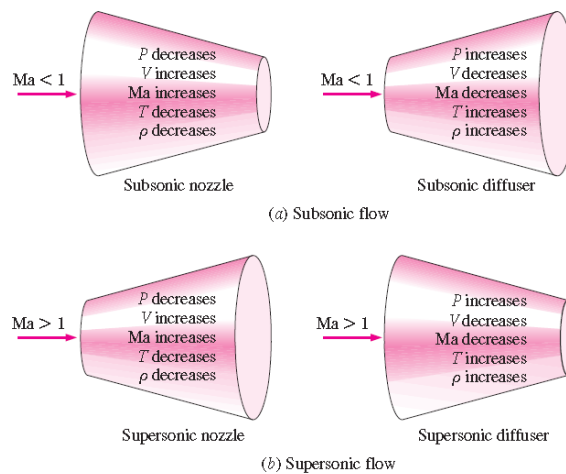
Figura 1. Sección Transversal De Una Boquilla



Termodinámica de Cengel 2 edición pág. 832

El flujo en boquillas no presenta efectos considerables de fricción debido a las cortas distancias recorridas por el fluido y la transferencia de calor es mínima ya que los cambios que sufren las partículas son suficientemente pequeños que no generan gradientes de velocidad, y temperatura importantes. Este hecho permite que se realice un análisis de las propiedades de los fluidos bajo consideraciones de flujo isentrópico y unidimensional.

Figura 2. Variación De Las Propiedades De Flujo En Boquillas Subsónicas Y Supersónicas



Termodinámica de Cengel 2 edición pág. 834

Para un flujo subsónico, mientras el área disminuye la velocidad aumenta y viceversa. La máxima velocidad que se puede alcanzar en un conducto convergente es la velocidad sónica, la cual siempre se presenta en la mínima área de sección transversal del conducto.

En flujos supersónicos, la velocidad del fluido aumenta al aumentar al aumentar el área, por esta se emplea un conducto divergente a la salida de la boquilla con la cuales es posible continuar acelerando el fluido más allá de la velocidad local del sonido.

1.4.2 Determinación del caudal volumétrico.

El caudal a través de boquillas bajo las condiciones de flujo sónico es función de las siguientes variables: A_g Área de la garganta, T_g Temperatura del fluido en la garganta, P_g Presión del fluido en la garganta, ρ_g Densidad del fluido en la garganta, k Coeficiente isoentrópico y R_g Constante del gas.

La determinación de las propiedades en la garganta no puede llevarse a cabo directamente, pues esto implicaría una grave perturbación del flujo, por esto es necesario inferir un sistema de referencia como el establecido por las condiciones de estancamiento.

Esta condición puede ser asumida a la entrada de la boquilla gracias a que cuando se alcanza el flujo sónico, la velocidad del fluido es despreciable en comparación con la velocidad sónica que se presenta en la garganta.

Una vez conocidas las propiedades a la entrada de las boquillas, es posible por medio de relaciones matemáticas, basados en el caso típico de los gases perfectos inferir los valores de presión, temperatura y densidad en la garganta de la boquilla sin necesidad de medirlas directamente.

El modelo matemático que permite determinar el caudal volumétrico a partir de una boquilla bajo estas condiciones es:

$$Q_v = \frac{A_g * C_d * C_0 * p_0}{(R_g * T_0)^{1/2} * \rho_0}$$

Donde:

C_d Coeficiente de descarga, calculado a partir de ecuaciones matemáticas en función del número de Reynolds o determinado experimentalmente.

C_0 Coeficiente de flujo crítico, el cual es función del fluido empleado y su valor se calcula a partir del coeficiente isoentrópico.

Como puede notarse en la formulación presentada, las boquillas sónicas solo requieren la evaluación de las propiedades de entrada, las condiciones ambientales y la geometría interna para determinación del caudal que pasa a través de ellas.

1.4.3 Operación de las boquillas a presión positiva o vacío.

Para generar flujo a través de la boquilla sónica y llevarlo a condiciones críticas, es necesario cumplir con la relación de presión crítica (ver numeral 1.5.2.1). Esto se puede realizar de dos diferentes formas, a presión o a vacío.

1.4.3.1 Sistema operando a presión positiva.

El flujo se genera por las diferencias de presión que se originan cuando aguas arriba de las boquillas, se conecta un equipo de alta presión, que provee una presión positiva a la entrada, mientras en la salida existe la presión atmosférica.

Figura 3. Sistema Operando A Presión Positiva

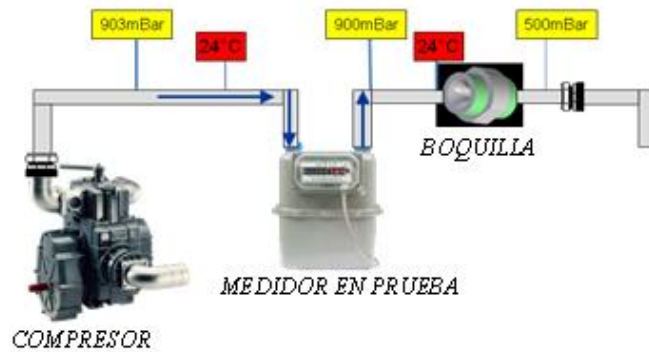


Imagen suministrada por el CDT De GAS

La ventaja principal en este sistema es la variabilidad de caudales, ya que para una boquilla de diámetro de garganta fijo, es posible obtener diferentes caudales máxicos al variar la presión de entrada. Sin embargo el aire antes de entrar a la boquilla se calienta y existe gran dificultad de mantener y garantizar un valor de presión constante, por lo cual se transmiten con gran facilidad las irregularidades del sistema de presión al flujo a la entrada de la boquilla.

1.4.3.2 Sistema operando a vacío.

La diferencia de presión se origina entre la presión atmosférica a la entrada del sistema y la presión negativa creada por un equipo de vacío aguas abajo de la boquilla.

Figura 4. Sistema Operando A Vacío



Imagen suministrada por el CDT De GAS

Desde el punto de vista metrológico, este es el sistema más conveniente para el banco, ya que ofrece mejores condiciones de estabilidad en los valores de presión y temperatura a la entrada del sistema.

El sistema de vacío posee una gran desventaja y es que este funcionamiento limita a un solo caudal por boquilla.

1.4.4 Descripción y cálculo de los flujos en boquillas.

Las siguientes ecuaciones iniciales son utilizadas para el cálculo de caudales en de boquillas.

- ✓ Para el flujo volumétrico

$$Q_v = A_g * C_* * \sqrt{R * T_0}$$

- ✓ Para el caudal de masa

$$Q_m = A_g * C_* * \frac{p_0}{\sqrt{R * T_0}}$$

Con la función de flujo crítica

$$C_* = \sqrt{k} * \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2*(k-1)}}$$

Estas ecuaciones son válidas para un flujo ideal (sin fricción, adiabático, unidimensional). Para tomar en cuenta efectos de flujos de gas reales, se introduce en cada una de las ecuaciones un coeficiente de descarga C_d que puede ser tomado de tablas o determinado a base de experimentos.

- ✓ Para el flujo volumétrico

$$Q_v = A_g * C_d * C_* * \sqrt{R * T_0}$$

- ✓ Para el caudal de masa

$$Q_m = A_g * C_d * C_* * \frac{p_0}{\sqrt{R * T_0}}$$

1.4.5 Metrología y boquillas sónicas.

Las razones que desde el punto de vista metrológico, justifican el empleo de esta tecnología (*boquilla sónica*) como patrón de calibración se resumen en los siguientes aspectos:

- Buena estabilidad a largo plazo: Gracias a que el dispositivo primario (*boquilla sónica*) no posee partes móviles y sus componentes no sufren desgastes excesivos a lo largo del tiempo de servicio (*hasta 30 años*).
- Bajos valores de incertidumbre: La teoría del flujo de fluidos a alta velocidad, bajo las consideraciones de flujo isentrópico y unidimensional garantiza la no influencia de muchos de los factores que producen disturbios e irregularidades difícilmente cuantificables. Esto gracias a que los disturbios aguas abajo de la boquilla nunca se pueden propagar aguas arriba. Por tratarse de la reproducción de un fenómeno termodinámico, el método es muy confiable. Adicionalmente, las boquillas que se calibran directamente contra patrones reconocidos, pueden usarse como patrones de transferencia, especialmente para caudales superiores a 1 dm³/min.
- Facilidad de operación: Dadas las condiciones de funcionamiento de estos dispositivos como medidores de flujo, no se requieren procedimientos especiales ni rigurosos para la determinación de los valores caudal, sólo se requieren medir las condiciones aguas arriba de la boquilla y el tiempo para obtener el volumen.

- Recuperación de presión: El diseño del difusor a la salida produce una recuperación de presión a través de la boquilla, dependiendo del tamaño de ésta y de la calidad de su geometría y acabado interno, lo cual disminuye las pérdidas en el sistema y de esta forma una disminución en los costos de los equipos de compresión.

1.5 REFERENCIAS NORMATIVAS

En las siguientes referencias las palabras: boquilla, boquilla sónica, boquilla venturi, tobera, tobera crítica y CFVN² representan el mismo dispositivo.

1.5.1 Requisitos ISO 9300:2005 “*Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles*”.

A continuación se describen los requisitos de diseño más importante tomados de la Norma ISO 9300:2005, los cuales contemplan los siguientes aspectos:

1.5.1.1 Material.

Las boquillas sónicas deben fabricarse de un material adecuado para la aplicación destinada. Algunas consideraciones son:

- a) Debe ser posible el acabado del material a la condición necesaria, teniendo en cuenta que algunos materiales son inadecuados debido a la inclusión de los pozos, huecos y otras heterogeneidades.
- b) El material, junto con cualquier tratamiento superficial utilizado, no estarán sujetas a corrosión para el servicio previsto.
- c) El material debe ser dimensionalmente estable, y se debería conocer el repetible coeficiente de expansión térmica, de modo que la correspondiente corrección de diámetro de garganta se pueda hacer.

² CFVN, Critical Flow Venturi Nozzles.

1.5.1.2 Acabado superficial en la garganta y en la entrada.

La garganta y la entrada toroidal hasta la sección divergente cónica de la CFVN deberán tener un acabado liso para que la rugosidad media aritmética no exceda $15 \times 10^{-6}d$ y $0,04\mu m$ para maquinados normales y precisos de boquillas venturi, respectivamente.

La garganta y la entrada toroidal hasta la sección divergente cónica estarán libres de suciedad o de cualquier otro contaminante.

1.5.1.3 Divergencia cónica.

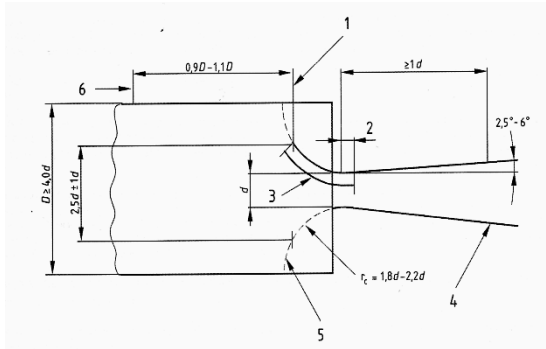
La forma de la sección divergente cónica de la CFVN será controlado para evitar que todas las medidas, las discontinuidades, irregularidades y la falta de concentricidad no superen el 1% del diámetro local. La rugosidad media aritmética R_a de la sección divergente cónica no debe superar $10^{-4}d$.

1.5.1.4 Diseño.

Hay dos diseños estándar de CFVN: la tobera venturi de garganta toroidal y la tobera venturi de garganta cilíndrica. La tobera venturi será construida con una maquina de precisión de acuerdo con el diseño toroidal.

La geometría toroidal es recomendable para propósitos metrológico debido a que en ésta se evita la discontinuidad indeseable en la curvatura de la boquilla al final de la sección convergente y al inicio de la sección divergente (transición convergente-cilíndrica-divergente). *Smith y Matz*, concluyeron que la discontinuidad de la curvatura infinita al final de la sección convergente en la boquilla cilíndrica resulta en un gradiente de presión que debilita la capa límite y puede llegar incluso a generar separación del flujo local.

Figura 5. Detalle De Perfil De Una Boquilla Toroidal, Según ISO 9300:2005



1	Plano de entrada
2	Tangente o Cono divergente
3	Rugosidad: $<0,04 \mu\text{m}$ Forma toroidal: $\pm 0,001d$
4	Rugosidad: $<10^{-4} d$
5	Superficie interna debe situarse fuera de este contorno
6	Localización del dispositivo para indicación de presión

- a. En esta región la rugosidad superficial promedio R_a no debe exceder de $15 \times 10^{-6}d$ y $0,04\mu\text{m}$ para maquinados normales y precisos de boquillas venturi, respectivamente, y el contorno no se debe desviar de la forma toroidal mas de $\pm 0.001d$.
- b. En esta región la rugosidad superficial promedio R_a no debe ser superior a $10^{-4}d$.
- c. El plano de entrada a la boquilla debe encontrarse en esta zona de ataque.

La Figura 5, presenta en forma detallada la geometría de una boquilla toroidal, con todos los requerimientos que debe cumplir según las exigencias del estándar ISO 9300:2005.

1.5.1.5 Alcance de medición.

Se limita a un alcance de índice de Reynolds de

$$10^5 < Re_d < 10^7 \text{ Para toberas con cuello toroidal}$$

1.5.1.6 Requerimientos de instalación.

Que no existan remolinos aguas arriba de la CFVN.

Se puede suponer que hay un gran espacio delante del dispositivo principal (*boquilla*) si no hay un muro más cerca de $5d$ al eje del dispositivo principal o con el plano de entrada del dispositivo principal.

1.5.1.7 Medición de presión.

Cuando se pueda suponer que hay un espacio grande delante del dispositivo principal la toma de presión en la pared aguas arriba se encuentra de preferencia en una pared perpendicular a la cara de entrada del dispositivo principal y dentro de una distancia de $10d \pm 1d$ de este plano.

La toma de presión en la pared se puede localizar aguas arriba o aguas abajo de esta posición, siempre que se ha demostrado que la presión medida puede ser utilizada de forma fiable para dar a la entrada de la boquilla la presión de estancamiento.

La tubería aguas abajo de las boquillas no tiene mayores exigencias, solo se recomienda evitar restricciones de flujo que puedan afectar la condición de flujo crítico.

En el caso de la ubicación del sensor de presión aguas abajo de la boquilla (necesario para verificar las presiones de bloqueo), el estándar recomienda realizar la toma por lo menos a una distancia de 0,5 veces el diámetro de salida de la sección divergente.

1.5.1.8 Medida de temperatura.

Se debe ubicar aguas arriba del plano de entrada del dispositivo principal siempre que se ha demostrado que la temperatura medida puede ser utilizada de forma fiable para dar a la entrada de la boquilla la temperatura de estancamiento.

1.5.2 Reglamento de prueba del PTB Tomo 25.

La medición del caudal de paso de gases con toberas críticas es un caso de aplicación espacial de la medición de caudal con elementos de estrangulación, toberas críticas aceleran el fluido de tal manera que alcanza velocidad de sonido en la parte más estrecha de la tobera.

El resultado de ajuste de esta condición de flujo crítica es una limitación del caudal de paso y las condiciones de flujo detrás de la sección más estrecha ya no pueden ejercer una influencia sobre las condiciones y el estado del flujo a la entrada de la tobera.

Bajo condiciones termodinámicas específicas solo se puede realizar cada vez un valor de caudal de paso.

Cuando toberas críticas son utilizadas en la práctica para mediciones del caudal de gas hay que subrayar algunas particularidades de las condiciones físicas de un flujo crítico. Estas tienen que ver ante todo con la necesidad de en todo caso los parámetros termodinámicos presión, temperatura y humedad relativa del aire a la entrada de la tobera porque el caudal de paso depende de estos parámetros, es decir:

1. De la temperatura, porque la velocidad del sonido depende de la temperatura.
2. De la humedad, porque el coeficiente isentrópico que entra en la función de flujo crítico depende de la humedad.
3. De la presión de entrada, porque el valor de referencia de la tobera depende del índice de Reynolds que por su parte depende de la densidad y por lo tanto de presión absoluta a la entrada.

Toberas críticas deben ser fabricadas de materiales resistentes a la corrosión y al desgaste (con preferencia de acero al cromo-níquel inoxidable).

1.5.2.1 Relación de presión crítica.

La condición de flujo crítica en la tobera (el flujo de gas alcanza en la sección más estrecha de la tobera la velocidad del sonido local) se produce si la relación de presión crítica (P_2/P_0) entre la presión absoluta P_2 a la salida de la tobera y la presión de reposo (estancamiento) P_0 a la entrada de la tobera esté alcanzada. Esta relación de presión es calculada como sigue:

$$\left(\frac{P_2}{P_0}\right) = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Si el diseño geométrico de la tobera no puede ser verificado, es preciso determinar o comprobar la relación de presión máxima a base de un experimento. A tal efecto, la presión a la salida de la tobera debe ser variada hasta que el flujo volumétrico que fluye a través de la tobera permanezca constante, es decir hasta que cambios de la presión ya no provoquen cambios en el caudal de paso.

La condición de flujo crítica de una tobera es, por tanto, garantizada si la relación máxima de presión (P_2/P_0) no está alcanzada. Esta condición puede ser realizada mediante dos modos de funcionamiento:

- a) Según el modo de aspiración, mediante un descenso de la presión a la salida de la tobera con ayuda de una bomba de vacío o un exhaustor de depresión.
- b) Según el modo de presión mediante un aumento de la presión a la entrada de la tobera.

El modo de aspiración mencionado en el punto a), se ha impuesto en la práctica de la metrología porque - contrariamente al modo de presión – no hay que tomar medidas para estabilizar la presión y la temperatura del flujo a la entrada de la tobera.

Toberas críticas también pueden ser empleadas más allá de los alcances de índice de Reynolds mencionado en la ISO9300:2005 para toberas con cuello toroidal. Ello se refiere a los alcances por debajo del alcance de medición mínimo de $Re=10^5$, que corresponde a un flujo volumétrico Q_v de aproximadamente $33m^3/h$ para aire bajo condiciones atmosféricas.

Todas las toberas con $Re < 10^5$ deben ser calibradas individualmente. Lo mismo vale si los parámetros geométricos no son cumplidos.

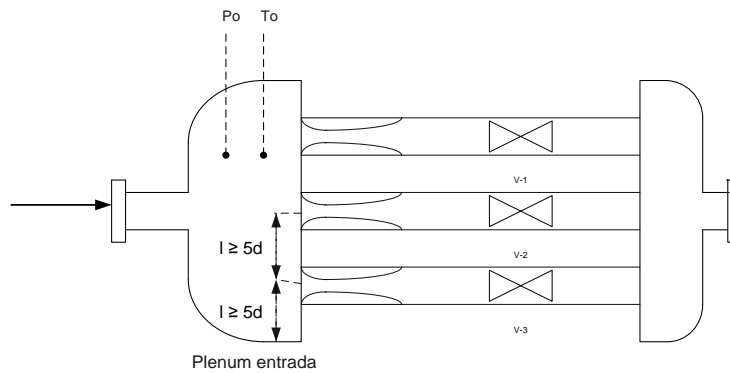
1.5.2.2 Diseños de bancos de pruebas.

La parte central del banco de pruebas con toberas críticas consta de las secciones de medición o unidades de toberas. Estas secciones de medición están integradas por la entrada delante de la tobera con los puntos de medición de referencia para la presión y la temperatura del gas de ensayo, la tobera crítica misma, la salida detrás de la tobera y un órgano de cierre. En caso necesario hay que prever filtros para proteger las toberas.

1.5.2.3 Condiciones para la instalación de componentes.

Este diseño está basado en un colector de entrada para todas las unidades de toberas. En este modelo, las toberas están insertadas en la base plana del colector o *Plenum* de entrada de tal manera que la superficie frontal de la tobera enrase con ella. Bajo aspectos físicos, la tobera así aspira en cierto sentido de un espacio de entrada infinito.

Figura 6. Ejemplo De Configuración De Un Banco De Pruebas (Instalación Colectiva De Toberas)



Entre las toberas y entre las paredes del recipiente y el eje o la superficie frontal de la tobera hay que prever una distancia de al menos cinco veces el diámetro d del cuello de tobera. Las unidades de la tobera y el espacio interior del colector de entrada deben ser diseñados de tal manera que esté garantizada una afluencia continua de las toberas y que las toberas no se influyan mutuamente.

1.5.3 NTC 2728:2005.

Medidores de gas tipo diafragma. Medidores de gas tipo diafragma, esto es medidores volumétricos de gas en los que el flujo de gas se mide mediante cámaras con membranas deformables.

Figura 7. Medidor De Diafragma



1.5.3.1 Errores máximos permisibles (5).

Los errores máximos permisibles en el examen de modelo y en la verificación inicial, así como los valores recomendados para los valores máximos permisibles en servicio, se presentan a continuación:

Tabla 1. Errores Máximos Permisibles

Tasa de flujo	Errores máximos permisibles	
	En examen de modelo y verificación inicial	En servicio
$Q_{\text{mín}} \leq Q \leq 0,1Q_{\text{máx}}$	±3%	-6%, +3%
$0,1Q_{\text{máx}} \leq Q \leq Q_{\text{máx}}$	±1,5%	±3%

Tabla 4 NTC 2728:2005

En el examen de modelo, el valor absoluto de cada error del medidor no debe exceder 1% en tasas de flujo entre $0,1Q_{\text{máx}}$ y $Q_{\text{máx}}$, cuando estos errores son todos del mismo signo.

1.5.3.2 Pérdidas de presión (6).

La pérdida total de presión en un medidor de gas, promediado en un ciclo de medición, con un flujo de aire de densidad $1,2 \text{ kg/m}^3$, a una tasa de flujo igual a $Q_{\text{máx}}$, no debe exceder los valores de la siguiente tabla:

Tabla 2. Pérdidas de Presión

$Q_{\text{máx}}$ m ³ /h	Errores máximos permisibles	
	En examen de modelo y verificación inicial	En servicio Pa
0 a 10 inclusive	200	220
16 a 100 inclusive	300	330
160 a 1000 inclusive	400	440

Tabla 5 NTC 2728:2005

Nota: Los valores “en servicio” son valores recomendados

Los errores de las muestras de los medidores de gas se deben determinar en siete tasas de flujo, distribuidas uniformemente en el intervalo de medida.

1.5.3.3 Verificación inicial (8).

Se considera que un medidor de gas cumple los requisitos relacionados con los errores máximos permisibles, si éstos se cumplen para las siguientes tasas de flujo: Q_{\min} , $0,2 Q_{\max}$ y Q_{\max} .

1.5.3.4 Verificación posterior (9).

Se recomienda aplicar los límites de error en servicio para la verificación de los medidores de gas cuyos sellos no hayan sido dañados.

1.5.3.5 Medición de presión (B.1.3.2).

Las tomas de presión para los medidores sometidos a ensayo, se deben colocar a un diámetro de tubería aguas arriba de la entrada del medidor y de un diámetro de tubería aguas abajo de la salida del medidor.

Los orificios para las tomas de presión deben ser perpendiculares al eje de la tubería. Deben tener un diámetro mínimo de 3mm. Las tomas no deben sobresalir hacia el flujo de gas.

2. DISEÑO DEL BANCO DE CALIBRACIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La corporación CDT De GAS, dentro de su portafolio de soluciones tecnológicas, busca mantener y mejorar el control de los procesos de calibración de medidores de gas tipo diafragma instalados y nuevos basados en la aplicación de fluidos compresible; contribuyendo a la aplicación de las normas NTC2728:2005 y NTC2826:1990; para ello se construyo un banco de calibración que permite la realización de pruebas a medidores diafragma tipo G1,6, G2,5, G4 y G6.

El banco de calibración tiene un rango de calibración de 0,016m³/h a 10m³/h, e incorpora la tecnología de flujo crítico/sónico que proporciona una medición con excelentes cualidades metrológicas y buena estabilidad a largo plazo.

Los patrones tipo boquillas sónicas están diseñados bajo la norma ISO 9300:2005 y calibrados con patrón tipo campana gasométrica y patrón tipo pistón con trazabilidad a patrones internacionales del BIPM e incertidumbres de calibración \leq a 3,5% (K=2).

El banco de calibración está conformado por tres subsistemas: sistema medidor bajo prueba, el sistema patrón de referencia y sistema generación de flujo; armónicamente integrados que hacen del Banco una herramienta adecuada para realizar mediciones de flujos. El sistema incluye una serie de conductos y válvulas que direccionan el flujo; sensores de presión, temperatura y humedad que caracterizan el aire que pasa por cada sistema.

Entre las características principales del banco están su tamaño compacto, su fácil operación, y su amplio rango de medición.

El sistema medidor bajo prueba de dos niveles o zonas del banco permite calibrar desde un medidor hasta diez medidores de la misma denominación en forma consecutiva agilizando la evaluación de grandes lotes de medidores.

En nombre “*facilidad tecnológica*”, se utilizara para denotar el banco de calibración que comprende todos los sistemas y componentes requeridos para el funcionamiento del mismo.

2.1.1 Análisis de requerimientos de la *facilidad tecnológica*.

- ☉ Calibración de medidores de gas tipo diafragma con designación G1,6, G2,5, G4 y G6 que opere en un rango de 0,016 m³/h a 10 m³/h a 905mbar y 22°C (alcance según NTC2728:2005); utilizando como patrón de calibración un banco de boquillas sónicas.
- ☉ Trazabilidad a Patrones Internacionales del BIPM y calibrados de manera que se obtengan niveles de incertidumbre del 0,35% (K=2) y en error en lectura del medidor del 0,4%(K=2).
- ☉ Líneas de flujo de aire acorde a las especificaciones de los medidores a calibrar con designación G1,6, G2,5, G4 y G6 y las normas de referencia NTC2728 y NTC2826.
- ☉ Las líneas del flujo de aire deben tener en cuenta el sentido de operación de los medidores tipo diafragma para la correcta instalación y prueba de los mismos, y el espacio físico disponible en el laboratorio.

- ⊗ El sistema de acoplamiento de los medidores tipo diafragma debe ser tal que se puedan manejar los diferentes tamaños y se reduzcan los tiempos de preparación de la calibración.
- ⊗ El equipo generador de flujo debe garantizar las condiciones óptimas en cuanto a requerimientos de caudal y caída de presión presentes en las calibraciones.

2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO PATRÓN

Para el diseño del banco patrón de calibración que utiliza la tecnología de boquillas sónicas se siguen los lineamientos dados por las normas ISO 9300:2005 y PTB Tomo 25; presentados en el capítulo 1 de este libro.

2.2.1 Diseño y construcción de las boquillas.

El diseño y construcción de las boquillas está sujeto a los caudales de flujo que van a pasar por las mismas, el mecanismo de generación de flujo es a vacío lo que indica que una boquilla solo nos proporcionara un caudal (ver capítulo 1); por lo tanto el número de boquillas estará sujeto a las características de los MUT³ y sus caudales de prueba.

Calibración de medidores modelo G1,6, G2,5, G4 y G6, es decir un alcance de operación desde 0,016 m³/h a 10 m³/h, el alcance fue definido según NTC 2728:2005.

³ MUT, Meter Under Test, medidores bajo prueba

Tabla 3. Caudales Nominales

Tasa de flujo para pruebas					
Medidor Caudal		G1,6	G2,5	G4	G6
		m3/h	m3/h	m3/h	m3/h
1	Qmax	2,5	4	6	10
0,7	Qmax	1,75	2,8	4,2	7
0,4	Qmax	1	1,6	2,4	4
0,2	Qmax	0,5	0,8	1,2	2
0,1	Qmax	0,25	0,4	0,6	1
3	Qmin	0,048	0,075	0,123	0,18
1	Qmin	0,016	0,025	0,041	0,06

Construir una boquilla para cada caudal de prueba resultaría muy costoso y poco efectivo, es por ello que el número de boquillas se definió teniendo en cuenta las posibles configuraciones que permitieran obtener los caudales nominales recomendados.

Se requieren solo de Diez (10) Boquillas Sónicas para obtener 25 caudales de prueba, ya que se utilizan configuraciones individuales o en paralelo de Dos (2) o Tres (3) boquillas. La utilización de estas configuraciones se valida, calibrando de manera individual las Diez boquillas y algunas de las configuraciones en paralelo, para determinar si existe algún cambio en la reproducción de los caudales y en las relaciones de bloqueo.

En la siguiente tabla se observan los caudales de prueba y las diferentes configuraciones que se requieren para obtener estos caudales utilizando Diez boquillas sónicas:

Tabla 4. Caudales De Prueba

Qreq	Qnom	Boquilla	Qprueba	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Qmin	0,016	B1	0,016	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
3Qmin	0,048	B3	0,05	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,1Qmax	0,25	B5	0,25	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,2Qmax	0,50	B6	0,5	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,4Qmax	1,00	B7	1	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,7Qmax	1,75	B5+B6+B7	1,75	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
Qmax	2,5	B6+B8	2,5	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
Qmin	0,025	B2	0,025	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
3Qmin	0,075	B2+B3	0,075	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,1Qmax	0,40	B2+B4+B5	0,4	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,2Qmax	0,80	B3+B5+B6	0,8	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,4Qmax	1,60	B4+B6+B7	1,625	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,7Qmax	2,80	B5+B6+B8	2,75	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
Qmax	4,0	B9	4	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
Qmin	0,04	B1+B2	0,041	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
3Qmin	0,12	B4	0,125	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,1Qmax	0,60	B4+B6	0,625	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,2Qmax	1,20	B5+B7	1,25	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,4Qmax	2,40	B6+B8	2,5	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,7Qmax	4,20	B5+B9	4,25	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
Qmax	6,0	B10	6	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
Qmin	0,06	B1+B3	0,066	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
3Qmin	0,18	B3+B4	0,175	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,1Qmax	1,00	B7	1	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,2Qmax	2,00	B8	2	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,4Qmax	4,00	B9	4	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
0,7Qmax	7,00	B7+B10	7	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6
Qmax	10,0	B9+B10	10	0,016	0,025	0,05	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6

Condiciones de operación requeridas para la fabricación de las boquillas:

Operación a vacío con aire atmosférico limpio

Pin=860mbar (Presión absoluta a la entrada) (Ver Tabla 15)

Se analizó la posible pérdida de la línea hasta llegar a cada una de las boquillas y esta pérdida es de 50mbar, entonces Pin=Patm-50mbar (numeral 2.4). Que corresponde a la caída de presión en los medidores instalados, las líneas de flujo y los accesorios de conexión.

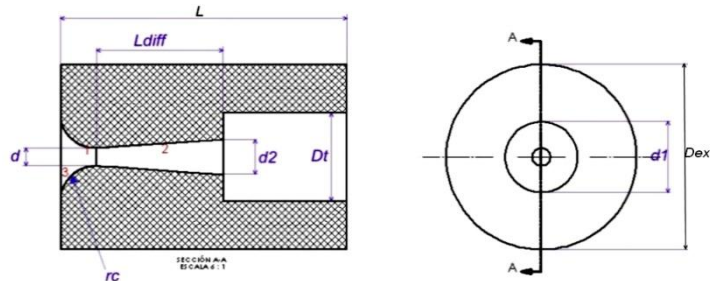
Pout= 200mbar a 400mbar (Presión absoluta a la salida)

T=22°C±2°C

Material: Acero Inoxidable AISI 304

Dados los caudales y las características de operación de las boquillas, se determina la geometría interna de las mismas según recomendaciones de la norma ISO9300:2005 y PTB Tomo 25. El perfil de boquilla seleccionado es el toroidal por las ventajas presentadas anteriormente (Capítulo 1).

Figura 8. Geometría De Las Boquillas



La mayoría de dimensiones del perfil están basadas en el diámetro de garganta como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Dimensiones De Las Boquillas

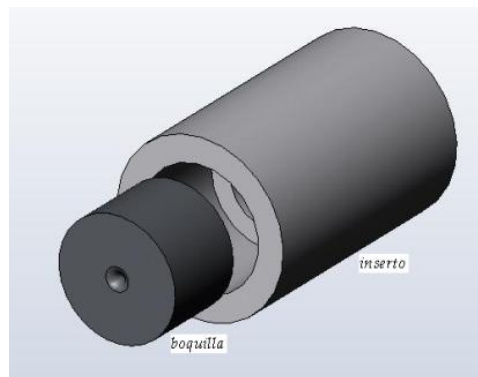
CARACTERÍSTICAS DE LAS BOQUILLAS									
Cantidad	Caudal Volumétrico	Diámetro Garganta	Radio de convergencia	Diámetro Entrada	Longitud de Difusor	Diámetro Final Difusor	Diámetro de Salida	Longitud Cuerpo	Diámetro Exterior
Qty	Qv	d	rc=2*d	d1=5*d	Ldiff=7*d	d2	Dt	L	Dext
unit	m ³ /h	mm	mm	(mm)	mm	mm	mm	(mm)	(mm)
1	0,016	0,174	0,35	0,87	1,22	0,34	8,00	12,00	14,00
1	0,025	0,217	0,43	1,09	1,52	0,43	8,00	12,00	14,00
1	0,05	0,306	0,61	1,53	2,14	0,61	8,00	12,00	14,00
1	0,125	0,481	0,96	2,41	3,37	0,95	8,00	12,00	14,00
1	0,25	0,679	1,36	3,39	4,75	1,34	8,00	12,00	14,00
1	0,5	0,957	1,91	4,79	6,70	1,89	8,00	12,00	14,00
1	1	1,351	2,70	6,76	9,46	2,67	8,00	12,00	14,00
1	2	1,907	3,81	9,54	13,35	3,77	14,00	30,00	20,00
1	4	2,694	5,39	13,47	18,86	5,33	14,00	30,00	20,00
1	6	3,297	6,59	16,48	23,08	6,52	14,00	30,00	20,00

Debido a los pequeños diámetros de garganta 0.174 mm, la importancia del perfil (toroidal), la rugosidad y del acabado superficial requeridas para las boquillas, se tomo la decisión de fabricarlas en un centro reconocido y con experiencia en la construcción de estos dispositivos de medición, entre estos centros se destaca TETRATEC, una empresa Alemana con mucha experiencia en este campo; quien fabrico de las Diez boquillas del banco patrón.

Como se puede observar en la tabla anterior la longitud del cuerpo y el diámetro exterior no son los mismos para todas las boquillas; estas dimensiones se adoptaron para disminuir costos de fabricación.

Posterior a la fabricación de las boquillas y buscando obtener unas dimensiones estándar para todas las boquillas se opto por que las dimensiones finales en cuanto a longitud del cuerpo y el diámetro exterior fueran 30mm y 20mm respectivamente, para los cuales se emplearon insertos para las boquillas con longitud del cuerpo 12mm y diámetro exterior de 14mm, Adicionalmente, estas dimensiones facilitan el manejo y montaje.

Figura 9. Imagen CAD Boquilla Con Inserto



Finalmente se implemento la identificación de las boquillas, esta identificación consistió en una marcación con laser en la superficie externa

de la boquilla los parámetros que la caracterizan, en nuestro caso, un código, el caudal nominal en dm^3/min y una flecha indicando la dirección del flujo.

Tabla 6. Identificación De Las Boquillas

Boquilla	Código	Caudal nominal	
B1	BS-01	0,267	dm^3/min
B2	BS-02	0,417	dm^3/min
B3	BS-03	0,833	dm^3/min
B4	BS-04	2,083	dm^3/min
B5	BS-05	4,167	dm^3/min
B6	BS-06	8,333	dm^3/min
B7	BS-07	16,67	dm^3/min
B8	BS-08	33,33	dm^3/min
B9	BS-09	66,67	dm^3/min
B10	BS-10	100,00	dm^3/min

En la siguiente figura se puede observar la identificación de la boquilla B1, quien además tiene inserto:

Figura 10. Identificación De Las Boquillas



2.2.2 Diseño de los *Plenum*.

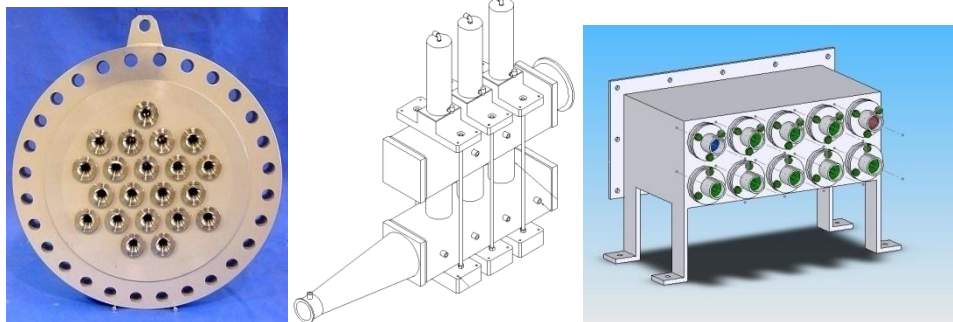
Los *Plenum* son estructuras cuya función es ofrecer las condiciones de homogeneidad y baja velocidad aguas arriba de las boquillas (Diseñado para reproducir lo más fielmente posible según la practicidad, las características de un reservorio infinito, donde la velocidad del fluido se considera cero, y las condiciones de presión y temperatura estables). Se tuvo en cuenta las dimensiones de las boquillas y de sus soportes, de tal forma que su arreglo permitiera obtener unas dimensiones adecuadas para el *Plenum* y lograr un volumen estancado representativo.

2.2.2.1 Alternativas de diseño.

Existen en la actualidad diferentes configuraciones y alternativas de diseño para *Plenum*, entre las más comunes se encuentran:

- ☞ *Plenum* tradicional tipo tambor con las boquillas instaladas en una de sus caras.
- ☞ *Plenum* tipo *manifold* con acomodación longitudinal.
- ☞ *Plenum* tipo rectangular con las boquillas instaladas en una de sus caras.

Figura 11. Tipos De *Plenum*



a) *Plenum* Tradicional

b) *Plenum* longitudinal

c) *Plenum* rectangular

2.2.2.2 Recomendaciones.

Normas internacionales (ISO9300:2005) permiten la instalación de un solo inyector en un tubo de medida como una transferencia de flujo estándar. Para múltiples inyectores en un solo tubo, el efecto de interferencia entre boquillas sónicas y la pared de cámara deben ser medidos para predecir el coeficiente de descarga de una serie de boquillas y de aquellas boquillas solas. El efecto de interferencia entre inyectores vecinos puede ser fuente de error adicional en la medida de flujo de masas.

Según la PTB Tomo 25, recomienda (capítulo 1) una separación entre boquillas y entre las boquillas y las paredes del *Plenum* de como mínimo 5 veces el diámetro de garganta de boquilla.

El artículo "*Interference effects of three sonic nozzles of different throat diameters in the same meter tube*"⁴ como su nombre lo indica presenta los efectos de interferencia de la operación de tres boquillas sónicas con diámetros de garganta diferentes instaladas en un solo tubo de medida (Plenum) y opciones de diseño para instalación de múltiples boquillas.

Entre las conclusiones de éste artículo se encuentran:

- ⊗ El C_d combinado para tres boquillas con un diámetro equivalente a la superficie total fue también el mismo que el obtenido de la ecuación de la norma ISO.
- ⊗ La diferencia de todos los valores experimentales del banco de boquillas con las tres placas de instalación de aquellos calculados de boquillas individuales era el cero con una incertidumbre moderada del $\pm 0,098\%$ dentro de límites de confianza del 95 % en $2 \times 10^6 < Re_d < 5 \times 10^6$. Por consiguiente, el flujo de aire principal producido por la boquilla sónica más

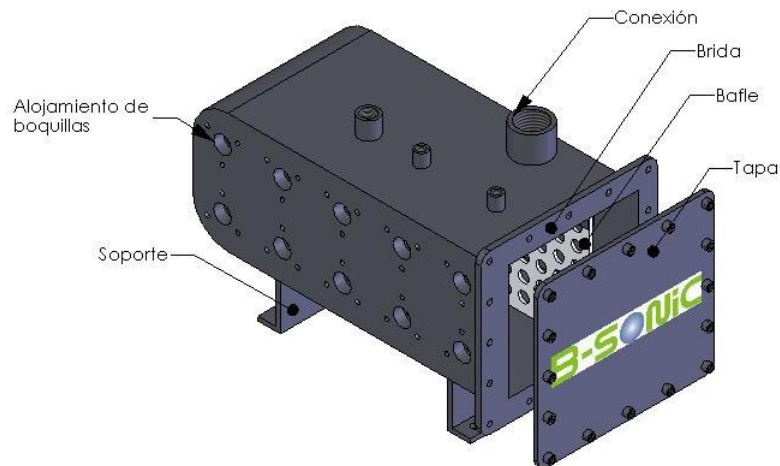
⁴ Flow Measurement and Instrumentation 10 (1999) 175–181

grande en el banco de boquillas no tenía ninguna influencia sobre otros. Por lo tanto, boquillas sónicas pueden ser instaladas dentro del banco, con distancia entre ellas de $2,1d$ que está basado en el diámetro de garganta de inyector más grande del banco de boquillas. Finalmente, las boquillas sónicas que están $1,5d$ de la pared de cámara no muestran ningún efecto de interferencia de la pared.

2.2.2.3 Selección del modelo.

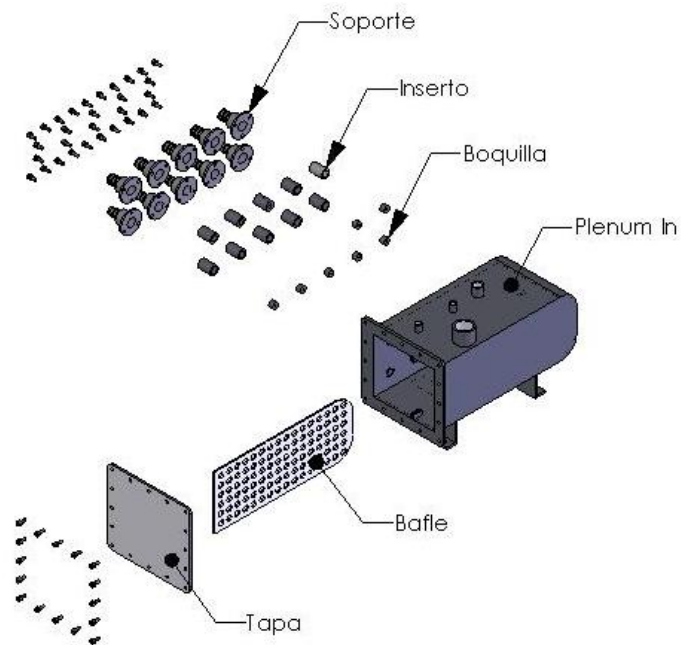
El modelo seleccionado es el rectangular, por las ventajas descritas anteriormente. Presenta la mejor alternativa de montaje de las Diez boquillas sónicas y facilita la instalación de las válvulas que restringen el flujo por las mismas.

Figura 12. Imagen CAD del *Plenum In* (*Plenum de Boquillas*)



Además de las condiciones de diseño mencionadas, el *Plenum In* cuenta con soportes, conexiones para los sensores (presión y temperatura) y líneas de flujo, una tapa bridada para permitir el acceso al Plenum y realizar limpieza y un baffle que sirve para amortiguación de la entrada de flujo al Plenum.

Figura 13. Disposición de los elementos en el *Plenum In*

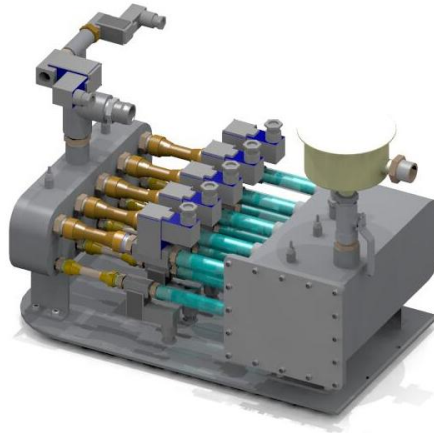


La distancia entre boquillas y entre las boquillas y las paredes del *Plenum* es de 68mm que es una distancia considerable y que cumple con las recomendaciones mencionadas anteriormente. Esta distancia esta en mayor medida influencia por los elementos para el soporte de las boquillas y las válvulas de control de flujo.

2.2.3 Montaje de las boquillas.

Se escogió como elemento de montaje de las boquillas un soporte cilíndrico el cual encapsula parte de la boquilla. Cuenta con una brida circular con tres orificios para permitir el acople con el *Plenum In*, de esta manera la parte restante de la boquilla se aloja en el *Plenum In* y se asegura con tornillos. Para garantizar el sello se instalan dos *O'rings* uno ubicado entre la cara de entrada de la boquilla y el alojamiento del *Plenum In* y otro entre la cara de salida de la boquilla y el soporte. Además el soporte cuenta a la salida con un espigo para hacer conexión por manguera aguas abajo de la boquilla.

Figura 14. CAD Ensamble Banco Patrón



2.2.4 Fabricación del banco de boquillas.

Para la fabricación de un banco de boquillas compacto que pueda ser montado y desmontado del banco de calibración con facilidad, se requiere la instalación de todos los elementos de control de flujo y sensores; además de una plataforma independiente que sirva para el desplazamiento banco de boquillas a los sitios de calibración. Esto es importante al momento de realizar mantenimiento y calibración de las boquillas.

Como el banco de boquillas es el elemento más representativo e importante de la *facilidad tecnológica* se inicio por la construcción de este para realizar pruebas y calibraciones que confirmaran las teorías y modelos utilizados.

Todos los elementos del banco patrón están soportados por una lámina en acero INOX304 de 8mm de espesor, la cual permite el ensamble de una manera compacta del banco.

El primer elemento a fabricar fue el *Plenum In*, para el cual se construyeron las piezas individuales y luego se soldaron para conformación del mismo.

Figura 15. Brida y tapa del *Plenum In*

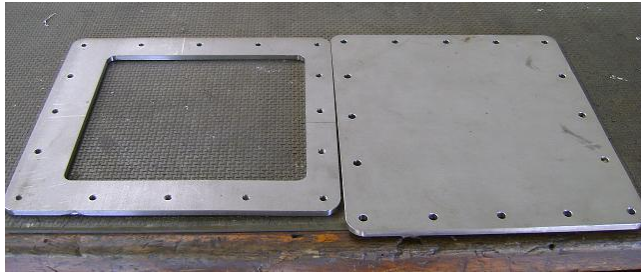


Figura 16. Alojamiento boquillas, baffle y cara posterior *Plenum In*



Figura 17. Fabricación Conectores



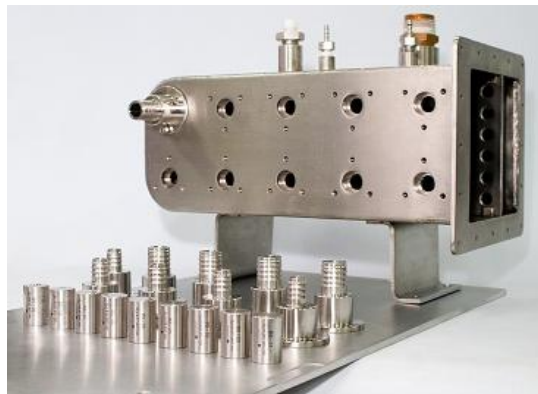
Luego de cortadas las piezas se procedió al ensamble de las mismas se aplicó soldadura tipo TIG, con material de aporte, ya que este tipo es la más empleada con el acero inoxidable debido al poco calentamiento que produce en el material. Con ella se unieron los dos extremos de la lámina del

desarrollo, así como las tapas, brida y conectores. Esta soldadura debe garantizar completa hermeticidad. El baffle es un elemento desmontable.

Figura 18. Fabricación Conectores



Figura 19. Plenum In y montaje de las boquillas



Para el montaje de las válvulas de control se requiere de otro *Plenum*, denominado *Plenum Out* el cual sirve de soporte de las válvulas, mantiene la alineación con respecto al *Plenum In* y tiene conexiones para sensores (diferencial y vacuo metro).

Para el fácil montaje y desmontaje de los elementos del banco se utilizo conexiones tipo fler las cuales además proporcionan un soporte rígido a las válvulas de control de flujo (Ver figura 20). Finalmente la conexión de las

válvulas con las boquillas se hace con manguera, ya que esta permite disminuir los problemas que puedan presentarse en algún momento por alineación.

Figura 20. *Plenum Out*, Conectores *Fler* Y Válvulas



2.3 INSTRUMENTACIÓN

La selección de la instrumentación se realizó de acuerdo a las siguientes consideraciones:

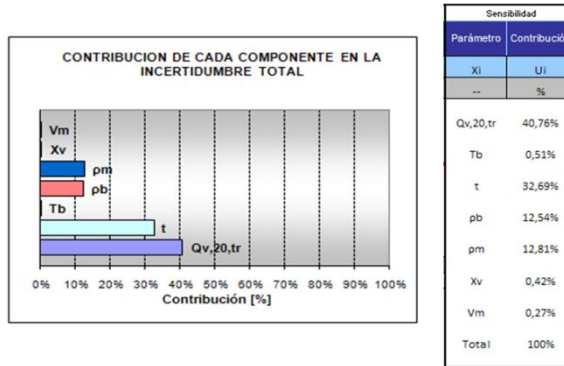
- ✓ Función o magnitud a medir
- ✓ Clase requerida del instrumento
- ✓ Precio
- ✓ Otras (tamaño, conexiones, etc.)

Uno de los aspectos más relevantes, es la clase del instrumento ya que de esta dependen en gran parte los niveles de incertidumbre requeridos.

Las variables que influyen en los valores de incertidumbre teórica de la *facilidad tecnológica* presentadas en el modelo matemático determinan la cantidad y características técnicas de los sensores encargados de determinar los valores correspondientes a estas propiedades. Fueron seleccionadas con

base a la influencia que la incertidumbre individual que cada uno de ellos tiene sobre el valor de la incertidumbre total de la medición.

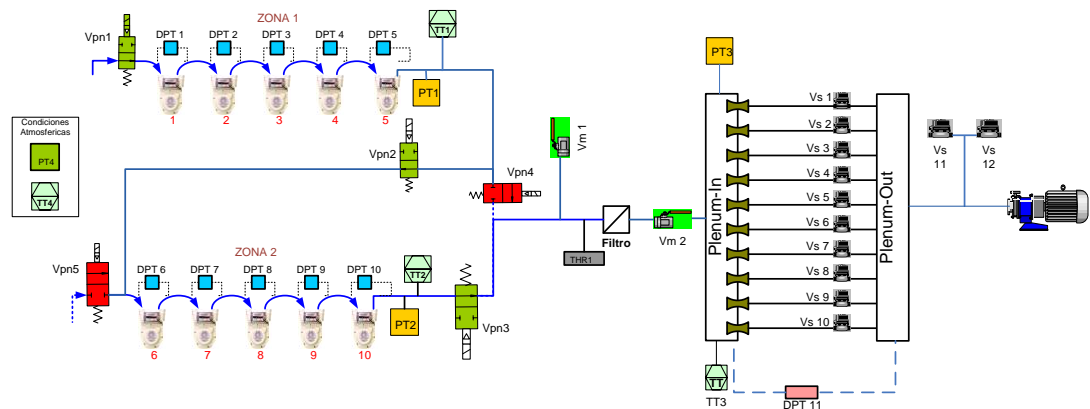
Figura 21. Contribución de los componentes



2.3.1 Ubicación de los sensores y transmisores.

La ubicación de los sensores y transmisores se realizó de acuerdo a siguiente esquema funcional del.

Figura 22. Esquema funcional



Se presento un cambio en lo referente a las válvulas Vs 11 y Vs 12, inicialmente se tenía estipulado la instalación de una válvula cuya función era generar un Bypass al sistema; debido a las diferentes configuraciones y tamaños del las boquillas en el banco patrón, las relaciones de bloqueo de

las boquillas varían, por tal motivo se instalaron dos válvulas en lugar de una para obtener diferentes niveles de presión.

2.3.2 Listado De Elementos Y Nomenclatura Utilizada.

En la siguiente tabla se listan los componentes principales mecánicos de la *facilidad tecnológica*.

Tabla 7. Listado de Elementos Completa

<i>Listado de Elementos Completa</i>					
<i>Accesorio</i>	<i>Código</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Características</i>	<i>Función</i>	<i>#</i>
VALVULAS SOLENOIDES DE CONTROL DE APERTURA Vpn	VEN-1	Zona 2	5 Vías - 3 Posiciones - CC	Accionar Vpn1	1
	VEN-2	Zona 2	6 Vías - 3 Posiciones - CC	Accionar Vpn2	2
	VEN-3	Zona 2	7 Vías - 3 Posiciones - CC	Accionar Vpn3	3
	VEN-4	Zona 2	8 Vías - 3 Posiciones - CC	Accionar Vpn4	4
	VEN-5	Zona 2	9 Vías - 3 Posiciones - CC	Accionar Vpn5	5
VÁLVULAS SOLENOIDES	Vs1	Salida boquilla 1	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	6
	Vs2	Salida boquilla 2	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	7
	Vs3	Salida boquilla 3	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	8
	Vs4	Salida boquilla 4	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	9
	Vs5	Salida boquilla 5	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	10
	Vs6	Salida boquilla 6	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	11
	Vs7	Salida boquilla 7	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	12
	Vs8	Salida boquilla 8	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	13
	Vs9	Salida boquilla 9	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	14
	Vs10	Salida boquilla 10	Válvula Solenoide 2/2 NC	Habilitar el flujo en la boquilla	15
	Vs11	Plenum out	Válvula Solenoide 2/2 NC	Bypass Bomba de Vacío	16
	Vs12	Plenum out	Válvula Solenoide 2/2 NC	Bypass Bomba de Vacío	17
BAROMETRO	PT1	Salida Zona 1	Alcance 500 a 1200mbar	Medir Presión Absoluta	18
	PT2	Salida Zona 2	Alcance 500 a 1200mbar	Medir Presión Absoluta	19
	PT3	Plenum In	Alcance 500 a 1200mbar	Medir Presión Absoluta	20
	PT4	Succión Zona 1 y 2	Alcance 500 a 1200mbar	Medir Presión Absoluta	21
MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL	DPT1	Cerca al medidor 1	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 1	22
	DPT2	Cerca al medidor 2	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 2	23
	DPT3	Cerca al medidor 3	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 3	24

Listado de Elementos Completa					
Accesorio	Código	Ubicación	Características	Función	#
	DPT4	Cerca al medidor 4	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 4	25
	DPT5	Cerca al medidor 5	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 5	26
	DPT6	Cerca al medidor 6	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 6	27
	DPT7	Cerca al medidor 7	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 7	28
	DPT8	Cerca al medidor 8	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 8	29
	DPT9	Cerca al medidor 9	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 9	30
	DPT10	Cerca al medidor 10	Alcance de 0 a 5mbar	Medir Presión Diferencial medidor 10	31
	DPT11	Entre Penums In/Out	Alcance de 0 a 10psig	Medir Presión Diferencial Penums In/Out	32
TRANSMISORES DE TEMPERATURA	TT1	Salida zona 1	Alcance de -51°C a 150 °C	Censar la temperatura ambiente	33
	TT2	Salida zona 2	Alcance de -51°C a 150 °C	Censar la temperatura zona 1	34
	TT3	Plenum In	Alcance de -51°C a 150 °C	Censar la temperatura zona 2	35
	TT4	Ambiente	Alcance de -51°C a 150 °C	Censar la temperatura en el plenum IN	36
HIGROMETRO	THR	Antes del Filtro	Alcance de 0 a 100%HR	Evaluar la HR del fluido de calibración	37
VALVULAS NEUMÁTICAS	Vpn1	Succión zona 1	NA	Permitir entrada de aire atm para calibración	38
	Vpn2	Entre zona 1 y zona 2	NA	Evitar flujo de zona 2 a zona 1	39
	Vpn3	Entre Zona 2 y Filtro	NA	Permitir entrada de aire atm para calibración	40
	Vpn4	Entre zona 1 y Filtro	NC	Evitar flujo de zona 1 a zona 2	41
	Vpn5	Succión Zona 2	NC	Aislar la zona 2, evitar flujo de zona 1 a zona 2	42
BOMBA DE VACIO	BV	Aguas abajo plenum OUT	Max Vacuum 25"Hg	Generación de flujo	43
UNIDAD MANTENIMIENTO	UM	Zona 2	Filtro-regulador-lubricación	Acondicionamiento Aire	44
REGULADOR DE PRESIÓN	RP	Zona 2	0-60psi	Brindar otro nivel de presión	45
VÁLVULAS OPERACIÓN MANUAL	Vom 1	Zona 1	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC1	46
	Vom 2	Zona 1	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC2	47
	Vom 3	Zona 1	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC3	48
	Vom 4	Zona 1	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC4	49
	Vom 5	Zona 1	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC5	50
	Vom 6	Zona 2	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC6	51
	Vom 7	Zona 2	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC7	52
	Vom 8	Zona 2	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC8	53
	Vom 9	Zona 2	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC9	54
	Vom 10	Zona 2	5/3 CC centrada por resortes	Accionar AC10	55
ACTUADORES	AC 1	Zona 1	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 1	56

Listado de Elementos Completa					
Accesorio	Código	Ubicación	Características	Función	#
	AC 2	Zona 1	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 2	57
	AC 3	Zona 1	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 3	58
	AC 4	Zona 1	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 4	59
	AC 5	Zona 1	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 5	60
	AC 6	Zona 2	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 6	61
	AC 7	Zona 2	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 7	62
	AC 8	Zona 2	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 8	63
	AC 9	Zona 2	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 9	64
	AC 10	Zona 2	Cilíndrico-DE-Carrera 150mm	Subir y Bajar medidor 10	65
FILTRO	FP	Plenum In	Conexión 1/2"NPT, 0,5micras	Evitar entrada de partículas	66
VÁLVULA DE BOLA	VB1	Plenum In	1"NPT	Control de flujo	67
	VB2	Zona 2	1"NPT	Conexión externa	68

Para determinar todos los datos provenientes de las variables anteriores se seleccionaron los siguientes elementos:

✓ Transmisor de Temperatura (RTD'S)

Sensor de resistencia variable, RTD'S "PT100" de 3 hilos, el transmisor entrega una señal de 4-20mA.

Figura 23. RTD



Tabla 8. Características RTD'S

RTD'S	
Precisión	± 0,1%
Señal de salida	4-20 mA
Rango de temperatura	-51 a 160 °C
Rango de voltaje	10 – 35 VDC

✓ Transmisor de Presión Diferencial

Figura 24. Transmisor de presión diferencial



Tabla 9. Características Transmisor De Presión Diferencial

TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL	
Rango	0-2 in H ₂ O
Máx. Presión	5 psig
Clase	0,25% FS ⁵
Señal de salida	4-20 mA
Máx. corriente	40 mA
Temperatura limite	-6,7 °C a 49 °C
Estabilidad Año	1% FS

⁵ Full Scale

✓ Barómetro

Cuenta con una salida serial RS-232 para la comunicación del sistema adquisición de datos.

Figura 25. Barómetro



Tabla 10. Características Del Barómetro

BARÓMETRO	
Rango de presión	500-1200 mbar
Rango de temperatura	-40 a 85 °C
Precisión	± 0,8 mbar
Estabilidad	0,25 mbar por año
Resolución	0,0011% FS ⁶
Salidas	RS 232 - RS 485
Rango de voltaje	5,5 – 30 VDC

✓ Higrómetro

Figura 26. Higrómetro



⁶ Mejor resolución obtenida con PFS (porcentaje de full escala) unidades de presión.

Tabla 11. Características Higrómetro

HIGRÓMETRO	
Humedad relativa	0-100% RH ⁷
Rango de voltaje	15-35 VDC
Señal de salida	4-20mA
Precisión	±2%@10-90%
Histéresis	Menos 1%/Año
Temperatura limite	-40 °C a 80 °C

✓ Sensor Óptico

Figura 27. Sensor Óptico



Tabla 12. Características Sensor Óptico

Amplificador BF4R	
Rango de voltaje	12-24 VDC
Corriente de consumo	Máx. 45mA
Temperatura Ambiente	-10 °C a 50°C
En Operación	
Almacenaje	-20 °C a 70 °C

⁷ Humedad relativa

2.3.3 Sistema de adquisición de datos.

La *facilidad tecnológica* requiere de la determinación de las condiciones de operación de las boquillas y de los MUT con el fin de llevar los valores de caudal medidos por el dispositivo primario a las del medidor.

Para esto fue necesario seleccionar un sistema de adquisición de datos que se encargue de captar las variables de proceso (presión, temperatura, humedad relativa y tiempo), transformarlas a un lenguaje binario y procesarlas para la presentación de resultados en forma continua al métrólogo durante las calibraciones.

El personal del CDT de GAS tiene experiencia en el manejo de sistema *Factory Floor* de la empresa OPTO 22; además de las ventajas económicas y de garantías que sugiere son bastante grandes comparadas con otros paquetes.

La automatización se realizó de manera paralela y sinérgica al diseño y construcción del banco, esta automatización estuvo a cargo de un estudiante en proyecto de la Escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander.

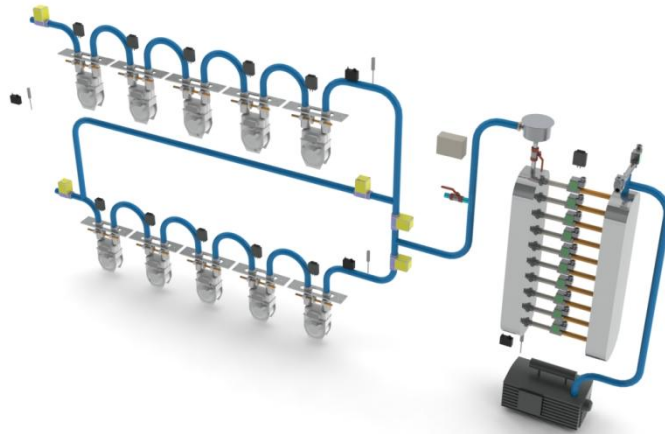
Las variables de proceso, que el sistema de adquisición de datos requiere, fueron identificadas con base a la teoría de flujo compresible y sustentadas por el resultado del análisis del mejor estimado de la medición en la *facilidad tecnológica*.

2.4 LÍNEAS DE FLUJO Y ANÁLISIS DE PÉRDIDAS

Para el análisis de las líneas de flujo y pérdidas del sistema se realizó un diseño preliminar de la estructura, que junto al esquema funcional permitió

evaluar las distancias aproximadas de tubería y la ubicación de las mismas en el banco.

Figura 28. PFD 3D De La Facilidat Tecnológica



El tamaño y material de la manguera a utilizar en las líneas de flujo de aire de calibración, estuvieron delimitadas por los bajos radios de curvatura, tamaño de las conexiones de los MUT, resistencia a la compactación por el vacío generado y la facilidad para el sellado en cada uno de los elementos. Esta última es de vital importancia para evitar fugas (entradas de aire) que entorpecen el proceso de medición.

Tabla 13. Análisis De Pérdidas

Cantidad medidores	10	unidades
ΔP medidor	2,2	mbar
Filtro	10	mbar
Long Tubería recta	5	m
Sección curva B=180°	8	tramos
Sección curva B=90°	7	tramos

Tabla 14. Pérdidas Totales De Presión

PÉRDIDAS TOTALES DE PRESIÓN EN LA LÍNEA AGUAS ARRIBA DEL PLENUM IN (mbar).					
	Q=10 m3/h	1"		3/4"	
5 medidores en serie, tipo G6 y AC-250.	Tubería recta	1,18		4,275	
	Secc curva $\beta=180^\circ$	0,96		2,88	
	Secc curva $\beta=90^\circ$	0,637		1,764	
	Filtro	10		10	
	Medidores	11		11	
	Perdida total	23,777		29,919	
	Q=0,06 m3/h	1"		3/4"	
	Tubería recta	0,00165		0,005	
	Secc curva $\beta=180^\circ$	0		0	
	Secc curva $\beta=90^\circ$	0		0	
	Filtro	10		10	
	Medidores	11		11	
	Perdida total	21,002		21,005	
		Q=2,5 m3/h	1"		3/4"
10 medidores en serie, tipo G1,6.	Tubería recta	0,0377		0,2291	
	Secc curva $\beta=180^\circ$	0,088		0,272	
	Secc curva $\beta=90^\circ$	0,035		0,168	
	Filtro	10		10	
	Medidores	22		22	
	Perdida total	32,1607		32,6691	
	Q=0,016 m3/h	1"		3/4"	
	Tubería recta	0		0	
	Secc curva $\beta=180^\circ$	0		0	
	Secc curva $\beta=90^\circ$	0		0	
	Filtro	10		10	
	Medidores	22		22	
	Perdida total	32		32	
			32,161	21,002	32,669
		ΔP MAX mbar	ΔP MIN mbar	ΔP MAX mbar	ΔP MIN mbar

La estimación de estas pérdidas se logro gracias a la utilización del Programa de perdidas *SF Pressure Drop*, el cual tuvo en cuenta las

recomendaciones anteriormente nombradas, así como características de los elementos como filtro y medidores de diafragma.

Con esta presión se estableció el parámetro de diseño p_0 de las boquillas. Para los cálculos, se trabajó con una caída de presión máxima de 50mbar que representa el caso más crítico que es la operación de los Diez medidores en serie.

2.4.1 Variación de la presión con la temperatura.

Este análisis es importante porque se requiere establecer una prueba de fugas, que nos indique la hermeticidad del sistema y que nos garantice que el volumen de aire que pasa por el medidor es el mismo que pasa por el banco patrón; por ello se determina y cuantifica el cambio de presión debido al efecto térmico y de esta forma tener un parámetro base que nos permita cuantificar el valor del diferencial de presión corresponde una fuga específica. Parámetro importante para las pruebas más largas que superan los 30min.

Las condiciones tenidas en cuenta para este análisis, corresponden a mediciones de los instrumentos de control de la Corporación CDT De GAS y son las siguientes:

Tabla 15. Condiciones Atmosféricas

CONDICIONES ATMOSFERICAS CDT De GAS		
Presión	910	mbar
Humedad	60,00	%
Temperatura	22	°C
Densidad	1,050750	m3/h

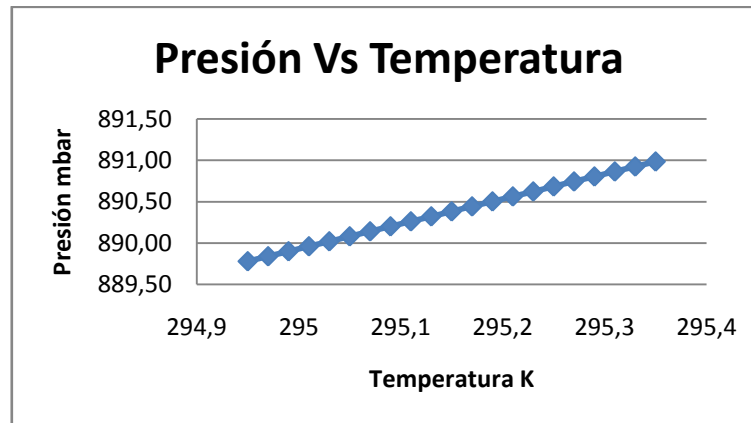
El volumen interno del sistema se aproximó a 10Litros, de los cuales 6,63Litros corresponden al volumen de aire estancado en el *Plenum In*, los otros corresponden a volúmenes de aire en las tuberías y filtro.

Variación de la presión debida a cambios de temperatura internos del sistema, se realizara para una variación de temperatura de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$

Tabla 16. Variación de la Presión con la Temperatura

<i>T</i>	<i>Densidad</i>	<i>P</i>
K	kg/m ³	mbar
294,95	1,051	889,78
294,97	1,051	889,84
294,99	1,051	889,90
295,01	1,051	889,96
295,03	1,051	890,02
295,05	1,051	890,08
295,07	1,051	890,14
295,09	1,051	890,20
295,11	1,051	890,26
295,13	1,051	890,32
295,15	1,051	890,38
295,17	1,051	890,44
295,19	1,051	890,50
295,21	1,051	890,56
295,23	1,051	890,62
295,25	1,051	890,68
295,27	1,051	890,74
295,29	1,051	890,80
295,31	1,051	890,86
295,33	1,051	890,92
295,35	1,051	890,98

Figura 29. Variación de la presión con la temperatura



La variación de presión máxima obtenida es de 1,21mbar. Que corresponde a una variación de volumen de $0,0004\text{dm}^3$, según la norma NTC2728:2005 la fuga no debe superar el $0,1\%Q_{\text{mín}}$ ($0,0016\text{dm}^3/\text{min}$) que corresponde a la tasa de flujo mínima para la cual está prevista la instalación.

2.4.2 Espacio físico del laboratorio.

El laboratorio debe ser suficientemente amplio como para asegurar que los medidores de gas y la *facilidad tecnológica* no estén sometidos unilateralmente a influencias provenientes de la radiación solar u otras fuentes. Se acordó un volumen mínimo neto de aire en el recinto 100m^3 que corresponden a un recinto de 8 m x 4 m x 3 m.

2.5 SISTEMA DE ACOPLAMIENTO MUT

Según los requerimientos expuestos anteriormente (Capítulo 1), el sistema debe permitir el fácil montaje de los diferentes tipos de MUT que se calibraran con la *facilidad tecnológica*, además de la fácil operación del sistema se debe garantizar el buen sello a la entrada y salida de los medidores para evitar fugas y errores de lecturas.

Para identificación de las características de los medidores se recurrió a las hojas técnicas de los medidores que más frecuentemente se calibran en el CDT De GAS, y que corresponden a las designaciones G1,6, G2,5, G4 y G6 para las que se diseñó la *facilidad tecnológica* y que muestran, cuales son los medidores más utilizados en las instalaciones residenciales. Entre estas marcas tenemos:

Figura 30. Dimensiones de los medidores

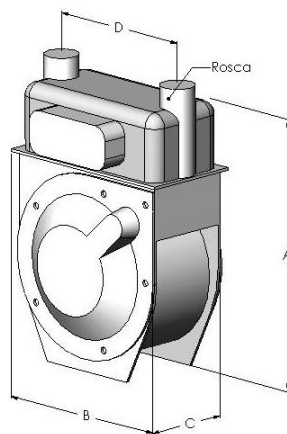


Tabla 17. Características de los Medidores

CARACTERISTICAS DE LOS MEMIDORES								
MARCA	Tamaño	Rosca	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	Sen FLUJO	Peso(kg)
METREX	G1,6	M26x1,5	204,5	156	126,5	130	I-D y D-I	1,46
	G 4	M	240	164	139	130	I-D	2,25
Elster Amco	G4		216	194	166	152,4		2
Sensus	MR8- R275*		342	257,2	216	152,4		6,35
	MR8-R275	1-1/4"	339,33	257,2	216	152,4		6,35
	MR9-R315		342	257,2	216	152,4		6,35
Keukdong	G 1,6	M25X1,5	217,4	164	124,2	100- 130	I-D	1,74

CARACTERISTICAS DE LOS MEMIDORES								
MARCA	Tamaño	Rosca	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	Sen FLUJO	Peso(kg)
Daesung	G1,6	M34XA1	204,5	164	119,25	130		
American Meter	AC250- 5Psig		323	224	221	152		5,44
	AC250- 10Psig		323	224	221	152		5,44

Esta tabla nos muestra modelos diferentes a los nombrados en los requerimientos pero son designaciones semejantes, las cuales se pueden manejar con este banco.

Las dimensiones que se tienen en cuenta para el sistema de acoplamiento son las siguientes:

- ☉ D Separación de los conectores entrada-salida de los MUT (100mm a 153mm).
- ☉ Rosca (M26 a M34)

El sentido de flujo de los medidores es importante para el diseño de las líneas de flujo del banco. Las dimensiones externas y el peso de los medidores se tienen en cuenta para la plataforma de soporte de los actuadores cilíndricos.

2.5.1 Diseño sistema de acoplamiento.

El sistema de acoplamiento tiene dos funciones específicas; permitir variar la distancia entre los conectores para diferentes tamaños de medidor y realizar sello entre el medidor y la línea de aire de calibración.

El sistema de acoplamiento cuenta con los siguientes elementos:

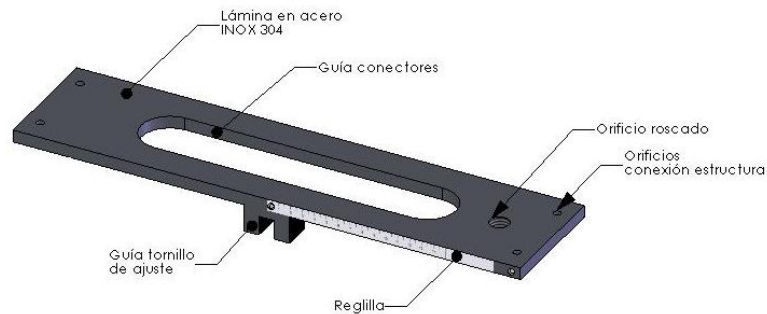
- ☉ Platina de soporte

- ☒ Conector externo
- ☒ Conector interno
- ☒ Tornillo de ajuste
- ☒ Elementos de sello

2.5.1.1 Platina soporte.

La función de esta como su nombre lo indica es soportar los conectores y fijar todo el sistema de acoplamiento a la estructura principal. Las dimensiones de esta platina están determinadas por los tamaños de los MUT, y está en capacidad de soportar las fuerzas de flexión que se presentan al momento de montar los MUT y requeridas para realizar el sello.

Figura 31. CAD Platina Soporte



2.5.1.2 Conector externo.

Este elemento es el encargado de conectar el medidor con las líneas de flujo del sistema, también permite el desplazamiento en el cambio de MUT y soporta el conector interno.

En el diseño del conector se tuvo en cuenta los requisitos de la norma NTC2728:2005, en lo referente a las tomas de presión; siempre tratando de evitar los cambios de sección exagerados que nos generen pérdidas de presión en el sistema.

El conector externo es de cuerpo cilíndrico, tiene en la parte superior un espigo para conexión a manguera y en la parte inferior una rosca para ensamble del conector interno. En la parte frontal tiene solidaria una tuerca con orificio roscado el cual enraza con el tornillo de ajuste y permitir el movimiento del conector y en la parte posterior un espigo para la toma de presión.

El conector que se ubica en la parte derecha del sistema, lleva una placa atornillada, que sirve como elemento indicador de la posición del conector en referencia a la reglilla de la platina soporte.

Figura 32. CAD Conector Externo



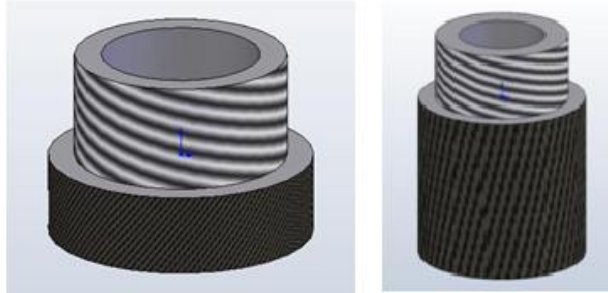
2.5.1.3 Conector interno.

Este elemento es el encargado de alojar el sello cónico. El conector interno es intercambiable y va roscado al conector externo.

Debido al amplio rango de operación del banco, se manejarán dos tamaños de conectores; uno pequeño de conexión amplia para los medidores de tamaños G2,5, G4 y G6 y uno grande de conexión reducida para los G1,6.

Estos elementos están fabricados en acero INOX 304.

Figura 33. CAD Conectores

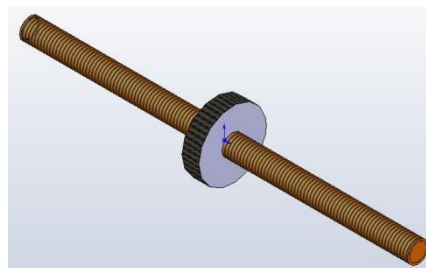


2.5.1.4 Tornillo de ajuste.

Este elemento nos permite variar las distancias entre los conectores, al momento de instalar MUT de diferentes tañamos.

Cuenta con dos elementos, un tornillo con roscas contrarias, cada una de las cuales ocupa la mitad de la longitud del tornillo y una tuerca circular solidaria al tornillo la cual nos permite de manera manual transmitir el giro al tornillo para apertura o cierre de los conectores. El material de la tuerca es en acero INOX 304, mientras el tornillo es en bronce.

Figura 34. CAD Tornillo De Ajuste



2.5.1.5 Elementos de sello.

Manejaremos dos tipos de sellos, un sello plano circular y otro cónico. El primero será instalado entre el conector externo y el conector interno y su objetivo es evitar las fugas a través de estos elementos y el otro estará montado en los conectores internos y nos permite además de evitar las fugas, un rango en la alineación para los MUT.

El diseño cónico se optó luego de la prueba de varios modelos de sello plano en la cual se varió tanto los espesores como el material de los mismos.

Figura 35. CAD Sellos

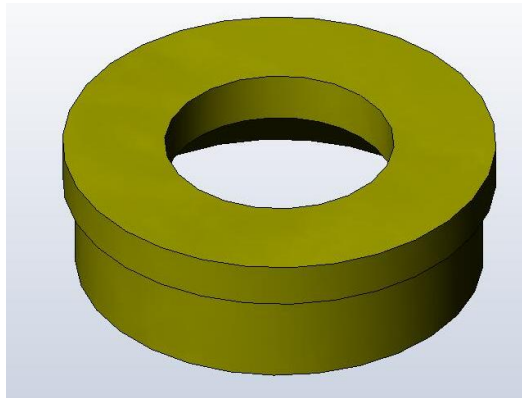
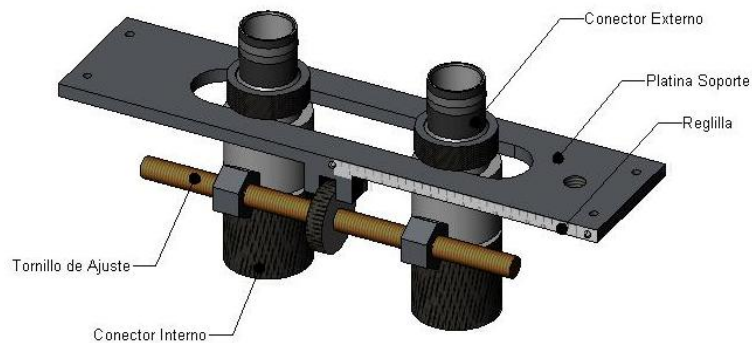


Figura 36. CAD Ensamble Sistema de Acoplamiento



2.5.2 Fabricación Sistema De Acoplamiento.

La fabricación del sistema de acoplamiento se realizo en el laboratorio de mecanizado de la CIC (UIS Guatugara).

Figura 37. Fabricación Conectores



Figura 38. Montaje Sistema De Acoplamiento



2.6 SISTEMA NEUMÁTICO

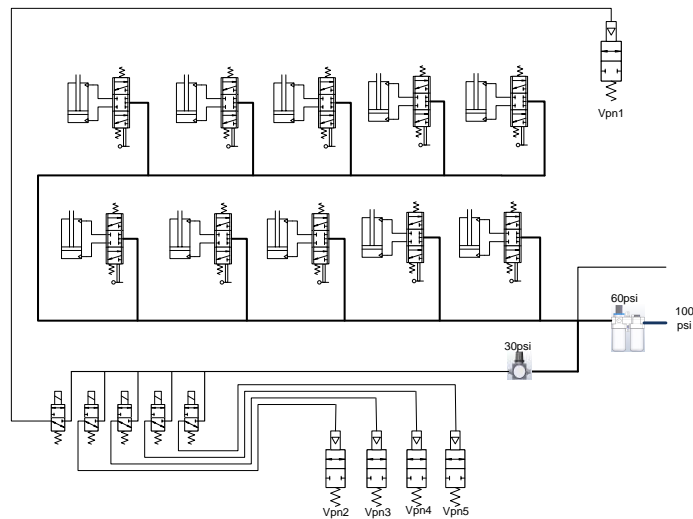
El sistema neumático es el encargado de transmitir la potencia a los elementos móviles de la *facilidad tecnológica*.

Este sistema tiene tres propósitos, los cuales son:

- ✓ Alimentación de válvulas manuales y actuadores neumáticos

- ✓ Alimentación válvulas solenoide y actuación de las válvulas neumáticas(VPn)
- ✓ Alimentación pistola neumática

Figura 39. Sistema Neumático



2.6.1 Requerimientos Del Sistema.

El sistema requiere de dos niveles de presión, el primer nivel es graduado a 60psi se utiliza para alimentación de válvulas manuales y actuadores neumáticos, esta es la presión recomendada luego de hacer pruebas de sello entre el MUT y el sistema de acoplamiento para que no existan fugas y para no dañar el empaque cónico que lo soporta. Esta presión también se utiliza para alimentación de la pistola neumática. Este nivel de presión lo determinamos con la utilización del regulador de presión de la unidad de mantenimiento. El otro nivel de presión que esta tarado a 30psi se utiliza para alimentación válvulas solenoide y actuación de las válvulas neumáticas (VPn); este valor es el recomendado para la correcta actuación de las válvulas. Este nivel de presión se obtiene con la utilización de un regulador de flujo.

2.6.2 Base medidores.

Esta parte es la encargada de soportar el medidor, así como de transmitir la fuerza de actuador neumático para realizar el respectivo sello con el conector. Consta de un disco con un agujero en el centro y una sección cilíndrica que le permite el acople con el actuador, además en la parte superior tiene una capa de neopreno que le brinda más flexibilidad al medidor al momento de acople.

Figura 40. CAD Base Medidores

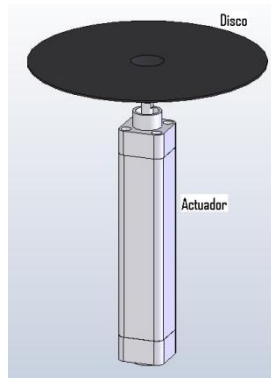


Figura 41. Montaje Base Medidor Y Sistema De Acople



2.7 GENERACIÓN DE FLUJO

El sistema generador de vacío es el encargado de producir la diferencia de presión a través de la boquilla necesaria para que el flujo de aire alcance las condiciones críticas cuando pasa a través de ella.

Como se discutió anteriormente el equipo generador de flujo que se requiere para esta aplicación es una bomba de vacío.

2.7.1 Requerimientos del sistema.

La bomba de vacío debe estar en capacidad de obtener presiones críticas o bloquear las boquillas, independiente de su configuración.

El caudal máximo a pasar por el banco de calibración es de 10m³/h, para determinar la presión requerida se realizo una estimación previa de las pérdidas de presión del sistema (capitula 1.8) y se utilizo la ecuación 16.

Donde P_0 corresponde a la presión en el *Plenum In* que equivale aproximadamente a 855mbar, este valor resulta de restarle a la presión atmosférica 50 mbar que corresponde a la estimación de pérdidas de presión en el sistema; el valor de k es de 1,4 para el aire considerado como gas ideal. Por lo anterior resulta:

$$\left(\frac{P_2}{P_0}\right) = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$P_2 = P_0 * \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$P_2 = 855 * \left(\frac{2}{1.4+1}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}}$$

$$P_2 = 855 * 0.5283$$

$$P_2 = 451,6\text{mbar}$$

El equipo me debe generar un vacío ≥ 455 mbar o alcanzar presiones inferiores a 451,6 mbar absolutos.

Estos son datos teóricos pero en la realidad el valor de P_2 varía con el tamaño de las boquillas. Por tal motivo se busco una bomba de vacío con mayor capacidad de la calculada para evitar posibles inconvenientes con la variación de caudales del banco.

La selección de este equipo tuvo en cuenta las condiciones de operación a las cuales trabajará la *facilidad tecnológica*, dadas las características atmosféricas del lugar donde funcionará.

- ☉ Fluido de trabajo: aire
- ☉ Condiciones de entrada al sistema: $T_e=22$ °C, $P_e=910$ mbar y HR: 50%
- ☉ Altura sobre el nivel del mar: 1000 msnm
- ☉ Caudal: $> 10\text{m}^3/\text{h}$ @ (s)

2.7.2 Selección del elemento generador de flujo.

Para la selección del elemento generador de flujo se tuvo en cuenta los siguientes requerimientos:

- ✓ Conexión a 110VCA
- ✓ Desplazamiento superior a $10\text{m}^3/\text{h}$
- ✓ Capacidad de vacío superior a 455 mbar

La selección de la bomba se delimito a la marca *U.S Vacuum Pumps*; por el precio y las características ofrecidas.

Figura 42. Selección Bomba de Vacío



DRY VAC DV SERIES

MODEL	VT 4.8	VT 4.16	VT 4.25	VT 4.40	KVT 3.80	KVT 3.100	VTLF 250	VTLF 400	VTLF 500
Displacement, CFM	5.6	11	18	28	48	69	173	280	353
Max Cont. Vacuum ("Hg)	25" Hg				27" Hg		25" Hg	22.5" Hg	
Motor, Kw	.56	.94	1.2	2	5		10	18	24
Suction Connection	3/8"	1/2"	3/4"		1"	1-1/2"	2"	4"	
Speed (RPM)	3300				1740		1150	850	1150
Weight, Lbs	24	50	57	85	178	230	865	1090	1100
Noise Level dBa	59	64	67	72	75	77	81	78	83

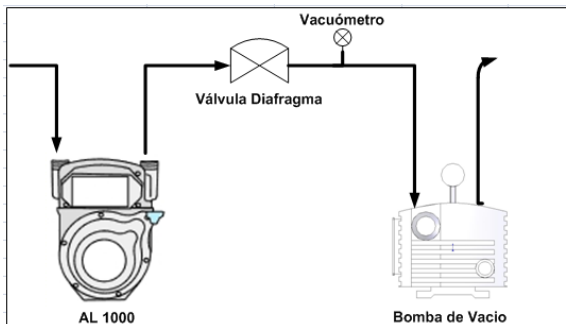
Capacidad de la bomba de vacio seleccionada VT 4,16:

- ✓ 11CFM, que equivale a 18,7m³/h.
- ✓ 25" Hg, que equivale a 846,6mbar.

2.7.3 Verificación de capacidad de la bomba.

Para la verificación de la capacidad de la bomba se utilizo el siguiente montaje, con el cual se varía la presión de succión mediante la utilización de una válvula tipo diafragma.

Figura 43. Montaje Prueba De Operación De La Bomba

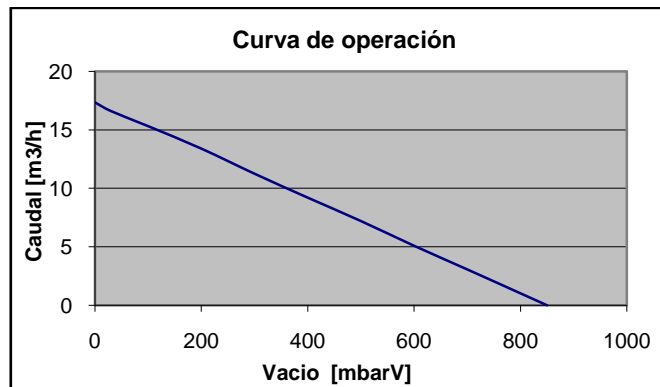


El caudal de prueba es obtenido conectando en serie un medidor tipo diafragma AL-1000 el cual nos registra el volumen de aire. Esta prueba la realizamos en un determinado tiempo para determinar el caudal de paso.

Tabla 18. Resultados De Las Pruebas

Vacio [mbarV]	Pabs [mbar]	Q [m ³ /h]
30	875	16,608
100	805	15,315
200	705	13,397
300	605	11,251
400	505	9,207
500	405	7,207
600	305	5,091
700	205	3,069
800	105	1,027

Figura 44. Curva Q_v vs Vacio



2.7.4 Conexiones y ubicación en el banco de calibración.

La bomba se conecta aguas abajo del *Plenum Out* como lo muestra el esquema funcional (figura 22), mediante conexión por manguera.

La bomba está montada en una estructura independiente que presenta los siguientes beneficios:

- ✓ Evitar transmisión de vibraciones a la estructura principal.
- ✓ Aislarla en caso de ruido excesivo
- ✓ Ubicación en un sitio alejado del banco para evitar transmisión de calor.

Figura 45. Montaje De La Bomba De Vacío



2.8 ESTRUCTURA

Como se describió anteriormente la *facilidad tecnológica* es una herramienta compacta, que permita la integración armónica de todos los elementos descritos anteriormente, además incorpora las características implícitas que conlleva un buen diseño como lo son: fabricabilidad, mantenibilidad, ergonomía; estas enfocadas siempre a la obtención de los bajo costos sin dejar de lado la buena calidad en los elementos de construcción.

Teniendo en cuenta requerimientos como espacio físico disponible, cantidad de medidores a calibrar y la incorporación de todos los sistemas que conlleva la construcción de un banco de calibración con buenas cualidades metrológicas; se utilizo una estructura metálica, con un esqueleto en perfiles de acero, recubierto por láminas algunas fijas y otras desmontables y

soportada por ruedas que le permiten el fácil desplazamiento considerando que es una estructura bastante robusta y pesada.

2.8.1 Dimensionamiento.

Para el dimensionamiento se tuvo en cuenta las siguientes características:

- ☒ Espacio físico disponible
- ☒ Cantidad de medidor a calibrar
- ☒ Líneas de flujo y elementos de control
- ☒ Subsistemas mecánicos
- ☒ Banco patrón
- ☒ Ergonomía
- ☒ Computador
- ☒ Automatización

El computador y la parte automatización de la *facilidad tecnológica*; no se describen a profundidad debido a que en el presente libro solo se enmarcan los elementos mecánicos; pero ya que la *facilidad tecnológica* es una herramienta que incorpora parte de automatización y control y análisis de datos (parte importante del banco que permiten la correcta operación de todos los subsistemas y elementos) estos aspectos se tuvieron en cuenta en el dimensionamiento de la estructura.

2.8.1.1 Computador.

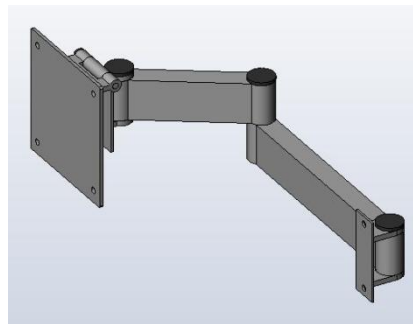
Consta de cuatro elementos que son: monitor, CPU, teclado y mouse; además de los cables y tomas de energía que requieren.

El computador seleccionado tiene las siguientes dimensiones:

- ✓ Monitor: 550x330x65mm (ancho, alto y profundo)
- ✓ CPU: 360x175x430mm (ancho, alto y profundo)

Adicional a estos elementos se busco darle a la *facilidad tecnológica* un amplio rango de visualización del proceso para el cual se incorporo un brazo soporte, sobre el que va montado el monitor y que le brinda flexibilidad de movimiento del mismo. Esto permite que el operario observe desde cualquier parte del banco el proceso y pueda realizar varias tareas al mismo tiempo.

Figura 46. CAD Brazo Monitor



2.8.2 Distribución de los elementos en el banco.

La *facilidad tecnológica* está distribuida de la siguiente manera:

1. Zona MUT esta parte consta de dos zonas, zona1 y zona2; las cuales están habilitadas para el montaje de 5 medidores cada una y contienen todos los elementos e instrumentación que estas requieren para el montaje y toma de datos los cuales ya han sido nombrados anteriormente.
2. Banco Patrón, en esta sección se encuentra ubicado el banco de boquillas sónicas.
3. Computador, es la parte reservada para el montaje e instalación del computador del banco.
4. Automatización, es el espacio disponible para la ubicación de toda la parte de automatización además de un UPS que brinda más autonomía a esta herramienta.

5. Sistema generador de vacío, a pesar de que la bomba de vacío está montada sobre una estructura independiente, tiene un espacio en la *facilidad tecnológica* en el cual puede incorporarse.

Figura 47. CAD Distribución Elementos En El Banco



2.8.3 Diseño De La Estructura.

En el diseño de la estructura se tuvo en cuenta que esta debía ser llamativa por lo cual se incorporaron curvas para dar un aspecto más acorde al tipo de elemento de medición que utiliza (boquillas).

Figura 48. Imagen CAD Estructura Soporte



En este se incorpora la mayoría de elementos y sistemas que lleva el banco así como su forma de montaje, para ello se elaboraron imágenes CAD de cada uno de ellos; con esto se buscaba:

- ✓ Determinar dimensiones reales de la estructura.
- ✓ Asignar ubicación precisa de los elementos en el banco
- ✓ Verificar funcionalidad de los elementos
- ✓ Delimitar elementos de montaje

Para la distribución del cableado y las líneas neumáticas el banco cuenta con canaletas, la principal está ubicada verticalmente y conecta cada zona del banco y otras secundarias que van internamente por toda la estructura.

Figura 49. Imagen CAD Facilidad Tecnológica



2.8.4 Fabricación Estructura.

Debido al diseño no convencional de la estructura, se presento inconveniente al momento de buscar una empresa que se comprometiera a fabricarla según los planos y acabados requeridos; la empresa MEGATONOS adquirió el compromiso de la fabricación de la estructura; que contenía implícita los siguientes elementos:

- ✓ Construcción esqueleto, adquirir, dimensionar y soldar los perfiles requeridos.
- ✓ Montaje de láminas, adquirir y dimensionar las láminas en los calibres adecuados además de su posterior ensamble a la estructura sean fijas o desmontables.
- ✓ Fabricación de la estructura soporte de la bomba de vacío.
- ✓ Construcción de la canaleta principal la cual estará fabricada en lámina de acero.

Luego de la fabricación y ensamble de estos elementos se pintarán con pintura en polvo electrostática en tres colores.

2.8.4.1 Esqueleto.

Para la construcción del esqueleto se utilizaron los siguientes perfiles:

- ✓ 1"x1" cal 16
- ✓ 1"x1" cal 14
- ✓ 2"x1" cal 16
- ✓ 2"x2" cal 16
- ✓ Perfil en C de 3"x1"x1/8"

Para las secciones más largas y que soportan mas fuerzas, se incorporaron refuerzos como nervios o pie de amigos.

La estructura va montada sobre 6 ruedas de 4 pulgadas con rodamiento de esferas, cubierta de hule y freno; que le dan al banco buena movilidad.

Figura 50. Fabricación Estructura (Esqueleto)



Para facilidad de la construcción se acordó que la mayoría de láminas que son curvas estén soldadas al esqueleto a excepción de las puertas las cuales se requieren con esas características.

Aquellas láminas que no están solidarias a la estructura, cuentan con acoples rápidos tipo balón que permiten el fácil montaje y desmontaje de las mismas. La parte inferior correspondiente a la zona de medidores cuenta con puertas de corredera que permiten un fácil acceso.

La mayoría de láminas cuentan con refuerzos, aquellas que son desmontables tienen agujeros o manijas para facilitar del desmontaje.

Figura 51. Ensamble Láminas Fijas



Figura 52. Montaje De Láminas Desmontables



Figura 53. Montaje De Puertas



Algunos láminas tienen paneles en acrílico transparente, dichos paneles se incorporaron para permitir que el operario observara el funcionamiento de algunos elementos que requieren supervisión constante y para visualizar los elementos más representativos como es el caso del banco de boquillas.

Antes de dar por terminada la estructura y enviarla a pintura muchos de los elementos principales que ya estaban terminados o en su etapa final, fueron pre ensamblado para verificar el dimensionamiento y funcionalidad de la *facilidad tecnológica* y que permitieron realizar modificaciones inherentes al proceso de fabricación.

Figura 54. Estructura Luego De La Pintura



Figura 55. Ensamble de la estructura completa



2.8.5 Ensamble De Componentes.

El ensamble de los elementos mecánicos estuvo acorde con el diseño y ubicación que se les había asignado previamente.

Este ensamble se realizo conjuntamente entre la parte mecánica y la parte de automatización y control para evitar errores de montaje.

2.8.5.1 Montaje del sistema de Soporte y conexión de medidores.

La operación conjunta de este sistema es importante desde el punto de vista de funcionalidad de la *facilidad tecnológica* ya que este permite manejar los diferentes tamaños de los medidores minimizando el riesgo de fugas.

Figura 56. Montaje Del Sistema De Soporte Y Conexión De Medidores



Luego de varias pruebas a este sistema se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- ✓ Los sellos planos no brindan la suficiente deformación que se requiere para evitar las fugas.
- ✓ El material de los sellos debe ser capaz de recuperar sus propiedades y forma luego de suspendida la fuerza.
- ✓ Los sellos cónicos se consideran la mejor alternativa para los problemas de alineamiento presentados por la variación de tamaño de los MUT y por la ubicación manual de estos en la base.
- ✓ La presión requerida en el actuador neumático es de 50psi, con esta presión se garantiza el sello para todos los medidores y se evita el daño a los sellos.

- ✓ Se requiere de un sello plano adicional entre la parte superior del cuerpo del actuador y la estructura, con el fin de compensar desalineamiento del actuador.
- ✓ El sistema de conector incluido las conexiones a la línea neumática principal, no presentan fugas.
- ✓ El sistema de intercambio de conectores es rápido y funcional.
- ✓ El sistema de ajuste de la separación de los conectores está sujeto a la rigidez de la manguera de la línea neumática principal.

2.8.5.2 Montaje del banco patrón.

El banco patrón está ubicado en la parte superior derecha de la estructura, se puede acceder fácilmente a él, ya que cuenta con una puerta frontal y dos paneles desmontables; el posterior y el superior, el panel superior cuenta con un cooler para la extracción del calor producido por las válvulas.

Figura 58. Montaje Del Banco Patrón



2.8.5.3 Montaje del computador.

La CPU está montada sobre una bandeja soldada a la parte derecha de la estructura; mientras que el monitor está montado sobre el brazo soporte. El teclado se encuentra ubicado sobre la lámina en la parte adjunta al monitor, pero tiene la opción de montaje en porta teclado.

Figura 59. Montaje Del Computador



3. FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE CALIBRACIÓN

La *facilidad tecnológica* está en la capacidad de calibrar de forma consecutiva desde 1 hasta 10 medidores de la misma denominación o tamaño, con facilidad de manejo independiente de cada medidor.

3.1 PFD⁸ Y DISTRIBUCIÓN POR ZONAS

Para facilitar la calibración de grandes lotes de medidores la *facilidad tecnológica* consta de 2 zonas que pueden trabajar conjuntamente o de manera separada al momento de una calibración.

3.1.1 Accionamiento de válvulas.

Luego del montaje de lo MUT en la respectiva zona de calibración se habilitan las líneas de flujo correspondientes.

- ✓ La *facilidad tecnológica* está diseñada para trabajar a máxima capacidad esto es para el montaje de Diez MUT; en esta disposición no se activa ninguna válvula y se mantiene Vm1 cerrada y Vm2 abierta.
- ✓ Si se requiere solamente la Zona 1, cerramos VPn2 y VPn3 y abrimos VPn4.
- ✓ Para trabajar Zona 2 únicamente, se abre la válvula VPn5 y cerramos VPn2.

Las válvulas Vs se actúan según el caudal de paso que se requiera.

⁸ PFD, Process Flow Diagram, Diagrama de flujo de proceso

3.1.2 Montaje De Los MUT

Pasos a seguir en el montaje de los medidores

- ✓ Determinar el tamaño de los MUT

Este paso es importante para seleccionar el tipo de conector más adecuado de los dos disponibles.

- ✓ Determinar el número de MUT a calibrar

El número de MUT a calibrar nos permite identificar el modo de operación de la *facilidad tecnológica*, si va a trabajar por zonas o completamente o si se requiere de medidores sustitutos para la calibración.

El operario tiene la opción de seleccionar en que zona quiere trabajar en el caso de calibración de 1 a 5 MUT.

Figura 60. Montaje Medidores Zona 1



Figura 61 Montaje Medidores Zona 1 Y Zona 2



3.2 MEDIDORES SUSTITUTOS

La aplicación de estos radica en la necesidad de conducir el aire de calibración a través de toda la *facilidad tecnológica* cuando no existe la totalidad de medidores requeridos. Se construyeron 4 medidores sustitutos los cuales se requieren en su totalidad si se calibra ya sea 1 o 6 MUT.

Tabla 19. Utilización De Los Medidores Sustitutos

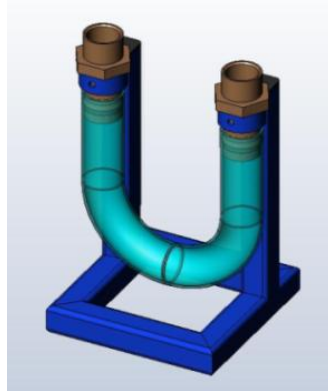
Utilización de los medidores sustitutos		
# MUT a Calibrar	# Med Sus	Ubicación
1	4	Zona 1 o Zona 2
2	3	Zona 1 o Zona 2
3	2	Zona 1 o Zona 2
4	1	Zona 1 o Zona 2
5	0	NA
6	4	Zona 2
7	3	Zona 2
8	2	Zona 2
9	1	Zona 2
10	0	NA

3.2.1 Diseño Medidores Sustitutos.

El tamaño del medidor sustituto está basado en la geometría (altura y separación de conexiones) del medidor G1,6, ya que este tipo de medidor es el más común pero puede ser utilizado para sustituir a cualquier medidor del rango de operación del banco.

Este medidor consta de tres elementos: soporte, conectores con espigo y una manguera. Su función es permitir el aire de calibración pase por las zonas con la menor pérdida posible.

Figura 62. CAD Medidor Sustituto



3.2.2 Fabricación Medidor Sustituto.

El soporte del medidor sustituto está construido en Acero de perfil cuadrado de 1"x1" cal 18 con tapones de caucho en la puntas y pintado del mismo color de la estructura.

Los conectores con espigo están elaborados en bronce y la manguera es la misma utilizada en la línea principal de la *facilidad tecnológica*.

Figura 63. Medidor Sustituto



3.3 CALIBRACION BANCO PATRON

Como se definió anteriormente la calibración de las boquillas se realizo con patrones primarios tipo campana gasométrica y tipo pistón; patrones que se

encuentran en la Corporación CDT de Gas permitiendo inter comparación entre los resultados obtenidos con estos patrones.

Para los caudales más grandes del banco de boquillas se utilizó el patrón tipo campana gasométrica y para los más pequeños el patrón tipo pistón.

El propósito principal de la calibración es determinar el caudal real de las boquillas en comparación al caudal nominal con el que fueron diseñadas y estimar las incertidumbres asociadas a estos valores.

Figura 64. Calibración Banco Patrón Con Campana Gasométrica



3.4 CALIBRACIÓN DE LAS BOQUILLAS

Lo más apropiado para el banco de boquillas es que se obtuvieran resultados de calibración para todos los caudales de prueba. Para el banco de boquillas de la *facilidad tecnológica* se realizaron calibraciones a todas las boquillas de manera individual y luego algunas calibraciones de boquillas operando en paralelo para estimar la reproducibilidad de volumen y determinar posible efectos de interferencia entre boquillas.

Pruebas preliminares a la calibración permitieron determinar las presiones de bloqueo requeridas para la obtención del flujo crítico sónico en las boquillas. Estas pruebas mostraron la necesidad de variar los niveles de presión de succión de la bomba de vacío. Esto se solventó con la instalación de orificios en la entrada de las válvulas de bypass, ocasionado una disminución del área de succión y permitiendo obtener 3 niveles de presión.

Tabla 20. Relación De Bloqueo Y Control De Válvulas De *By-pass*s

CAUDALES DE PRUEBA DE BANCO BSONIC						
#	Comb para 25Q	m3/h	dm3/min	Bypass		
				Válvula 1/2" NPT	Válvula 1/4" NPT	$\Delta P_{plenums}$ (psi)
				Orificio 3mm	Orificio 0,8mm	
1	B1	0,016	0,2667	on	on	8,71
2	B2	0,025	0,4167	on	on	8,70
3	B1+B2	0,041	0,6833	on	on	8,70
4	B3	0,05	0,8333	on	on	8,70
5	B1+B3	0,066	1,100	on	on	8,69
6	B2+B3	0,075	1,250	on	on	8,69
7	B4	0,125	2,083	on	on	8,65
8	B3+B4	0,175	2,917	on	on	8,61
9	B5	0,25	4,167	on	on	8,56
10	B2+B4+B5	0,4	6,667	on	on	8,45
11	B6	0,5	8,333	on	on	8,37
12	B4+B6	0,625	10,42	on	on	8,27
13	B3+B5+B6	0,8	13,33	on	on	8,15
14	B7	1	16,67	on	on	8,02
15	B5+B7	1,25	20,83	on	on	7,83
16	B4+B6+B7	1,625	27,08	on	on	7,55

17	B5+B6+B7	1,75	29,17	on	on	7,46
18	B8	2	33,33	on	on	7,31
19	B6+B8	2,5	41,67	on	on	6,93
20	B5+B6+B8	2,75	45,83	on	on	6,75
21	B9	4	66,67	on	off	6,13
22	B5+B9	4,25	70,83	on	off	5,96
23	B10	6	100,0	off	on	7,73
24	B7+B10	7	116,7	off	on	7,00
25	B9+B10	10	166,7	off	off	5,11

La VPn11 y la VPn12 corresponden a válvulas normalmente cerradas; con conexión a 1/2"NPT y 1/4"NPT respectivamente, los orificios instalados en estas válvulas de bypass son de 3mm para la VPn11 y de 0,8mm para la VPn12.

Como se aprecia en la siguiente tabla, los valores de caudal obtenidos para la prueba de boquillas en paralelo, corresponde a la sumatoria de los caudales de las boquillas operando de manera individual a las mismas condiciones de referencia.

Tabla 21. Resultados Calibración Boquillas

Patrón	Boquilla	Qv,20,tr (dm3/min)	Desv est	UQv (dm3/min)	k
PISTON	BS01	0,2635	0,0003	0,0005	2,0739
		0,2662	0,0003	0,0005	2,1199
	BS02	0,4070	0,0002	0,0006	1,9944
		0,4088	0,0002	0,0005	1,9853
	BS03	0,8434	0,0003	0,0010	1,9670
		0,8447	0,0001	0,0011	1,9722
	BS04	2,1433	0,0006	0,0031	1,9893
		2,1450	0,0001	0,0024	1,9625
	BS05	4,1637	0,0007	0,0048	1,9621

Patrón	Boquilla	Qv,20,tr (dm3/min)	Desv est	UQv (dm3/min)	k
		4,1602	0,0003	0,0053	1,9685
	BS0304	2,9902	0,0002	0,0034	1,9623
		2,9905	0,0006	0,0036	1,9648
	BS0203	1,2525	0,0001	0,0016	1,9743
		1,2540	0,0003	0,0015	1,9656
	BS0103	1,1099	0,0002	0,0015	1,9833
		1,1114	0,0003	0,0014	1,9771
	CAMPANA	BS06	8,5347	0,0051	0,0173
8,5751			0,0007	0,0166	1,9908
BS07		16,2716	0,0054	0,0319	1,9908
		16,3430	0,0060	0,0322	1,9905
BS08		32,0708	0,0074	0,0577	1,9886
		32,0666	0,0057	0,0575	1,9890
BS09		63,9226	0,0104	0,1100	1,9870
		63,9126	0,0063	0,1097	1,9873
BS10		97,8631	0,0174	0,1700	1,9861
		97,8593	0,0038	0,1692	1,9864
BS0910		161,9585	0,0227	0,2879	1,9837
		161,8421	0,0502	0,2913	1,9835
BS0710		114,1498	0,0318	0,2007	1,9853
		114,0956	0,0261	0,2000	1,9853
BS0509		68,0509	0,0126	0,1173	1,9870
		68,0199	0,0033	0,1167	1,9873
BS050607		28,9516	0,0058	0,0519	1,9890
BS040607		26,9394	0,0122	0,0535	1,9905

4. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS MUT

4.1 GENERALIDADES

Este método se basa en la comparación entre el volumen medido por el medidor objeto de calibración y el volumen determinado a partir de la conversión de los caudales de referencia de cada una de las boquillas en operación (caudales determinados a partir de la calibración de las boquillas) al estado termodinámico del medidor en prueba, teniendo en cuenta el tiempo de duración de la calibración.

Este método es utilizado por laboratorios de metrología reconocidos internacionalmente

Para que estos datos correspondan a valores reales se debe seguir un procedimiento de calibración el cual estipula los pasos para la realización de las pruebas.

4.1.1 Pasos generales del procedimiento de calibración:

- a) Determinar el tipo y cantidad de MUT a calibrar.
- b) Atemperar los medidores: Consiste en mantener el medidor a calibrar por lo menos 5 horas antes de iniciar la calibración a las mismas condiciones de presión, temperatura y humedad del banco patrón para obtener la estabilidad térmica.
- c) Realizar el montaje del medidor aguas arriba del banco de boquillas, de acuerdo a la zona y con el tipo de conexión requerida por el medidor.
- d) Verificar que no existan fugas en el sistema.

- e) Ubicar el sensor óptico enfocando con el haz de luz la zona que atraviesa el reflectivo, mientras no pase la aguja el LED verde del amplificador de fibra óptica permanece activo y sin parpadear. Utilizar la pistola neumática para llevar el odómetro de cada medidor a la misma cifra.
- f) Poner en funcionamiento la *facilidad tecnológica*; garantizando que la bomba de vacío permanezca operando por lo menos 10 minutos antes de iniciar la toma de datos.
- g) Revisar presiones del sistema: Son tres presiones del sistema, la primera de 100psi que corresponde a la presión de suministro y que se conecta directamente a la unidad de mantenimiento; la segunda de 50psi que es regulada por la unidad de mantenimiento alimenta los actuadores neumáticos y la pistola de aire y se conecta a un regulador el cual está tarado a 30psi, esta presión es utilizada para la apertura y cierre de las válvulas VPn.
- h) Insertar datos de calibración como son (numero de medidores en prueba, zonas habilitada, los caudales de calibración, número de repeticiones y valores relacionados con el medidor).
- i) Verificar que las condiciones de temperatura ambiente y humedad se encuentran dentro de rango. Los rangos admisibles para la temperatura y la humedad relativa del cuarto de calibración son $22 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 10\%$ respectivamente. Si las condiciones de temperatura y humedad no permanecen estables se debe esperar hasta que se estabilicen.
- j) Ejecutar estrategia de calibración
- k) Al finalizar la calibración guardar los datos, para generar el informe de calibración.
- l) Desmontar medidores
- m) Analizar los resultados del informe de calibración, y con base en este se decide expedir el Informe de Resultados de Calibración o repetir la calibración. Una calibración puede requerir repetición si se obtiene baja

repetibilidad o si alguna variable se salió de control (temperaturas, humedad, pérdida de presión, etc.).

n) Retirar de operación la *facilidad tecnológica*.

4.1.2 Prueba De Fugas.

La prueba de fugas nos brinda la certeza de que los caudales volumétricos que pasan por el MUT corresponden a los mismos del banco patrón. Como se discutió anteriormente los cambios de temperatura generan cambios en la presión interna del sistema, pero esta se considera como despreciable, además la prueba de fugas requiere de tiempos relativamente cortos en comparación al tiempo máximo de calibración de los medidores.

4.1.2.1 Prueba de fugas inicial.

La prueba de fugas inicial se realizó a presión positiva con instrumento que determina la variación de presión contenida en un recinto cerrado en un determinado tiempo (ATeQ). Esta se realizó previamente para verificar fugas en el banco patrón y luego para verificación de las líneas de toda la *facilidad tecnológica*.

Figura 65. Prueba De Fugas Con El ATeQ



4.1.2.2 Prueba de fugas en operación.

La prueba de fugas en operación se realiza antes de cada calibración luego del montaje de lo MUT que van a ser probados.

Esta prueba se realizara de manera automática como una estrategia de la parte de automatización de la *facilidad tecnológica*.

Etapas de la prueba de fugas:

- a) Montaje de los MUT y selección del escenario de calibración
- b) Encender la bomba de vacio
- c) Correr estrategia de prueba de fugas

Estrategia de prueba de fugas:

- Inicialmente se mantiene todo el circuito abierto como si se estuviera calibrando, durante esta operación las válvulas de bypass permanecen cerradas y solo está habilitada la boquilla #5 del banco patrón. Esta operación se ejecuta durante 20 segundos (tiempo suficiente para que se alcance la presión de operación del sistema).
- Luego de los 20 segundos se apaga la bomba y se cierra la válvula #5 del banco de boquillas.
- Se deja 30 segundos para la estabilización de las presiones del sistema.
- Terminados los 30 segundos se observa el valor del medidor de presión diferencial del banco patrón, si este registra valores superiores a los consideraos como ruidos o valores superiores correspondientes a pequeños cambios de temperatura; el sistema tiene fugas. Esta operación también la podemos realizar mirando la variación de presión que se presenta en el medidor de presión absoluta montado en el *Plenum In o Plenum* de boquillas.
- Si se presentan fugas, lo siguiente es determinar la zona donde estas ocurren. Para esto realizamos el mismo procedimiento pera aislamos las zonas con las válvulas VPn y observamos el valor de los medidores de presión absoluta de las zonas PT1 y PT2 respectivamente.

Luego de encontrada la fuga, se procede a solucionarla y nuevamente se corre la estrategia hasta que el sistema indique que se puede continuar con la calibración.

4.2 PRUEBA CALIBRACIÓN MEDIDORES

La prueba de calibración se realizó para comprobar la operatividad del banco de calibración, la integridad de todos los elementos y conexiones, y finalmente para obtener resultados de calibración para los MUT que nos permitan establecer las condiciones metrológicas en que se encuentra y los valores de incertidumbre asociados a esta calibración.

Para esta prueba seguimos los pasos generales del procedimiento de calibración descritos en el numeral 4.1.1.

4.2.1 Montaje prueba de calibración de medidores en la *facilidad tecnológica*.

Para la prueba de calibración se instalaron 4MUT con denominación G1,6 y de un medidor sustituto y utilizamos la zona 1 de la *facilidad tecnológica* como se muestra en la siguiente figura.

Figura 66. Montaje Prueba De Calibración De Medidores En La Facilidad Tecnológica



4.2.2 Iniciación De La Prueba.

Se realiza el registro de la información de los medidores. Para ello se crea un nuevo servicio en la plataforma MDM⁹, sistema encargado de la operación del banco.

- ✓ En la creación del nuevo servicio, se incorporan los datos del cliente en este caso el CDT de GAS por ser una calibración de prueba, datos del servicio y los parámetros de calibración.
- ✓ Por experiencia de los funcionarios del CDT de GAS, 4 puntos de caudal y 3 repeticiones por punto proporcionan un buen resultado de calibración.
- ✓ Luego se registran los datos de las características técnicas o *datasheet* de los MUT.
- ✓ Luego se inicia el servicio, luego de corroborar la información registrada.
- ✓ Se verifica el montaje y ubicación de los MUT
- ✓ Se configura la prueba, en donde se revisan los caudales de calibración, se introduce la secuencia (calibración ascendente o calibración descendente) y se determina el tiempo total de la prueba.
- ✓ Antes de iniciar la prueba se realiza una verificación del hardware, la cual indica el estado de comunicación de los sensores-transmisores del sistema.

⁹ MDM, Metrological Data Management

- ✓ Luego se realiza la prueba de fugas.
- ✓ Posterior a la prueba de fugas, se comienza la calibración en la que el sistema de forma automática toma los datos, los almacena y los guarda.
- ✓ Finalmente se realiza el análisis de datos.

4.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

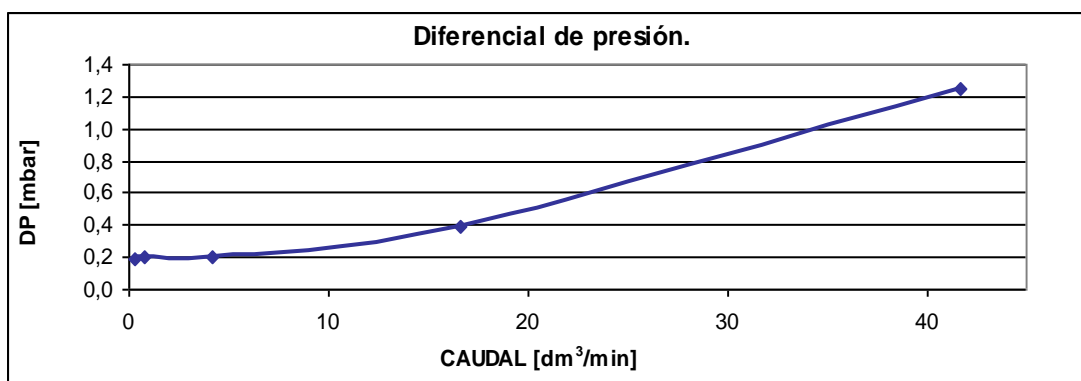
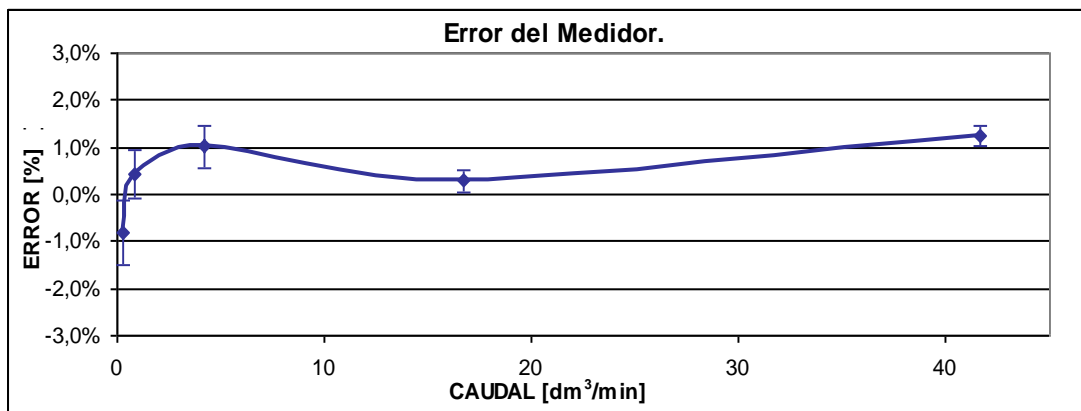
Condiciones de prueba:

Gas de Calibración	Aire
Presión atmosférica	903,6 ± 1,8 mbar
Temperatura cuarto de ensayos	22 ± 0,3 °C
Humedad relativa	57,2 ± 2,0 %HR

- Resultados MUT1:

Tabla 22. Resultados MUT1

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	-0,83%	0,19	0,14%	0,29%	1,97
4,17	20	1,01%	0,20	0,04%	0,25%	2,01
16,67	70	0,28%	0,39	0,05%	0,26%	2,00
41,67	210	1,23%	1,25	0,07%	0,30%	1,98



La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de $\pm 0,28\%$ ($k=2,01$), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

- Resultados MUT2:

Tabla 23. Resultados MUT2

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm³/min]	[dm³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	-0,66%	0,47	0,19%	0,30%	1,97
4,17	20	-0,37%	0,54	0,11%	0,31%	1,97
16,67	70	-0,36%	0,58	0,11%	0,28%	1,97
41,67	210	-0,75%	0,74	0,15%	0,26%	1,96

La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de $\pm 0,27\%$ ($k=2,01$), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

- Resultados MUT3:

Tabla 24. Resultados MUT3

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	-2,15%	0,27	0,15%	0,23%	1,98
4,17	20	-0,87%	0,28	0,08%	0,27%	1,99
16,67	70	-0,50%	0,29	0,12%	0,26%	2,00
41,67	210	-0,36%	0,33	0,01%	0,29%	2,00

La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de $\pm 0,25\%$ ($k=2,01$), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

- Resultados MUT4:

Tabla 25. Resultados MUT4

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	0,02%	0,26	0,07%	0,31%	1,97
4,17	20	0,89%	0,28	0,06%	0,29%	1,99
16,67	70	-0,28%	0,3	0,01%	0,26%	1,99
41,67	210	-0,20%	0,35	0,01%	0,25%	1,99

La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de $\pm 0,28\%$ ($k=1,98$), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

5. CONCLUSIONES

Después de desarrollar el presente proyecto se puede concluir:

- ④ Se logro que la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander continuara apoyando procesos de cambio por el progreso económico en la región y al Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas mantener y mejorar el control de los procesos de calibración de medidores tipo diafragma; obteniéndose excelentes resultados a nivel personal y profesional, reflejados en el cumplimiento a cabalidad del proyecto.
- ④ Con el banco se amplió la infraestructura existente en Colombia para la calibración de medidores de gas de bajo caudal tipo diafragma con denominaciones G1,6, G2,5, G4 y G6.
- ④ Se adquirieron boquillas construidas según la Norma ISO9300:2005 y recomendaciones de la PTB Tomo 25, de excelentes cualidades metrológicas como lo muestra la calibración de las mismas.
- ④ La calibración de las boquillas con patrones tipo pistón y tipo campana gasométrica del CDT de GAS permiten trazabilidad de los resultados obtenidos de la *facilidad tecnológica* a patrones Internacionales.
- ④ La *facilidad tecnológica* permite realizar calibraciones con niveles de incertidumbre en la estimación del error del medidor de $<0,4\%$ con $(k=2)$, como lo indican los resultados presentados.

- ④ El uso de una herramienta CAD facilitó la etapa de diseño al permitir la visualización de diferentes alternativas de montaje y la obtención de los planos necesarios para la construcción de los elementos constitutivos del banco.

- ④ El sistema de acoplamiento permite la instalación de los diferentes medidores de manera práctica garantizando en cada momento el sello de la conexión gracias al empaque cónico que posee el conector.

- ④ La selección de un buen equipo generador de flujo en este caso la bomba de vacío facilitó el alcanzar las condiciones de operación del banco.

- ④ Los sensores y dispositivos seleccionados para el sistema de adquisición de datos cuentan con las especificaciones necesarias para que el banco opere bajo los niveles de incertidumbre proyectados.

- ④ La integración de la mecánica, la electrónica y de sistemas computacionales permitieron obtener una herramienta de calibración compacta, atractiva, fácil de operar y lo más importante funcional; sobrepasando las expectativas presentadas en la etapa de diseño.

- ④ El trabajo sinérgico entre la parte mecánica y la parte electrónica desarrollada por estudiantes de estas carreras de la UIS, permitió obtener una herramienta de buenas cualidades metrológicas.

6. RECOMENDACIONES

- ④ Realizar estudios con banco patrón de calibración de la *facilidad tecnológica* que permitan identificar los efectos de interferencia en la utilización de boquillas operando en paralelo sobre un mismo tubo de medida o plenum.
- ④ Aprovechar el banco patrón para realizar modelos estadísticos relacionados con el estado metrológico de los medidores tipo diafragma que se prueban.
- ④ Continuar realizando pruebas en el banco patrón que nos permitan obtener datos experimentales sobre los efectos de realizar calibraciones en serie de Uno hasta Diez medidores.
- ④ Incorporar cuando sea posible, sensores de mejor clase con el fin de disminuir la contribución de esta variable dentro de la incertidumbre total.
- ④ Realizar pruebas de inter comparación entre la *facilidad tecnológica* y otros patrones de medición como cámaras húmedas.
- ④ Promover la utilización de esta herramienta de calibración, entre las empresas del sector gas en Colombia; para generar cambios en la cultura metrológica del país.
- ④ Seguir el Reglamento del PTB como guía de trabajo para los modelos de cálculo y consideraciones sobre las condiciones del recinto y medios de ensayo.

- Seguir trabajando por mejorar la estructura metrológica de la región y del país con ayuda del CDT de GAS, la UIS y COLCIENCIA

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ ÇENGEL YUNUS, Boles Michael. Termodinámica, Tomo II. Segunda edición. Editorial McGrawHill. Capítulo 17.
- ✓ CÓMBITA PUERTO, Oscar Alberto - CUADRADO PEÑA, Ilba Geonine. Diseño y construcción de un banco patrón para calibrar medidores de gas basado en la tecnología de boquillas sónicas. Bucaramanga 2004. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica) Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías fisicomecánicas.
- ✓ FRÖSSI FRANZ, Wendt Gudrun. Reglamento de prueba del PTB, Tomo 25. 1998. Medidores de gas – banco de prueba con toberas críticas.
- ✓ FRÖSSI FRANZ, Wendt Gudrun. Reglamentos de Prueba del PTB. Tomo 25, Medidores de Gas – Bancos de pruebas con toberas críticas- 1998. Editorial Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB).
- ✓ INTERNATIONAL ESTÁNDAR, ISO 9300. Second edition 2005-08-15. Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
- ✓ MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas, Ediciones del Castillo S.A. 1986.
- ✓ NORMA TECNICA COLOMBIANA, NTC2728. Editada 2005-06-29. Medidores de gas tipo diafragma.

- ✓ SHAPIRO, Ascher. The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow. Volume 1. Jhon Wiley & sons Inc, New York, 1953, Capítulos 1, 2, 4, 5.

- ✓ GIACOMO, P. Equation for the determination of the density of moist air. Metrología 18, 33-40 (1982).

- ✓ MOON CHOI, Yong. Interference effects of three of three sonic nozzles of different throat diameters in the same meter tube. Flow Measurement and Instrumentation 10 (1999) 175-181.

APENDICES

APENDICE A. MEDIDORES DE FLUJO DE GAS DISPONIBLES EN EL MERCADO Y SUS CARACTERÍSTICAS DE CALIBRACIÓN.

A.1 INTRODUCCIÓN

Los medidores han sido desde hace muchos años un elemento fundamental en cada una de las fases que componen la cadena de la industria del gas. Entre los más empleados se encuentran los de diafragmas, rotatorios, turbinas, y platinas de orificio; cada uno sirve a un propósito definido y cumple con requerimientos específicos.

Los cuatro tipos de medidores mencionados anteriormente pueden clasificarse en dos categorías diferentes: los de desplazamiento positivo y los diferenciales. Los medidores de diafragma y rotatorios están dentro de la categoría de los medidores de desplazamiento positivo debido a que estos tienen compartimientos de volumen definido que se llenan y vacían alternativamente. Conociendo el volumen desplazado en cada movimiento e instalando una relación de engranajes adecuada, el medidor ofrecerá la lectura directamente en unidades volumétricas.

En vías de proveer una base común para la calificación de la capacidad de varios fabricantes de medidores de gas, varias normas establecen un conjunto de directrices para medidores de diafragma, turbina y rotatorios entre ellas las ANSI y las DIN.

El banco de boquillas sónicas fue diseñado bajo la proyección de la calibración de los medidores de flujo de gas del tipo diafragma ya que estos abarcan un amplio rango de mediciones que actualmente no se encuentran cubiertos por patrones en el país. Entre los criterios de diseño

tenidos en cuenta se encuentran las especificaciones dadas por norma para la calibración de este tipo de medidores.

A.2 MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO TIPO DIAFRAGMA.

Son medidores volumétricos de gas en los cuales la medida de gas suministrado se efectúa por medio de cámaras medidoras con diafragmas deformables.

Medidor de diafragma



A.3 COMPONENTES

- ✓ Un cuerpo que contiene el gas presurizado y forma parte de los compartimientos que miden el gas.
- ✓ Diafragmas que se mueven conforme la presión del gas fluctúa de cada lado.
- ✓ Válvulas y asientos que controlan el flujo de gas hacia cada lado del diafragma.
- ✓ Mecanismo articulado que conecta el diafragma con las válvulas y el indicador.
- ✓ Un indicador u odómetro que registra el número de revoluciones del mecanismo.

A.4 FUNCIONAMIENTO

Un medidor de diafragma se puede comparar con un motor de dos pistones de doble acción, en el cual los diafragmas corresponden a los pistones y el cuerpo del medidor a los cilindros. Cada carrera del diafragma desplaza un volumen fijo de gas y los diafragmas operan con un desfase de 90° de forma que cuando uno está en el final de su carrera, el otro está a la mitad de su desplazamiento.

Esto proporciona un flujo uniforme del gas a la salida del medidor y garantiza que el medidor siempre se pondrá en marcha independientemente de su posición estática.

Cuando existe una demanda de gas aguas abajo del medidor, se origina una caída de presión a través del medidor y sus diafragmas. Este diferencial, que puede ser por ejemplo 25 Pa, proporciona la fuerza para accionar el medidor.

APENDICE B. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE FACILIDAD TECNOLÓGICA

Para estimar la incertidumbre de medición existen varias metodologías, de las cuales dos son reconocidas en el ámbito internacional de la metrología, estas son: la primera, basada en la ley de propagación de incertidumbre, descrita en la GUM¹⁰ y, la segunda, el método numérico basado en la simulación de Monte Carlo, descrito en el suplemento 1 de la GUM. En el caso de la *facilidad tecnológica*, se trabaja con la primera.

Presentación del modelo matemático y el procedimiento empleado para la determinación del error relativo de medición y la incertidumbre asociada a este, los cuales son empleados en la calibración de medidores volumétricos utilizando el Banco Patrón de la *facilidad tecnológica*.

B.1 MODELO MATEMÁTICO

El error relativo de un medidor bajo prueba es evaluado mediante comparación contra el Volumen registrado por la Boquilla sónica o el conjunto de boquillas durante el tiempo de prueba, utilizando la siguiente expresión:

$$fp[\%] = \frac{V_{mut} - V_b}{V_b} * 100$$

Donde;

fp (%): Porcentaje de error del medidor.

V_{mut} (dm³): Volumen indicado por el medidor a las condiciones de calibración.

¹⁰GUM, Guide To The Expression Of Uncertainty In Measurement

Vb (dm³): Volumen indicado por el Patrón (Boquillas) a las condiciones de calibración del medidor.

$$V_{mut} = N_p * K_m$$

Donde;

Np (pulsos): Número de pulsos.

Km (dm³/pulsos): Volumen indicado por el medidor a las condiciones de calibración. Obtenido a partir del volumen cíclico del medidor y el numero de revoluciones de la cifra menos significativa de su odómetro

$$V_b = \left[\frac{\rho_b}{\rho_m} * (1 - 0.0169 * X_v) * \sqrt{\frac{T_b + 273.15}{297.15}} * \sum_{i=1}^n Q_{vi,20,tr} \right] * \frac{t}{60}$$

Donde;

i (NA¹¹): El subíndice i representa las boquillas (de una a tres) utilizadas en la calibración.

pb (kg/m³): Densidad del aire en el plenum in.

pm (kg/m³): Densidad del aire a través del medidor.

Q_{vi,20,tr} (dm³/min): Caudal de referencia de la boquilla, obtenido a partir de su calibración.

Xv (AD¹²): Fracción molar del vapor de agua evaluada a las condiciones del plenum de entrada.

t (s): Tiempo de prueba

Tb (°C): Temperatura del aire en el plenum in

Reemplazando en las ecuaciones anteriores, se obtiene el modelo final del error relativo

¹¹ NA, No aplica

¹² AD, Adimensional

$$f_p[\%] = \left[\frac{N_p * K_m}{\left[\frac{\rho_b}{\rho_m} * (1 - 0.0169 * X_v) * \sqrt{\frac{T_b + 273.15}{297.15}} * \sum_{i=1}^n Q_{vi,20,tr} \right] * \frac{t}{60}} - 1 \right] * 100$$

B.2 DENSIDAD DEL AIRE A TRAVÉS DEL MEDIDOR Y DE LAS BOQUILLAS

Densidad del aire en el medidor ρ_m (kg/m³)

$$= \frac{P_m}{P_b} * \left[\frac{P_b}{P_m} * \left(\frac{P_b}{P_m} \right) \right]$$

Densidad del aire a través de la boquilla ρ_b (kg/m³)

$$= \frac{P_m}{P_b} * \left[\frac{P_b}{P_m} * \left(\frac{P_b}{P_m} \right) \right]$$

P_m (Pa) Presión absoluta a la entrada del medidor

P_b (Pa) Presión absoluta de estancamiento de las boquillas, medido en el Plenum in

M_a (kg/mol) Masa molar del aire seco

M_v (kg/mol) Masa molar del vapor

R_u (J/mol*K) Constante universal de los gases

T_m (°C) Temperatura del aire en el medidor

Las constantes para la estimación de la densidad del aire fueron tomadas del artículo EQUATION FOR THE DETERMINATION OF THE DENSITY OF MOIST AIR (1981). P Giacomo, International Bureau of weights, F-92310 Sevres, France.

Constante universal de los gases

$$= .$$

Masa molar del vapor de agua

$$= . *$$

Masa molar del aire

$$= . *$$

B.3 FUENTES DE INCERTIDUMBRE

Las fuentes de incertidumbre se identifican para las magnitudes de entrada del modelo matemático, las cuales son resultado de los factores involucrados en la medición.

B.4 EPRESIÓN COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD

Con base en el modelo matemático expresado en la ecuación 20, se determinan los coeficientes de sensibilidad para cada una de las fuentes de incertidumbre establecidas. Los coeficientes son empleados para determinar la incertidumbre combinada del error.

Con el fin de facilitar la expresión de los coeficientes de sensibilidad se define una función auxiliar denominada factor **f** así:

$$f = \frac{100 * Vm}{\left[\frac{\rho b}{\rho m} * (1 - 0.0169 * Xv) * \sqrt{\frac{Tb + 273.15}{297,15}} * Q \right] * \frac{t}{60}}$$

B.5 INCERTIDUMBRE COMBINADA

$$u_c = \sqrt{\sum (c_i * u_i)^2}$$

B.6 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

$$U = u_c * k$$

B.7 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE FACILIDAD TECNOLÓGICA

Según los modelos de matemáticos descritos anteriormente, obtenemos las siguientes fuentes de incertidumbre y coeficientes de sensibilidad.

B.8 FUENTES DE INCERTIDUMBRE

La siguiente tabla muestra cada una de las fuentes de incertidumbre y su procedencia:

Tabla 26. Fuentes de Incertidumbre

<i>Descripción</i>	<i>Fuente de incertidumbre</i>	<i>Simb</i>	<i>Tipo</i>	<i>Distribución</i>	<i>Formula</i>
Volumen registrado por el medidor U_{vm}	Repetibilidad de las lecturas (Evaluada combinando el Patrón y el Medidor)	U_{Rvm}	A	Normal	$\frac{S_{vm}}{\sqrt{n}}$
$U_{\rho m}$	Repetibilidad de las lecturas	$U_{R\rho m}$	A	Normal	$\frac{S_{\rho m}}{\sqrt{n}}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Simb	Tipo	Distribución	Formula
Densidad del medidor	Método de calculo	$U_{CAL\rho m}$	B	Normal	$U_{CAL\rho m}$
Densidad del Patrón	Repetibilidad de las lecturas	U_{Rpb}	A	Normal	$\frac{S_{\rho b}}{\sqrt{n}}$
$U_{\rho b}$	Método de calculo	$U_{CAL\rho b}$	B	Normal	$U_{CAL\rho b}$
Fracción molar de vapor de agua U_{Xv}	Repetibilidad de las lecturas	U_{RXv}	A	Normal	$\frac{S_{Xv}}{\sqrt{n}}$
	Método de calculo	U_{CALXv}	B	Normal	U_{CALXv}
Temperatura Boquillas U_{Tb}	Repetibilidad de las lecturas	U_{RTb}	A	Normal	$\frac{S_{Tb}}{\sqrt{n}}$
	Clase del sensor o transmisor confirmada a través del certificado de calibración (U_{Tb} , k)	U_{ClaTb}	B	Normal	$\frac{U_{Tb}}{k}$
	Resolución sensor o transmisor (R_{Tb})	U_{ResTb}	B	Rectangular	$\frac{R_{Tb}}{\sqrt{12}}$
Temperatura Boquillas					

Descripción	Fuente de incertidumbre	Simb	Tipo	Distribución	Formula
U_{Tb}	Deriva del sensor o transmisor (D_{Tb})	U_{DerTb}	B	Rectangular	$\frac{D_{Tb}}{\sqrt{12}}$
	Profundidad de inmersión (Pf)	U_{PfTb}	B	Normal	$\frac{U_{PfTb}}{k}$
Caudal de referencia $U_{Qv,20,tr}$	Reproducibilidad (R_{Qv})	U_{RQv}	B	rectangular	$\frac{0,1\% \cdot Q_{vTotal}}{\sqrt{3}}$
	Certificado de calibración	U_{CerQv}	B	Normal	$\frac{U_{Qv,20,tr}}{k}$
Tiempo U_t	Repetibilidad de las lecturas	U_{Rt}	A	Normal	$\frac{S_t}{\sqrt{n}}$
	Certificado de calibración	U_{cerT}	B	Normal	$\frac{U_{cerT}}{k}$
	(U_{cerT} , k)				
	Deriva	U_{DerTb}	B	Rectangular	$\frac{D_t}{\sqrt{12}}$
(D_t)					

B.9 COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD

Con base en el modelo matemático expresado en la ecuación 22, se determinaron los coeficientes de sensibilidad para cada una de las fuentes de incertidumbre establecidas; los coeficientes son empleados para determinar la incertidumbre combinada del error.

Tabla 27. Coeficientes de Sensibilidad

Coeficiente de Sensibilidad	Ecuación
Respecto a la densidad en la boquilla	$C_{\rho_b} = \frac{\partial \% E}{\partial \rho_b} = \frac{f}{\rho_b}$
Respecto a la densidad en el medidor	$C_{\rho_m} = \frac{\partial \% E}{\partial \rho_m} = \frac{f}{\rho_m}$
Respecto a la Fracción de Vapor	$C_{X_v} = \frac{\partial \% E}{\partial x_v} = f \cdot \frac{0.169}{(1 + 0.169 \cdot X_v)}$
Respecto a la Temperatura de las Boquillas	$C_{T_b} = \frac{\partial \% E}{\partial T_b} = \frac{f}{2 \cdot (293,15) \cdot \left[\sqrt{\frac{(T_b + 273,15)}{293,15}} \right]^3}$
Respecto al Caudal de referencia de las Boquillas	$C_{Q_{vi,20,tr}} = \frac{\partial \% E}{\partial Q_{vi,20,tr}} = \frac{f}{Q}$
Respecto al tiempo de la prueba	$C_t = \frac{\partial \% E}{\partial t} = \frac{f}{t}$
Respecto al volumen indicado por el medidor	$C_{V_m} = \frac{\partial \% E}{\partial V_m} = \frac{f}{V_m}$

ANEXOS

ANEXO A. Artículo Facilidad Tecnológica Para La Calibración De Medidores De Gas Tipo Diafragma.



FACILIDAD TECNOLÓGICA PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS TIPO DIAFRAGMA

Raúl Alonso Anaya Barajas

Luis Eduarda García

Corporación Centro De Desarrollo Tecnológico Del Gas (CDT del GAS)

Universidad Industrial de Santander (UIS)

Escuela de Ingeniería Mecánica

ranaya@cdtdegas.com

Resumen: La medición del flujo en la industria del gas en Colombia es de vital importancia para realizar una adecuada optimización en los procesos y es una herramienta fundamental en la conciliación de balances. El presente *paper* describe el diseño de una facilidad tecnológica para el proceso de calibración de medidores residenciales de gas natural tipo diafragma que pretende fortalecer la estructura metrológica de la industria nacional en materia de mediciones de gas. Se inicia con la definición de los requerimientos metrológicos y operativos. Describe la solución desarrollada, la cual integró un Banco patrón basado en tecnología de boquillas sónicas.

INTRODUCCIÓN

En América Latina, la importancia del gas natural como recurso energético crece cada vez más, motivado por el aumento en la utilización de este recurso en los sistemas de transporte, la industria alimenticia, de los procesos industriales y como fuente de energía para uso domestico, debido a las buenas características que presenta este elemento. En razón a lo anterior, las empresas Colombianas involucradas con la comercialización del gas son consientes de este fenómeno y por ello buscan altos niveles de calidad en sus procesos, logrados en cierta forma a partir de la conciliación en sus balances de gas, siendo este ultimo el principal problema cuando no se cuenta con una infraestructura metrológica adecuada.

Mediante un estudio desarrollado por parte del CDT de GAS(2008)[1], se concluyó que la carencia de estrategias de control y la ausencia de la estimación de la Incertidumbre en los balances de las redes de distribución, también se logro evidenciar que uno de los factores a controlar en el balance de las redes de gas está directamente relacionado con las pérdidas

que no son debidamente cuantificadas por parte del distribuidor debido a errores sistemáticos y/o aleatorios causados por un aseguramiento metrológico deficiente de los medidores de gas residenciales.

Con el objetivo de contribuir en la solución a esta problemática; la Corporación CDT de GAS con el apoyo de la Universidad Industrial de Santander, a partir de los requerimientos operativos y metrológicos, desarrollaron una facilidad tecnológica para la calibración de medidores de gas residenciales con la cual se busca lograr un aseguramiento metrológico eficiente.

El resultado de este proceso es un banco para calibración de medidores de gas tipo diafragma con designación G1,6, G2,5, G4 y G6; que opera en un rango de 0,016 m³/h a 10 m³/h a 905mbar y 22°C y utiliza como patrón de calibración un banco de boquillas sónicas, obteniendo niveles de incertidumbre relativa a la reproducción de volumen

0,35% (k=2) y relativa a la estimación del error en la lectura del medidor del 0,4% (k=2)¹³.

REQUERIMIENTOS METROLOGICOS Y OPERATIVOS

Un banco de calibración es básicamente la infraestructura necesaria para poder realizar una comparación entre lo que registra un medidor bajo prueba con respecto a lo que registra otro medidor de mejores cualidades metrológicas. La facilidad tecnológica para la calibración de medidores de gas tipo diafragma, se adapta a los requerimientos operativos y metrológicos los cuales son tenidos en cuenta como parte fundamental del diseño.

2.1 DESEMPEÑO METROLÓGICO

La facilidad tecnológica cuenta con patrones e instrumentos de excelentes cualidades metrológicas y trazables a centros de metrología reconocidos.

La tecnología de boquillas sónicas se presenta como una buena alternativa y brinda trazabilidad a patrones nacionales e internacionales.

Las razones que justifican el empleo de esta tecnología como patrón de calibración se resumen en los siguientes aspectos [2]:

- Buena estabilidad a largo plazo: Gracias a que el dispositivo primario (*boquilla sónica*) no posee partes móviles y sus componentes no sufren desgastes excesivos a lo largo del tiempo de servicio (*hasta 30 años*).
- Bajos valores de incertidumbre: La teoría del flujo de fluidos a alta velocidad, bajo las consideraciones de flujo isoentrópico y unidimensional garantiza la no influencia de muchos de los factores que producen disturbios e irregularidades difícilmente cuantificables. Por tratarse de la reproducción de un fenómeno termodinámico, el método es muy confiable. Adicionalmente, las boquillas que se calibran directamente contra patrones reconocidos, pueden usarse como patrones de transferencia, especialmente para caudales superiores a 1 dm³/min.
- Facilidad de operación: Dadas las condiciones de funcionamiento de estos dispositivos como

¹³ k=2. Factor de Cobertura, corresponde a un nivel de confianza del 95,45%.

medidores de flujo, no se requieren procedimientos especiales ni rigurosos para la determinación de los valores caudal, sólo se requieren medir las condiciones aguas arriba de la boquilla y el tiempo para obtener el volumen.

- Recuperación de presión: El diseño del difusor a la salida produce una recuperación de presión a través de la boquilla, dependiendo del tamaño de ésta y de la calidad de su geometría y acabado interno, lo cual disminuye las pérdidas.

2.2 CAPACIDAD OPERATIVA

En Colombia existen más de 25 empresas dedicadas a la distribución de gas natural 0, los cuales a su vez, cuentan con una red utilizada para llegar a cada hogar Colombiano [4].

Como se conoce, la tecnología más utilizada corresponde a la tipo diafragma y los tamaños más comunes corresponden a las designaciones G1,6, G2,5, G4 y G6 los dos primeros son usados en instalaciones residenciales, y los dos últimos en comercio e industria.

Siendo consecuentes, para cada empresa distribuidora, esa misma cifra sería la cantidad de medidores potenciales a calibrar; desde luego sería imposible realizar la calibración de todos los medidores, para ello se utilizan técnicas estadísticas de análisis de datos y las calibraciones pasan a ser realizadas a lotes de medidores, pero esta discusión no es parte del presente artículo, lo que se desea destacar es la necesidad de realizar calibraciones simultáneas de grupos y/o lotes de medidores, que brinden resultados que permitan caracterizar la infraestructura utilizada para la medición.

Los medidores tipo diafragma pueden ser de sentido izquierdo o derecho, siendo más comunes los de sentido izquierdo, la facilidad tecnológica debe estar en capacidad de adaptarse a cualquier sentido y ser capaz de calibrar medidores modelo G1,6 a G6, es decir un alcance de operación desde 0,016 m³/h a 10 m³/h; el alcance definido según NTC 2728:2005 [3], ver Tabla 1.

Designación	G1,0	G1,6	G2,5	G4,0	G6,0
Q _{mín}	0,016	0,016	0,025	0,04	0,06
3Q _{mín}	0,048	0,048	0,075	0,12	0,18
0,1Q _{máx}	0,16	0,25	0,40	0,60	1,00

0,2Q _{máx}	0,32	0,50	0,80	1,20	2,00
0,4Q _{máx}	0,64	1,00	1,60	2,40	4,00
0,7Q _{máx}	1,12	1,75	2,80	4,20	7,00
Q _{máx}	1,6	2,5	4,0	6,0	10,0

Tabla 1. Caudales nominales según NTC 2728:2005 expresado en m³/h.

El número de boquillas se definió teniendo en cuenta las posibles configuraciones que permitieran obtener los caudales nominales recomendados por NTC 2728:2005 y se utilizan configuraciones individuales o en paralelo de Dos o Tres boquillas.

DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DE LA FACILIDAD

El Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas con apoyo de la Universidad Industrial de Santander, diseño y construyó una facilidad tecnológica para calibrar medidores de flujo de gas tipo diafragma basado en la tecnología de boquillas sónicas con bajos niveles de incertidumbre inferiores a 0,4% (k=2) y trazabilidad a patrones nacionales e internacionales. Los patrones tipo boquillas sónicas están diseñados bajo la norma ISO 9300:2005 [5] y calibrados con patrón tipo campana gasométrica y patrón tipo pistón; incorporando la tecnología de flujo crítico-sónico y proporcionando una medición con excelentes cualidades metrológicas y buena estabilidad a largo plazo.

La *facilidad tecnológica* está conformada por tres subsistemas: sistema medidor bajo prueba, el sistema patrón de referencia y sistema generación de flujo; armónicamente integrados que hacen del Banco una herramienta adecuada para realizar mediciones de flujos. El sistema incluye una serie de conductos y válvulas que direccionan el flujo; sensores de presión, temperatura y humedad que caracterizan el aire que pasa por cada sistema.

Entre las características principales están su tamaño compacto, su fácil operación, y su amplio rango de medición.

El sistema de dos niveles o zonas de la *facilidad tecnológica* permite calibrar desde un medidor hasta diez medidores de la misma denominación en forma consecutiva agilizando la evaluación de grandes lotes de medidores.

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS BOQUILLAS

El diseño y construcción de las boquillas está sujeto a los caudales de flujo que van a pasar por las mismas y al mecanismo de generación de flujo.

Utiliza solo de Diez Boquillas Sónicas para obtener 25 caudales de prueba. La utilización de las configuraciones se valida, calibrando de manera individual las Diez boquillas y algunas de las configuraciones en paralelo para determinar si existe algún cambio en la reproducción de los caudales y en las relaciones de bloqueo.



Boquilla BS-01

3.2 DISEÑO DE LOS PLENUMS

Los *Plenums* son estructuras cuya función es ofrecer las condiciones de homogeneidad y baja velocidad aguas arriba de las boquillas (Diseñado para reproducir lo más fielmente posible según la practicidad, las características de un reservorio infinito, donde la velocidad del fluido se considera cero, y las condiciones de presión y temperatura estables). Se tuvo en cuenta las dimensiones de las boquillas y sus soportes, de tal forma que su arreglo permitiera obtener unas dimensiones adecuadas para el *Plenum* y obtener un volumen estancado representativo.

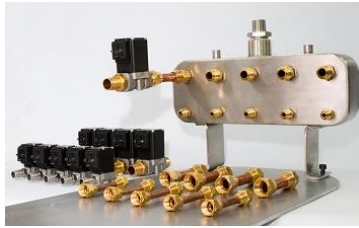
La PTB Tomo 25 [6], recomienda una separación entre boquillas y entre las boquillas y las paredes del *Plenum* de cómo mínimo 5 veces el diámetro de garganta de la boquilla.



Plenum in

Para el montaje de las válvulas de control se requiere de otro *Plenum*, denominado *Plenum Out*, el cual sirve

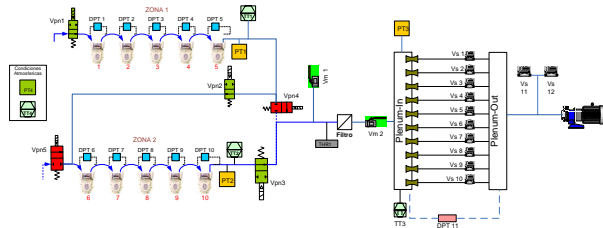
de apoyo, mantiene la alineación con respecto al Plenum In y tiene conexiones para sensores (diferencial y vacuo metro).



Plenum Out

3.3 LÍNEAS DE FLUJO

Según los requerimientos expuestos anteriormente, el sistema debe permitir el fácil montaje de los diferentes tipos de MUT que se calibraran con el banco, además de la fácil operación del sistema se debe garantizar el buen sello a la entrada y salida de los medidores para evitar fugas y errores de lecturas.



Esquema Funcional

El sistema de acoplamiento tiene dos funciones específicas; permitir variar la distancia entre los conectores para diferentes tamaños de medidor y realizar sello entre el medidor y la línea de aire de calibración.

El banco cuenta con un sistema neumático que es el encargado de transmitir la potencia a los elementos móviles de la *facilidad tecnológica*.

3.4 GENERACIÓN DE FLUJO

El sistema generador de flujo es el encargado de producir la diferencia de presión a través de la boquilla necesaria para que el flujo de aire alcance las condiciones críticas cuando pasa a través de ella.

El equipo generador de flujo que utiliza esta herramienta de calibración es una bomba de vacío.

3.5 ESTRUCTURA

La *facilidad tecnológica* es una herramienta compacta, que permite la integración armónica de todos los elementos, además incorpora las características implícitas que conlleva un buen diseño como lo son: fabricabilidad, mantenibilidad, ergonomía; estas enfocadas siempre a la obtención de los bajo costos de producción, sin dejar de lado la buena calidad en los elementos de construcción.



Facilidad Tecnológica

3.6 FUNCIONAMIENTO

El método de calibración se basa en la comparación entre el volumen medido por el medidor objeto de calibración y el volumen determinado a partir de la conversión de los caudales de referencia de cada una de las boquillas en operación (caudales determinados a partir de la calibración de las boquillas) al estado termodinámico del medidor en prueba, teniendo en cuenta el tiempo de duración de la calibración.

Para facilitar la calibración de grandes lotes de medidores la *facilidad tecnológica* consta de 2 zonas que pueden trabajar conjuntamente o de manera separada al momento de una calibración.

Utiliza medidores sustitutos, la aplicación de estos radica en la necesidad de conducir el aire de calibración a través de todo el banco cuando no existe la totalidad de medidores requeridos. Utiliza 4 medidores sustitutos los cuales se requieren en su totalidad si se calibra ya sea 1 o 6 MUT.

RESULTADOS

Los resultados tiene que ver con el funcionamiento del banco patrón y de su elemento principal boquillas y el funcionamiento de la *facilidad tecnológica* como herramienta de calibración.

4.1 CALIBRACIÓN BOQUILLAS

Para los caudales más grandes del banco de boquillas se utilizó el patrón tipo campana gasométrica y para los más pequeños el patrón tipo pistón.

El propósito principal de la calibración es determinar el caudal real de las boquillas en comparación al caudal nominal con el que fueron diseñadas y estimar las incertidumbres asociadas a estos valores.

4.2 PRUEBA DE CALIBRACIÓN EN LA FACILIDAD TECNOLÓGICA

Para la prueba de calibración se realizó el montaje de 4MUT¹⁴ con denominación G1,6 y de un medidor sustituto y utilizamos la zona 1 de la *facilidad tecnológica*.

Condiciones de prueba:

Gas de Calibración	Aire
Presión atmosférica	903,6 ± 1,8 mbar
Temperatura cuarto de ensayos	22 ± 0,3 °C
Humedad relativa	57,2 ± 2,0 %

- Resultados MUT1:

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	-0,83%	0,19	0,24%	0,49%	1,97
4,17	20	1,01%	0,20	0,04%	0,45%	2,01
16,67	70	0,28%	0,39	0,05%	0,24%	2,00
41,67	210	1,23%	1,25	0,07%	0,21%	1,98

Tabla 2, Resultados MUT 1

La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de 0,34% (k=2,01), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

- Resultados MUT2:

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	-0,66%	0,47	0,19%	0,42%	1,97

¹⁴ MUT, Meter Under Test

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
4,17	20	-0,37%	0,54	0,11%	0,32%	1,97
16,67	70	-0,36%	0,58	0,11%	0,29%	1,97
41,67	210	-0,75%	0,74	0,15%	0,31%	1,96

Tabla 3, Resultados MUT 2

La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de 0,31% (k=2,01), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

- Resultados MUT3:

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	-2,15%	0,27	0,15%	0,23%	1,98
4,17	20	-0,87%	0,28	0,08%	0,15%	1,99
16,67	70	-0,50%	0,29	0,12%	0,21%	2,00
41,67	210	-0,36%	0,33	0,01%	0,17%	2,00

Tabla 4, Resultados MUT 3

La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de ± 0,19% (k=2,01), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

- Resultados MUT4:

CAUDAL NOMINAL	VOLUMEN DE PRUEBA	ERROR PROMEDIO	DIFERENCIAL DE PRESIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	U	FACTOR DE COBERTURA
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[mbar]	[%]	[% Error]	k
0,27	20	0,02%	0,26	0,08%	0,25%	1,97
4,17	20	0,89%	0,28	0,06%	0,22%	1,99
16,67	70	-0,28%	0,3	0,01%	0,21%	1,99
41,67	210	-0,20%	0,35	0,01%	0,17%	1,99

Tabla 5, Resultados MUT 4

La incertidumbre de la medición, asociada al volumen indicado por el medidor en prueba es de ± 0,22% (k=1,98), para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

CONCLUSIONES

Después de desarrollar el presente proyecto podemos concluir que:

- ✓ Se logro que la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander continuara apoyando procesos de cambio por el progreso económico en la región y al Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas mantener y mejorar el control de los procesos de calibración de medidores tipo diafragma obteniéndose excelentes resultados.
- ✓ Con el banco se amplió la infraestructura existente en Colombia para la calibración de medidores de gas de bajo caudal tipo diafragma con denominaciones G1,6, G2,5, G4 y G6.
- ✓ La calibración de las boquillas con patrones tipo pistón y tipo campana gasométrica del CDT de GAS permitieron trazabilidad de los resultados de la *facilidad tecnológica* a patrones nacionales e internacionales.
- ✓ La *facilidad tecnológica* nos permite realizar calibraciones con niveles de incertidumbre en la estimación del error en la lectura del medidor de <0,4% con (k=2), como lo indican los resultados presentados.
- ✓ La integración de la mecánica, la electrónica y de sistemas computacionales permitieron obtener una herramienta de calibración compacta, atractiva, fácil de operar y lo más importante funcional; sobrepasando las expectativas presentadas en la etapa de diseño.

REFERENCIAS

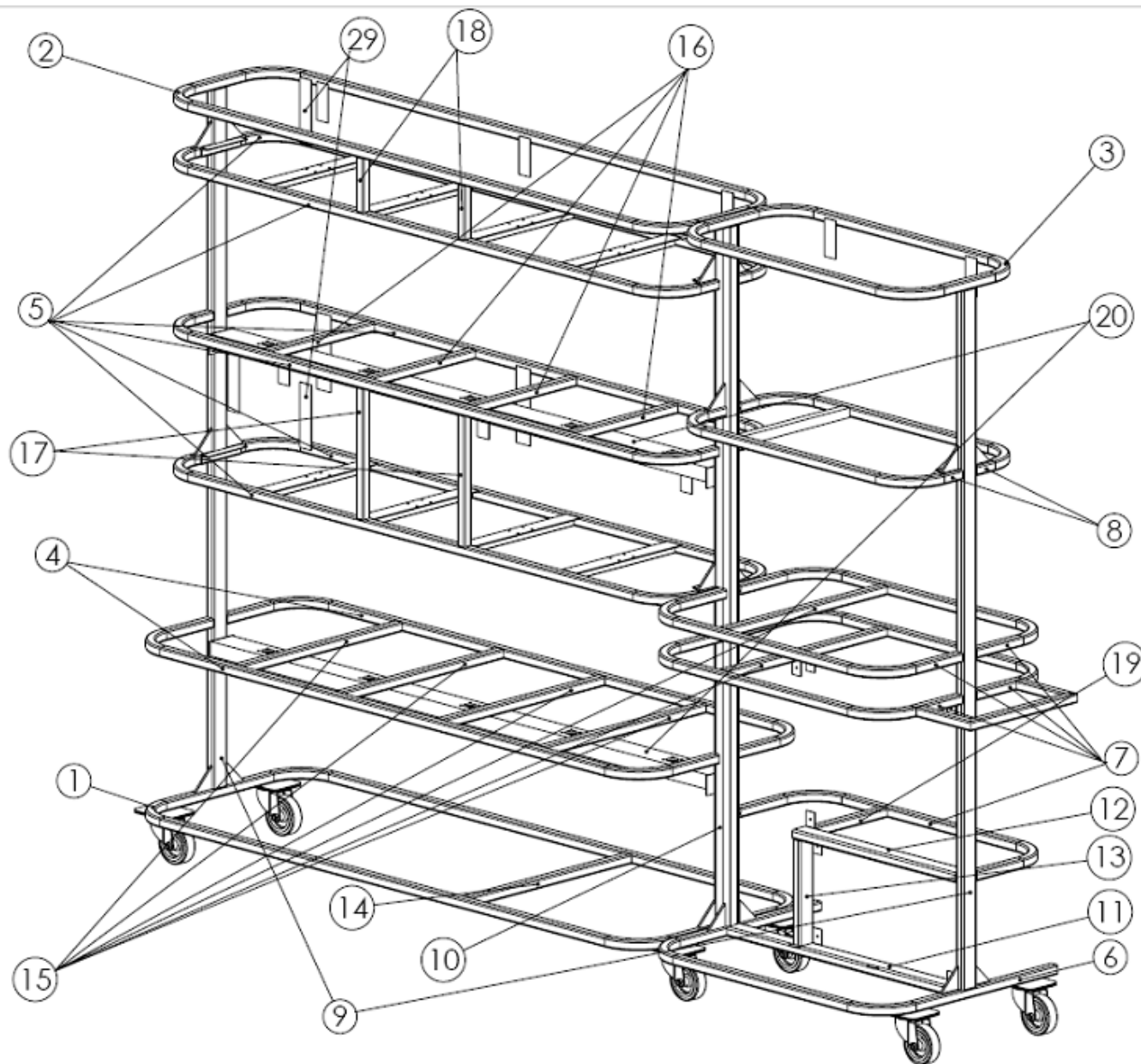
- [1]http://www.cdtdegas.com/index.php?option=com_content&view=article&layout=form&Itemid=5&lang=es
- [2] CÓMBITA PUERTO, Oscar Alberto - CUADRADO PEÑA, Ilba Geonine. Diseño y construcción de un banco patrón para calibrar medidores de gas basado en la tecnología de boquillas sónicas. Bucaramanga 2004. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica) Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías fisicomecánicas.
- [3]http://webserver.gasesdeoccidente.com:7778/porta/page?_pageid=62,19267&_dad=portal&_schema=PORTA
- [4]http://cregas.creg.gov.co/pls/directdcd/directorio_fm.t.listar_sector_gas?sectact=GD

[5] INTERNATIONAL ESTÁNDAR, ISO 9300. Second edition 2005-08-15. Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.

[6] REGLAMENTO DE PRUEBA DELPTB, Tomo 25. Medidores de gas – Bancos de pruebas con toberas críticas.

ANEXO B. Planos De Fabricación Solución Tecnológica CDT de GAS – UIS.

#	Pieza	Plano	Cantidad
1	Aro 1825x625	EP 1	1
2	Aro 1825x425	EP 1	1
3	Aro 865x425	EP 1	1
4	Oreja 1825x290	EP 1	2
5	Oreja 1825x190	EP 1	6
6	Oreja 865x615	EP 1	1
7	Oreja 865x290	EP 1	5
8	Oreja 865x190	EP 1	2
9	Vertical lateral	EP 2	2
10	Vertical Central	EP 2	1
11	Sección 815	EP 2	1
12	Sección 582	EP 2	1
13	Sección 275	EP 2	1
14	Sección 575	EP 2	1
15	Sección 575	EP 2	6
16	Sección 375	EP 2	4
17	Sección 340	EP 2	2
18	Sección 140	EP 2	2
19	Sección 262	EP 2	1
20	Soporte actuadores	EP 3	2
21	Soporte en T	EP 4	8
22	Angulo 375	EP 4	1
23	Angulo 140	EP 4	5
24	Nervio	EP 4	22
25	Soporte medidores	EP 5	10
26	Conector med grande	CM 1	20
27	Conector med pequeño	CM 1	20
28	Ensamble Conector	CM	10
29	Placas valvulas neumaticas	EP 6	2
30	Soporte valvulas manuales	EP 6	10



Corporación CDT de GAS
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

Facilidad Tecnológica

Dibujo: **Raúl Anaya**

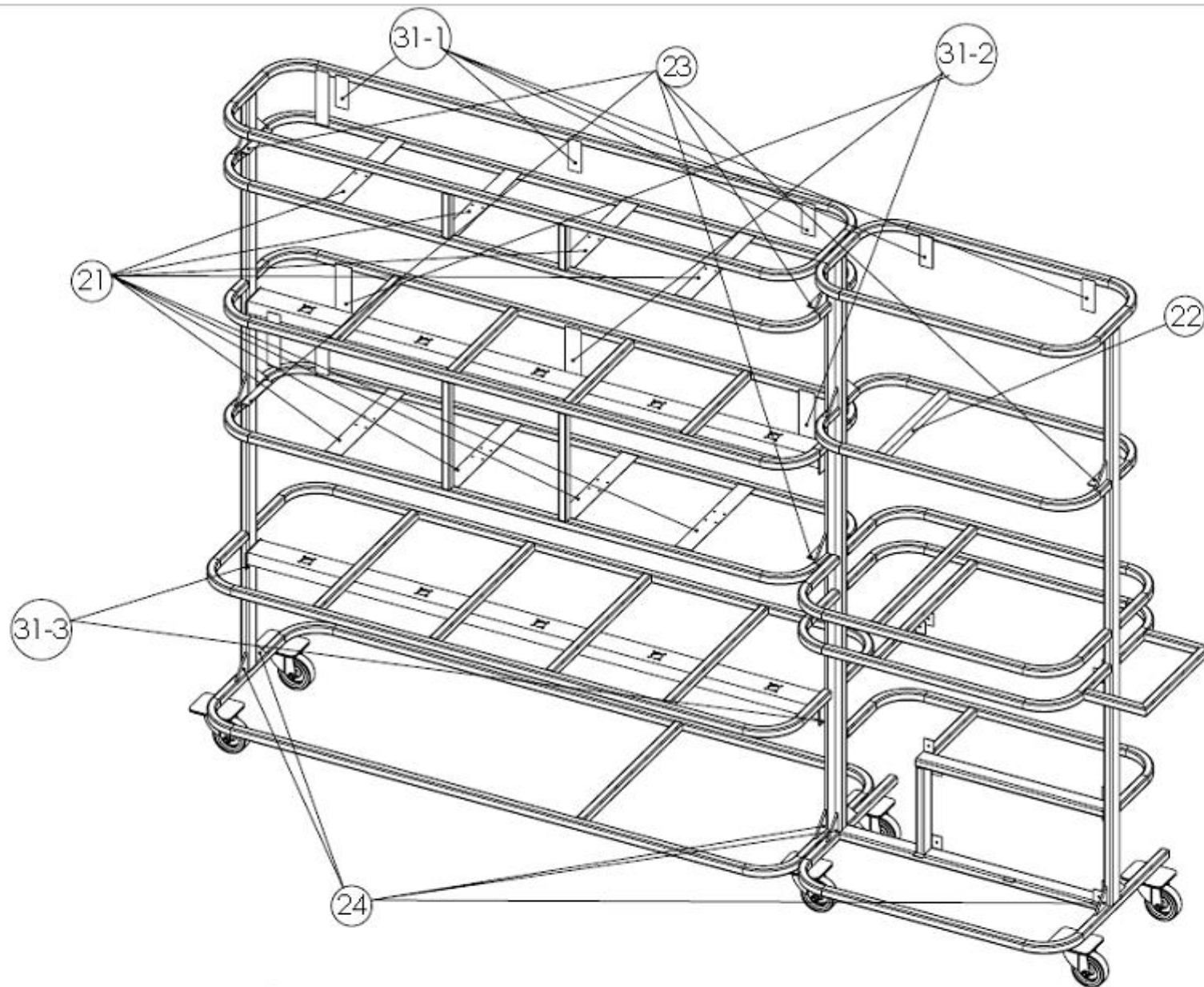
Nombre: **Estructura**


Reviso: **Ing. Luis Garcia**

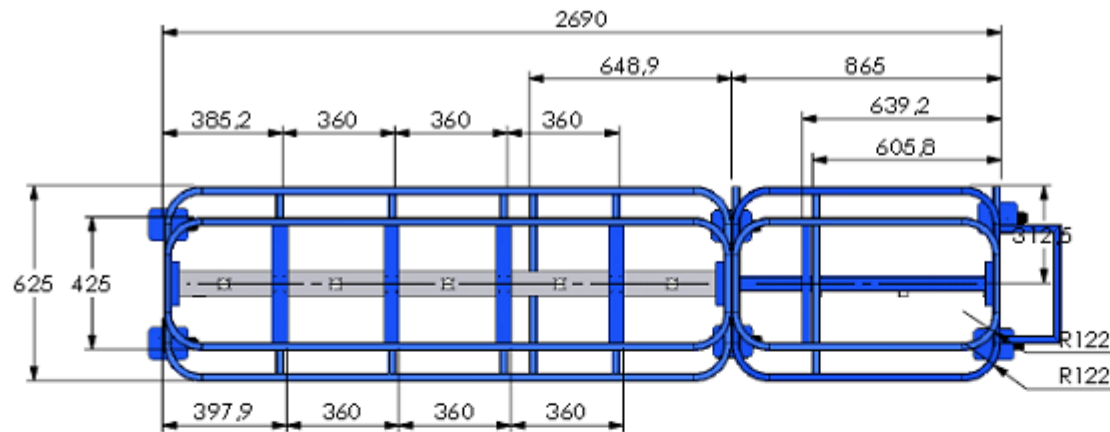
Plano No. **EP 0-2**
Medidas en: **mm**

Fecha: **05/09/09**

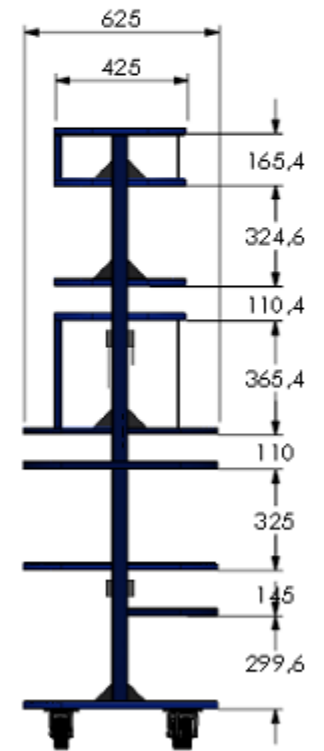
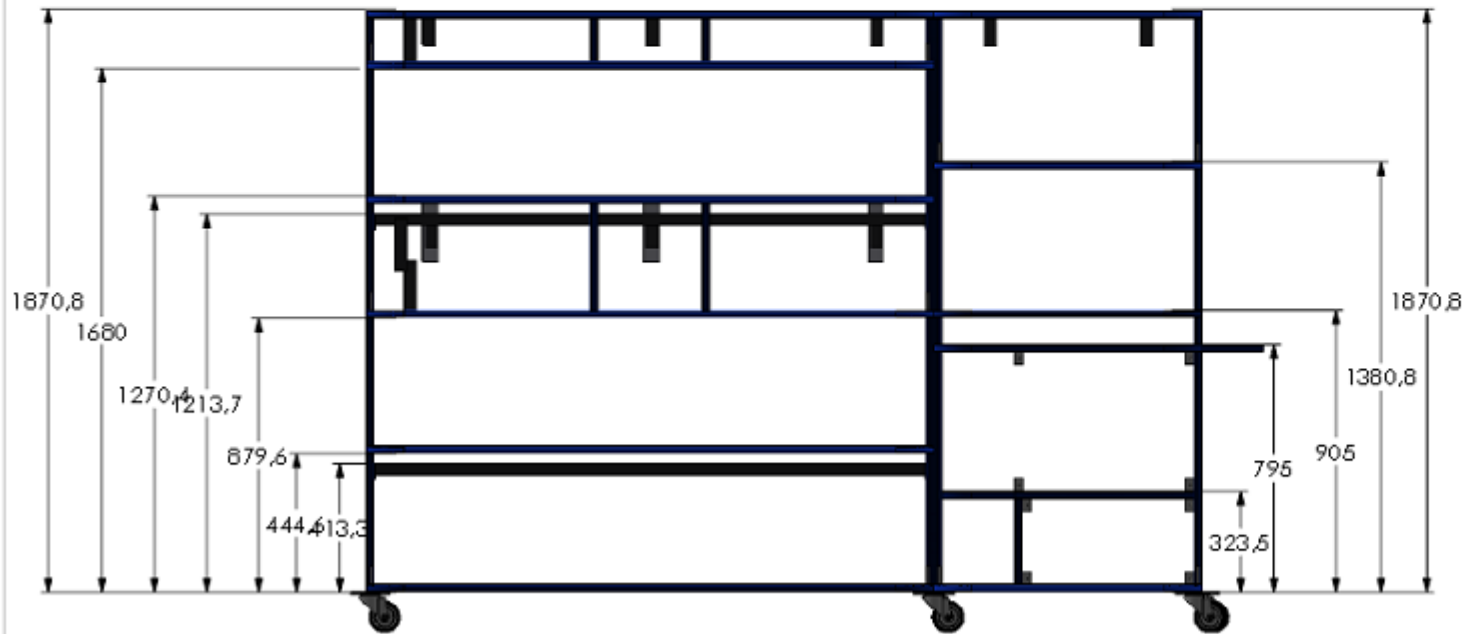
Norma: **DIN**
Escala: **X:X**




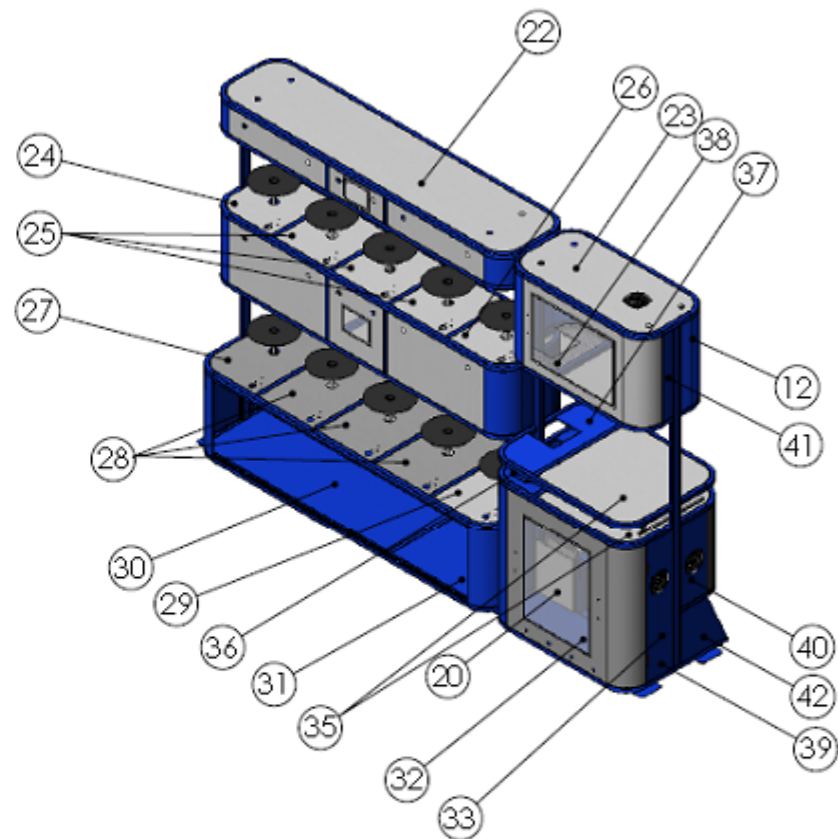
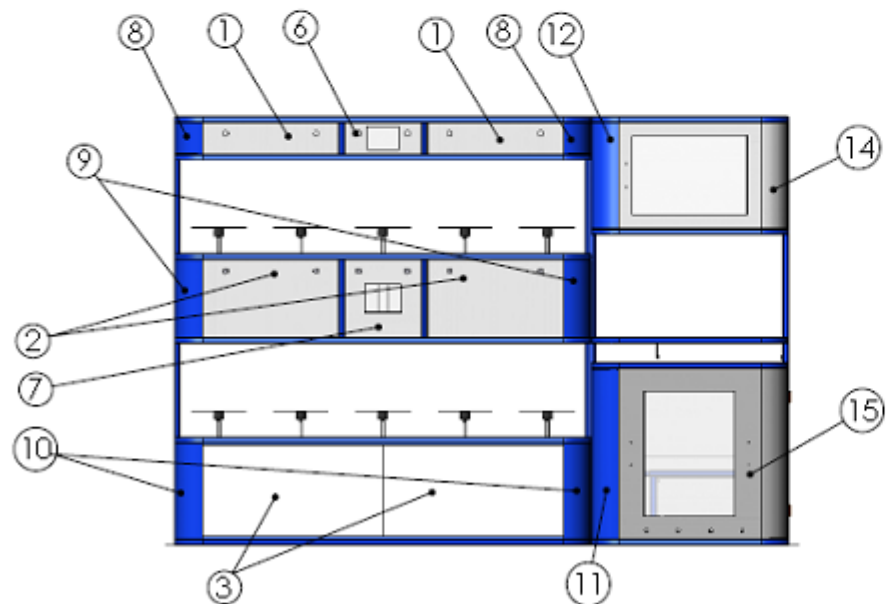
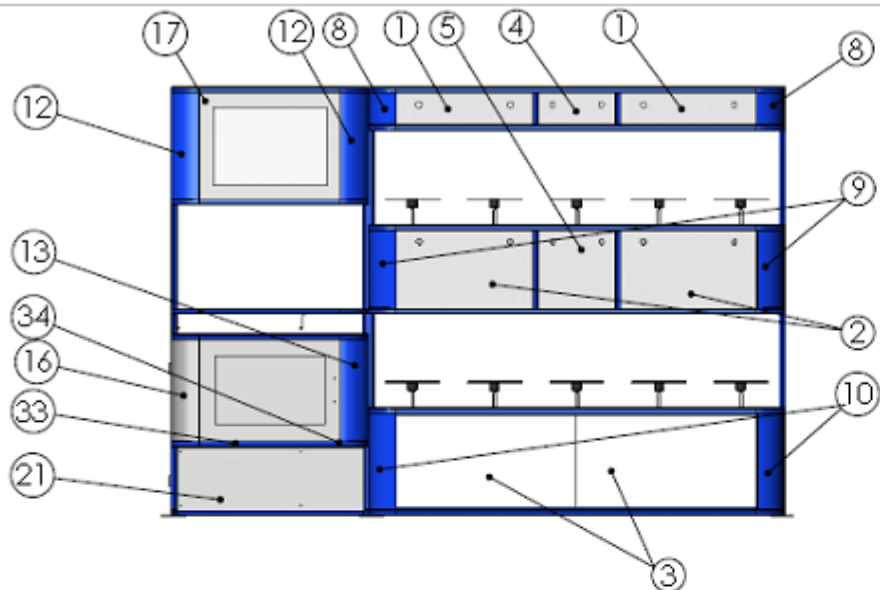
 Corporacion CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas	Dibujó:	Raúl Anaya	Revisó:	Ing. Luis Garcia	Fecha:	07/09/09
	Facilidad Tecnológica	Nombre:	Estructura	Plano No.	EP 0.3	Norma:
			Medidas en:	mm	Escala:	X:X




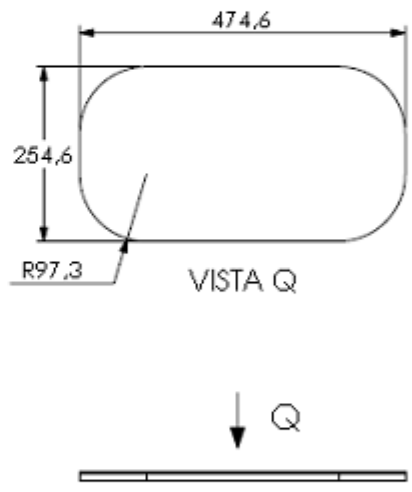
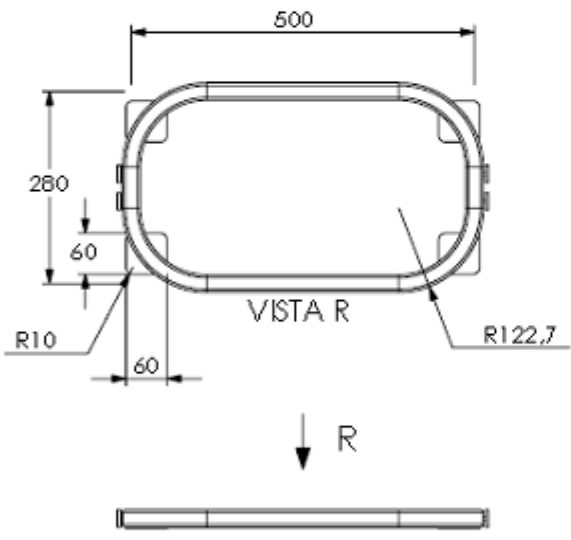
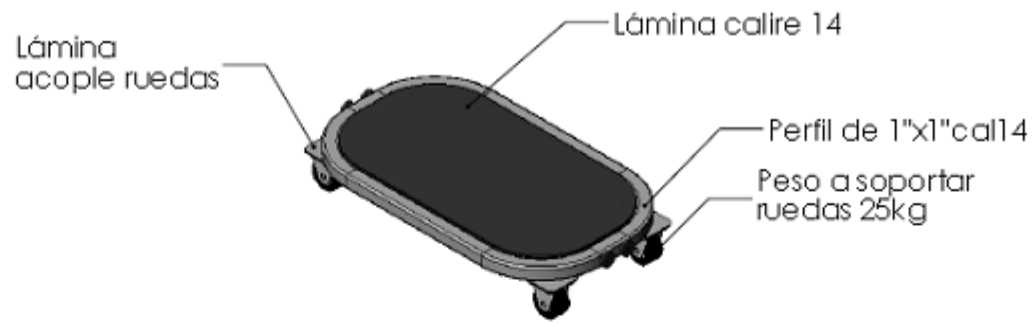
Nota:
 Todos los componentes
 deben ser pintados
 con pintura electrostatica



 Corporacion CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas	Dibujo:	Raúl Anaya	Revisor:	Ing. Luis Garcia	Fecha:	04/09/09
	Facilidad Tecnológica	Nombre:	Estructura	Plano No.	EP 0-1	Norma:
			Medidas en:	mm	Escala:	X:X



 Corporacion CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas	Dibujó:	Raúl Anaya	Revisó:	Ing. Luis Garcia	Fecha:	14/09/09
	Facilidad Tecnológica	Nombre:	Ensamble Estructura	Plano No.	General	Norma:
			Medidas en:	mm	Escala:	X:X



 Corporacion CDT de GAS Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas	Dibujo: Raúl Anaya	Reviso: Ing. Luis Garcia	Fecha: 17/09/09
	Facilidad Tecnológica	Nombre: Carrito bombaVacio	Plano No. EP 7
		Medidas en: mm	Escala: X:X