

**PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN PARA MEDICIÓN DE BAJOS CAUDALES Y
VOLÚMENES DE GAS. AUTOMATIZACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN.**

JORGE ANDRÉS REYES VALDÉS

RAUL HUMBERTO TAPIA CARREÑO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES E
INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2006**

**PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN PARA MEDICIÓN DE BAJOS CAUDALES Y
VOLÚMENES DE GAS. AUTOMATIZACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN.**

JORGE ANDRÉS REYES VALDÉS

RAUL HUMBERTO TAPIA CARREÑO

**Trabajo de grado para optar a los títulos de Ingeniero Electrónico e Ingeniero Mecánico
respectivamente**

Director

JABID EDUARDO QUIROGA

Ingeniero Mecánico

Codirectores

JOSE AMAYA PALACIO

Ingeniero Electrónico

LUÍS EDUARDO GARCÍA

Ingeniero Mecánico

Centro De Desarrollo Tecnológico del Gas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELAS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES E

INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2006

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1 DESCRIPCIÓN DEL PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN A PATRONES PRIMARIOS PARA MEDICIÓN DE CAUDAL	3
1.2 ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN	5
1.2.1 Cilindros	6
1.2.2 Pistón	7
1.2.3 Sello con Mercurio	8
1.2.4 Conjunto Encoder y Contrapesos	9
1.3 ELEMENTOS SECUNDARIOS DE MEDICIÓN	11
1.3.1 Presión Atmosférica (Pb).....	13
1.3.2 Presión Cilindro Grande (Pcg) y Presión Cilindro Pequeño (Pcp)	14
1.3.3 Presión del Medidor (Pm).....	14
1.3.4 Temperatura Ambiente (Tamb).....	15
1.3.5 Temperatura Cilindro Grande (Tcg) y Temperatura Cilindro pequeño (Tcp).....	16
1.3.6 Temperatura del Medidor (Tm).	16
1.3.7 Desplazamiento de los cilindros grande (Npg) y pequeño (Npp)	16
1.3.8 Contabilización del Volumen del Medidor	17
1.4 ELEMENTO TERCIARIO DE MEDICIÓN.....	19
1.5 PLATAFORMA OPTO 22.....	20
1.5.1 Opto Control.....	20
1.5.2 Opto Display	22
1.6 HARDWARE UTILIZADO EN LA AUTOMATIZACIÓN DEL PATRÓN TIPO PISTÓN.....	23
1.6.1 Controlador LCSX-PLUS	23
1.6.2 Brain B3000	24
1.6.3 Módulos OAC5.....	25
1.7 Sistema de Adquisición de Datos	26
1.7.1 Sensor De Presión Diferencial (Dwyer 616W4).....	27
1.7.2 Sensor De Presión Diferencial (Ashcroft XLdp).....	27
1.7.3 Snap AIMA.....	28
1.7.4 Barómetro Honeywell De Precisión (HPB)	29
1.7.5 Sensor De Temperatura RTD Pt100.....	30
1.7.6 Snap Airtd	31
1.7.7 Encoder.....	31
1.7.8 Snap IDC5-Q	32
1.7.9 Finales de carrera.....	33
1.7.10 Sensor Óptico.....	33
1.8 COMPONENTES ESTRUCTURALES	34
1.9 COMPONENTES ADICIONALES.....	35
2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PATRÓN TIPO PISTÓN.....	38
2.1 CONSTRUCCIÓN DEL ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN	38
2.1.1 Cilindros de Borosilicato	39
2.1.2 Pistones de PVC tipo I y Contrapesos	42
2.1.3 Bases de Soporte en Nylon.....	46
2.1.4 Conjunto Encoder y Barras de Soporte	46
2.2 ESTRUCTURA SOPORTE DEL PATRÓN.....	47
2.3 SISTEMA NEUMÁTICO	48
2.3.1 Válvulas para el Control del Fluido de Calibración	48

2.3.2	Conexiones y Accesorios	49
2.3.3	Acondicionamiento de Aire	50
2.3.4	Aire de Control	51
3	SOFTWARE DE CONTROL E INTERFAZ GRAFICA.....	52
3.1	SOFTWARE DE CONTROL.....	52
3.1.1	Verificación de fugas	54
3.1.2	Ajuste de caudales	56
3.1.3	Ejecución de la calibración	57
3.2	INTERFAZ GRAFICA.....	60
3.2.1	Verificación de condiciones	60
3.2.2	Ingreso de datos	61
3.2.3	Ajuste de caudales	62
3.2.4	Pistón en prueba.....	63
4	CALIBRACIÓN DEL PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN.....	64
4.1	CALIBRACIÓN DIMENSIONAL	64
4.1.1	Instrumentos Utilizados	65
4.1.2	Diámetro interno del cilindro grande	66
4.1.3	Diámetro interno del cilindro pequeño	67
4.1.4	Constante K Del Patrón tipo pistón	68
4.2	CALIBRACIÓN GRAVIMETRICA DEL PATRÓN.....	69
4.2.1	Procedimiento.....	70
4.3	CALIBRACION ELEMENTOS SECUNDARIOS DE MEDICIÓN	72
4.3.1	Calibración Sensores De Temperatura.....	73
4.3.2	Calibración Transductores De Presión	74
5	CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO DEL PATRÓN.....	77
5.1	CARACTERIZACIÓN PATRÓN TIPO PISTÓN.....	77
5.1.1	Presión de Operación.....	78
5.1.2	Temperatura de Operación	79
5.1.3	Alcance de medición.....	79
5.1.4	Volumen muerto	80
5.2	COMPARACIÓN CENAM – CDT DE GAS BAJOS CAUDALES MASICOS.....	85
5.3	COMPARACIÓN PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA – PATRÓN TIPO PISTÓN.....	89
5.4	RESULTADO FINAL PATRÓN TIPO PISTÓN.....	91
6	OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.....	94
7	RECOMENDACIONES	97
8	REFERENCIAS	98

Lista de Figuras

Figura 1. Patrones para medición de gas	4
Figura 2. Subconjuntos del Patrón Tipo Pistón.....	5
Figura 3. Modelamiento CAD del Elemento Primario de Medición (conjunto Cilindro-Pistón Grande).....	6
Figura 4. Ajuste del Pistón y el Cilindro de Vidrio	8
Figura 5. Conjunto Encoder Pistón Pequeño	9
Figura 6. Elementos Primarios de Medición	11
Figura 7. Base Del Cilindro Grande	16
Figura 8. Esquema del Sistema de Control y Adquisición de Datos del Patrón Tipo Pistón	20
Figura 9. Bloques de Opto Control.....	22
Figura 10. Controlador LCSX-PLUS	23
Figura 11. Brain B3000	25
Figura 12. Esquema del Barómetro Honeywell.....	29
Figura 13. Sensor de Temperatura RTD PT-100.....	31
Figura 14. Señales de Salida en los Encoder Incrementales	32
Figura 15. Sensor Óptico.....	33
Figura 16. Estructura del Pistón	34
Figura 17. Esquema Diseño Final patrón Tipo Pistón En Operación Descendente	36
Figura 18. Esquema Diseño Final patrón Tipo Pistón En Operación Ascendente	37
Figura 19. Torno CNC y Centro de Mecanizado de la CIC.	39
Figura 20. Perfiles de los Cilindros de Borosilicato.....	41
Figura 21. Barras de PVC Tipo I.....	42
Figura 22. Diámetro del pistón grande vs su temperatura promedio durante la fabricación.	44
Figura 23. Medición del Diámetro del Pistón Durante el Proceso de Fabricación.....	44
Figura 24. Pistón Grande.....	45
Figura 25. Pistón Pequeño	45
Figura 26. Conjunto encoder Pistón Grande (Der) y Pistón Pequeño (Izq).....	47
Figura 27. Modelamiento CAD de la estructura, Proceso de Fabricación y Resultado Final.	48
Figura 28. Figura 1 Válvula 2/2 y 3/2 Utilizadas para Controlar el Fluido de Calibración.....	49
Figura 29. Elementos Utilizados en el Conexionado Neumático de Calibración	50
Figura 30. Manifold de Regulación de Caudal y Regulación de Alta Presión para el Fluido de Calibración.....	51
Figura 31. Reguladores y Filtros de la Segunda Etapa de Regulación.....	51
Figura 32. Grafcet Funcionamiento General del Sistema de Control.....	53
Figura 33. Grafcet Macro etapa verificación de fugas	54
Figura 34. Esquema del proceso de verificación de fugas	55
Figura 35. Grafcet ajuste de caudales	56
Figura 36. Grafcet Ejecución de la calibración.....	58
Figura 37. Selección del Pistón a operar	60
Figura 38. Verificación de condiciones.....	61
Figura 39. Ingreso de datos de Calibración	61
Figura 40. Verificación de Fugas.....	62
Figura 41. Ajuste de Caudales	63
Figura 42. Calibración en Ejecución.....	63
Figura 43. Calibración del Patrón Tipo Pistón por el Método Dimensional	64
Figura 44. Instrumentación Utilizada en la Calibración del Patrón Tipo Pistón	66
Figura 45. Medición de diámetros internos del cilindro grande	66
Figura 46. Medición de diámetros internos del cilindro pequeño	67
Figura 47. Montaje realizado para la calibración por el método gravimétrico.....	71

Figura 48. Desalojo del agua por secciones del cilindro para el proceso gravimétrico.	72
Figura 49. Verificación Inicial e Interfaz Implementada para la Calibración de RTD's	73
Figura 50. Curva de corrección para una RTD del Patrón tipo Pistón	74
Figura 51. Calibración diferenciales del presión del patrón primario tipo pistón.....	75
Figura 52. Curva de Calibración del Transductor de Presión Diferencial del Patrón Tipo Pistón	75
Figura 53. Dinámica del Sistema del Elemento Primario de Medición Operando en Ascenso..	81
Figura 54. Comportamiento del Caudal con Respecto al Número de Pulsos	82
Figura 55. Comportamiento del Caudal Vs. Número de Pulsos para el Arranque	83
Figura 56. Comportamiento del Caudal Vs. Número de Pulsos para la Parada	83
Figura 57. Número de Pulsos Vs Caudal para el Arranque.....	84
Figura 58. Número de Pulsos Vs Caudal para la Parada.....	85
Figura 59. Montaje Calibración de Microrifícios CDT de GAS.....	86
Figura 60. Grafica del coeficiente de descarga contra la relación de presión, orificio de 300 micras	86
Figura 61. Gráficas del coeficiente de descarga contra el número de Reynolds, orificio de 300 micras	87
Figura 62. Gráfica del coeficiente de descarga contra la relación de presión, orificio de 100 micras	87
Figura 63. Gráfica del coeficiente de descarga contra el número de Reynolds, orificio de 100 micras	87
Figura 64. Calibración de Cámara Húmeda Utilizando Encoder con el Pistón Grande Operando en Ascenso.....	90
Figura 65. Curvas de Calibración Obtenidas para la Cámara Húmeda, Utilizando los patrones tipo Pistón y Campana Gasométrica	91
Figura 66. Patrón primario tipo pistón vista frontal (Izq) Sistema de control (Der)	93
Figura 67. Jerarquía de los patrones.....	102
Figura 68. Estructura metrológica internacional.....	103
Figura 69. Concepto de trazabilidad en las mediciones (Cadena de trazabilidad)	104
Figura 70. Principio de medición de un patro tipo piston	111
Figura 71. a- Medición total del desplazamiento, b- Medición parcial del desplazamiento	115
Figura 72. Medición Continua del desplazamiento a- Por sonar, b- Por encoder rotativo	116
Figura 73. Elemento Primario de Medición	116
Figura 74. Montaje de Entrada de Gas Proveniente de una Fuente de Almacenamiento	117
Figura 75. Patrón Tipo Campana Gasométrica.....	121
Figura 76. Método de Desplazamiento de Líquido.....	123
Figura 77. Sistema Primario para Calibración de Medidores de Gas Tipo PVTt.....	124
Figura 78. Esquema de un Patrón Gravimétrico Dinámico.....	125
Figura 79. Alcance de medición de patrones primarios en el mundo	128
Figura 80. Porcentaje de Patrones Primarios en los Principales INM.....	128
Figura 81. Curva característica de un medidor de caudal lineal	129
Figura 82. Curva característica de un medidor de caudal no-lineal	130
Figura 83. Curva del índice de desempeño de un medidor de caudal.	130
Figura 84. Ejemplo de curva característica basada en el coeficiente de descarga de un medidor de caudal.	131
Figura 85. Ejemplo de curva característica basada en el factor K.	133
Figura 86. Medidores de desplazamiento positivo.....	135
Figura 87. Diagrama de un medidor tipo turbina	136
Figura 88. Sistema básico de un medidor ultrasónico.....	137
Figura 89. Diagrama medidor efecto Doppler	137
Figura 90. Tipos de medidores de presión diferencial	138

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones Nominales	10
Tabla 2. Instrumentos necesarios para el Patrón tipo Pistón.....	13
Tabla 3. Estimación previa de la incertidumbre volumen para el nuevo patrón tipo pistón	18
Tabla 4. Requisitos Metroológicos de los Instrumentos Asociados al Patrón Tipo Pistón.....	19
Tabla 5. Especificaciones del Controlador	24
Tabla 6. Especificaciones del <i>Brain</i>	25
Tabla 7. Especificaciones del Modulo OAC5	26
Tabla 8. Componentes del Sistema de Adquisición de datos	26
Tabla 9. Especificaciones Técnicas del Sensor Dwyer 616W4.....	27
Tabla 10. Especificaciones Técnicas del Sensor Ashcroft XLdp	28
Tabla 11. Especificaciones Técnicas del SNAP AIMA.....	28
Tabla 12. Comandos de Comunicación con el Barómetro.....	30
Tabla 13. Especificaciones Técnicas del Barómetro Honeywell.....	30
Tabla 14. Especificaciones Técnicas del SNAP AIRTD.....	31
Tabla 15. Especificaciones Técnicas Encoder.....	32
Tabla 16. Especificaciones Técnicas Snap IDC5-Q.....	33
Tabla 17. Componentes del Elemento Primario de Medición	39
Tabla 18. Propiedades Físicas del Borosilicato provisto por SHOTT DURAN	40
Tabla 19. Dimensiones de los Cilindros de Borosilicato	40
Tabla 20. Especificaciones Técnicas del PVC Tipo I.....	43
Tabla 21. Resumen de las Características de los Pistones y Contrapesos	45
Tabla 22. Elementos Constituyentes del Conjunto Encoder.....	47
Tabla 23. Válvula para el control del fluido de calibración	49
Tabla 24. Componentes del Sistema Neumático de Control	51
Tabla 25. Instrumentos Utilizados en la Calibración dimensional del Patrón Tipo Pistón	65
Tabla 26. Resultados medición de diámetros internos del cilindro grande	67
Tabla 27. Resultados medición de diámetros internos del cilindro pequeño	68
Tabla 28. Resumen parámetros para el calculo de K_{pg}	69
Tabla 29. Resultados calibración dimensional	69
Tabla 30. Resultados calibración de las RTDs.....	74
Tabla 31. Resultados calibración de los diferenciales de presión	76
Tabla 32. Resultados Calculo de Cd e Incertidumbres Asociadas, Orificio de 300 micras	88
Tabla 33. Resultados calculo de Cd e incertidumbres asociadas, orificio de 100 micras.....	89
Tabla 34. Resultados de la comparación Campana Gasométrica –Patrón Tipo Pistón	90
Tabla 35. Características Finales del Nuevo Patrón Tipo Pistón.....	92
Tabla 36. Procedencia de los Patrones tipo Pistón en los Principales INM del Mundo	112
Tabla 37. Operación de Sistemas Patrón Tipo Pistón	114

Lista de Apéndices

APÉNDICE A. METROLOGÍA Y CONCEPTOS BÁSICOS.....	101
APÉNDICE B. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS Y EL CONCEPTO DE CAUDAL	106
APÉNDICE C. PRINCIPIO DE OPERACIÓN Y PARAMETROS RELEVANTES DE UN PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN.....	111
APÉNDICE D. GENERALIDADES DE LOS PATRONES PARA GAS A BAJO CAUDAL	121
APÉNDICE E. CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE CAUDAL.....	129
APÉNDICE F. MEDIDORES DE CAUDAL	134

RESUMEN

TÍTULO:

PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN PARA MEDICIÓN DE BAJOS CAUDALES Y VOLÚMENES DE GAS. AUTOMATIZACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN.*

AUTORES:

Jorge Andrés Reyes Valdés.

Raul Humberto Tapia Carreño**

PALABRAS CLAVES:

Patrón, Calibración, Pistón, Automatización.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo del proyecto es la automatización y puesta en operación de un patrón primario tipo pistón, el cual cuenta a nivel internacional con un amplio reconocimiento en el ámbito metrológico, para la calibración de medidores a bajos caudales y volúmenes de gas.

Para el desarrollo del proyecto se diseñó el sistema de control y adquisición de datos automatizado con el cual el metrólogo opera el banco, se exhiben las diferentes variables del proceso en tiempo real a través de una interfaz gráfica y almacena los datos de la calibración. Adicionalmente se realizó la fabricación, el ensamble de los elementos del patrón, bajo estrictos requerimientos de calidad. Ensamblado el patrón se realizó la calibración de los elementos primarios y secundarios de medición, y posteriores pruebas de caracterización del patrón, para obtener un banco con altas cualidades metrológicas. Con el fin de validar los resultados obtenidos se realizaron dos comparaciones, una con el patrón nacional de flujo tipo pistón del Centro Nacional de Metrología de México (CENAM) y otra contra la campana gasométrica del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas).

El proyecto fue desarrollado por el CDT de Gas, con el apoyo de Conciencias, la Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander y contando con la asesoría del CENAM, con el fin de ampliar la infraestructura metrológica existente en Colombia para la calibración de medidores de gas, cubriendo el rango de bajos con un alcance de calibración para el patrón de $0.05 \text{ dm}^3/\text{min}$ a $45 \text{ dm}^3/\text{min}$ y mejor capacidad de medición de volumen de 0.1%, que permitirá brindar trazabilidad a medidores de volumen, caudal másico y volumétrico de gas utilizados por los diversos sectores de la industria Colombiana, los cuales hasta el desarrollo del presente proyecto debían ser enviados al extranjero para su correspondiente calibración.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuelas de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones e Ingeniería Mecánica, Ing. Jabid Quiroga, Ing. Jose Amaya Palacio.

ABSTRACT

TITLE:

PRIMARY STANDARD PISTON TYPE FOR THE MEASUREMENT OF LOW GAS FLOW AND VOLUMES. AUTOMATION AND START-UP.*

AUTHORS:

Jorge Andres Reyes Valdés.
Raul Humberto Tapia Carreño **

KEY WORDS:

Standard, Calibration, Piston, Automation.

DESCRIPTION:

The goal of this project is the automation and start-up of a primary standard piston type, which counts with a broad international recognition in the metrology area, for the calibration of low flow and volumes of gas.

For the development of the project, we designed the automated control and data acquisition system with whom the metrologist operates the test bank, the different process variables are exhibited in real time throughout a graphic interface and stores the calibration data. Furthermore, we constructed the standard's assembly following strict quality requirements. Once the standard was assembled, we calibrated the primary and secondary measurement elements, afterwards a characterization test of the standard, in order to obtain a high quality metrological test bank. To validate the obtained results, we made two comparisons, one with the national standard of piston type flow of the National Metrology Center of Mexico (CENAM) and another one with the gasometrical bell of the Technological Development Center of gas (CDT of Gas).

The project was developed by the CDT of gas, with the support of Colciencias, the Faculty of Mechanical, Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering of the Universidad Industrial de Santander and also counting with the assessment of the CENAM, in order to broaden existing the metrological facilities in Colombia for the calibration of gas measurers, covering the low range with a calibration accomplishment for the standard of 0.05 dm³/min a 45 dm³/min and better measurement capabilities of volumes of 0.1%, that will allow traceability to volume measurers, mass and volume flow of gases used by the different sectors of the Colombian industry, which up to the development of the present project had to be sent abroad for its corresponding calibration.

* Degree Project.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electronic Engineering and Mechanical Engineering, Jaid Eduardo Quiroga Méndez, Jose Amaya Palacio.

INTRODUCCIÓN

En Colombia existen cinco (5) laboratorios de calibración de medidores de flujo de gas acreditados por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) entre los cuales se halla el CDT de GAS, en estos laboratorios se miden caudales desde 0.016 hasta 250 m³/h.

La SIC otorga la acreditación, basándose en los aspectos reglamentados por la norma ISO 17025, la cual aplica a laboratorios de calibración y ensayos, sin embargo, esta organización no posee patrones de flujo de gas en su división de metrología, de esta forma resulta imposible asegurar una cadena de trazabilidad única para Colombia, en lo referente a metrología de flujo de gas. Uno de los retos que enfrenta la comunidad metrológica, no solo a nivel nacional, sino internacional, es asegurar esta trazabilidad a todo nivel (caudales bajos y altos), este reto se afronta desde el momento mismo de la concepción de los patrones primarios, evaluando los requerimientos nacionales en materia de flujo de gases y planeando estrategias de intercomparación, que permitan detectar problemas y errores en la medición.

El CDT de GAS posee el único patrón primario en Colombia para medición de flujo de gas (tipo campana gasométrica) el cual está acreditado por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) y recientemente participó en una comparación realizada con IPT de Brasil (Febrero/2005). En el rango de los altos caudales, se diseñó y construyó un banco patrón secundario basado en la tecnología de boquillas sónicas, con aportes de COLCIENCIAS. Con este banco se soporta la medición de caudales entre 3 y 500 m³/h, rango lo suficientemente amplio para cubrir el sector comercial e industrial. En el rango de bajos caudales no existía en Colombia un patrón que permitiera tener una referencia nacional.

La Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas - CDT de GAS - consciente de esta situación, colocó a consideración de COLCIENCIAS el proyecto titulado "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS QUE OPERAN A BAJOS CAUDALES" con el objeto de continuar desarrollando la infraestructura metrológica Colombiana requerida para solventar las necesidades de los diversos sectores productivos en relación al aseguramiento de las

mediciones; tal proyecto fue aprobado por COLCIENCIAS y ejecutado por la Corporación CDT de GAS, la Universidad Industrial de Santander y en su nombre las Escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones brindando los resultados que se exponen en el presente documento.

El desarrollo del Patrón presentó diversos retos, desde las limitantes relacionadas con el ajustado presupuesto (si se tiene en cuenta que un Patrón tipo Pistón comercial de características similares puede ascender a los 130 000 USD frente a los aproximadamente 45000 USD invertidos en el presente proyecto) hasta la consecución de ciertos componentes cuyas especificaciones complicaron los procesos de compras por la dificultad de hallar proveedores que cumplieran con los requisitos definidos. Pero todas ellas fueron solventadas hasta lograr con éxito el desarrollo del patrón.

El objetivo principal fue alcanzado con éxito y hoy Colombia posee un Patrón Tipo Pistón con un alcance de caudal de $0.05 \text{ dm}^3/\text{min}$ a $45 \text{ dm}^3/\text{min}$ y mejor capacidad de medición de volumen de 0.1%, que permitirá brindar trazabilidad a medidores de volumen, caudal másico y volumétrico de gas utilizados por los diversos sectores de la industria Colombiana, los cuales hasta el desarrollo del presente proyecto debían ser enviados al extranjero para su correspondiente calibración.

El desarrollo del tema a través de este documento es de la siguiente manera: En el primer capítulo se presenta una descripción de los componentes del patrón, en el segundo capítulo se tratan los aspectos referentes a su construcción, en el tercer capítulo se describen el software de control y la interfaz grafica realizados para el funcionamiento del patrón, en el capítulo cuatro se presentan los procedimientos utilizados y los resultados obtenidos en la calibración del patrón y por ultimo en el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos en el proceso de caracterización y pruebas de comparación.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN

1.1 INTRODUCCIÓN A PATRONES PRIMARIOS PARA MEDICIÓN DE CAUDAL

La percepción inicial de metrología deriva de su etimología: del griego metros medida y logos tratado, podemos decir que metrología es la ciencia de las mediciones y que medir es comparar con algo (unidad) que se toma como base de comparación. La metrología es tan importante, que es considerada la columna vertebral de todas las disciplinas científicas.

Una unidad es un valor en términos del cual puede definirse la magnitud medida. De gran importancia son las unidades del Sistema Internacional de Unidades, SI, estas son establecidas por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) bajo cuya autoridad funciona la Oficina Internacional de Pesa y Medidas (BIPM - Bureau International des Poids et Mesures) con sede en Francia.

Anteriormente citamos algo con que comparar; ese algo se conoce como patrón. En la actualidad, y dado que los avances de la ciencia han permitido definiciones exactas y confiables de las unidades, basadas en constantes físicas universales, se define como patrón: una medida materializada, instrumento de medir, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores conocidos de una magnitud, a fin de transmitirlos por comparación a otros instrumentos de medida.

Definiremos entonces patrón primario como aquel patrón designado o ampliamente reconocido como poseedor de las más altas calidades metrológicas, cuyo valor se acepta sin referencia a otros patrones de la misma magnitud. Otras dos definiciones importantes son: patrón internacional y nacional de medición, aquellos patrones reconocidos mediante acuerdos internacionales o nacionales respectivamente y además poseedores de altas características metrológicas (En el APÉNDICE A se da una presentación completa de metrología básica).

Cuando nos referimos a patrones primarios de flujo de gas existen patrones para reproducir volumen y caudales másicos y volumétricos de gas, dependiendo de su principio de operación, algunos poseen la capacidad de reproducir las tres magnitudes, ya que los patrones de volumen son simples totalizadores que permiten cuantificar el volumen de gas transferido o recibido y que solo requieren de la integración de la magnitud tiempo para obtener el caudal volumétrico y de una adecuada estación de estado que permita obtener el caudal másico. En la siguiente grafica se muestra la clasificación de los patrones para medición de flujo de gas:

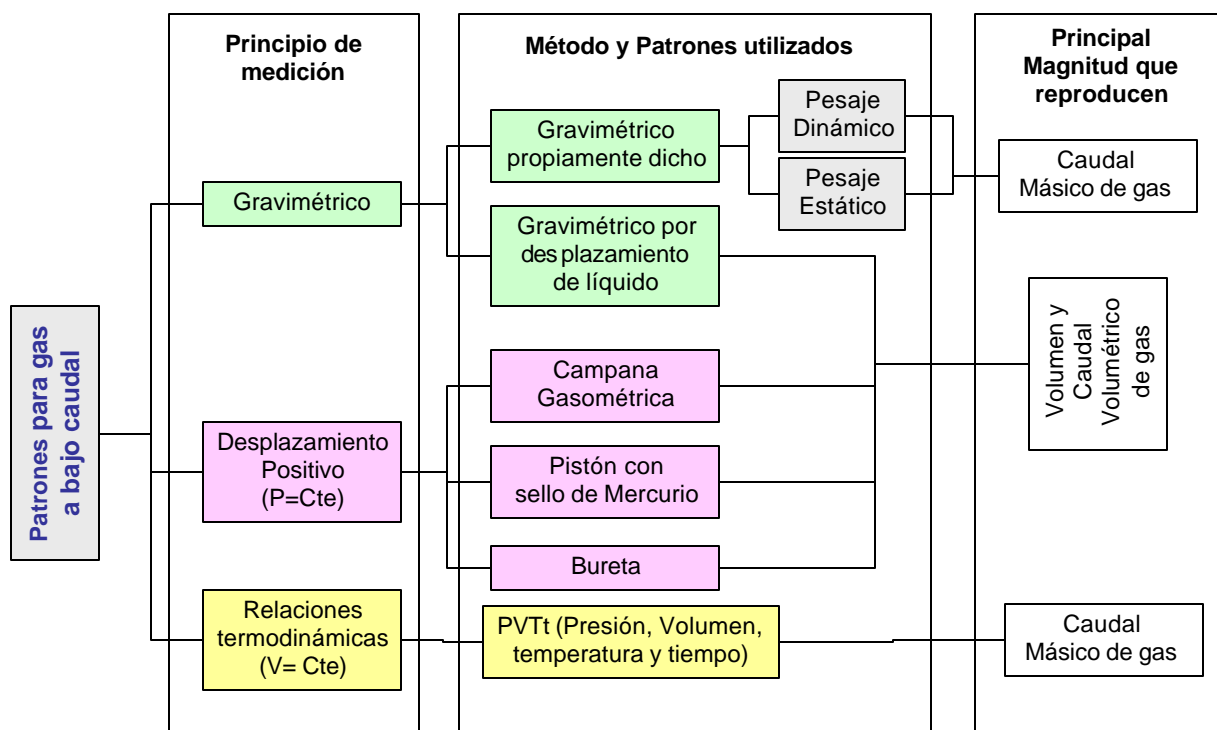


Figura 1. Patrones para medición de gas

Una de las técnicas más antiguas y más comúnmente usadas para medición de gas es el patrón tipo pistón. Este patrón consiste de un tubo de vidrio de diámetro interno determinado (de alta precisión) que contiene dentro un pistón de plástico ligeramente menor en diámetro. Una acanaladura horizontal alrededor del pistón retiene mercurio, de tal forma que exista poca fricción entre el tubo y el pistón, y sirva de sello. Su principio de operación se basa en la medición del volumen de gas acumulado o entregado por el conjunto tubo pistón a unas condiciones de temperatura y presión medidas. Una descripción completa de su principio de funcionamiento y demás detalles teóricos se describen en el APÉNDICE C, y en el APÉNDICE D se presenta el principio de operación de otros patrones primarios.

Debido a la complejidad del nuevo patrón desde el punto de vista operacional y al alto desempeño metrológico que se esperaba obtener, se dividió el Patrón en subconjuntos que permitieran un diseño y construcción más ágil, manteniendo control sobre los parámetros de diseño (Ver Figura 2).

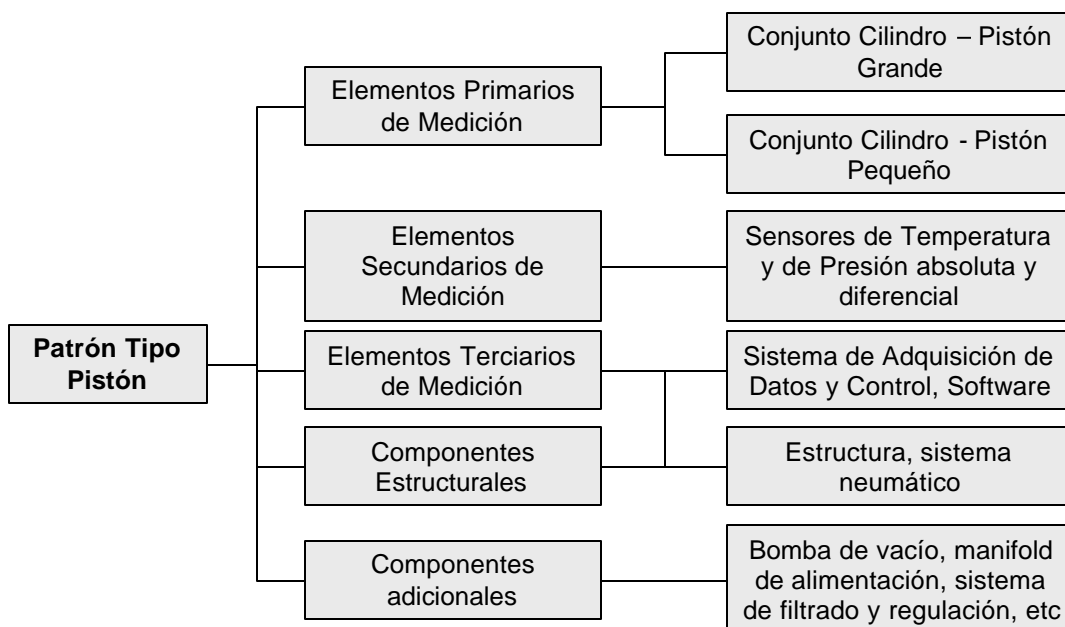


Figura 2. Subconjuntos del Patrón Tipo Pistón

1.2 ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN

Estos se constituyen de los dos conjuntos Cilindro-Pistón y demás accesorios que se muestran en la Figura 3 (grande y pequeño) que permiten reproducir físicamente un volumen limitado por la base de cada conjunto, el cilindro de vidrio y el Pistón.

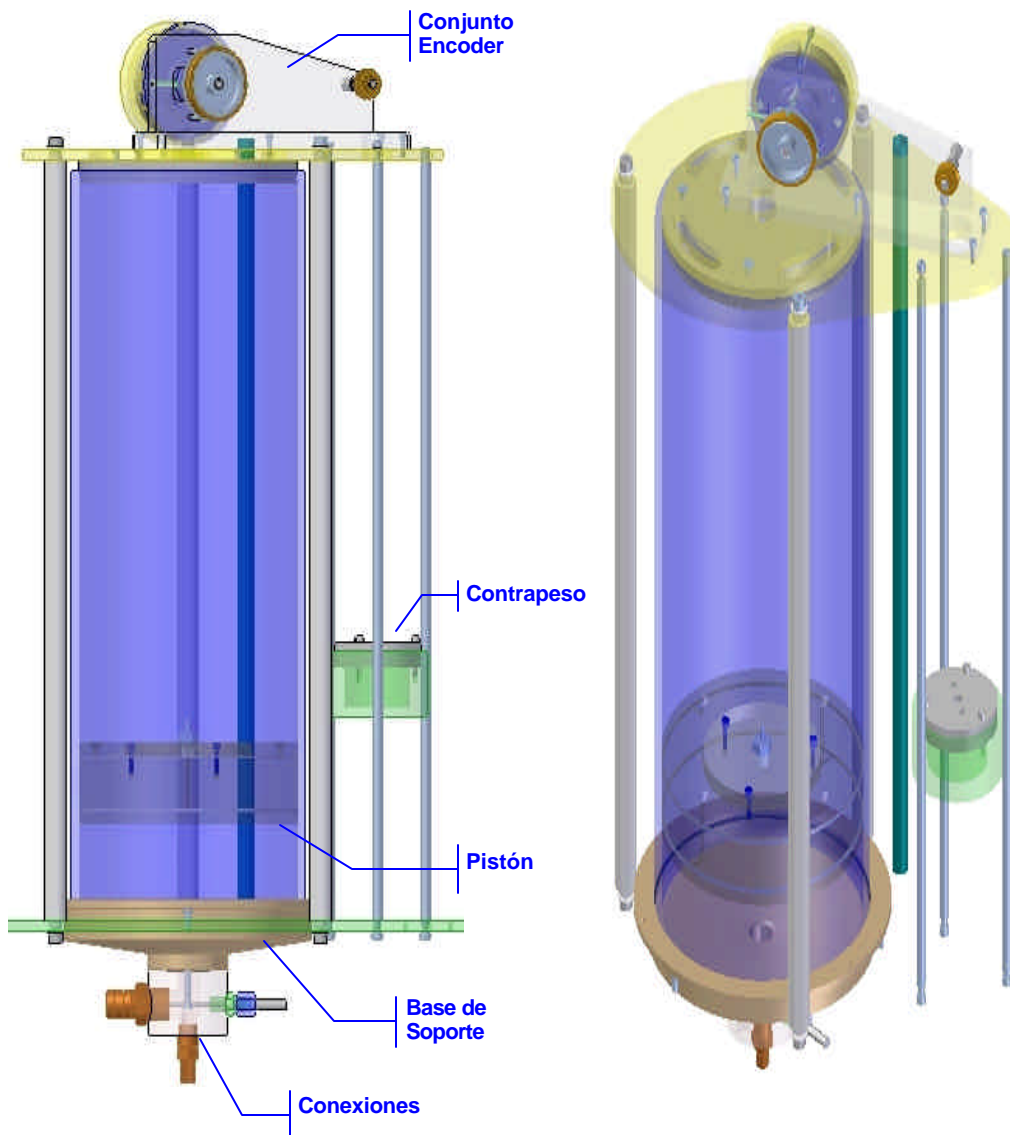


Figura 3. Modelamiento CAD del Elemento Primario de Medición (conjunto Cilindro-Pistón Grande)

1.2.1 Cilindros

Los cilindros de medición son sin duda uno de los elementos más importantes dentro del patrón tipo pistón, ya que en base al área transversal interna de estos cilindros se estima el volumen o caudal de gas.

La longitud de los cilindros es otro parámetro que determina la capacidad volumétrica del pistón, por tanto este valor está igualmente ligado al alcance de caudal que se desea manejar; pero a diferencia del diámetro, la longitud tiene una cota inferior para su dimensionamiento, la cual depende de dos factores principalmente: la necesidad de utilizar un sistema muy exacto para la detección de la posición vertical del pistón si las longitudes que se están manejando son muy cortas, la segunda causa es el comportamiento de la presión dentro del pistón, ya que se requiere un desplazamiento inicial del pistón durante el cual se estabilizan las condiciones de presión dentro de este, por tanto se debe añadir a la longitud nominal del pistón una cierta longitud para permitir la estabilización de la presión y por ende el caudal.

Dada la importancia que posee el cilindro sobre el comportamiento del patrón, es necesario garantizar para éste, dos características geométricas: la circularidad y concentricidad, tales que permitan el desplazamiento de un pistón en el interior del cilindro, evitando que este pistón entre en contacto con las paredes del cilindro y así garantizar un buen funcionamiento del patrón.

El material comúnmente empleado para la fabricación de los cilindros en un patrón tipo pistón es el vidrio Borosilicato, estandarizado internacionalmente según la norma DIN/ISO 3585. Se caracteriza por una excelente resistencia química, una baja dilatación térmica, y en consecuencia, una elevada resistencia al choque térmico. Este comportamiento físico y químico lo convierte en el material ideal para el uso en el laboratorio. Por otra parte, es muy adecuado para aplicaciones en las cuales se requiere una extrema estabilidad dimensional. Se desechan los materiales metálicos para la fabricación de los cilindros, puesto que se requiere de materiales transparentes para la detección del pistón o su permanente inspección y los materiales poliméricos transparentes debido a su alto coeficiente de dilatación térmica que los hace poco estables dimensionalmente.

1.2.2 Pistón

En cuanto al Pistón, el problema de la estabilidad dimensional puede tornarse más complejo puesto que se prefiere el uso de materiales poliméricos, debido a su bajo peso, bajo coeficiente de fricción, excelente maquinabilidad y acabado superficial, presentando el inconveniente de

poseer altos coeficientes de dilatación lineal térmica (10^{-4} a 10^{-5} K^{-1}) comparados con el del vidrio Borosilicato.

Todos los patrones Tipo Pistón de los cuales se tiene conocimiento, poseen pistones fabricados en PVC de alta pureza, este material posee todas las características antes mencionadas con uno de los coeficientes de dilatación lineal térmica mas bajos entre los materiales poliméricos ($7.3 \times 10^{-5} \text{ in/in-}^{\circ}\text{F}$), siendo también el material utilizado por los fabricantes de patrones tipo pistón de marcas tales como Brooks, MKS y Cal-Bench.

1.2.3 Sello con Mercurio

Solo los patrones Tipo Pistón que operan con sello de mercurio son considerados patrones primarios de calibración, dada la hermeticidad que dicho sello permite obtener.

Aunque este tipo de sello es de configuración sencilla, exige el manejo de estrechas tolerancias de ajuste entre el Pistón y el cilindro de vidrio, de manera que se garantice una tolerancia diametral máxima que evite el derramamiento del mercurio a través de las paredes del cilindro. Para ilustrar el fenómeno se presenta en la Figura 4 tres posibles situaciones para el ajuste entre el pistón y el cilindro; En la Situación (a) se tiene un pistón con excelente circularidad y concéntrico respecto al cilindro de vidrio, lo cual brinda un área constante para el acomodamiento del anillo de mercurio. En las situaciones (b) y (c) se presenta el rompimiento del sello de mercurio debido a tolerancias inadecuadas, problemas de nivelación del conjunto cilindro pistón y deficiente circularidad tanto en el cilindro como en el pistón.

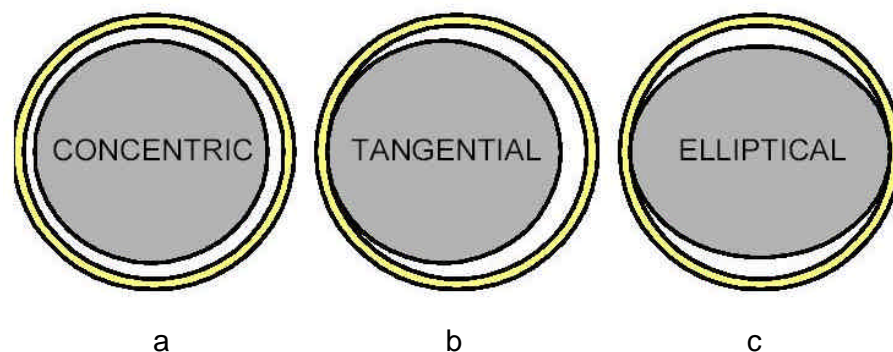


Figura 4. Ajuste del Pistón y el Cilindro de Vidrio

Las tolerancias diametrales utilizadas para el ajuste entre el cilindro y el pistón son del orden de 60 a 200 micras, siendo muy crítica la circularidad de los dos elementos.

1.2.4 Conjunto Encoder y Contrapesos

Para la detección y cuantificación del desplazamiento vertical del pistón se seleccionaron *encoders* rotativos de tipo incremental (los cuales se describen en la sección 1.7.7), además de esto el sistema cuenta con poleas, contrapesos y un cable o cinta de unión. La función del contrapeso es mantener en contacto constante a la cinta con la polea, para que no ocurran deslizamientos que causen errores en la medición.

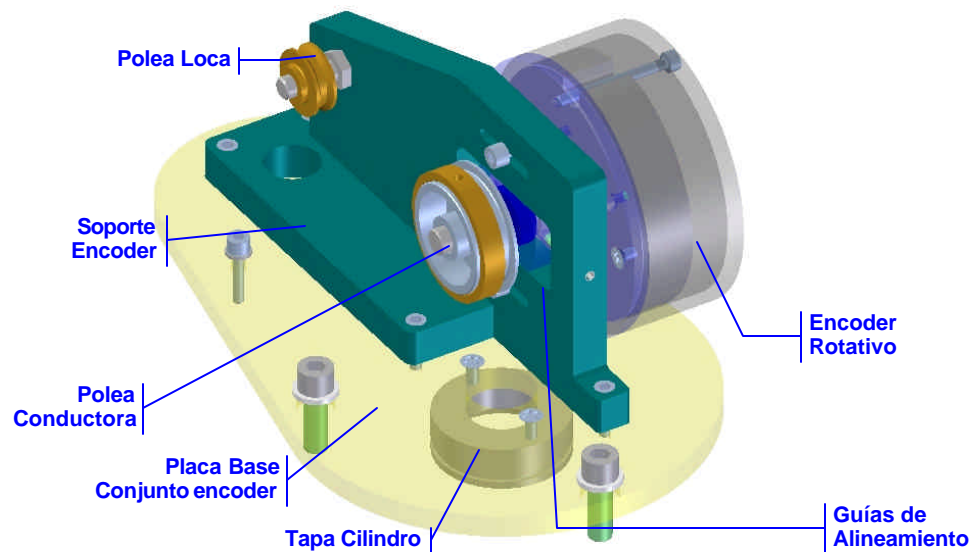


Figura 5. Conjunto Encoder Pistón Pequeño

La exactitud de estos sistemas esta dada por la resolución (pulsos por revolución) y la calidad del encoder utilizado, así como las tolerancias manejadas para los elementos cinemáticos (polea y eje) sin dejar de lado el comportamiento antideslizante que debe tener el cable o cinta de unión empleado.

A partir de los parámetros seleccionados para el Pistón se fijo el alcance de caudal para cada uno de los cilindros dando como resultado las dimensiones y especificaciones nominales que se presentan en la Tabla 1.

Dimensionamiento Base Patrón Tipo Pistón								
Conjunto Cilindro Pistón	Caudal Q_{min}	Caudal Q_{max}	Relación Q_{max}/Q_{min}	Diámetro interno del Cilindro	Longitud total	Volumen Nominal	Tiempo de un desplazamiento vertical	
	dm^3/min	dm^3/min		mm	mm	dm^3	t_{max}	t_{min}
							min	s
Pequeño	0.05	1	20	38	650	0.65	13	40
Grande	0.5	45	90	150	460	7.0	14	9.42

Tabla 1. Especificaciones Nominales

La integración de los elementos primarios de medición fue necesaria para obtener un equipo compacto que permita utilizar el mismo sistema de control y adquisición de datos para los dos Conjuntos cilindro-Pistón por lo cual fueron montados sobre una misma placa base, a partir de la cual se integraron todos los demás componentes del Patrón.

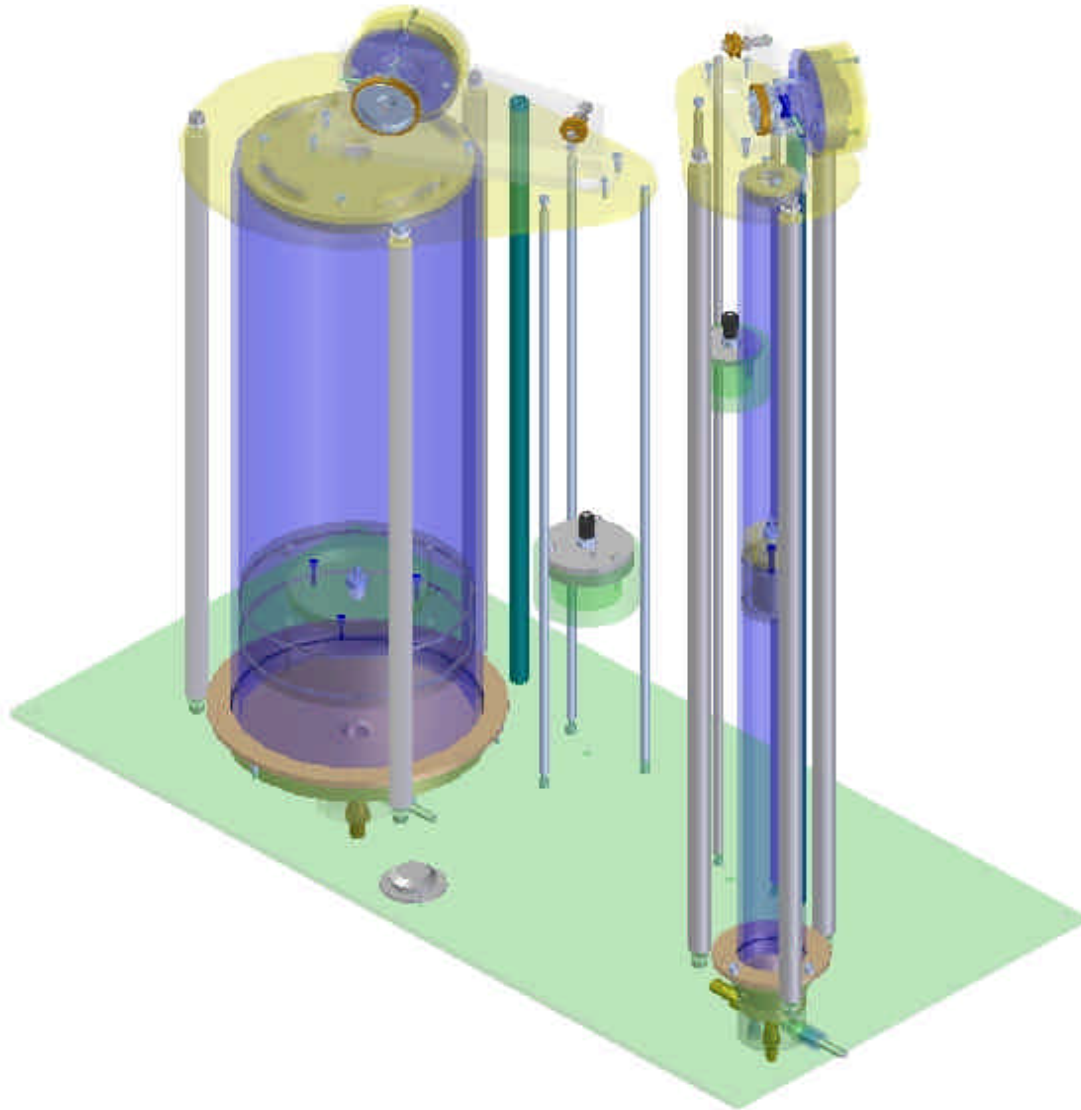


Figura 6. Elementos Primarios de Medición

1.3 ELEMENTOS SECUNDARIOS DE MEDICIÓN

Entre los elementos secundarios se cuentan los instrumentos necesarios para la medición de las magnitudes de influencia del patrón (Presión atmosférica, presión diferencial, temperatura, entre otros).

Para la selección de los elementos secundarios y la definición de ciertas especificaciones se estimó la incertidumbre del patrón considerándolo inicialmente como patrón de volumen y

evaluando la incertidumbre asociada a la reproducción de volumen de gas a condiciones de referencia (20 °C y 101325 Pa).

La incertidumbre fue estimada utilizando la metodología descrita por el principal documento de referencia que a nivel internacional haya sido reconocido; GUIDE TO THE EXPRESSION OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT y del conocimiento que el grupo de trabajo del CDT de GAS desarrollado en relación a patrones de volumen, lo cual permitió establecer la variabilidad de las condiciones de operación típicas en este tipo de patrones, definir el tipo de distribuciones de probabilidad asociados a cada fuente de incertidumbre y estimar el nivel de incertidumbre probable por concepto de cada magnitud de influencia del patrón.

La evaluación de la incertidumbre de medición parte del modelo matemático del fenómeno estudiado, que para el caso del Patrón se trata del volumen de gas a condiciones de referencia y la definición del error de medición en la calibración de medidores de gas, dados por las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{N_p \cdot (T_s + 273.15) \cdot (P_b + P_p)}{K_p \cdot (T_p + 273.15) \cdot P_s} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\%E = \frac{V_m \cdot K_p}{N_p} \cdot \left[\frac{(P_b + P_m) \cdot (T_p + 273.15)}{(P_b + P_p) \cdot (T_m + 273.15)} \right] \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

V: Volumen de Gas en el cilindro (dm³) a condiciones de referencia (T_s, P_s)

N_p: Numero de pulsos generados por el Encoder del elemento primario de medición

K_p: Constante de Calibración del Pistón (Pulsos/dm³) que relaciona el volumen desplazado con los pulsos generados por el encoder

T_s: Temperatura Estándar (K)

P_s: Presión Estándar (1013,25 mbar)

T_p: Temperatura del gas en el cilindro (°C)

T_m: Temperatura del gas en el medidor (°C)

P_b : Presión barométrica (mbar)

P_p : Presión manométrica del gas en el cilindro (mbar)

P_m : Presión manométrica del gas en el medidor (mbar)

V_m : Volumen de gas registrado por el medidor bajo calibración

A partir de los modelos matemáticos, considerando que son dos los pistones a operar, y que para realizar la calibración de un medidor se requiere conocer las condiciones termodinámicas del gas en el medidor (presión y temperatura), entre otras. Se definieron las magnitudes a medir y los sensores e instrumentos necesarios para tal fin, los cuales se listan en la Tabla 2. Cada una de estas magnitudes es registrada por el sistema de adquisición de datos mediante el uso de tarjetas electrónicas que manejan señales eléctricas específicas acorde con las emitidas por los sensores y las cuales se describe en la sección 1.7.

Magnitud a medir	Abrev	Instrumento
Presión Atmosférica	P_b	Barómetro
Temperatura Ambiente	T_{amb}	RTD PT 100
Presión Cilindro Grande	P_{cg}	Transductor de Presión diferencial
Presión Cilindro Pequeño	P_{cp}	
Desplazamiento pistón grande	N_{pg}	Encoder
Desplazamiento pistón pequeño	N_{pp}	Encoder
Temperatura Cilindro Grande	T_{cg}	RTD PT 100
Temperatura Cilindro pequeño	T_{cp}	RTD PT 100
Temperatura medidor	T_m	RTD PT 100
Presión del medidor	P_{dm}	Transductor de Presión diferencial
Volumen del medidor a calibrar	V_m	Sensor óptico

Tabla 2. Instrumentos necesarios para el Patrón tipo Pistón

1.3.1 Presión Atmosférica (P_b)

La presión atmosférica no es una variable que incida en el mensurando volumen o flujo de gas (a condiciones estándar), generalmente se registra solo como referencia. Sin embargo en el Patrón se decidió utilizar transductores diferenciales para la presión en los cilindros y el medidor y sumar esta a la atmosférica para obtener la presión absoluta.

Esta decisión incrementa ligeramente la incertidumbre relacionada con las mediciones de presión absoluta dado que dependería de 2 instrumentos (Barómetro + Manómetro), sin embargo el costo final de la configuración seleccionada es mucho menor

1.3.2 Presión Cilindro Grande (Pcg) y Presión Cilindro Pequeño (Pcp)

En el diseño del elemento primario de medición se previeron tomas en las bases de cada cilindro con el objeto de muestrear la presión más representativa del gas en la cámara de medición y se decidió utilizar un solo transductor de presión que pudiera ser seleccionado acorde con el Pistón a operar (grande o pequeño), pues no se pretende utilizarlos simultáneamente.

La selección del cilindro en el cual se desea medir la presión se realizaría por medio de una pequeña válvula manual de 3 vías, 2 posiciones ubicada en el panel frontal del patrón.

1.3.3 Presión del Medidor (Pm)

Existen tres posibles situaciones en las cuales se requiere medir la presión del medidor a calibrar y dependen básicamente del tipo de medidor y de la forma en que opere el pistón (ascendente o descendente).

➤ Operación Ascendente

Cuando se opere en esta forma se tendrá la opción de calibrar a alta presión de entrada, medidores de flujo crítico, y a baja presión medidores de desplazamiento positivo o inferenciales. Por tal razón es requerida la utilización de transductores de presión con dos alcances de presión bien definidos:

- Baja Presión: Transductor de presión diferencial con un alcance similar al necesario para los cilindros (0 - 50 mbar).
- Alta presión: Transductor con un alcance de 1 a 8 bar. Este transductor no fue previsto inicialmente en el proyecto propuesto a COLCIENCIAS por ser de uso poco frecuente. Sin embargo en el CDT de GAS se cuenta con un instrumento que puede ser utilizado para tal fin.

➤ Operación Descendente

Este modo de operación es básicamente usado para calibrar medidores de flujo crítico a vacío, pudiéndose utilizar en la entrada del medidor el mismo transductor de baja presión utilizado para operación ascendente.

En los medidores de flujo crítico (boquillas, Orificios, etc) es necesario verificar la relación de presiones para asegurar el bloqueo o condición de flujo sónico (teóricamente $P_2/P_1 < 0.533$), pero esta medición no es una variable que requiera ser medida con gran exactitud por lo que es posible utilizar uno de los manómetros de columna que posee el CDT de GAS para regular la presión de vacío generada por la bomba aguas abajo del medidor.

1.3.4 Temperatura Ambiente (T_{amb})

De igual manera que la presión atmosférica, esta magnitud sirve como referencia y variable de control, sin afectar directamente el mensurando, aunque sí, su incertidumbre, ya que se debe tener en cuenta la incertidumbre debida a la expansión térmica de la polea conductora del encoder considerando que esta se halla a temperatura ambiente, puesto que no es posible determinar una temperatura representativa de la misma.

El monitoreo de la temperatura ambiente es de vital importancia para la operación del patrón y el logro de bajo niveles de incertidumbre. Este requiere de una banda de temperatura muy estrecha para operar de manera correcta (20 ± 2 °C). De otra parte es necesario evaluar la estabilidad térmica del cuarto de calibración, del Patrón y del medidor a calibrar para garantizar la estabilidad térmica del sistema y evitar incertidumbres por concepto de las variaciones de densidad en el fluido de calibración. Causada por perfiles de temperaturas desde o hacia el ambiente del laboratorio.

El sensor utilizado para medir la temperatura ambiente se ubicó en el interior del cubículo, donde se hallan los elementos primarios de medición (conjunto cilindro –pistón) logrando estimar la temperatura representativa del ambiente.

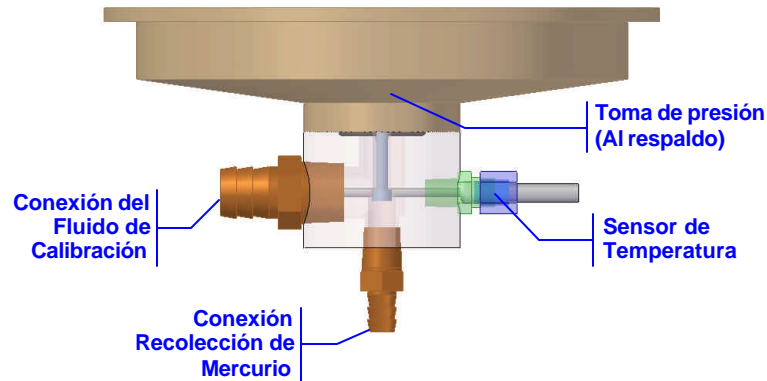


Figura 7. Base Del Cilindro Grande

1.3.5 Temperatura Cilindro Grande (Tcg) y Temperatura Cilindro pequeño (Tcp)

Los sensores necesarios para la medición de estas temperaturas fueron ubicados directamente en la conexión de entrada a cada cilindro, evitando los errores que presentan ciertos patrones tipo Pistón de marcas comerciales que sensan la temperatura lejos de la cámara de medición. Los detalles de la ubicación de los sensores pueden apreciarse en la Figura 7.

1.3.6 Temperatura del Medidor (Tm).

El alcance de caudal del pistón, limita inmediatamente el diámetro de tubería a utilizar. De esta forma se puede prever que los tubos de medición para los medidores (P. Ej. diámetros de 1/2, 3/8, y tal vez 1/4 SCH 40) no superarán en la mayoría de los casos los 20 mm.

Por tal razón se deben utilizar sensores cuyo diámetro sea menor o igual a 1/8 de pulgada. Igualmente los sensores requeridos para los cilindros deben ser de pequeño tamaño para disminuir los efectos de inercia térmica debido a la masa del propio sensor.

1.3.7 Desplazamiento de los cilindros grande (Npg) y pequeño (Npp)

Aunque el encoder hace parte del elemento primario de medición, por su estructura eléctrica se prefirió presentarlo junto a los elementos secundarios. Este permite la detección del desplazamiento vertical de los pistones, siendo requeridos 2 Encoder rotativos incrementales con las siguientes características:

- Doble canal de pulsos desfasados 90 grados y que generen cada uno 5000 pulsos/rev

- Un tercer canal Z, que entregue un pulso por revolución, con el cual sea posible verificar el encoder, estas dos primeras características son prácticamente estándares en todos los encoder rotativos.
- Con montaje tipo brida
- Bajo torque de arranque.

1.3.8 Contabilización del Volumen del Medidor

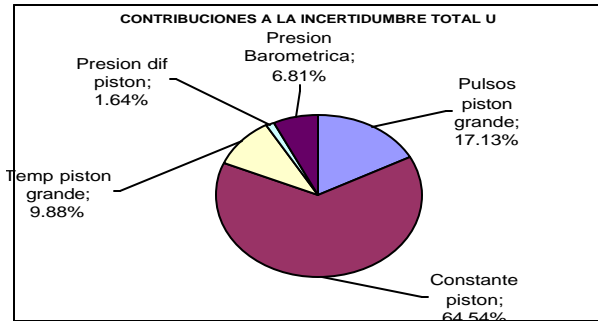
Según el medidor que se requiera calibrar existen dos opciones, los medidores analógicos y los que poseen una salida digital en forma de pulsos:

- Para los analógicos se requiere un sensor óptico que permita detectar el giro de la cifra menos significativa del odómetro o el giro de la aguja en la carátula del medidor. Existe la posibilidad de calibrar medidores de caudal tales como Rotámetros, en los cuales no es posible adquirir el caudal del medidor en forma automática y se debe registrar manualmente el caudal de prueba luego de ajustarlo y estabilizarlo.
- Para los medidores con salida digital se requiere el conteo de los pulsos a través de una tarjeta de adquisición de datos ligada al sistema de adquisición y control.

Luego de la definición del instrumental y los sensores, se procedió a evaluar la incertidumbre para el volumen del Patrón, a partir de la cual se establecieron los requerimientos metrológicos relacionados con las fuentes de incertidumbre, entre las que se destacan las de tipo B (resolución, calibración del instrumental, etc) y las de tipo A (Variabilidad de las mediciones).

El presupuesto de incertidumbre obtenido es presentado en la Tabla 3 en ella pueden apreciarse las fuentes de incertidumbre consideradas y los valores requeridos en cada una de ellas para lograr un nivel de incertidumbre acorde con la jerarquía metrológica del patrón.

N°	Fuente	Abrev	Valor Estimado	Fuente de Informacion	Incertidumbre Original	Tipo, Distribución	Combinada Parcial	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribucion $u_i(y)$	Grados de Libertad v	$u_i(y)^2$	Contribución %
1	Pulsos piston grande	Ppg	40000 Puls				10.05 Puls	7.52E-05 dm ³ /Puls	7.556E-04	10	5.71E-07	17.13%
	Repetibilidad	XXXXX	XXXXX	Mediciones Repetidas	10 Puls	A normal, K=1	10 Puls	XXXXX	7.518E-04	10	5.65E-07	99.01%
	Calibracion Encoder	XXXXX	XXXXX	Certificado de Calibracion	2 Puls	B normal, K=2	1 Puls	XXXXX	7.518E-05	∞	5.65E-09	0.99%
	Resolucion Encoder	XXXXX	XXXXX	Catalogo	5.E-04 Puls	B Rectang, K=2	0.0001 Puls	XXXXX	1.085E-08	∞	1.18E-16	0.00%
2	Constante piston	Kpg	12000 Puls/dm ³				5.852 Puls/dm ³	-2.51E-04 dm ⁶ /Puls	1.47E-03	56	2.15E-06	64.54%
	Desviacion x Temp	XXXXX	XXXXX	Mediciones Repetidas	3 Puls/dm ³	A normal, K=1	3.0 Puls/dm ³	XXXXX	-7.52E-04	10	5.65E-07	26.28%
	Calibracion Patron	XXXXX	XXXXX	Certificado de Calibracion	10 Puls/dm ³	B normal, K=2	5.025 Puls/dm ³	XXXXX	-1.26E-03	∞	1.59E-06	73.72%
	Resolucion del patron	XXXXX	XXXXX	Certificado de Calibracion	5.83E-04 Puls/dm ³	B Rectang, K=2	1.68E-04 Puls/dm ³	XXXXX	-4.22E-08	∞	1.78E-15	0.00%
3	Temp piston grande	Tpg	19.00 °C				0.056 °C	-1.03E-02 °C	5.74E-04	68	3.29E-07	9.88%
	Repetibilidad	XXXXX	XXXXX	Mediciones Repetidas	0.02 °C	A normal, K=1	0.0200 °C	XXXXX	-2.06E-04	10	4.24E-08	12.87%
	Calibracion RTD	XXXXX	XXXXX	Certificado de Calibracion	0.10 °C	B normal, K=2	0.0500 °C	XXXXX	-5.15E-04	∞	2.65E-07	80.43%
	Resolucion RTD	XXXXX	XXXXX	Catalogo	0.05 °C	B Rectang, K=2	1.44E-02 °C	XXXXX	-1.49E-04	∞	2.21E-08	6.70%
4	Presion dif piston	Pdg	6.00 mbar				0.071 mbar	3.30E-03 1/K	2.34E-04	33	5.46E-08	1.64%
	Repetibilidad	XXXXX	XXXXX	Mediciones Repetidas	0.05 mbar	A normal, K=1	0.050 mbar	XXXXX	1.65E-04	10	2.72E-08	49.92%
	Calibracion Diferencial	XXXXX	XXXXX	Certificado de Calibracion	0.1 mbar	B normal, K=2	0.050 mbar	XXXXX	1.65E-04	∞	2.72E-08	49.92%
	Resolucion Diferencial	XXXXX	XXXXX	Catalogo	0.01 mbar	B Rectang, K=2	2.89E-03 mbar	XXXXX	9.53E-06	∞	9.08E-11	0.17%
5	Presion Barometrica	Pb	905.0 mbar				0.144 mbar	3.30E-03 1/dm ³	4.76E-04	36	2.27E-07	6.81%
	Repetibilidad	XXXXX	XXXXX	Mediciones Repetidas	0.10 mbar	A normal, K=1	0.100 mbar	XXXXX	3.30E-04	10	1.09E-07	48.00%
	Calibracion Barometro	XXXXX	XXXXX	Certificado de Calibracion	0.20 mbar	B normal, K=2	0.100 mbar	XXXXX	3.30E-04	∞	1.09E-07	48.00%
	Resolucion Barometro	XXXXX	XXXXX	Catalogo	0.10 mbar	B Rectang, K=2	0.029 mbar	XXXXX	9.53E-05	∞	9.08E-09	4.00%



	Valor	Contribución %	
Suma Total Contribución $u_i(y)^2$	$\sum u_i^2(y)$	3.333E-06	100.0%
Incumbencia Combinada	$u_c(V) = \sqrt{\sum u_i(V)}$	1.826E-03	dm ³
Grados de Libertad Efectivos	$n_{ef} = \frac{u_c^2(V)}{\sum \frac{u_i^2(y)}{n_i}}$	93.0	XXXXXX
Factor de Cobertura	$t_{95}(n_{ef})$	1.986	XXXXXX
Incumbencia Total	$U = u_c(V) \cdot t_{95}(n_{ef})$	0.0036	dm ³
Incumbencia Relativa	$U_{rel} = \frac{U(V)}{V_{nom}} \cdot 100 =$	0.12	%

Tabla 3. Estimación previa de la incertidumbre volumen para el nuevo patrón tipo pistón

Realizada la estimación previa de incertidumbre se extrajeron los requerimientos metroológicos para los principales instrumentos asociados al Nuevo Patrón Tipo Pistón (ver Tabla 4).

Instrumento	Alcance de Medición necesario	Resolución	Error o Clase	Incertidumbre de calibración requerida
Barómetro	800 – 1200 mbar	0.1 mbar	0.1 % F.S. ³	± 0.2 mbar (K=2)
Sensor de Temperatura	10 – 30 °C	0.05 °C	0.1 %	± 0.1 °C (K=2)
Transductor de Presión diferencial	0 – 50 mbar	0.01 mbar	0.5 % F.S.	± 0.1 ± (K=2)
Encoder	N/A	5000 Pulsos/rev	N/A	± 5 Pulsos (K=2)

Tabla 4. Requisitos Metroológicos de los Instrumentos Asociados al Patrón Tipo Pistón

1.4 ELEMENTO TERCIARIO DE MEDICIÓN

Como elemento terciario de medición se definió el sistema de adquisición de datos y control, encargado de ejecutar las labores de registro y monitoreo de las variables durante la calibración, disminuyendo la incertidumbre asociada a errores humanos en los procesos de registro.

Los instrumentos y sensores (Que se describen en la sección 1.7) envían las señales eléctricas hacia tarjetas de adquisición de datos (Módulos) de acuerdo a su naturaleza digital o analógica, y estos a su vez la transmiten al procesador del sistema el cual convierte estas señales en información digital que es transferida al controlador por comunicación serial (RS485) para ser corregida y presentada al usuario por medio de un PC como muestra la Figura 8.

³ Porcentaje de error máximo a Full escala

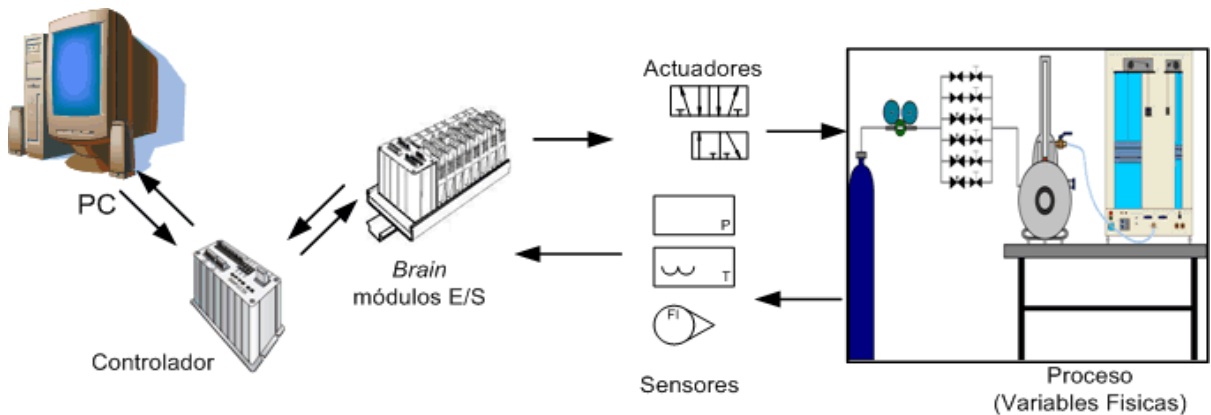


Figura 8. Esquema del Sistema de Control y Adquisición de Datos del Patrón Tipo Pistón

1.5 PLATAFORMA OPTO 22

El Sistema de adquisición y control se implementó bajo la plataforma Factory Floor de la empresa OPTO 22, sistema que ha sido utilizado anteriormente en otros proyectos desarrollados por el CDT de Gas y que ha demostrado poseer las especificaciones adecuadas para ser integrado en sistemas de medición.

1.5.1 Opto Control

Es un lenguaje de programación desarrollado por OPTO 22 y basado en diagramas de flujo, este permite el desarrollo de software para automatización industrial utilizando hardware de control (Controladores) de OPTO 22. Opto control hace parte del software para automatización industrial Factory Floor de 32-bits para Windows. A continuación se presentan los aspectos y partes fundamentales necesarias para automatizar un sistema utilizando tecnología OPTO 22.

➤ **Estrategia**

El Software creado usando Opto Control es llamado estrategia. Esta contiene todas las definiciones e instrucciones necesarias para el proceso de control. Está compuesta por un conjunto de diagramas de flujo o *charts*.

➤ **Chart**

Es una serie de instrucciones en forma de diagrama de flujo en opto control, también llamado tarea. Cada *chart* controla un aspecto de la estrategia, una parte del proceso de automatización. En conjunto todos los *charts* constituyen la estrategia. Los *charts* están constituidos por bloques conectados por flechas, que indican como fluye el proceso como se ve en la Figura 9. Estos bloques pueden ser:

- Bloques de Acción: Son bloques rectangulares que contienen comandos o instrucciones a ser ejecutadas, un bloque puede incluir muchos comandos y tener varias entradas pero solo una salida.
- Bloques de Condición: Poseen forma de diamante y contienen condiciones que controlan el flujo lógico de una estrategia de opto control. Los bloques de condiciones pueden tener varias entradas pero solo dos salidas: verdadero y falso. Más de una condición puede ser evaluada en un solo bloque de condición. Los operadores AND y OR determinan si todas la condiciones deben ser verdaderas para obtener una salida verdadera (AND) o si solo una condición debe ser cierta para obtener una salida verdadera (OR).
- Bloques de OptoScript: Bloques en forma hexagonal que contienen lenguaje de programación Optoscript. Estos bloques pueden tener varias entradas pero solo una salida.

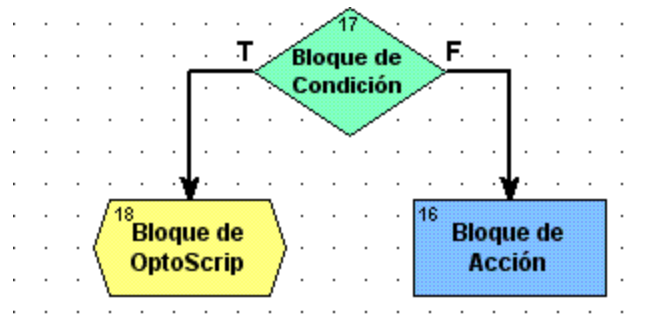


Figura 9. Bloques de Opto Control

➤ Controladores

Los controladores son dispositivos electrónicos que proveen la inteligencia requerida para la automatización. Usando Opto Control, se puede crear un conjunto de instrucciones (un software) que le indique al controlador como debe trabajar cada aspecto del proceso. Opto control también permite descargar el software de programación a un controlador de Opto 22 y este lo ejecuta como una aplicación permanente. Puesto que el conjunto de instrucciones es almacenado en la memoria interna del controlador este puede ejecutar el programa mientras el computador esta apagado o es utilizado para otra aplicación. Las instrucciones pueden ser modificadas fácilmente cuando sea necesario.

➤ Brain

Es un procesador que se enclava en el *rack* seguido de módulos análogos, digitales y/o entradas/salidas de propósitos especiales formando una unidad E/S inteligente. Además de comunicarse con el computador o el controlador el *Brain* posee la inteligencia local necesaria para llevar a cabo funciones básicas de control tales como controles On/Off, contadores, o tareas complejas como controles PID, conversiones de temperatura, salidas proporcionales al tiempo, y cierres de emergencia.

➤ Modulo E/S

Un dispositivo que provee una interfaz entre las señales recibidas del "Mundo Real", dispositivos de campo y señales lógicas usadas en computadores y controladores.

1.5.2 Opto Display

Es un paquete que forma parte del software para automatización industrial Factory Floor de 32-bits para Windows utilizado para crear interfaces hombre-maquina (IHM), o interfaces de

operador para monitorear sistemas de control. Este se puede utilizar para crear una IHM que lleve a cabo el monitoreo de una estrategia de Opto Control que sea ejecutada por un controlador industrial Opto 22 permitiendo al operador visualizar en tiempo real la información acerca de la ejecución de las diferentes partes del sistema de control.

1.6 HARDWARE UTILIZADO EN LA AUTOMATIZACIÓN DEL PATRÓN TIPO PISTÓN

El sistema de control del patrón consta de un controlador LCSX-PLUS, un BRAIN B3000 y dos módulos OAC5 para control de electro válvulas, junto al hardware necesario para el sistema de adquisición de datos los cuales se describen a continuación.

1.6.1 Controlador LCSX-PLUS

El modulo controlador LCSX-PLUS esta diseñado para ser usado con módulos de sistemas E/S y software Factory floor para automatización industrial de Opto 22. Este provee una herramienta poderosa para el control industrial en “tiempo real” en un tamaño compacto.

Contiene un poderoso procesador de 32-bit con un amplio rango de funciones de computación alimentado con una fuente de 5 V DC y con la posibilidad de ser instalado en un riel DIN o un panel.

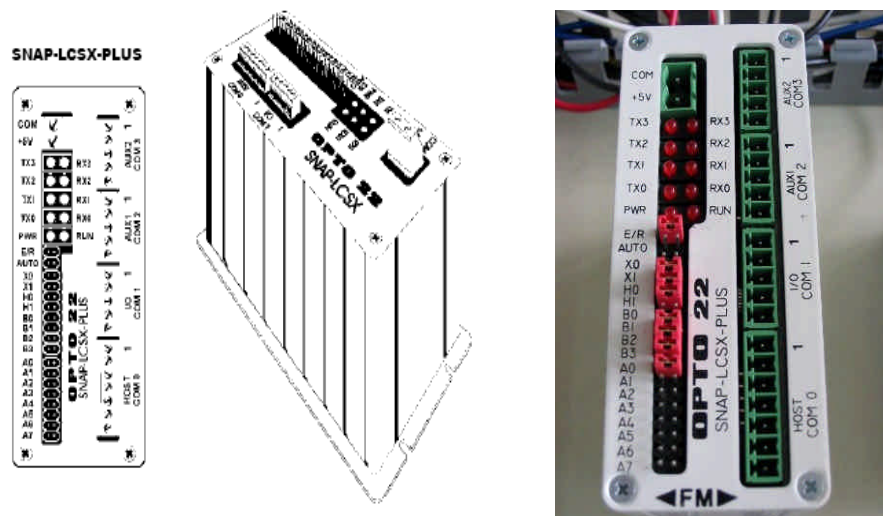


Figura 10. Controlador LCSX-PLUS

Posee cuatro puertos seriales instalados en la parte superior del controlador como se ve en la Figura 10 con conexiones de tornillo removible estilo europeo.

- Puerto COM 0 seleccionable como RS-232, RS-485 half-duplex (2 hilos) o RS485 full duplex (4 hilos). El modo por defecto de este es RS-232 para conexión al computador.
- Puerto COM 1 es un puerto OPTO 22 E/S remoto (solo RS-485 half-duplex) cuya función es la comunicación con el *Brain*.
- Puertos COM 2 y COM 3 son puertos auxiliares configurables ambos como RS-232 o como half o full-duplex RS-485.

En la Tabla 5 se presentan las principales especificaciones del controlador.

Ítem	Especificación
Unidad Central de Procesamiento	Procesador Motorota 68EC020
Frecuencia del reloj	16.57Mhz
Memoria RAM Flash ROM	1MB con batería de respaldo 256KB
Batería RAM/reloj	3.6 V de litio no recargable
E/S	Remotas Opto 22 usando RS -485
Alimentación	5VDC +/- 5%, 500mA (máximo)
Temperatura de operación	0 °C a 70 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a 85°C
Humedad	Humedad relativa de 5% a 95% sin condensación

Tabla 5. Especificaciones del Controlador

1.6.2 Brain B3000

Es un *brain* de alto rendimiento para control remoto de módulos E/S análogos y digitales utilizando un *rack* serie “B” de Opto 22 (En el patrón se utilizo un MB8). Este se comunica con el controlador a través de un puerto serial RS485 a una velocidad de 115 kbits/segundo y soporta los protocolos Mystic[®] y Optomux[®]. Estos protocolos le permiten realizar tareas como lazos PID, medición del ancho de pulso, conteo de alta velocidad (20kHz), detección de flancos, configuración de eventos acción-reacción y otras que facilitan el control y adquisición de datos del sistema.

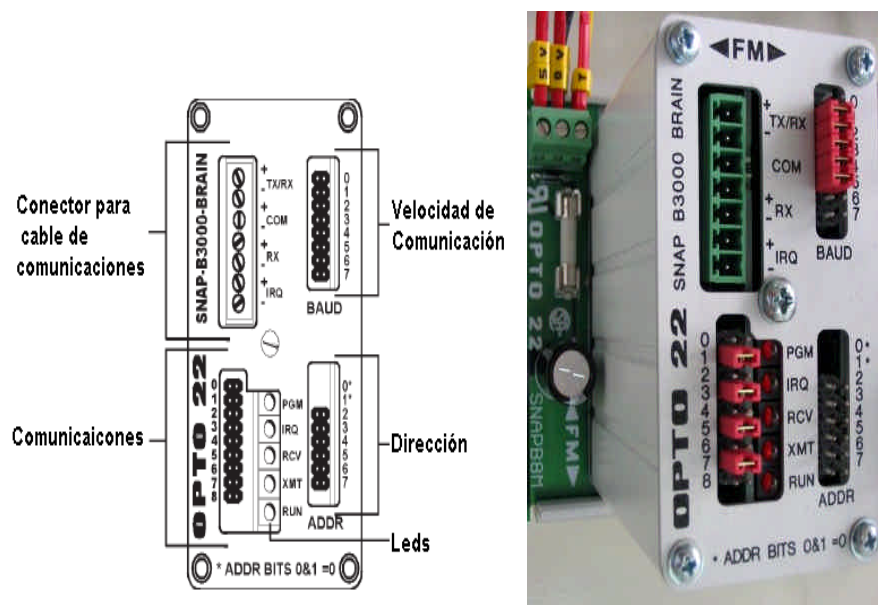


Figura 11. Brain B3000

Ítem	Especificación
Alimentación	5VDC +/- 5%, 500mA (máximo)
Comunicación	RS 485/422
Leds Indicadores	RUN(Encendido), RCV(Recibir), XMT(Transmitir), IRQ(Interrupción) y (PGM) Programa
Jumpers de selección	Dirección Velocidad de comunicación CRC/Checksum ASCII/Binario
Temperatura de operación	0 °C a 70 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a 85°C
Humedad	Humedad relativa de 5% a 95% sin condensación

Tabla 6. Especificaciones del *Brain*

1.6.3 Módulos OAC5

Estos módulos de salida digitales funcionan como un interruptor para cuatro cargas de AC por separado. Operan con 5VDC para el control, además cuentan con cuatro leds que permiten observar el estado de cada carga o canal. A continuación se puede observar una tabla con sus principales características:

Ítem	Especificación
Voltaje máximo de línea	250 VAC
Voltaje de línea nominal	120/240 VAC
Rango de Corriente	3A por módulo
Frecuencia de Operación	25-65 Hz
Fuente lógica de voltaje	5VDC +/- 5%, 50mA (máximo)
Temperatura de operación	0 °C a 70 °C
Temperatura de almacenamiento	-30 °C a 85°C

Tabla 7. Especificaciones del Modulo OAC5

1.7 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos fue definido a partir de las variables que requerían ser medidas durante la operación del Patrón y la calibración de medidores. Los componentes del sistema son listados en la Tabla 8.

Variable a monitorear	Sensor	Modulo de adquisición	Procesamiento de datos	Control de proceso
Temperatura	RTD	AIRTD	BRAIN B3000	CONTROLADOR LSCX-PLUS
Presión Barométrica	Barómetro	N/A	N/A	
Presión Diferencia	De presión diferencial	AIMA	BRAIN B3000	
Posición vertical del Pistón	<i>Encoder</i>	IDC5Q	BRAIN B3000	
Posiciones extremas del pistón	Circuito final de carrera	IDC5FAST	BRAIN B3000	
Volumen desplazado por el medidor en prueba	Óptico o <i>encoder</i> externo	IDC5FAST	BRAIN B3000	

Tabla 8. Componentes del Sistema de Adquisición de datos

1.7.1 Sensor De Presión Diferencial (Dwyer 616W4)

Es un transmisor de presión diferencial que detecta presión de aire y gases no combustibles en un rango de operación de 0-50 mbar y posee una salida estándar de 4-20 mA. Su función en el patrón es determinar la presión en el medidor en prueba. A continuación se presenta una tabla con sus especificaciones.

Ítem	Especificación
Máximo Error	± 0.25% Full Escala
Estabilidad	± 1% Full Escala
Temperatura de trabajo	-17.8 a 60 °C
Rango de compensación térmica	-6.67 a 48.9 °C
Limite de Presión	11psi
Efecto de Temperatura	± 0.0012%F.E./°C
Alimentación	10-35 VDC 38mA(Máximo)
Señal de Salida	4-20 mA
Ajuste de Cero y Escala	Potenciómetros

Tabla 9. Especificaciones Técnicas del Sensor Dwyer 616W4

1.7.2 Sensor De Presión Diferencial (Ashcroft XLdp)

Es un transmisor de bajas presiones diferenciales de capacitancia variable, detecta presión de aire y gases no combustibles en un rango de operación de 0-12 mbar. Su función en el patrón es determinar la presión en el pistón que se halle en operación. En la Tabla 10 se pueden observar sus principales características.


	Ítem	Especificación
	Máximo Error	± 0.25% Full Escala
	Estabilidad	± 0.5% Full Escala
	Temperatura de trabajo	-28.9 a 71.1 °C
	Rango de compensación térmica	1.67 a 57.2 °C
	Límite de Presión	15 psi
	Efecto de Temperatura	± 0.0009%F.E./°C
	Alimentación	10-35 VDC
	Señal de Salida	4-20 mA
	Ajuste de Cero y Escala	Potenciómetros

Tabla 10. Especificaciones Técnicas del Sensor Ashcroft XLdp

1.7.3 Snap AIMA

Este modulo posee dos entradas análogas de corriente en un rango de 4-20 mA. Su función es tomar las lecturas de los diferenciales de presión anteriormente descritos, para ser tratadas por el controlador. Dado que todas la entradas comparten una referencia común el modulo debe ser instalado al principio o al final de un lazo típico de 4 -20 mA.

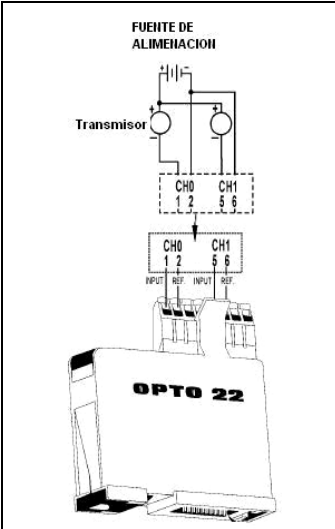
	Ítem	Especificación
	Rango de Entrada	-20 mA a 20 mA
	Resolución	0.8 uA
	Tiempo de Respuesta (Entrada) %Rango/Corriente/Tiempo	99.9%/19.9mA/10ms
	Rechazo a modo común (DC)	>-120dB
	Rechazo a modo común (AC)	>-120dB a 60Hz
	Máxima entrada	39 mA o 9 VDC
	Máximo voltaje modo común	250 V
	Máximo Error	0.05% (10uA)
	Alimentación	5 VDC @ 170mA
Resistencia de entrada	200 ohm (Cada canal)	
Temperatura de operación	0°C a 70°C	

Tabla 11. Especificaciones Técnicas del SNAP AIMA

1.7.4 Barómetro Honeywell De Precisión (HPB)

Es basado en un sensor piezoresistivo de silicio junto con un microprocesador y otros circuitos electrónicos. El sensor piezoresistivo contiene un elemento sensible a la presión y uno a temperatura. Después de la medida del sensor sobre una matriz de temperatura y presión en la fábrica, los valores son guardados en la EEPROM y usados por el microprocesador para corregir cualquier no linealidad en el sensor. La lectura digital es transmitida en niveles de señal TTL, y es conectada al computador vía RS-232 o un conversor TTL. El usuario puede modificar la velocidad de lectura, las unidades y otros parámetros del barómetro.

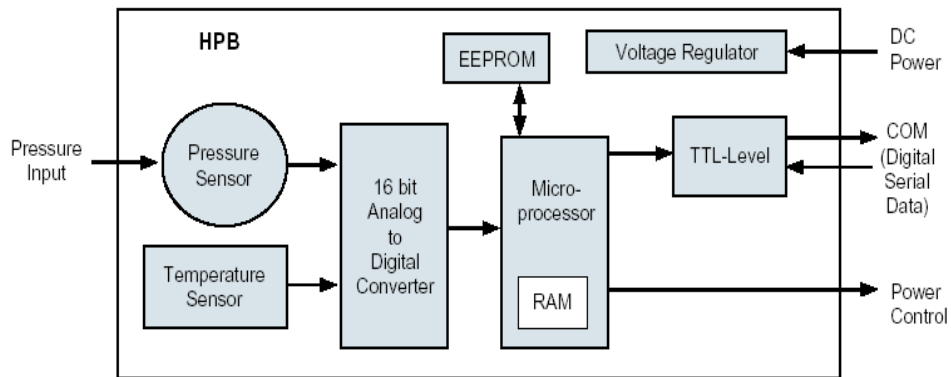


Figura 12. Esquema del Barómetro Honeywell

El HPB es configurado de fábrica a una tasa de transmisión de 9600 bits/s, 1 bit de inicio, 8 bits de datos sin bit de paridad y 1 bit de parada. La comunicación entre el *host* o controlador de proceso y el HPB es compuesta por la transferencia de mensajes o comandos y respuestas. Las comunicaciones iniciadas por el controlador de proceso hacia el HPB son llamadas comandos y deben comenzar con un '*' (carácter de encabezado). Todos los comandos deben terminar con un <cr> (Carácter 13 o pulsar la tecla enter). Las comunicaciones iniciadas por el HPB hacia el controlador de proceso son llamadas repuestas, e inician con uno de diez únicos caracteres (2 para ASCII, 8 Binario) y también terminan con un <cr>. La forma típica de los comandos del HPB es: *ddcc=nnn<cr> donde:

*	Carácter de encabezado del comando
dd	Dirección decimal de HPB
cc	Código del comando
=	Signo igual (requerido en algunos comandos)
nnn	Caracteres adicionales (requeridos en algunos comandos)
<cr>	Retorno del carro (Carácter 13)

Tabla 12. Comandos de Comunicación con el Barómetro


	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ítem</th> <th>Especificación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rango de Presión</td> <td>500 a 1200 mbar</td> </tr> <tr> <td>Sobrepresión</td> <td>4150 mbar</td> </tr> <tr> <td>Presión de Ruptura</td> <td>48000 mbar</td> </tr> <tr> <td>Temperatura de Operación</td> <td>-40 a 85 °C</td> </tr> <tr> <td>Exactitud</td> <td>± 0.4 mbar</td> </tr> <tr> <td>Estabilidad</td> <td>0.25 mbar por año</td> </tr> <tr> <td>Resolución</td> <td>0.0011 % De la escala total</td> </tr> <tr> <td>Señal de Salida</td> <td>Digital (TTL)</td> </tr> <tr> <td>Alimentación</td> <td>6 a 26 VDC (5-9 mA)</td> </tr> </tbody> </table>	Ítem	Especificación	Rango de Presión	500 a 1200 mbar	Sobrepresión	4150 mbar	Presión de Ruptura	48000 mbar	Temperatura de Operación	-40 a 85 °C	Exactitud	± 0.4 mbar	Estabilidad	0.25 mbar por año	Resolución	0.0011 % De la escala total	Señal de Salida	Digital (TTL)	Alimentación	6 a 26 VDC (5-9 mA)
	Ítem	Especificación																			
Rango de Presión	500 a 1200 mbar																				
Sobrepresión	4150 mbar																				
Presión de Ruptura	48000 mbar																				
Temperatura de Operación	-40 a 85 °C																				
Exactitud	± 0.4 mbar																				
Estabilidad	0.25 mbar por año																				
Resolución	0.0011 % De la escala total																				
Señal de Salida	Digital (TTL)																				
Alimentación	6 a 26 VDC (5-9 mA)																				

Tabla 13. Especificaciones Técnicas del Barómetro Honeywell

1.7.5 Sensor De Temperatura RTD Pt100

Para la obtención de las mediciones de temperatura en el patrón se utilizaron 4 RTDs Pt100 de 3 hilos para bajo alcance (-200 a 204 °C). Estos instrumentos se adquirieron para un error de resistencia máximo de ± 0.03% a 0 °C (Clase DIN A).



Figura 13. Sensor de Temperatura RTD PT-100

1.7.6 Snap Airtid

El patrón cuenta con dos de estos módulos de entrada análogos, para lectura de RTDs de tres hilos, a continuación se muestra una tabla con sus especificaciones:

Ítem	Especificación
Rango de entrada de temperatura	-200 a 850 °C
Span	4000
Tiempo de Respuesta (Entrada) %Rango/Temperatura/Tiempo	63%/598°C/25ms
Resolución	0.042°C (0.0160)
Error máximo	0.6°C
Rechazo a modo común (DC)	>-120dB
Rechazo a modo común (AC)	>-120dB a 60Hz
Fuente lógica de voltaje	5VDC +/- 5%, 50mA (máximo)
Temperatura de operación	0 °C a 70 °C
Temperatura de almacenamiento	-30 °C a 85°C

Tabla 14. Especificaciones Técnicas del SNAP AIRTD

1.7.7 Encoder

Un Encoder es un transductor de movimiento. Este instrumento genera señales eléctricas a partir de un movimiento (un giro, desplazamiento lineal). El patrón cuenta con dos encoder ópticos incrementales para medir el desplazamiento de cada uno de los pistones. Estos encoder cuentan con dos señales de salida (canal A y canal B) en cuadratura lo cual permite

conocer la dirección de desplazamiento y aumentar cuatro veces el número de pulsos por revolución de estos (Ver Figura 14).

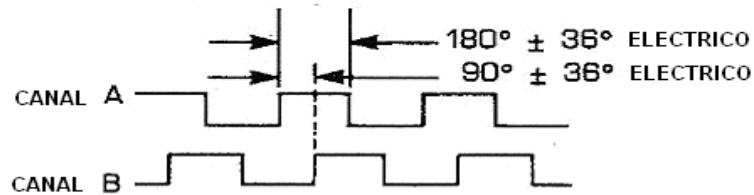


Figura 14. Señales de Salida en los Encoder Incrementales


	Ítem	Especificación
	Pulsos por revolución	5000
	Fuente de Alimentación	5 VDC ± 5% 150mA máx. sin carga
	Señal de salida	Doble onda cuadrada en Cuadratura
	Respuesta en Frecuencia	200kHz
	Temperatura de operación	0 °C a 70 °C
	Temperatura de almacenamiento	-20 °C a 80°C
	Pulsos por revolución	5000

Tabla 15. Especificaciones Técnicas Encoder

1.7.8 Snap IDC5-Q

El patrón cuenta con uno de estos módulos de entrada digitales cuya función es realizar la toma de los pulsos que envían los encoder para obtener la posición y el sentido de desplazamiento del pistón. Esto se logra dando uso a los dos canales del encoder (A y B). En la siguiente tabla se muestran sus principales especificaciones:

Ítem	Especificación
Voltaje lógico	5 VDC
Temperatura de Operación	0 a 70°C
Rango de voltaje a la entrada	4-24 VDC
Resistencia de entrada	1kO a 4V 560O a 24V
Voltaje máximo de estado en bajo	1V
Frecuencia máxima de entrada	5 kHz por canal

Tabla 16. Especificaciones Técnicas Snap IDC5-Q

1.7.9 Finales de carrera

Se implementaron cuatro circuitos de final de carrera para detectar cuando el pistón en operación llega a la parte inferior o superior del tubo según sea el caso. Estos circuitos utilizan un fotosensor en herradura el cual es interrumpido por un par de pines ubicados en la parte inferior y superior de cada contrapeso.

1.7.10 Sensor Óptico

Se compone de un cable de fibra óptica tipo reflectivo SUNX FD-T80 y un control fotoeléctrico de fibra óptica MICRO SWITCH FE5F-3MC6-M (Ver Figura 15). Este elemento es el encargado de monitorear las revoluciones que realicen los medidores en prueba durante una calibración y transformar esta información en pulsos.



Figura 15. Sensor Óptico

1.8 COMPONENTES ESTRUCTURALES

La estructura del Patrón se halla constituida básicamente por el gabinete que debe albergar:

- El elemento Primario de medición (Placa base + Conjuntos cilindro Pistón)
- La caja de potencia y control, incluyendo los instrumentos de medición.

En su diseño se evolucionó hasta lograr una estructura con las siguientes características:

- Diseño modular con fácil acceso a su interior permitiendo inspecciones rápidas, de los componentes del patrón.
- Rigidez estructural, para brindarle estabilidad al patrón.
- Sistema de nivelación manual para lograr la verticalidad del elemento primario de medición.
- Aislamiento térmico de los elementos eléctricos evitando la generación de perfiles de temperaturas adversos para la operación del patrón.
- Estética y acabados acordes para el patrón.
- Adecuada disposición de los elementos eléctricos evitando la generación de perfiles de temperaturas adversos para la operación del patrón.

La estructura al igual que el resto de componentes del Patrón fueron modelados en software CAD dando como resultado la estructura mostrada en la Figura 16.

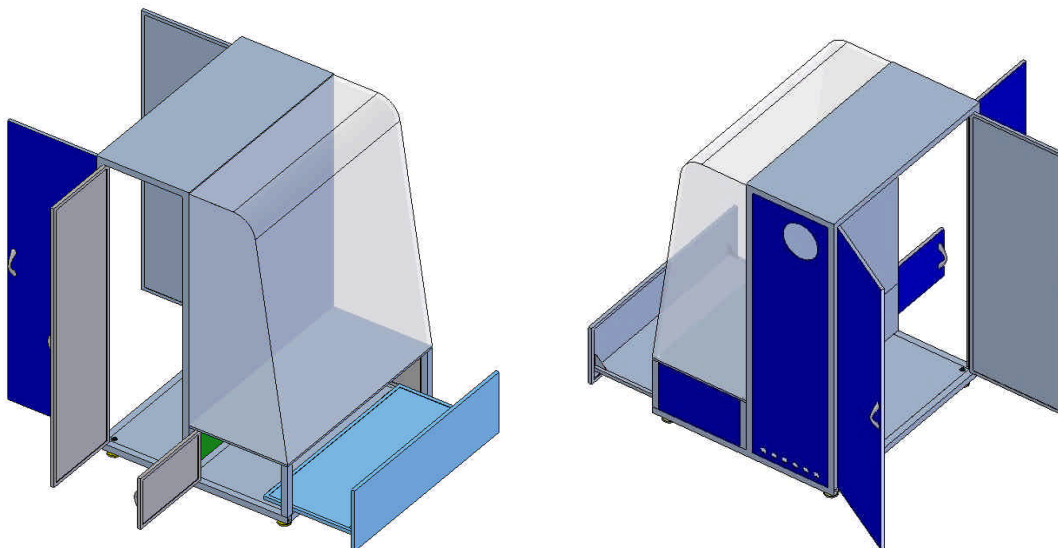


Figura 16. Estructura del Pistón

1.9 COMPONENTES ADICIONALES

Aunque estos componentes no forman parte integral del Patrón son necesarios para su funcionamiento y la calibración de medidores. Los componentes adicionales identificados son:

- Bomba de Vacío con capacidad para generar un caudal superior al nominal Patrón (45 dm³/min) a una presión absoluta de 200 mbar, permitiendo la calibración de elementos de flujo crítico a vacío. La bomba debe operar libre de aceite, para evitar la contaminación del cuarto de Calibración en el cual opere el Patrón.
- Sistema de regulación de presión para el fluido de calibración que permita entregar 2 niveles de presión:
 - Baja Presión: 15 mbar a 25 mbar con estabilidad de 0.3 % de la presión regulada.
 - Alta Presión: 0.2 bar a 5 bar con estabilidad de 0.5%.
- *Manifold* de regulación de caudal que permita ajustes finos sobre el alcance del Patrón. Compuesto por Válvulas de aguja y de bola para la preselección de los caudales de Calibración.
- Sistema de filtrado para el fluido de calibración que permita retener partículas de hasta 5 micras, evitando la contaminación del patrón.

La Configuración final del Sistema de medición para la Calibración de medidores utilizando el Patrón Tipo Pistón en forma ascendente o descendente dio como resultado los esquemas mostrados en la Figura 17 y Figura 18.

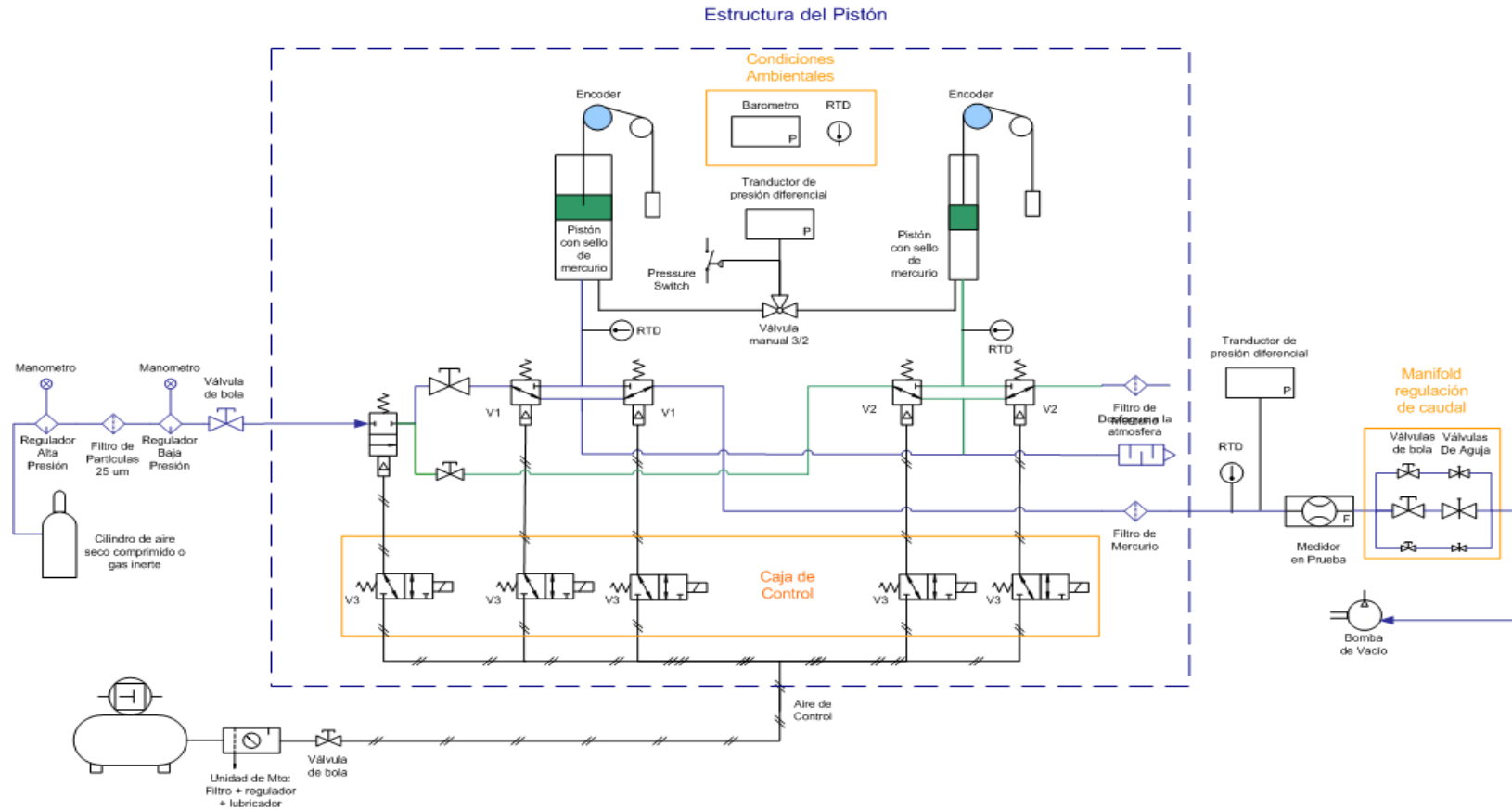


Figura 17. Esquema Diseño Final patrón Tipo Pistón En Operación Descendente

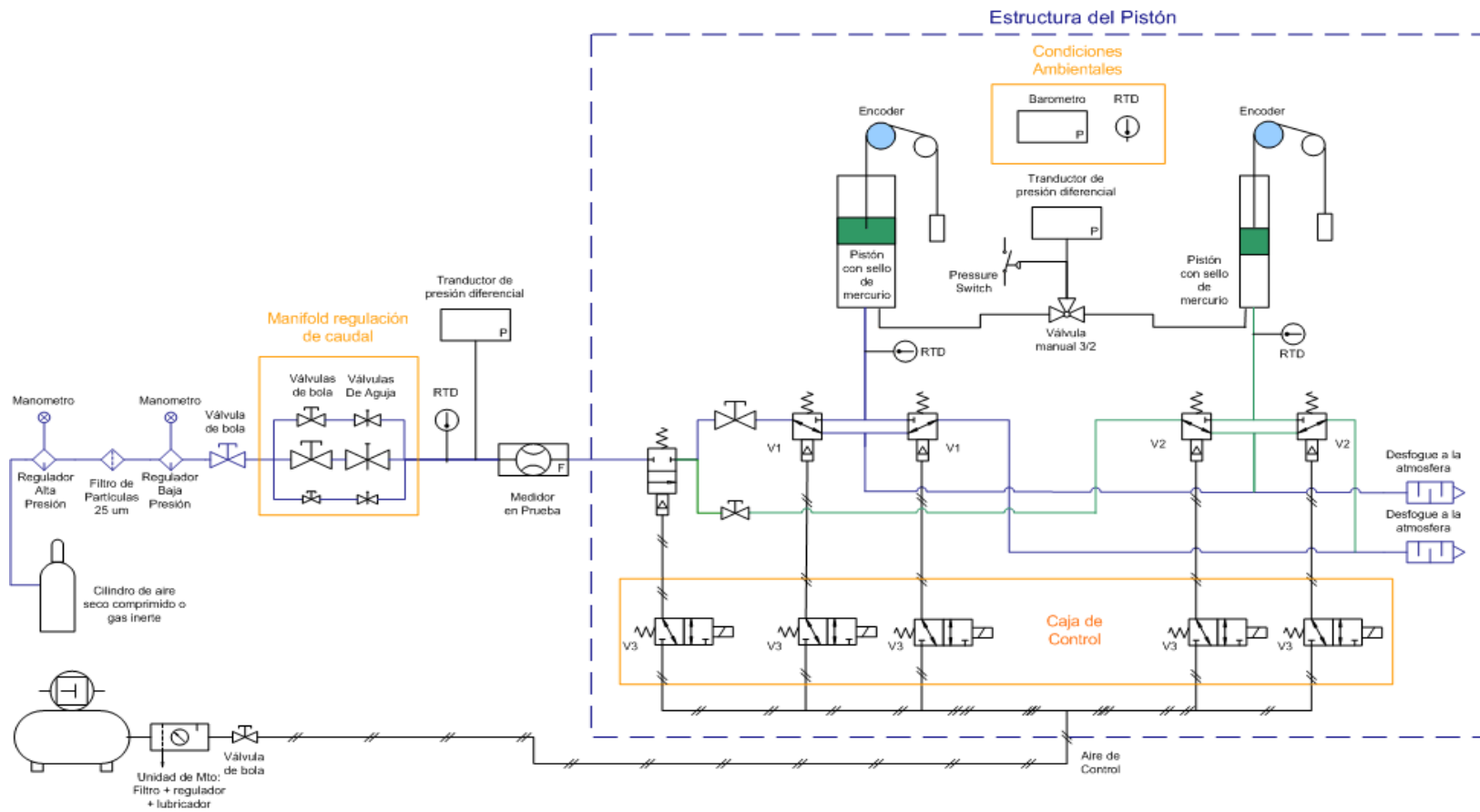


Figura 18. Esquema Diseño Final patrón Tipo Pistón En Operación Ascendente

CAPÍTULO 2

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PATRÓN TIPO PISTÓN

Como en todo nuevo desarrollo dar el paso desde el diseño en planos a la fabricación y posterior ensamble y puesta a punto, representa uno de los mayores retos en la consecución de los objetivos planteados. Es aquí donde se empiezan a visualizar tamaños, dimensiones, formas y ajuste de los elementos diseñados o en otros casos adquiridos. En algunas ocasiones es necesario realizar realimentaciones o ajuste al diseño, por razones que pueden variar desde, imposibilidades en la manufactura, discordancia de diseño, cambio en los materiales o simplemente una mejora en el diseño.

Para la materialización del patrón se requirió de un proceso de manufactura riguroso en el cual se involucró personal calificado con alta experiencia en labores de mecánica fina, maquinas herramientas de Control Numérico Computarizado, y una amplia variedad de instrumental dimensional necesario para realizar el control de calidad durante el proceso de fabricación.

2.1 CONSTRUCCIÓN DEL ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN

Como se mencionó anteriormente para el proceso de construcción, se necesito de toda una serie de elementos tecnológicos indispensables para satisfacer los requerimientos del nuevo patrón, especialmente la fabricación del Elemento Primario de Medición, dado que este, es el encargado de reproducir la magnitud volumen. Para manufacturar las piezas del patrón tipo pistón se selecciono el taller de Mecánica Fina de la Corporación para la Investigación de la Corrosión **(CIC)**

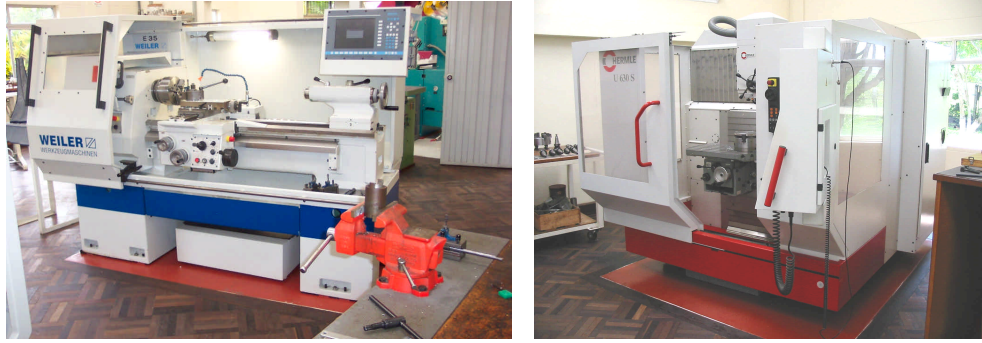


Figura 19. Torno CNC y Centro de Mecanizado de la CIC.

Los materiales y componentes requeridos en la fabricación de los Conjuntos Cilindro – Pistón se describen en la siguiente Tabla:

Elemento del EPM	Material	Características
Cilindros	Borosilicato	Adquirido
Pistones	PVC Tipo I	Fabricado
Bases	Nylon	Fabricado
Cuerdas	Acero	Adquirido
Poleas y Ejes	Acero Inox 304	Fabricado
Encoder	Varios	Adquirido
Contrapeso	PVC Tipo I	Fabricado

Tabla 17. Componentes del Elemento Primario de Medición

2.1.1 Cilindros de Borosilicato

Los tubos de borosilicato fueron adquiridos a través del fabricante alemán Shott Duran. Esta empresa se dedica a la elaboración de elementos en borosilicato para uso industrial y de laboratorios. A continuación se describen las principales propiedades físicas del borosilicato suministradas por el fabricante.

Coeficiente medio de dilatación lineal térmica	
α (20 °C; 300 °C) según la norma ISO 7991	$3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Temperatura de transformación T_g	525 °C
Temperaturas del vidrio para 10^{13} (temperatura enfriamiento superior)	560 °C
las viscosidades η en $\text{dPa} \cdot \text{s} : 10^{7,6}$ (temperatura reblandecimiento)	825 °C
10^4 (temperatura de trabajo)	1260 °C
Temperatura máxima admisible para uso de corta duración	500 °C
Densidad ρ a 25 °C	$2,23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Módulo de elasticidad E (Young's modulus)	$64 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Índice de Poisson μ	0,20
Conductividad térmica λ_w a 90 °C	$1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Temperatura para la resistencia eléctrica	
específica de $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ (norma DIN 52 326) t_{k100}	250 °C
Logaritmo de la resistencia eléctrica	a 250 °C 8
volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$)	a 350 °C 6,5
Propiedades dieléctricas (1 MHz, 25 °C)	
Constante dieléctrica ϵ	4,6
Factor de pérdida dieléctrica $\tan \delta$	$37 \cdot 10^{-4}$
Índice de refracción ($\lambda = 587,6 \text{ nm}$) n_d	1,473
Coeficiente de tensión óptica (norma DIN 52 314) K	$4,0 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{N}^{-1}$

Tabla 18. Propiedades Físicas del Borosilicato provisto por SHOTT DURAN

La propiedad física mas relevante del vidrio borosilicato en relación a la operación del Patrón es su bajo coeficiente de dilatación lineal térmica (α) que le confiere una excelente estabilidad dimensional.

En la Tabla 19 se presentan las dimensiones ofrecidas por SHOTT para los vidrios de Borosilicato y en la sección 4.1 donde se describe la calibración dimensional del patrón tipo pistón se pueden apreciar los resultados obtenidos para los diámetros internos de los cilindros durante las mediciones realizadas en el Cuarto de Condiciones ambientales controladas del CDT de GAS.

Cilindro	Diámetro interno del cilindro	Tolerancia Diametral	Espesor de Pared	Tolerancia Espesor de pared	Longitud	Tolerancia Longitud
	Dcil mm	TD mm	Ep mm	TEp mm	L mm	TL mm
Grande	150	$\pm 0,05$	7.1	$\pm 1,1$	460	$\pm 1,0$
Pequeño	38.03	$\pm 0,01$	5.1	$\pm 0,5$	650	$\pm 1,0$

Tabla 19. Dimensiones de los Cilindros de Borosilicato

Las mediciones del Diámetro interno de los cilindros que hicieron parte de la Calibración dimensional del Patrón permitieron obtener las desviaciones diametrales máximas y verificar que estas cumplieran con las tolerancias especificadas. En la Figura 20 se presentan los diámetros de los cilindros que se obtuvieron como resultado de la Calibración Dimensional.

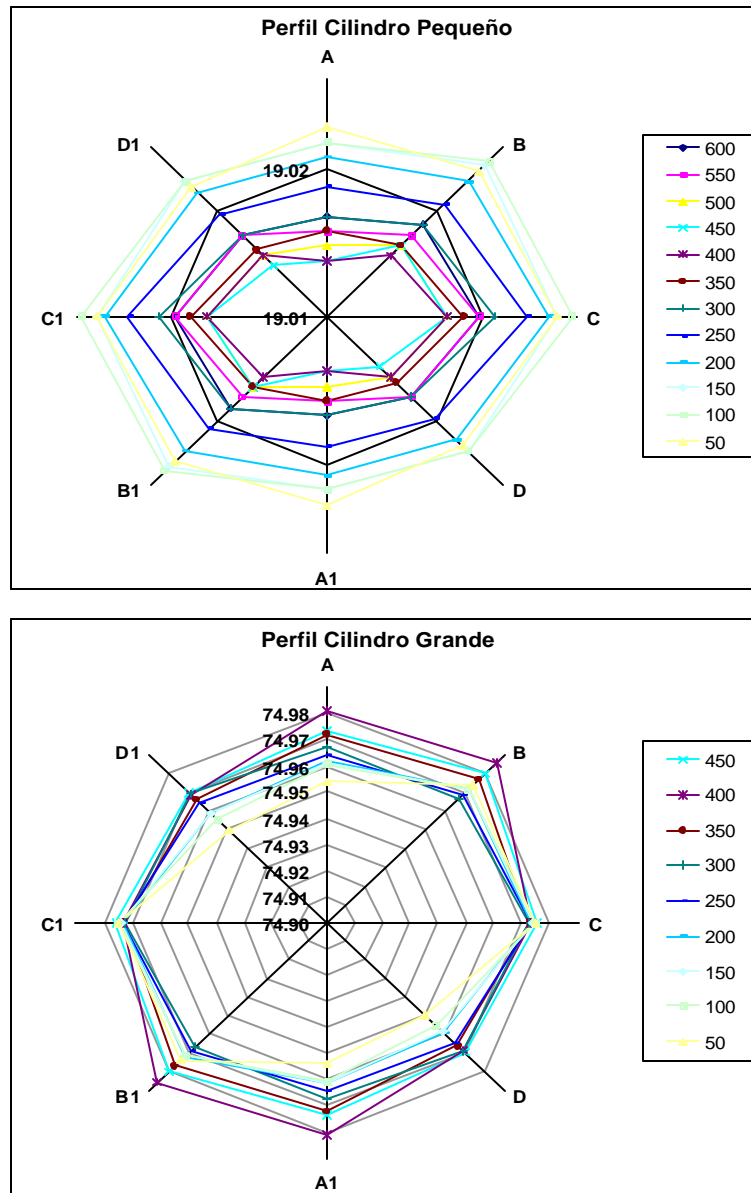


Figura 20. Perfiles de los Cilindros de Borosilicato

Nota: Las letras A, B, C y D corresponden a las direcciones en que se realizaron las mediciones de los diámetros internos de cada cilindro. Las curvas representa los diámetros obtenidos para cada altura del cilindro y los valores numéricos se refieren a la escala del radio en milímetros

2.1.2 Pistones de PVC tipo I y Contrapesos

Anteriormente se mencionó la importancia de poseer cilindros de excelentes características dimensionales, es obvio entonces que los pistones deben poseer iguales o incluso mejores características dimensionales que los cilindros. Los pistones son los elementos mas críticos en todo el proceso de fabricación, partiendo del hecho de que un ajuste muy holgado entre el pistón y el cilindro podría ocasionar problemas de escurrimiento del sello de mercurio, por otra parte un ajuste muy estrecho podría generar atascamiento del pistón dentro del cilindro o en el peor de los casos una dilatación térmica excesiva de los pistones produciría la ruptura del cilindro.

Debido a los requerimientos se optó por fabricar los pistones en PVC Tipo I como el que se muestra en la Figura 21, material en el cual se hayan fabricados la mayoría de los patrones tipo Pistón a nivel mundial. Este material presenta dentro de sus ventajas buena estabilidad dimensional al cambio de temperatura, alta densidad, excelente maquinabilidad y buen acabado superficial.



Figura 21. Barras de PVC Tipo I

A continuación se listan las principales especificaciones técnicas del PVC Tipo I declaradas por el fabricante.

	Propiedades	Unidad	Valor
Mecánicas	Resistencia a la Tensión	psi	7000
	Resistencia a la Flexión	psi	12500
	Modulo de Elasticidad Tensión	psi	410000
	Dureza Rockwell	Escala	R112
Térmicas	Densidad	Lb/in ³	0.053
	Punto de Fusión	°F	360
	Temperatura Máxima Trabajo Continuo	°F	160
	Coficiente Expansión Térmica	in/in°F	7.3x10E-5

Tabla 20. Especificaciones Técnicas del PVC Tipo I

Luego de la documentación y consultadas realizadas a ciertos INM que poseen patrones similares, se determinó que la tolerancia diametral entre el pistón y el cilindro para un adecuado funcionamiento del patrón debía ser de 0.07 a 0.10 mm, a la temperatura media de operación del Patrón.

Para lograr obtener tales tolerancias a la temperatura de operación del patrón (20 °C ± 2 °C) se debió considerar el efecto por dilatación térmica del PVC durante el proceso de fabricación, dado que el taller en el cual se fabricaron los pistones posee una temperatura que fluctúa entre 25 y 31 °C. Para esto, se calculó el diámetro al cual debería ser fabricado el pistón partiendo del coeficiente de dilatación térmica declarado por el fabricante y una temperatura de operación mínima de 18 °C. En la Figura 22 se presenta la grafica del diámetro del Pistón grande como función de la temperatura, la cual fue obtenida utilizando el coeficiente de dilatación térmica lineal del PVC Tipo I ($\alpha = 7,30E-05$ in/in-°F) y la siguiente ecuación:

$$D_f = \frac{D_{@18^{\circ}C}}{1 - \alpha \cdot (T_f - 18^{\circ}C)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

D_f = Diámetro del Pistón medido a la temperatura de fabricación (mm)

$D_{@18^{\circ}C}$ = Diámetro del Pistón a la mínima temperatura de operación 18 °C (mm)

α = Coeficiente de dilatación térmica lineal del PVC Tipo I

T_f = Temperatura del Pistón durante su fabricación (°C)

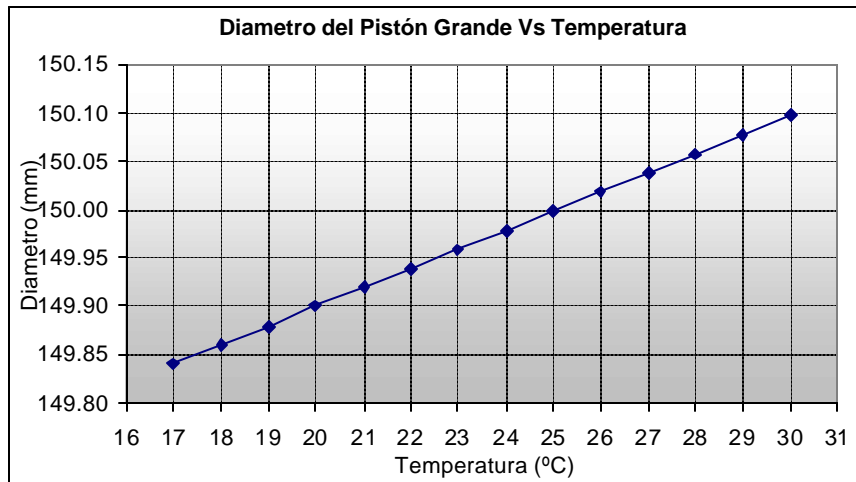


Figura 22. Diámetro del pistón grande vs su temperatura promedio durante la fabricación.

De esta forma, midiendo el diámetro y la temperatura del Pistón durante el proceso de fabricación, se logro obtener a la temperatura de operación del Pistón la tolerancia adecuada para su correcto funcionamiento. En la Figura 23 se observa la medición del diámetro del Pistón durante el proceso de fabricación.

Cabe señalar que debido a sus pequeñas dimensiones (diámetro ~ 38 mm) el efecto de la dilatación térmica en el pistón pequeño es despreciable, por lo cual no fue necesario ejecutar dichas correcciones por temperaturas.



Figura 23. Medición del Diámetro del Pistón Durante el Proceso de Fabricación

Como resultado del proceso de fabricación se obtuvieron los dos pistones (Grande y Pequeño) junto a sus piezas complementarias (tapa, pesas de

balanceo, tornillos de acople y sujetador de cable) que fueron fabricadas en acero Inoxidable. En la Tabla 21 se presentan las dimensiones finales de los dos pistones y sus correspondientes contrapesos, y en la Figura 24 y Figura 25 se pueden observar los componentes de cada Pistón y el ensamble de los mismos.

ELEMENTO		DIAMETRO @	ALTURA	PESO
		20 °C	ARMADO	TOTAL
		mm	Mm	Kg
PISTÓN	GRANDE	149,84	50	1,4407
	PEQUEÑO	37,93	60	0,263
CONTRAPESO	GRANDE	69	40	448
	PEQUEÑO	51	40	200

Tabla 21. Resumen de las Características de los Pistones y Contrapesos



Figura 24. Pistón Grande



Figura 25. Pistón Pequeño

Los contrapesos se fabricaron en PVC Tipo I por poseer una alta densidad, de tal forma que se logrará balancear fácilmente el conjunto pistón-contrapeso.

Adicionalmente este material posee una buena maquinabilidad, brindando un buen acabado superficial.

2.1.3 Bases de Soporte en Nylon

La base inferior es el elemento que junto con el pistón y el cilindro conforman la denominada cámara de medición. Adicionalmente cumple la función de brindar soporte al cilindro y alojar la entrada de flujo, las tomas de presión y los sensores de temperatura.

Debido al diseño de la base y su función como soporte del cilindro, se decidió utilizar un material polimérico que disminuyera el riesgo en caso de algún impacto entre el cilindro y la base durante el ensamblaje o mantenimiento del patrón. Adicionalmente se buscó el uso de un material liviano, de buena maquinabilidad y buen acabado superficial. La búsqueda del material polimérico condujo a la selección del nylon. El cual fue adquirido a través de la empresa colombiana Polytech.

2.1.4 Conjunto Encoder y Barras de Soporte

Esta parte del elemento primario de medición es la encargada de convertir un desplazamiento volumétrico asociado al movimiento lineal del pistón, en una señal de pulsos. Para que el encoder realice correctamente su función se requiere de una adecuada alineación entre los elementos móviles solidarios a la cuerda (pistón-contrapeso) y las poleas; el conjunto encoder debe estar soportado por una estructura rígida que permita nivelar el conjunto cilindro pistón y obtener un buen grado de verticalidad en la Figura 26 se puede observar el conjunto encoder para cada uno de los pistones.

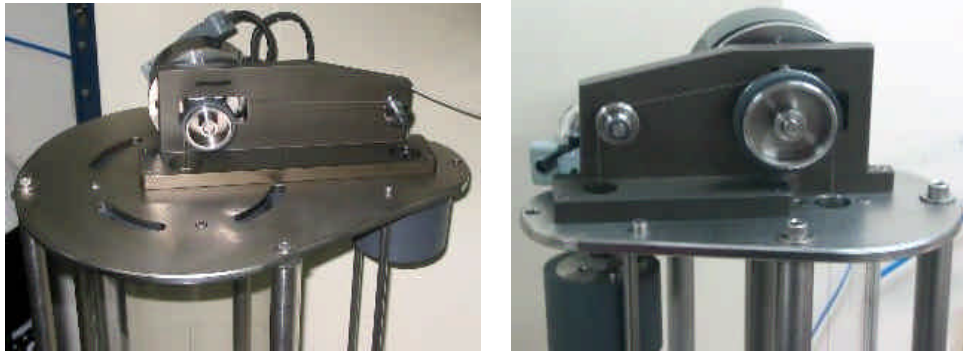


Figura 26. Conjunto encoder Pistón Grande (Der) y Pistón Pequeño (Izq)

En la siguiente tabla se listan los elementos constituyentes de cada conjunto Encoder.

ELEMENTO	MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
Tapa Superior	Pvc	Fabricado
Placa Base Encoder	Acero Inox	Fabricado
Base Encoder	Duraluminio	Fabricado
Encoder	Varios	Comprado
Canastilla	Acero Inox	Fabricado
Eje Encoder	Acero Inox	Fabricado
Polea Encoder	Acero Inox	Fabricado
Eje Y Polea Loca	Acero Inox	Fabricado
Barras De Soporte	Acero Inox	Fabricado

Tabla 22. Elementos Constituyentes del Conjunto Encoder

2.2 ESTRUCTURA SOPORTE DEL PATRÓN

La estructura es la encargada de soportar la mayoría de los elementos del patrón, por lo cual debe cumplir requisitos estructurales como resistencia y rigidez, además de los estéticos como el acabado y los detalles finales de la estructura.

Para su construcción se seleccionó la empresa de metalmecánica Full House. Para su fabricación se utilizó básicamente tubo estructural de $\frac{3}{4}$ de pulgada calibre 14 y lamina Cold Roll calibre 18 y 20 (Ver Figura 27) .



Figura 27. Modelamiento CAD de la estructura, Proceso de Fabricación y Resultado Final.

2.3 SISTEMA NEUMÁTICO

Con el objeto de mejorar la estabilidad térmica del patrón, minimizando los cambios en la densidad del aire al pasar por las válvulas debido a los efectos de transferencia de calor acarreados por el calentamiento del solenoide de las electroválvulas, se dispuso de dos etapas de control neumático, una donde las válvulas son operadas eléctricamente por el sistema de control del patrón, constituidas por un bloque de cinco electroválvulas y cada una de ellas a su vez controla una segunda etapa de válvulas neumáticas de 3 vías 2 posiciones.

2.3.1 Válvulas para el Control del Fluido de Calibración

Para el control del fluido de calibración se adquirieron cuatro válvulas de 3 vías, 2 posiciones y una válvula de 2 vías, 2 posiciones, todas pilotadas neumáticamente del fabricante ASCO. Estas válvulas por su diseño no requieren una presión mínima del fluido de trabajo, siendo suficiente para operarlas, una presión de pilotaje entre 30 a 120 psig (ver Figura 28).

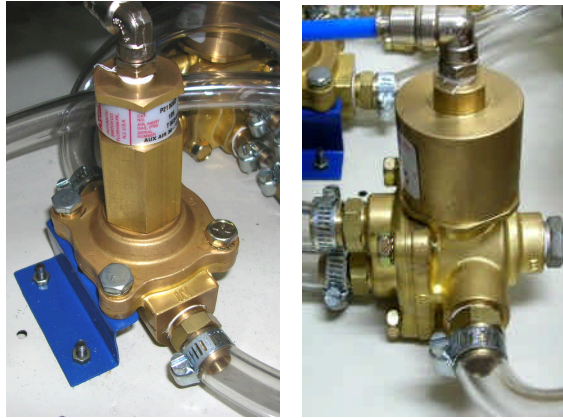


Figura 28. Figura 1 Válvula 2/2 y 3/2 Utilizadas para Controlar el Fluido de Calibración

Válvula y Función	Numero Vías	Conexionado	Cantidad
Principal	2	3/8 NPT	1
Pistón Grande	3	3/8 NPT	2
Pistón pequeño	3	1/4 NPT	2

Tabla 23. Válvula para el control del fluido de calibración

2.3.2 Conexiones y Accesorios

Para unir los diversos elementos del patrón (Conjunto cilindro-pistón, válvulas de control y conexiones) se requirió de diversos accesorios que se describen a continuación:

- **Mangueras Tygon Siliconadas de ½ y ¼ de Pulgada de diámetro:** Fue seleccionada por su excelente flexibilidad en cortos espacios y la capacidad de brindar hermeticidad sin ajustes elevados.
- **Accesorios en Bronce tipo Espigo:** Este tipo de conexión presenta buenas condiciones de hermeticidad, bajo costo, y facilidad de instalación. Para garantizar un perfecto sello entre el espigo y la manguera se incluyó el uso de abrazaderas.
- **Válvulas de selección del pistón:** Dos válvulas de tipo Bola de 3/8 de pulgada.
- **Válvula selección presión Pistón grande o Pequeño:** Válvula de 3 vías 3 posiciones, disposición tipo bola de 1/8 de pulgada.



Figura 29. Elementos Utilizados en el Conexionado Neumático de Calibración

2.3.3 Acondicionamiento de Aire

Antes de ingresar el fluido de calibración al pistón, este debe ser tratado y acondicionado para que el patrón trabaje libre de partículas que puedan poner en peligro la integridad del patrón, por esto se ubicaron dos filtros aguas arriba de la entrada al patrón de 25 y 5 μm . Adicionalmente el aire debe ser llevado hasta un nivel de presión adecuado para la correcta operación del patrón, de 15 a 25 mbar para medidores calibrados a baja presión y 0.2 a 5 bar para medidores calibrados a alta presión de entrada.

Para la regulación de presión pueden utilizarse hasta tres etapas, una de alta presión a la salida del cilindro, una intermedia y una final justo antes del patrón.

De otra parte se requiere el uso de un *manifold* de regulación de caudal que permita ajustar los caudales, disminuyendo el tiempo del proceso de calibración, por tal motivo se ensambló un *manifold* utilizando válvulas de aguja conectadas en paralelo con una única entrada y salida, que puede ser acoplado aguas abajo o aguas arriba dependiendo del tipo de operación del patrón, tal y como se puede observar en la Figura 30 y Figura 31.



Figura 30. Manifold de Regulación de Caudal y Regulación de Alta Presión para el Fluido de Calibración.



Figura 31. Reguladores y Filtros de la Segunda Etapa de Regulación.

2.3.4 Aire de Control

Todos los elementos del fluido de control fueron adquiridos al fabricante italiano **AZ**, estos permiten acondicionar el aire provisto por las líneas de aire comprimido del laboratorio (a 125 psig) donde estará ubicado el patrón hasta la presión de pilotaje de las válvulas de control del fluido de calibración (30- 120 psig)

ELEMENTO	CARACTERISTICAS	CANTD
Unidad de Mantenimiento	Constituida por filtro, regulador y manómetro. Conexiones de ¼ NPT, presión de alimentación 0,5 a 8 bar, filtrado de 25 µm, temperatura max 50 °C.	1
Manifold	Material aluminio, con 6 conexiones ¼ NPT.	1
Conectores	Conectores rápidos de 4 mm x ¼ NPT y 4 mm x G4	5 c/u
Manguera	Manguera plástica de 4 mm de diámetro, máx. Presión de operación 120 PSI.	10 m

Tabla 24. Componentes del Sistema Neumático de Control

CAPÍTULO 3

SOFTWARE DE CONTROL E INTERFAZ GRAFICA

Como ya se menciona anteriormente el software de control y la interfaz grafica que permiten la operación del patrón primario tipo pistón se realizaron utilizando Factory Floor de la empresa OPTO22.

3.1 SOFTWARE DE CONTROL

Para describir y diseñar el sistema de control y el software de adquisición de datos del Patrón Tipo Pistón se utilizó la metodología Grafcet. Se trata de un estándar que utiliza descripción gráfica para el diseño de sistemas de control independientemente de la tecnología a utilizar. Permitiendo describir los comportamientos del automatismo en relación con las informaciones que recibe, imponiendo un funcionamiento riguroso y evitando de esta forma incoherencia, bloqueos o conflictos en su funcionamiento.

La Metodología Grafcet fue desarrollada en Francia, en el año 1977, por AFCET (Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique) y ADEPA (Association pour le Développement de Production Automatisée). Actualmente es aceptado en Europa y homologado por varios países, entre ellos Francia por la norma NFC-03-190 y en Alemania por DIN.

Partiendo del Hardware (Elemento terciario de medición) seleccionado se procedió a desarrollar el software de control utilizando la Plataforma Factory Floor de OPTO 22 anteriormente descrita.

El software se dividió en dos estrategias según el tipo de operación del pistón (Operación en ascenso o en descenso) cuyas principales diferencias desde el punto de vista del sistema de control son el punto de posicionamiento inicial del pistón y la válvula que se debe abrir o cerrar para permitir el paso de flujo necesario para iniciar la calibración. A continuación se muestra el grafcet que ilustra en forma general la operación del sistema de control

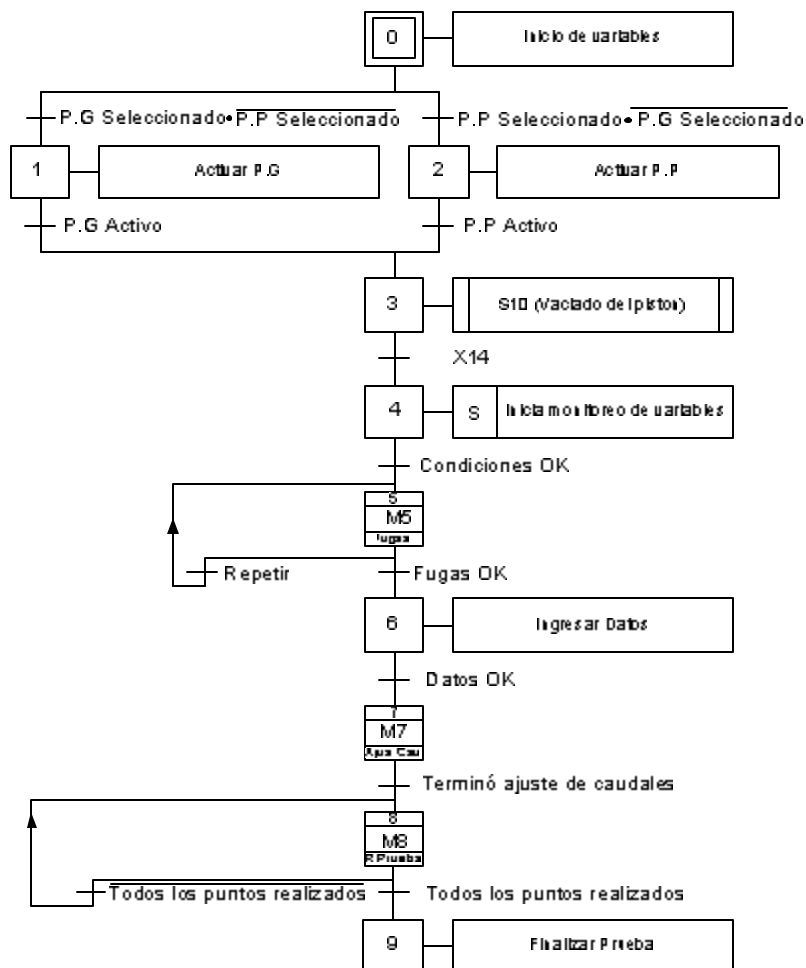


Figura 32. Graficet Funcionamiento General del Sistema de Control

El proceso de calibración inicia con la selección del pistón que va operar y un vaciado inicial del mismo. Luego se da inicio al monitoreo de las variables de influencia del proceso (presión y temperatura) y espera un acuse de usuario para continuar. Este acuse lo envía el PC&E⁴ a través de la interfaz grafica del sistema cuando considere acorde con su experiencia y procedimiento técnico de calibración, que los valores de las magnitudes monitoreadas son adecuados para iniciar la calibración. En este punto el sistema de control queda a la espera del ingreso de los datos del medidor a calibrar, sus características y los parámetros de la calibración tales como el número de puntos de caudal, el numero de repeticiones de cada uno de ellos, el orden en cual se van a realizar y

⁴ Profesional de Calibración y Ensayos, cargo del responsable de la ejecución de una calibración en la Corporación CDT de GAS.

el volumen de prueba con el que se realizarán. Luego de almacenado estos datos en la memoria del sistema se procede a realizar la verificación de fugas en el montaje.

3.1.1 Verificación de fugas

En la Figura 33 se presenta el graficet para el proceso de verificación de fugas que consiste en permitir el ingreso de fluido al pistón en operación abriendo la válvula principal y de entrada hasta que alcance una altura determinada, llegado este punto se cierran las válvulas y el sistema queda esperando la confirmación de usuario que le indica el cierre de la válvula de paso manual. Al recibir esta confirmación se abre la o las válvulas que comunican el pistón con el medidor según sea el caso (operación en ascenso o descenso) como muestra la Figura 34.

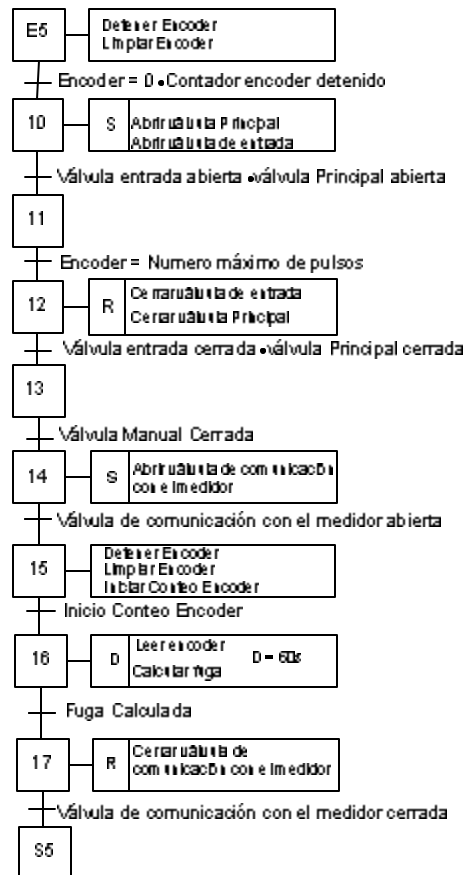
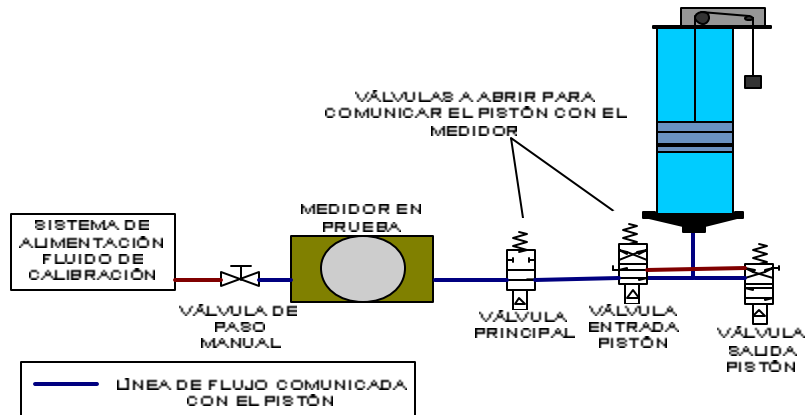
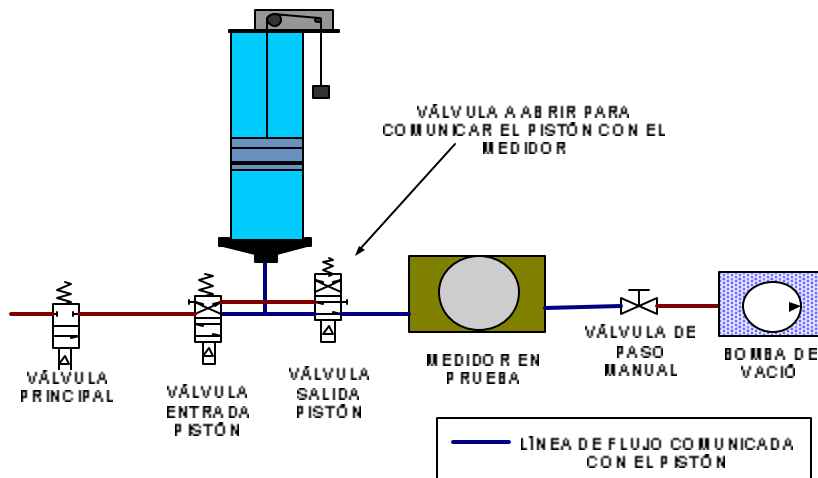


Figura 33. Graficet Macro etapa verificación de fugas



a. Operación en Ascenso



b. Operación en Descenso

Figura 34. Esquema del proceso de verificación de fugas

Al abrir estas válvulas el sistema de control espera un tiempo determinado para que la presión se establezca entre el Pistón y el medidor a calibrar. Transcurrido este tiempo se inicia el conteo de pulsos en el encoder del pistón para medir el desplazamiento del pistón durante un minuto y evaluar el volumen evacuado determinando si existe una fuga de fluido que impida realizar la calibración en forma adecuada. Cuando se comprueba que el montaje no posee fuga se procede con el ajuste de los puntos de caudal en los cuales se calibrará el medidor.

Como parámetro de control del nivel de fugas se definió un caudal de fuga máximo permitido ($Q_{fuga-max} = 0.01\%Q_{cal-min}$) como el 0.01 por ciento del mínimo

caudal a calibrar en el medidor, garantizando de esta manera un nivel de incertidumbre despreciable por concepto de fugas. P. Ej: Si el mínimo caudal a calibrar es de $0.5 \text{ dm}^3/\text{min}$, entonces el máximo caudal de fugas permitido es de $0.01\% \times 0.5 \text{ dm}^3/\text{min} = 0.005 \text{ dm}^3/\text{min}$.

3.1.2 Ajuste de caudales

Esta parte del sistema de control cuyo grafcet se muestra en la Figura 35 inicia vaciando el pistón en operación, para luego posicionarlo según el modo de operación (En la parte inferior si opera en ascenso o en la parte superior si opera en descenso), realizado esto, se abre la válvula que comunica el pistón con el medidor según sea el caso (de la misma forma que indica la Figura 34) y enciende la bomba de vacío si esta operando en descenso.

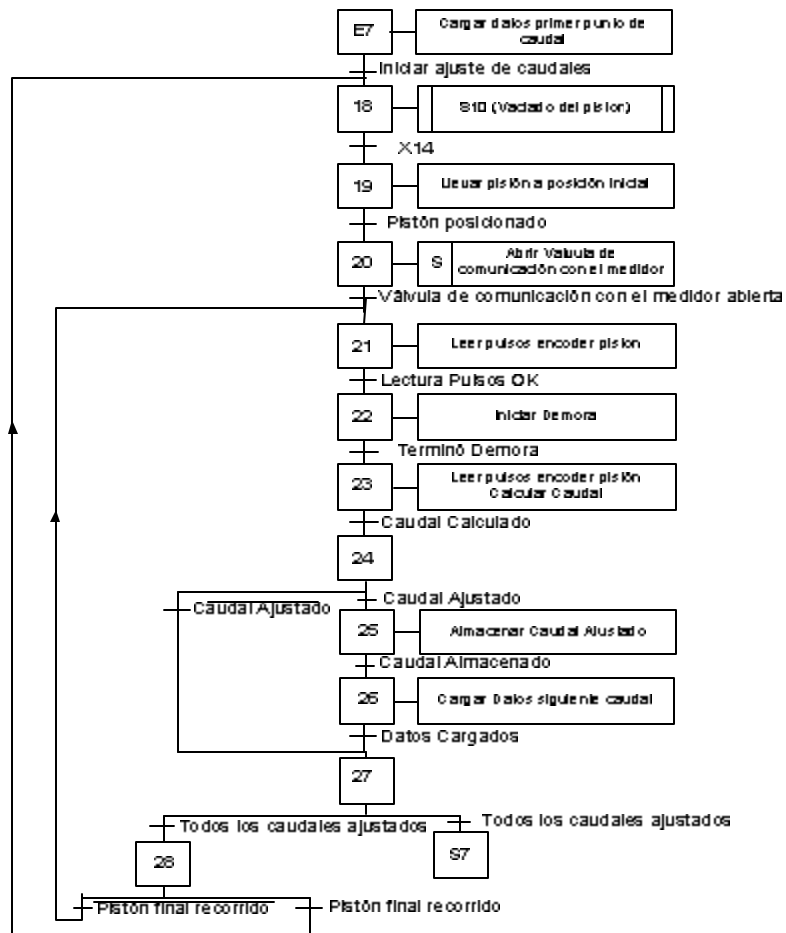


Figura 35. Grafcet ajuste de caudales

A continuación se inicia el cálculo del caudal instantáneo tomando el número de pulsos emitido por el encoder del pistón durante una pequeña fracción de tiempo determinada según el valor del caudal que se desea ajustar (mínimo 250 ms - máximo 2s), y este valor es enviado a la interfaz para permitir que el PC&E lo ajuste manipulando la válvula de aguja del *manifold* de regulación según corresponda. Cuando este caudal alcance el valor a ajustar con una variación admisible de $\pm 5\%$, el PC&E envía una confirmación que le indica al controlador que este punto de caudal ya fue ajustado, debe almacenar su valor y continuar con el ajuste del siguiente caudal hasta realizar el ajuste de todos los caudales necesarios en la calibración.

En forma simultánea a esta tarea el controlador se mantiene monitoreando las variables de influencia (temperatura y presión), manteniendo una constante verificación de la posición absoluta del pistón para determinar si se está acercando al final de su recorrido (la parte superior cuando opera en ascenso o parte inferior si lo hace en descenso) y realizar un vaciado o llenado del mismo según corresponda. Terminando el ajuste de todos los caudales se realiza un vaciado final del pistón.

3.1.3 Ejecución de la calibración

En este punto se inicia el proceso de calibración como tal, que consiste en pocas palabras en estimar el volumen desplazado por el pistón y compararlo contra el volumen indicado por el medidor en prueba cuando se trata de medidores de desplazamiento positivo y adicionalmente registrar el tiempo que llevó desplazar este volumen para calcular el caudal medio y compararlo con el caudal indicado por el medidor cuando se trata de medidores de caudal volumétrico o másico. En la Figura 36 se muestra un graficet que ilustra esta etapa del proceso.

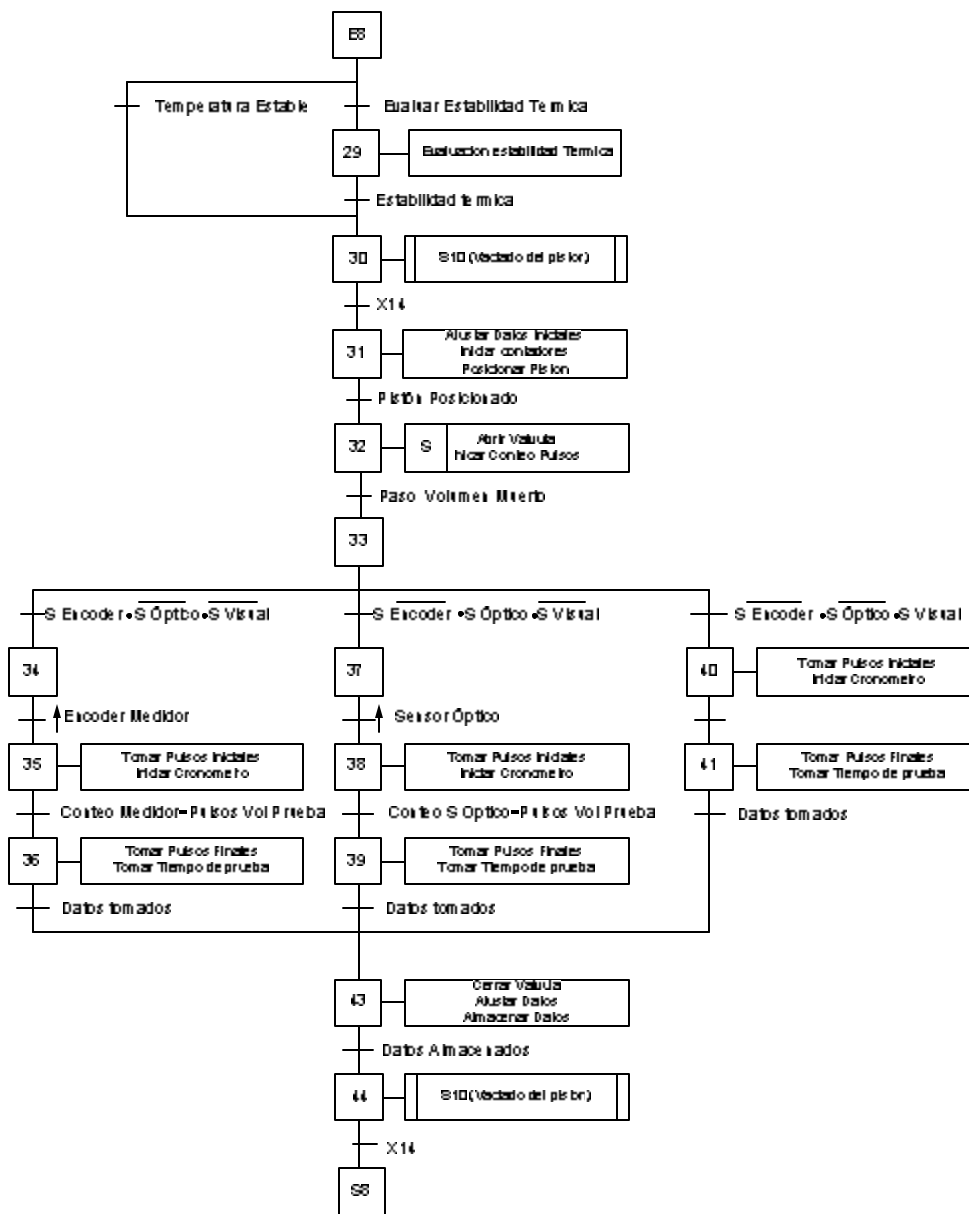


Figura 36. Graficet Ejecución de la calibración

Se inicia realizando un vaciado del pistón en operación, cuando este llega a su posición de reposo inferior el controlador queda esperando una confirmación de usuario enviada por el PC&E que le indique si debe realizar la verificación de estabilización térmica que consiste en comparar los valores de las temperaturas instantáneas del sistema durante un minuto y comprobar que la máxima variación entre ellas no supere 1 °C, o si el sistema se encuentra térmicamente estable y no es necesario realizar dicha verificación. Superado este paso el

controlador carga los datos iniciales del punto de prueba a calibrar según corresponda, e inicia la calibración llevando el pistón a su posición inicial (El punto de reposo inferior cuando se opera en ascenso o a una altura equivalente al volumen necesario para realizar la prueba cuando el pistón opera en descenso).

Ubicado el pistón en dicha posición se procede a abrir la o las válvulas que comunican el pistón con el medidor según su operación como se indicó en la Figura 34 y se inicia un monitoreo de los pulsos del encoder del pistón para determinar cuando se registraron los pulsos equivalente al volumen muerto previamente ajustado acorde con el valor del caudal de prueba. Desplazado este volumen el controlador inicia el conteo de pulsos correspondientes al volumen de prueba del caudal en ejecución cuando se presente un flanco de subida en la entrada digital correspondiente al medidor (encoder del medidor o sensor óptico según sea el caso) cuando se trata de medidores desplazamiento positivo y de forma inmediata si es otro tipo de medidor (caudal volumétrico o másico).

Si se trata de medidores de desplazamiento positivo el control del paso del volumen de prueba para terminar la calibración de cada punto de caudal se realiza monitoreando los pulsos registrados en la entrada digital a la cual se conecta el medidor (encoder o sensor óptico), cuando se registren un número de pulsos equivalente al volumen de prueba se toma el número de pulsos registrados por el encoder del pistón y el tiempo transcurrido, y se almacenan junto con el número de pulsos registrados en la entrada del medidor.

Si se trata de medidores de caudal volumétrico o másico este control se realiza directamente con los pulsos registrados por el encoder del pistón. Al alcanzar un valor equivalente al volumen de prueba, se almacena este dato y el tiempo de desplazamiento.

Realizada la toma de datos se cierra la válvula que comunica el pistón con el medidor, se realiza el vaciado de este y se repite este mismo procedimiento para todos los caudales de calibración. Al finalizar la calibración se genera un archivo a través de la interfaz gráfica el cual contiene todos los datos de la calibración (volúmenes registrados por el medidor, volúmenes registrados por el pistón,

tiempo para el desplazamiento de cada volumen y los valores de las temperaturas y presiones durante cada punto de prueba), permitiendo calcular el error del medidor, la incertidumbre asociada y generar el informe de calibración del medidor.

3.2 INTERFAZ GRAFICA

Como parte integral del sistema de control se desarrolló una interfaz grafica que permite al PC&E interactuar con el sistema de control y adquisición de datos, ingresar los datos de la calibración y realizar un monitoreo de las variables de influencia durante la misma. La interfaz grafica se constituyo de cuatro ventanas las cuales se describen a continuación:

3.2.1 Verificación de condiciones

Esta es la ventana de inicio de la estrategia de calibración, y permite realizar la selección del pistón que va operar, después de seleccionado, la ventana activa el monitoreo de las presiones y temperaturas del sistema, estas ultimas mostradas en una grafica, para que sea posible determinar si la condiciones son adecuadas para iniciar la calibración o se debe esperar a que se estabilicen.



Figura 37. Selección del Pistón a operar

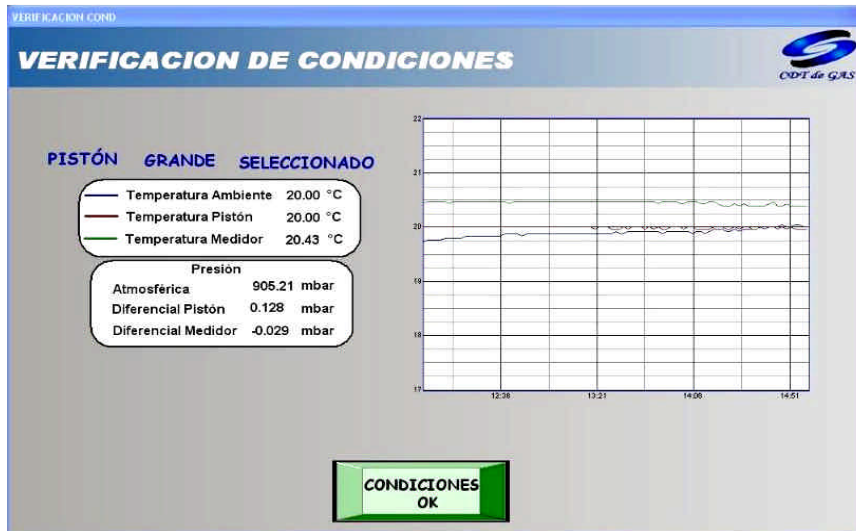


Figura 38. Verificación de condiciones

3.2.2 Ingreso de datos

Esta ventana posee dos funciones, la primera de ellas es permitir el ingreso de los datos necesarios para realizar la calibración y las características del medidor a calibrar para ser enviados al controlador.

Valvula	Caudal dm^3/min	Volumen dm^3
1	3.000	5.500
2	3.500	5.500
3	4.000	5.500
4	16.000	5.500

Figura 39. Ingreso de datos de Calibración

La segunda es ejecutar y controlar el inicio de la verificación de fugas en el montaje realizado para la calibración, permitiendo observar al PC&E una barra de avance del tiempo de verificación transcurrido, el número de pulsos de fuga registrado por el pistón, y cuando finaliza la verificación determina si existe caudal de fuga y cuanto fue su valor.

Figura 40. Verificación de Fugas

3.2.3 Ajuste de caudales

El objetivo de esta ventana es controlar el ajuste de los distintos puntos de caudal en los cuales se va a realizar la calibración del medidor en prueba, mostrando el valor de caudal a ajustar y los valores máximos y mínimos del mismo, además de una gráfica en la cual se indica en color rojo el valor de caudal a ajustar y en color verde el caudal instantáneo que esta pasando a través del pistón para lograr el caudal deseado manipulando una de las válvulas de aguja del *manifold* de regulación según indique en los mensajes de la parte inferior de la ventana. También permite observar el valor instantáneo de las presiones y temperaturas del sistema.

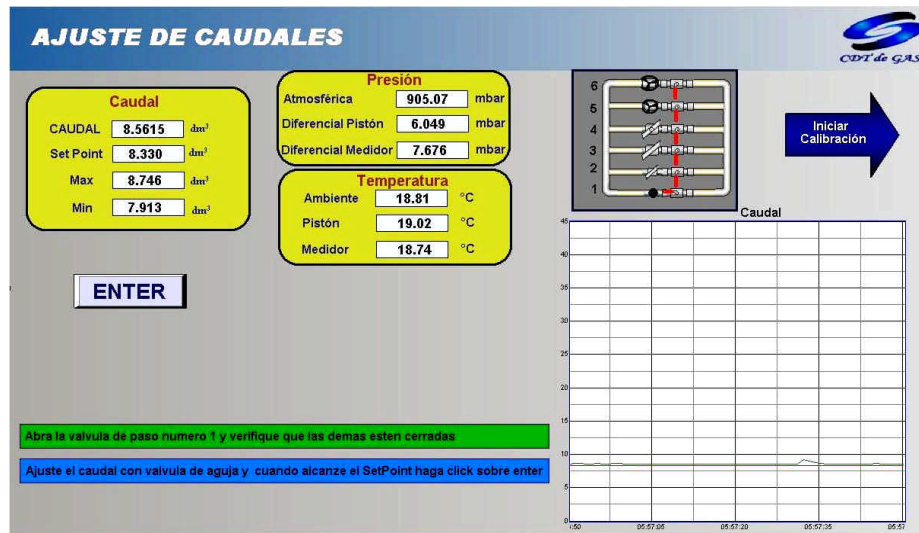


Figura 41. Ajuste de Caudales

3.2.4 Pistón en prueba

Esta última ventana lleva a cabo el monitoreo de las variables (presión y temperatura) durante la realización de los diferentes puntos de prueba de la calibración mostrando su valor instantáneo y una gráfica que permite observar el comportamiento de cada una de las variables. Además visualiza el caudal instantáneo del pistón. También permite al PC&E ejecutar una verificación de la estabilidad térmica al inicio de cada uno de los puntos de prueba si lo considera necesario, y controlar el momento de inicio de los mismos.

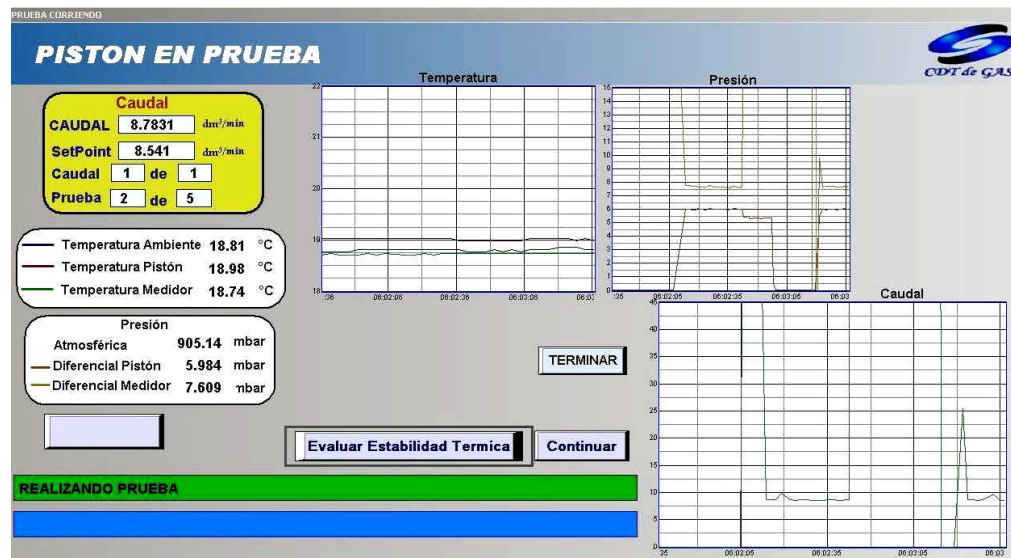


Figura 42. Calibración en Ejecución

CAPÍTULO 4

CALIBRACIÓN DEL PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN

El objetivo del proceso de calibración del patrón tipo pistón es determinar la constante K , que relaciona el número pulsos generados por el encoder con el volumen desplazado o acumulado por el patrón. Para esto se utilizaron dos métodos el dimensional y el gravimétrico. Además de esto en este capítulo se describe la calibración realizada a los instrumentos de temperatura y presión.

4.1 CALIBRACIÓN DIMENSIONAL

El método consiste en la determinación de las características geométricas del patrón. Adicionalmente, se determinaron las dimensiones de la polea circular y del cable que sostiene el pistón con el propósito de determinar la constante K_p de cada cilindro que compone el patrón, la cual relaciona el volumen desplazado o acumulado con los pulsos emitidos por el codificador electrónico rotativo (encoder), solidario al eje de la polea circular. Con este método se logra trazabilidad a patrones de longitud (una magnitud básica) y no depende de patrones de su propia magnitud para obtener trazabilidad dado que se trata de un patrón primario.



Figura 43. Calibración del Patrón Tipo Pistón por el Método Dimensional

El proceso de calibración se realizó bajo condiciones de temperatura y humedad relativa controladas en el cuarto de calibración del CDT de GAS (%HR = 50 % ± 10 % y $T_{amb} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) debido a la influencia de la temperatura en los procesos de medición dimensional y la necesidad de corregir las mediciones a una temperatura de referencia, que para el caso del Patrón Tipo Pistón es de 20 °C.

4.1.1 Instrumentos Utilizados

Para la realización de esta calibración se utilizaron los instrumentos que se listan a continuación:

- Micrómetro digital, marca MITUTOYO, alcance de medición de 0 - 6 pulgadas, Número de serie 55027756, certificado de calibración N° CMED728405 de Equipo y Controles Industriales S.A. (ECI) (Acreditación N° 35705) trazable a la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) - Colombia y Laboratorio MITUTOYO BRASIL (acreditación N° 031 INMETRO) trazado al INMETRO (BRASIL).
- Indicador de carátula, marca MITUTOYO, alcance de medición de 0 - 1 mm, Número de serie EUP004 (523174), certificado de calibración N° CICA739605 de Equipo y Controles Industriales S.A. (ECI) (Acreditación N° 35705) trazable a la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) - Colombia y Laboratorio MITUTOYO BRASIL (acreditación N° 031 INMETRO) trazado al INMETRO (BRASIL).
- Indicador digital TL-001 con termocupla tipo J TL-011, certificado de calibración N° 23359 del laboratorio THERMOMETRIC con trazabilidad a la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) – Colombia.

INSTRUMENTO	UND	ALCANCE DE MEDICIÓN	INCERTIDUMBRE CERTIFICADO K=2	RESOLUCIÓN	ERROR
Micrómetro Digital 0-160 mm	mm	0 - 150	0.0051	0.001	0.0014
Comparador Interiores 35-60 mm	mm	35 - 60	0.001	0.001	0.010
Calibrador Digital	mm	0 - 150	0.015	0.01	0.000
Comparador Interiores 100-150 mm	mm	100 - 150	0.002	0.001	0.0010
Trisense 37000-00 + Termocupla tipo J	°C	0 - 121	0.4	0.1	0.6

Tabla 25. Instrumentos Utilizados en la Calibración dimensional del Patrón Tipo Pistón

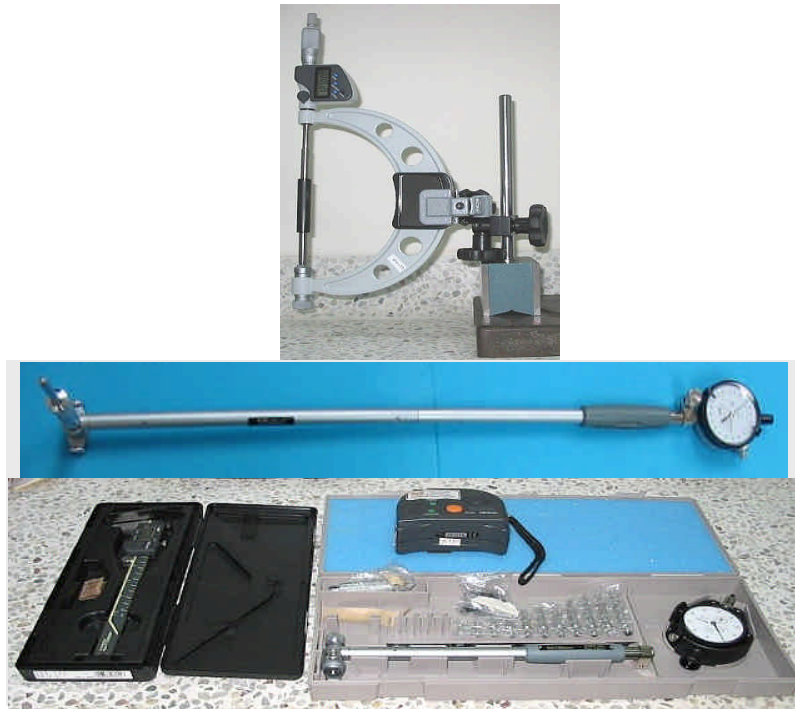


Figura 44. Instrumentación Utilizada en la Calibración del Patrón Tipo Pistón

4.1.2 Diámetro interno del cilindro grande

Se realizaron cuatro repeticiones de la medición del diámetro sobre cada uno de los 9 niveles que fueron marcados sobre el cilindro, comenzando desde la base (0 mm) hasta la parte superior (450 mm), como se ilustra en la Figura 45.

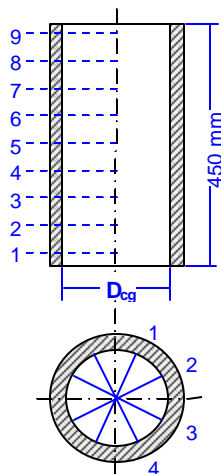


Figura 45. Medición de diámetros internos del cilindro grande

De las lecturas tomadas se calculo un diámetro interno promedio $D_{cg} = 149.938 \pm 0.071$ mm ($K = 3.18$). Los resultados de las mediciones se muestran en la siguiente tabla:

Diámetro Interno del Cilindro Grande		
Nivel #	Altura (mm)	D_{cg} Promedio (mm)
1	50	149.926
2	100	149.931
3	150	149.932
4	200	149.933
5	250	149.935
6	300	149.938
7	350	149.944
8	400	149.954
9	450	149.949

Tabla 26. Resultados medición de diámetros internos del cilindro grande

4.1.3 Diámetro interno del cilindro pequeño

Al igual que para el cilindro grande se realizaron 4 mediciones del diámetro sobre cada uno de los 12 niveles que fueron marcados sobre el cilindro, comenzando desde la base (0 mm) hasta la parte superior (650 mm), como se ilustra en la Figura 46.

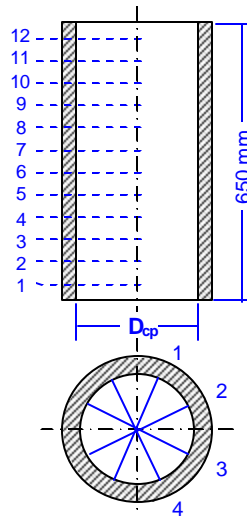


Figura 46. Medición de diámetros internos del cilindro pequeño

De los resultados de estas mediciones que se muestran en la Tabla 27 se calculo un diámetro interno promedio $D_{cp} = 38.029 \pm 0.011$ mm ($K = 4.3$).

Diámetro Interno del Cilindro Pequeño		
Nivel #	Altura (mm)	D_{cp} Promedio (mm)
1	50	38.033
2	100	38.034
3	150	38.033
4	200	38.032
5	250	38.030
6	300	38.028
7	350	38.027
8	400	38.026
9	450	38.026
10	500	38.026
11	550	38.028
12	600	38.028

Tabla 27. Resultados medición de diámetros internos del cilindro pequeño

4.1.4 Constante K Del Patrón tipo pistón

La constante del pistón K_{pg} define la relación entre el volumen desplazado y el número de pulsos que ingresan al sistema de adquisición de datos, provenientes del codificador rotatorio (encoder), accionado por un cable que esta en contacto con la polea circular.

Esta se determina por cinemática, de acuerdo con el siguiente modelo matemático⁵:

$$K_{pg} (dm^3 / Pulso) = \frac{4 \cdot P_{enc}}{p \cdot [D_{pe} \cdot [1 - a \cdot (T_{pe} - 20)] + D_{cab}] \cdot [p \cdot (D_b + \Delta D)^2]} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

- P_{enc} : Pulsos/revolución del encoder
- D_{pe} : Diámetro de la polea del encoder
- D_{cab} : Diámetro del cable
- D_b : Diámetro base
- ?D: Desviación del diámetro
- a: Coeficiente de dilatación térmica del acero Inox
- T_{pe} : Temperatura de la polea del encoder

⁵ Tomada de: Procedimientos técnicos CDT de GAS

En la siguiente tabla se muestran los valores de los parámetros anteriormente mencionados, los cuales se obtuvieron realizando mediciones a los demás elementos conjunto encoder, para calcular K_{pp} y K_{pg} .

Parámetro	Valor PP	Valor PG	Magnitud
P_{enc}	20000	20000	Pulsos/rev
D_{pe}	39.858	30.041	mm
D_{cab}	0.225	0.224	mm
D_b	38.00	149.935	mm
?D	0.0316	0.0056	mm
?	5.00 E-05	5.00 E-05	1/°C
T_{pe}	20.9	21.19	°C

Tabla 28. Resumen parámetros para el cálculo de K_{pg}

Realizando los cálculos se obtuvieron los siguientes valores para las constantes:

Pistón	Valor constante K (pulsos/dm ³)	Incertidumbre Relativa (%)	Factor de Cobertura
Grande	11913.79	0.070	K = 1.98
Pequeño	139817.7	0.058	K = 1.972

Tabla 29. Resultados calibración dimensional

4.2 CALIBRACIÓN GRAVIMETRICA DEL PATRÓN

Este método permite calibrar los cilindros del Patrón Tipo Pistón, brindando trazabilidad a patrones de masa. Internacionalmente es conocido como método por desplazamiento de Agua o "Water Draw", consiste en determinar el factor de

calibración K, que relaciona los pulsos generados por el encoder con el volumen de agua desplazado por el cilindro.

Cabe aclarar que la calibración gravimétrica no fue llevada a la práctica, debido a que a partir de análisis realizados por un PC&E de CDT de GAS se determino que las balanzas con que cuenta el laboratorio del CDT de GAS para realizar la prueba no poseen las cualidades metrológicas necesarias para obtener el nivel incertidumbre adecuado para la calibración un patrón de este tipo, incurriendo en gastos y esfuerzos innecesarios que no aportan nada al proyecto. Por esta razón se opto por calibrar el patrón tipo pistón únicamente con el método dimensional. Sin embargo se elaboro el procedimiento para llevar acabo la prueba y se describe a continuacion.

4.2.1 Procedimiento

El cilindro a calibrar se llena con agua pura (Bidestilada, tipo ASTM 1), luego se vacía el agua en un recipiente, al tiempo que se miden los pulsos generados por el encoder. Este volumen de agua, se conoce midiendo la masa de agua y determinado su densidad a la temperatura de prueba. Para esto se mide la masa del recipiente vacío (M_v) y después la del recipiente lleno con agua destilada hasta la marca de aforo (M_t); la diferencia de masa de ambas mediciones será la masa de agua contenida en el recipiente, (M_b). El mensurando se calcula por medio de la siguiente ecuación que constituye el modelo matemático⁶:

$$K_c = \frac{(P_{ini} - P_{fin}) \cdot r_w}{(M_t - M_v) \cdot (1 - \alpha \cdot (T_w - 20))} \quad \text{Ecuación 5}$$

K_c : Constante del Pistón obtenida por el método gravimétrico (pulsos/dm³)
 P_{ini} - P_{fin} : Diferencia entre los pulsos iniciales y finales emitidos por el encoder (pulsos)
 V_c : Volumen de agua desplazado por el pistón a la temperatura de 20 °C, [cm³].

⁶ Tomado de INCERTIDUMBRE EN LACALIBRACIÓN DE UN MATRAZ VOLUMÉTRICO, Sonia Trujillo Juárez, Roberto Arias Romero, CENAM 2002

- $M_t - M_v$: Masa del recipiente con agua (M_t) menos la masa del recipiente vacío (M_v); es decir, la masa de agua desplazada por el cilindro y contenida en el recipiente (M_t), [g].
- ρ_w : Densidad del agua que se usa en la calibración, [g/cm³].
- α : Coeficiente de expansión cúbica del vidrio de Borosilicato ($1,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$)
- T_w : Temperatura del agua medida durante la calibración, [°C].

La densidad del agua se calcula en kg/m³ en función de la temperatura, utilizando la ecuación de Kell⁷ modificada para usarse con la ITS-90 y en el intervalo de 5°C a 40 °C, así:

$$\rho_w = 999,853 + 6,326 \cdot 10^{-2} \cdot T_w - 8,523 \cdot 10^{-3} \cdot T_w^2 + 6,943 \cdot 10^{-5} \cdot T_w^3 - 3,821 \cdot 10^{-7} \cdot T_w^4$$

Ecuación 6

Por los análisis previos de incertidumbre se determinó que la influencia por la flotación debida al aire es despreciable, comparada con la gran influencia provocada por el instrumental a utilizar, por esto no es necesario realizar correcciones por esta influencia. En la Figura 47 se observa el montaje requerido para la calibración por el método gravimétrico.

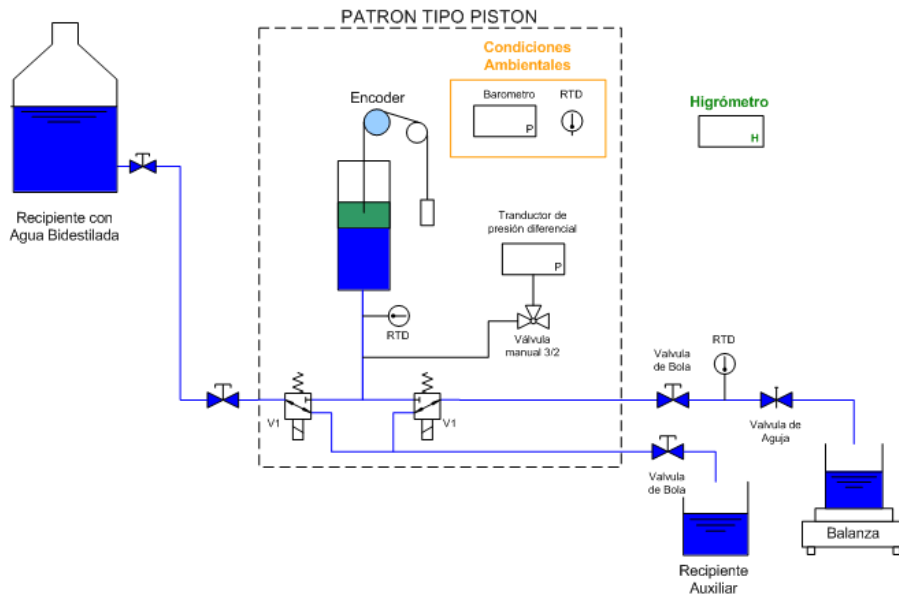


Figura 47. Montaje realizado para la calibración por el método gravimétrico.

⁷ Tomado de INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE UN MATRAZ VOLUMÉTRICO, Sonia Trujillo Juárez, Roberto Arias Romero, CENAM 2002

Con el ánimo de hacer más representativo el proceso, luego de llenar completamente el cilindro, el volumen es desalojando por porciones, relacionando dichas porciones con un número de pulsos generados por el encoder. La repetibilidad del método esta ligada a que el observador de la calibración desaloje el volumen exacto por medio del número pulsos del encoder. En la Figura 48 se muestra el desalojo por porciones en el momento de realizar la calibración gravimétrica.

El procedimiento exige ser realizado en un ambiente bajo condiciones controladas, y además se debe garantizar una adecuada estabilidad térmica de todo el sistema relacionado con la calibración.

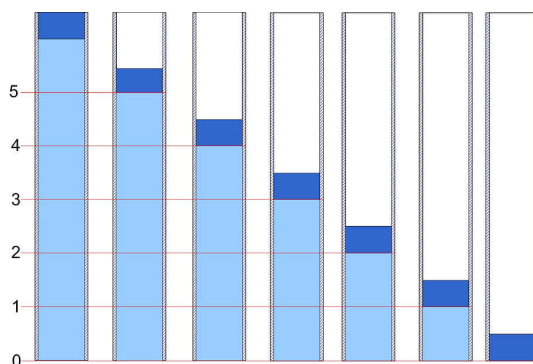


Figura 48. Desalojo del agua por secciones del cilindro para el proceso gravimétrico.

4.3 CALIBRACION ELEMENTOS SECUNDARIOS DE MEDICIÓN

Una vez adquiridos los instrumentos, estos fueron verificados en el laboratorio, para determinar si cumplían con las especificaciones solicitadas a los proveedores. El proceso se ejecutó utilizando los procedimientos técnicos del CDT de GAS, como parte del proceso de verificación de las compras previsto en el Sistema de Gestión de la Calidad.

Luego de culminar el ensamble del Patrón y poner a punto el sistema de adquisición de datos, se realizó la calibración de los instrumentos en lazo cerrado, considerando: sensor, transductor e interfaz (PC).

Para la calibración del instrumental secundario se desarrollaron estrategias de adquisición de datos con interfaz basada en Opto Display de OPTO 22. (Ver Figura 49).

4.3.1 Calibración Sensores De Temperatura

La calibración de las RTD's se efectuó empleando un bloque seco y una RTD Patrón tipo Pt-100 de cuatro hilos, para un alcance entre 17 °C y 22 °C. Las mediciones de las RTD's fueron tomadas directamente por el sistema de adquisición de datos y las correspondientes a la RTD Patrón, utilizando un Multicalibrador.

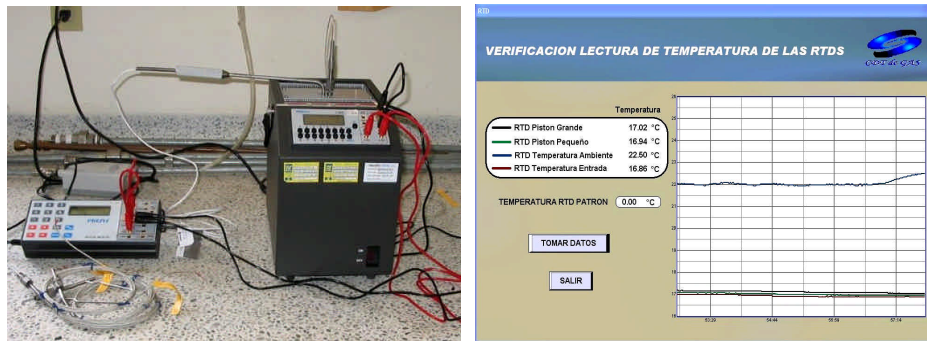


Figura 49. Verificación Inicial e Interfaz Implementada para la Calibración de RTD's

El resultado de la calibración de las RTD's permitió brindarle trazabilidad a las mediciones de temperatura en el Patrón y ajustar las curvas para la corrección de temperaturas (Ver Figura 50).

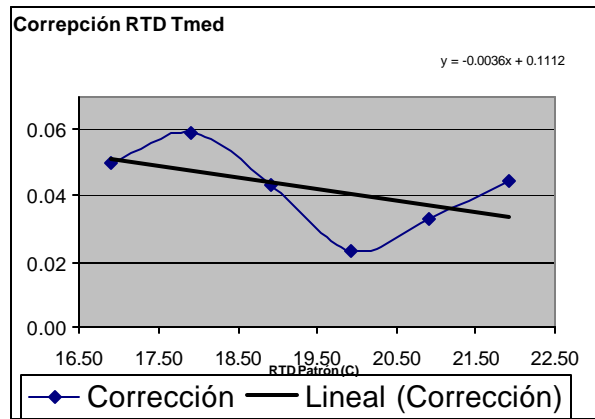


Figura 50. Curva de corrección para una RTD del Patrón tipo Pistón

Con los datos obtenidos de este proceso se realizó el cálculo de las curvas de corrección para las RTDs, mediante el método de mínimos cuadrados para ajuste de ecuaciones lineales utilizando Microsoft Excel. Las curvas obtenidas se muestran en la siguiente tabla donde x es la lectura inicial y y el de la temperatura corregida:

RTD	FUNCION DE CORRECCION
Temperatura Pistón Pequeño	$y = x - 0.01823x + 0.24181$
Temperatura Pistón Grande	$y = x - 0.0089x + 0.0405$
Temperatura Medidor	$y = x - 0.0036x + 0.1112$
Temperatura Ambiente	$y = x - 0.0077x - 0.0296$

Tabla 30. Resultados calibración de las RTDs

4.3.2 Calibración Transductores De Presión

Los transductores de presión se calibraron mediante comparación directa con un manómetro de columna, generando la presión por medio de una bomba manual como muestra la Figura 51.



Figura 51. Calibración diferenciales del presión del patrón primario tipo pistón

El diferencial de presión del pistón se calibró sobre un alcance de 0 a 12 mbar con escalones de 2 mbar en ascenso y descenso. Para el caso del diferencial de presión del medidor se calibró de 0 a 50 mbar con escalones de 10 mbar.

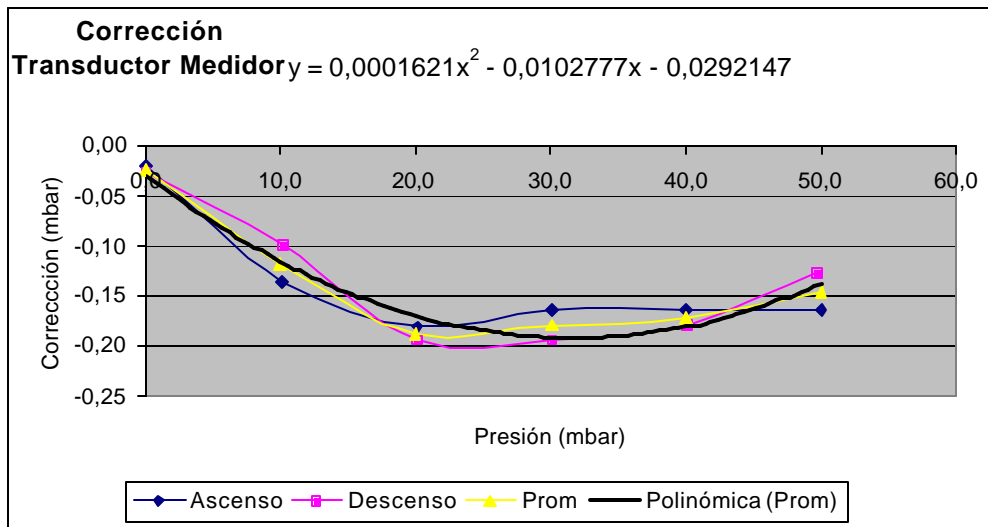


Figura 52. Curva de Calibración del Transductor de Presión Diferencial del Patrón Tipo Pistón

Con los datos obtenidos se ajusto una curva de corrección polinómica de orden 2 utilizando Microsoft Excel para el diferencial de presión del medidor. Para el diferencial de presión del pistón no se calculo la curva de ajuste debido a que no presentaba errores sistemáticos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Diferencial	Curva de corrección
Medidor	$y = x + 0,0001621x^2 - 0,0102777x - 0,0292147$
Pistón	Sin corrección

Tabla 31. Resultados calibración de los diferenciales de presión

CAPÍTULO 5

CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO DEL PATRÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN PATRÓN TIPO PISTÓN

Luego de culminar con la fabricación, ensamble y calibración del nuevo Patrón tipo Pistón, incluida la instrumentación secundaria, las estrategias del sistema de control y adquisición de datos y los componentes adicionales necesarios para la adecuada operación del patrón, se procedió a realizar el proceso de caracterización.

Dicho proceso de caracterización consistió en la realización de pruebas al patrón tipo pistón para determinar las condiciones más favorables de manera que se lograrán obtener resultados confiables con bajos niveles de incertidumbre.

Tales pruebas consistieron en operar el pistón bajo diversas condiciones, variando las magnitudes de influencia más importantes al momento de realizar una calibración.

Los parámetros más importantes que se buscó definir fueron:

- Presión De Operación
- Temperatura De Operación
- Alcance De Caudal
- Volumen Muerto

Cabe anotar que las pruebas de caracterización se realizaron bajo un ambiente adecuado, en el cuarto de condiciones controladas (Temperatura ambiente y humedad relativa) del CDT de GAS.

Para garantizar un adecuado desempeño del Patrón se deben establecer la presión y temperatura de operación óptimas, las cuales limitarán su alcance de medición, tipo de medidores a calibrar e inclusive nivel de incertidumbre pues la estabilidad de estas dos variables influye en la repetibilidad del Patrón.

5.1.1 Presión de Operación

Para garantizar la estabilidad en la densidad del gas durante los procesos de calibración estos deben realizarse a presión constante, dado que los gases exhiben grandes variaciones de densidad con pequeños cambios de presión o temperatura. Adicionalmente se debe operar el Patrón lo más cerca posible de la presión atmosférica disminuyendo la influencia por el fenómeno de compresibilidad de los gases.

Otro factor que limita la presión del equipo es la presión de rotura de sello de mercurio. Experimentalmente se determinó que el sello de mercurio puede soportar una presión de hasta 30 mbar. Para determinarla se operó el pistón en ascenso hasta llevarlo al tope superior incrementando lentamente la presión interna del cilindro hasta lograr el rompimiento del sello y liberar la presión, realizando un constante monitoreo de la presión cada 250 milisegundos.

Teniendo como máxima presión de operación tres cuartas partes de la presión de rotura del sello de mercurio ($30 \text{ mbar} \times \frac{3}{4} = 20 \text{ mbar}$) y basados en las recomendaciones obtenidas de CENAM⁸ se definió la presión de operación para los dos pistones, como sigue:

Presión de operación pistón Grande: 6 mbar

Presión de operación pistón Pequeño: 7 mbar

Las presiones antes declaradas son un indicativo de la presión media de operación de cada pistón dado que esta puede cambiar ligeramente por fenómenos tales como diferencia en la caída de presión asociada a la tubería y accesorios del Patrón entre su operación en ascenso y descenso, generación de fricción durante el desplazamiento del pistón, irregularidad en el torque de arrastre de los encoder. Lo más importante es lograr una baja variación de la presión (máximo $\pm 0.5 \text{ mbar}$ del valor medio) de operación del Pistón para un caudal dado.

⁸ Centro Nacional de Metrología de Mexico

5.1.2 Temperatura de Operación

La temperatura máxima de operación del patrón es limitada por el posible atascamiento del pistón dentro del cilindro debido al fenómeno de dilatación térmica del pistón. Esto ocasiona inestabilidad en la presión y consecuentemente en el caudal, pues se requiere vencer la fuerza de fricción generada por las fuerzas normales entre el cilindro y el Pistón.

Si la dilatación del pistón es excesiva, podría ocasionar que este presionara la pared del cilindro, ocasionando esfuerzos que podrían llegar a la ruptura del mismo.

La temperatura mínima se halla limitada por el evento contrario donde el pistón se contrae incrementando la tolerancia entre este y el cilindro, dando como resultado el escurrimiento del sello de mercurio.

Las pruebas realizadas al patrón luego de estabilizarlo a diversas temperaturas comprendidas entre 17 y 25 °C permitieron concluir que la temperatura de operación para su óptimo funcionamiento es de 20 ± 2 °C.

Además de esto para salvaguardar la integridad de los cilindros, el patrón debe ser almacenado a una temperatura máxima de 28 °C.

5.1.3 Alcance de medición

El alcance de medición es uno de los principales parámetros de operación del patrón tipo pistón. En la determinación del alcance de caudal óptimo para el patrón se consideraron todos los posibles caudales hasta 50 dm³/min.

El caudal máximo de operación del patrón esta sujeto a las perdidas generadas en la tubería, accesorios y válvulas previas al pistón. En cuanto mayor sea el caudal mayor serán las perdidas generadas, siendo estas proporcionales al cuadrado del caudal.

Por otra parte el caudal mínimo de operación depende de la estabilidad del sistema. A caudales muy bajos los pistones pueden tender a atascarse durante

su recorrido, exhibiendo un movimiento inestable, presentándose saltos de presión y del caudal instantáneo dentro el sistema.

Las pruebas ejecutadas consistieron en realizar ascensos y descensos a diversos caudales para cada pistón en forma individual, registrando todas las variables de influencia (Presión, temperatura, etc) para su posterior análisis, el cual dio como resultado:

- Una operación con caudales y presiones estables del patrón para un alcance de caudal entre 0.05 a 45 dm³/min. Dicho alcance cubierto por los dos pistones así, el pistón grande entre 45 a 0.1 dm³/min y el pequeño entre 1 a 0.05 dm³/min.

5.1.4 Volumen muerto

Antes de lograr la estabilidad dinámica de un sistema a partir de un estado de reposo, este pasa a través de un estado transitorio, el cual se caracteriza por un comportamiento inestable de las propiedades del sistema, hasta que las variaciones de dichas propiedades son tan pequeñas que para efectos prácticos se puede suponer que el sistema se encuentra bajo condiciones estables.

Considerando que los procesos de calibración deben realizarse bajo condiciones estables de presión, temperatura y caudal, es necesario determinar la duración de las condiciones transitorias en función del caudal de operación del patrón, tanto en la parte inicial como final del recorrido del pistón durante el proceso de calibración, obteniendo así tres estados a través de este como muestra la Figura 53.

- Estado transitorio al arranque: Se incrementa la presión y el caudal
- Estado Estable: Se mantienen estables la presión y el caudal
- Estado transitorio a la parada: Se pierde estabilidad hasta lograr el estado de reposo del pistón

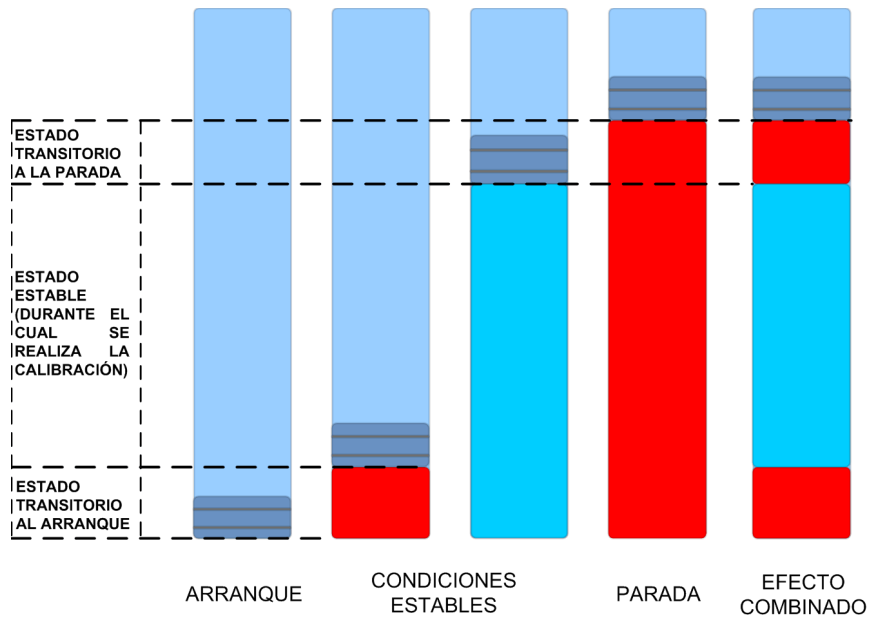


Figura 53. Dinámica del Sistema del Elemento Primario de Medición Operando en Ascenso

Al volumen desplazado o acumulado por el elemento primario de medición durante el estado transitorio se le denominó Volumen Muerto de Calibración. Después del cual inicia la toma de datos de la Calibración.

Considerando que los pulsos emitidos por el encoder son directamente proporcionales al volumen desplazado o acumulado por el Patrón, se pudo determinar el volumen muerto de Calibración para su alcance de caudal.

La caracterización del volumen muerto consistió en realizar mediciones de presión, pulsos y caudal instantáneo, operando el patrón en ascenso y descenso, con el objeto de determinar por inspección el número de pulsos necesarios para lograr estabilizar el sistema como una función del caudal.

Para obtener un mejor estimado de los volúmenes muertos de calibración a diversos caudales se realizaron tres repeticiones para cada valor de caudal.

A continuación se presenta una muestra del proceso (operación del patrón en ascenso y un punto de caudal nominal 20 dm³/min) seguido para la obtención de los volúmenes muertos de calibración.

Luego de realizadas las mediciones se procedió a graficar el caudal instantáneo versus el número de pulsos emitidos por el encoder para todo el recorrido del pistón, como puede apreciarse en la Figura 54 .

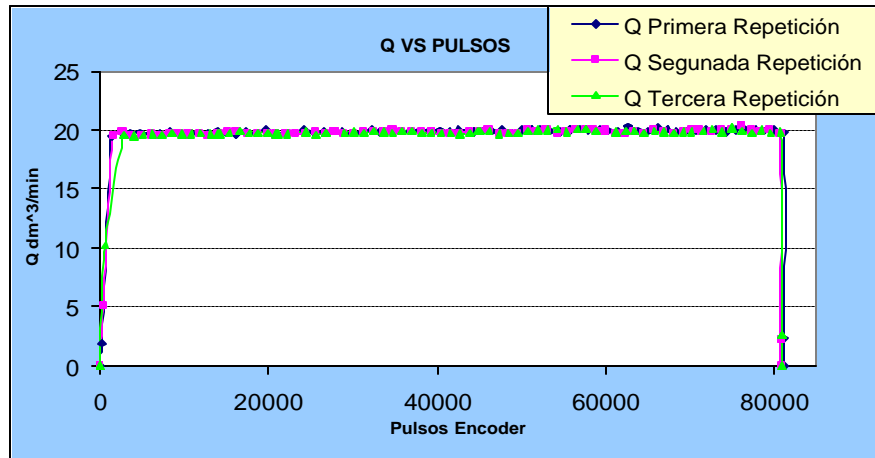


Figura 54. Comportamiento del Caudal con Respecto al Número de Pulsos

A partir de estas graficas se determinó por inspección el número de pulsos equivalentes al volumen muerto al arranque y a la parada.

En la Figura 55 y Figura 56 se muestran en detalle el comportamiento del pistón al arranque y a la parada de su recorrido. Como se alcanza apreciar el caudal logra estabilizarse luego que el encoder ha emitido aproximadamente 3000 pulsos en el arranque (Figura 55) y se detiene completamente luego que el encoder a emitido aproximadamente 1500 pulsos (ver Figura 56) luego de su estado estable.

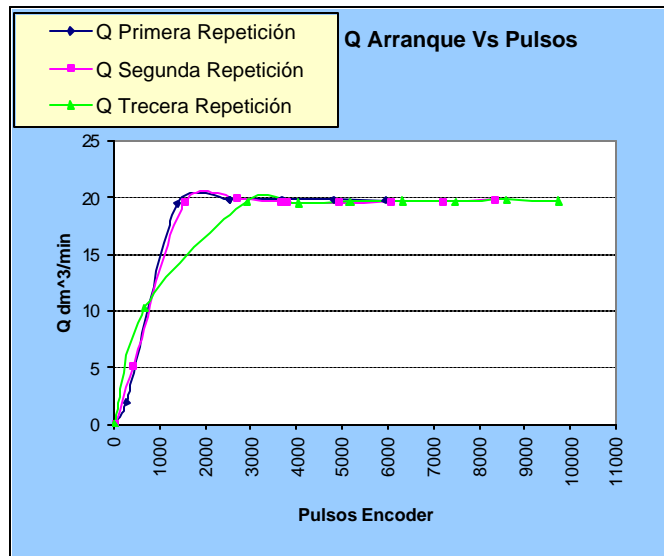


Figura 55. Comportamiento del Caudal Vs. Número de Pulsos para el Arranque

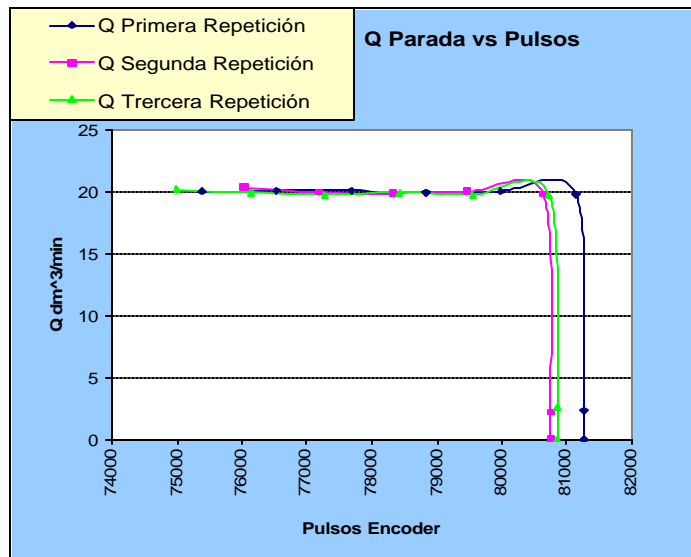


Figura 56. Comportamiento del Caudal Vs. Número de Pulsos para la Parada

Este mismo procedimiento fue ejecutado para los siguientes caudales nominales: 45, 30, 20, 10 y 0.5, determinando los pulsos de estabilización para el arranque y la parada del pistón operando en ascenso y descenso, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 57 y Figura 58, donde se aprecian el número de pulsos correspondientes al volumen muerto versus el caudal. La curva superior (Descenso/Arranque) fue ajustada por medio de una función cuadrática obteniéndose la polinómica mostrada en la Figura 57.

Dado que las pruebas realizadas indicaron un mayor requerimiento de volumen muerto en descenso que en ascenso para alcanzar el estado estable a un caudal dado, y que la diferencia entre el volumen muerto entre ascenso y descenso es pequeña, solo se ajustó la curva de volumen muerto en descenso para el arranque y la parada.

Las dos funciones polinómicas obtenidas se ingresaron en la estrategia de control para que el sistema automáticamente defina el punto a partir del cual se logra el estado estable para un caudal dado e inicie la toma de datos de la calibración.

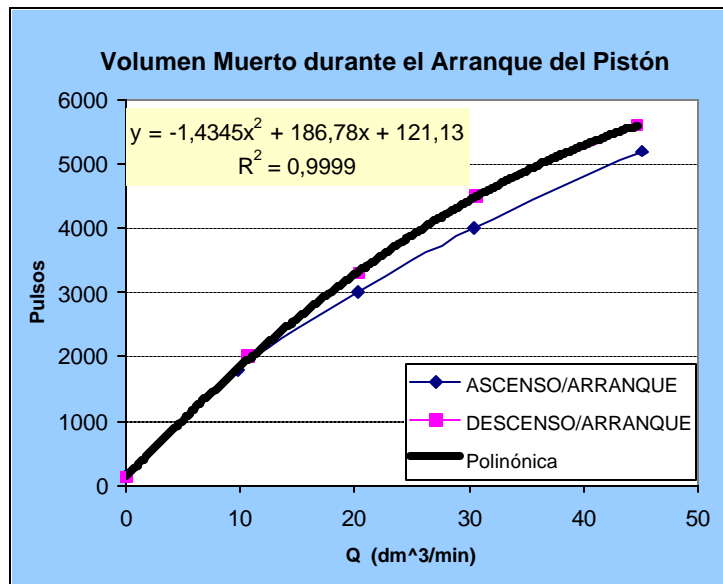


Figura 57. Número de Pulsos Vs Caudal para el Arranque

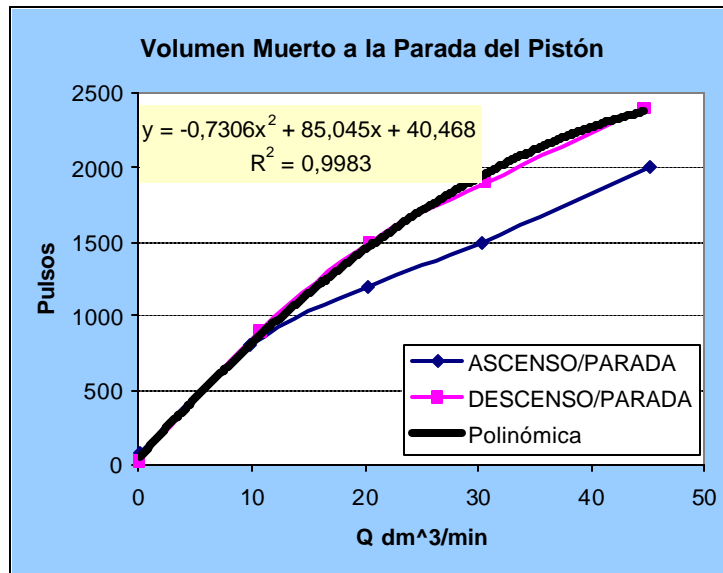


Figura 58. Número de Pulsos Vs Caudal para la Parada

5.2 COMPARACIÓN CENAM – CDT DE GAS BAJOS CAUDALES MASICOS

Con el fin de validar los resultados obtenidos con Patrón tipo Pistón se realizó el proceso de comparación de resultados de calibración de orificios de borde recto, los cuales fueron calibrados utilizando el Patrón Tipo Pistón de CENAM, en México y traídos a Colombia para ser calibrados utilizando el nuevo patrón del CDT de GAS.

A continuación se describen los trabajos realizados y los resultados obtenidos en la calibración de los orificios.

Estos orificios fueron calibrados en el CDT de Gas utilizando el Procedimiento Técnico de Calibración “PTC-012 Calibración de Medidores de Volumen y Flujo de Gas utilizando el Patrón Primario Tipo Pistón”, procedimiento que fue desarrollado e implementado como parte de los resultados del presente proyecto. En la Figura 59 se observa el montaje realizado para la calibración de los orificios en el CDT de GAS.

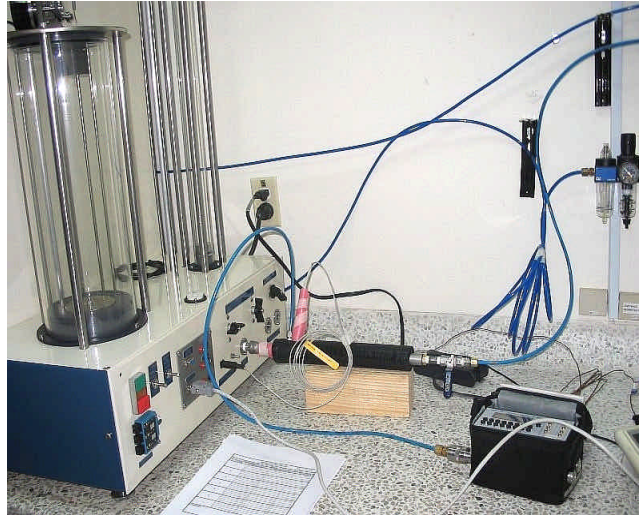


Figura 59. Montaje Calibración de Microrifícios CDT de GAS

Al igual que en CENAM los orificios de flujo critico fueron calibrados a presión, realizando mediciones para tres diferentes relaciones de presión así: 0.27, 0.32 y 0.4. Adicionalmente para cada relación de presiones se realizaron siete repeticiones. Como fluido de calibración se utilizó aire sintético 4.7 FID con humedad inferior a 0.001%.

A continuación se presentan las curvas de los coeficientes de descarga contra la relación de presión y el número de Reynolds, mostrando simultáneamente los resultados de las mediciones realizadas en CENAM y las realizadas en el CDT de GAS.

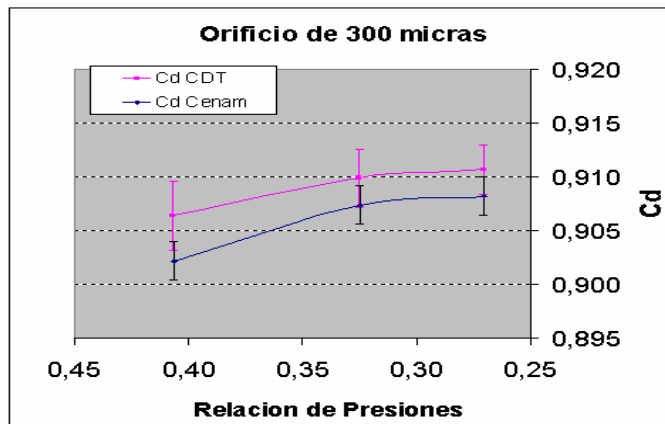


Figura 60. Grafica del coeficiente de descarga contra la relación de presión, orificio de 300 micras

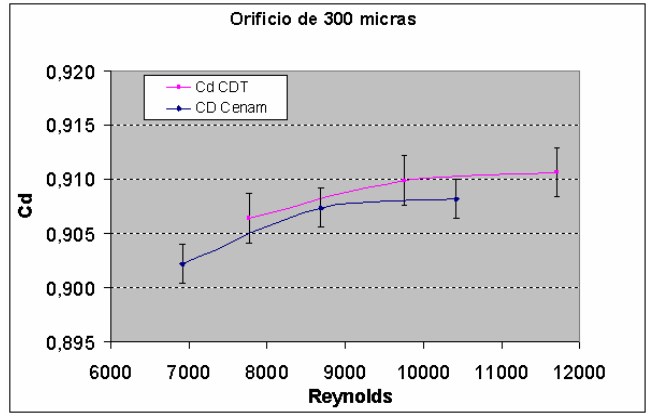


Figura 61. Gráficas del coeficiente de descarga contra el número de Reynolds, orificio de 300 micras

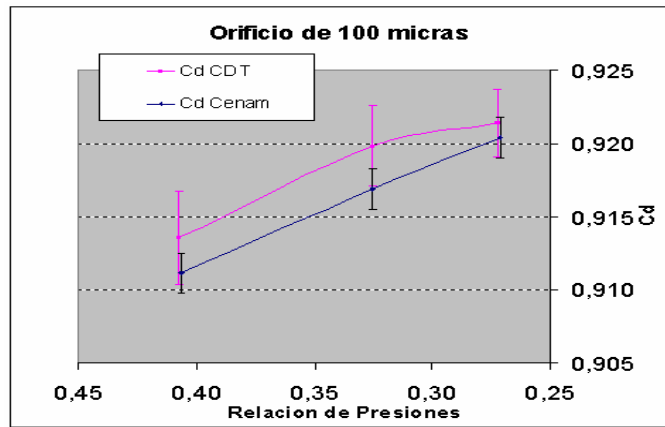


Figura 62. Gráfica del coeficiente de descarga contra la relación de presión, orificio de 100 micras

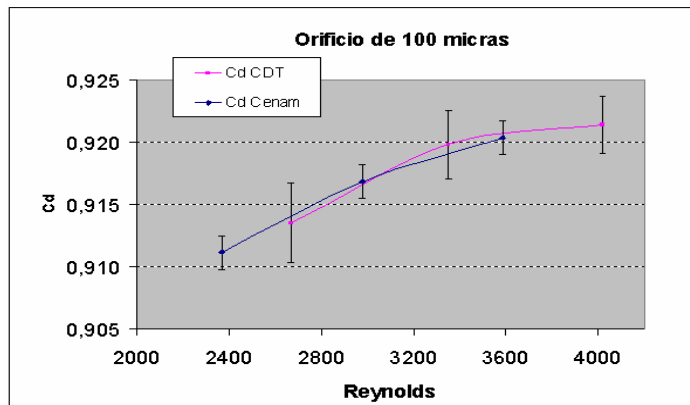


Figura 63. Gráfica del coeficiente de descarga contra el número de Reynolds, orificio de 100 micras

Analizando las graficas que relacionan el coeficiente de descarga contra la relación de presiones se aprecia que las mediciones realizadas en CENAM y las realizadas en el CDT de GAS exhiben comportamientos similares, pero muestran una pequeña desviación sistemática, la cual puede considerarse despreciable teniendo en cuenta que el nivel de incertidumbre supera el valor de la desviación.

Con el fin de realizar una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos en el CENAM y el CDT de GAS se realizó el cálculo del error normalizado⁹, siendo este definido como:

$$E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde x_{lab} es el resultado de calibración del laboratorio, x_{ref} es el resultado de referencia, U_{lab} es la incertidumbre de x_{lab} y U_{ref} es la incertidumbre de x_{ref} .

El valor absoluto del error normalizado debe ser menor que 1, para que los resultados se consideren validos y sean comparables.

En este caso $x_{lab} = x_{CDT}$, $x_{ref} = x_{CENAM}$, $U_{lab} = U_{CDT}$ y $U_{ref} = U_{CENAM}$.

ORIFICIO 300 MICRAS				
PISTÓN	Cd	U	K	Error Normalizado En
CDT de GAS	0,910667	0,00228	2,05	0,851
	0,909875	0,00273	1,99	0,765
	0,906374	0,00317	1,97	1,145
CENAM	0,908188	0,00182	2,06	
	0,907369	0,00181	1,99	
	0,902194	0,00180	2,03	

Tabla 32. Resultados Calculo de Cd e Incertidumbres Asociadas, Orificio de 300 micras

⁹ Tomado de: VALIDATING UNCERTAINTY ANALYSES FOR GAS FLOW STANDARDS VIA INTRA- AND INTER-LABORATORY COMPARISONS.

ORIFICIO 100 MICRAS				
PISTÓN	Cd	U	K	Error Normalizado En
CDT de GAS	0,913517	0,00320	1,97	0,686
	0,919803	0,00276	1,98	0,953
	0,921406	0,00230	2,01	0,376
CENAM	0,911130	0,00137	2,02	
	0,916863	0,00138	2,01	
	0,920398	0,00138	2,09	

Tabla 33. Resultados calculo de Cd e incertidumbres asociadas, orificio de 100 micras

De los resultados obtenidos en este proceso de comparación se puede concluir que los valores del error normalizado resultado de la comparación entre CENAM y CDT de GAS estuvieron entre 0.376 y 1.145, siendo 1.145 el único valor superior a 1, los valores restantes fueron inferiores a 1. Lo cual permitió validar los resultados obtenidos con el nuevo Patrón tipo Pistón.

5.3 COMPARACIÓN PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA– PATRÓN TIPO PISTÓN

Para realizar esta comparación se utilizó un patrón secundario tipo cámara húmeda marca ELSTER de propiedad del CDT de GAS cuyo alcance de medición es de 0.0125 a 1.25 m³/h. La comparación inició calibrando la cámara húmeda con el patrón primario tipo campana Gasométrica propiedad del CDT de GAS el cual se halla acreditado por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) y recientemente participó en una comparación realizada con IPT de Brasil (Febrero/2005).



Figura 64. Calibración de Cámara Húmeda Utilizando Encoder con el Pistón Grande Operando en Ascenso

Realizado este proceso se calibró la cámara con el nuevo patrón primario Tipo Pistón operando en ascenso como muestra la Figura 64. Las calibraciones en ambos casos se ejecutaron utilizando un encoder de 1024 pulsos por revolución para discretizar el volumen medido por la cámara húmeda. Se realizaron 3 puntos de caudal y 4 repeticiones para cada uno de ellos. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos incluyendo el error normalizado que se definió anteriormente.

Caudal medio (dm ³ /min)	Resultados Campana			Resultados Pistón			Error normalizado
	%E	U %E	K	%E	U %E	K	
2.07	2.744	0.548	1.97	2.318	0.156	1.98	0.747
8.40	1.957	0.452	1.97	1.537	0.169	1.99	0.869
20.85	1.180	0.443	1.97	1.597	0.251	2.06	0.815

Tabla 34. Resultados de la comparación Campana Gasométrica –Patrón Tipo Pistón

A continuación se presenta la curva de calibración obtenida para la cámara Húmeda utilizando los dos Patrones (Campana y Pistón).

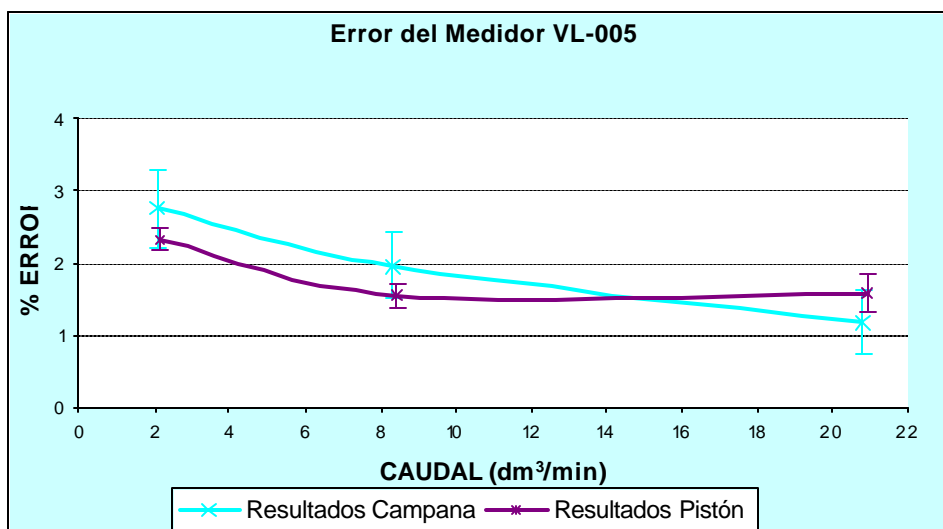


Figura 65. Curvas de Calibración Obtenidas para la Cámara Húmeda, Utilizando los patrones tipo Pistón y Campana Gasométrica

De los resultados obtenidos en este proceso de comparación se puede concluir:

- Todos los valores del error normalizados son menores a 1, validando los resultados obtenidos con el nuevo Patrón tipo Pistón.
- La calibración de la cámara húmeda con el patrón tipo Pistón mostró una excelente repetibilidad, presentando menores niveles de incertidumbre comparadas con los obtenidos utilizando el Patrón tipo Campana Gasométrica.

5.4 RESULTADO FINAL PATRÓN TIPO PISTÓN

Luego de ejecutadas las pruebas de caracterización, de realizados los procesos de comparación y de lograr validar la calidad de los resultados, el equipo de trabajo del proyecto pudo concluir con gran satisfacción el nuevo Patrón tipo Pistón, cuyas principales especificaciones y características se resumen en la Tabla 35 y en la Figura 66 se puede apreciar el nuevo Patrón tipo Pistón.

CARACTERÍSTICA	PISTÓN GRANDE	PISTÓN PEQUEÑO	OBSERVACIÓN
Condiciones de Operación			
Caudal Nominal Máximo	45 dm ³ /min	1 dm ³ /min	Mejores resultados para obtener excelente repetibilidad del patrón. Asociado a caídas de presión
Caudal Nominal Mínimo	0.1 dm ³ /min	0.05 dm ³ /min	Mejores resultados para obtener excelente repetibilidad del patrón Asociado a la estabilidad de presión
Volumen Nominal	7 dm ³	0.65 dm ³	
Volumen Util a máximo Caudal	6.5 dm ³	0.55 dm ³	Descontando volumen muerto durante el arranque o parada del pistón
Constante K _p	11913.79 ± 8.3 Pulsos/dm ³ K=1.98	139817.7 ± 80.9 Pulsos/dm ³ K=1.972	Determinadas mediante el proceso de calibración dimensional
Presión de Operación Ascenso	6 mbar	7 mbar	
Presión de Operación Descenso	5 mbar	5 mbar	
Mejor Capacidad de Medición	± 0.1 %	± 0.12 %	Declarada para volumen de gas a condiciones estándar
Requerimientos Externos			
Alimentación Eléctrica	110 VAC – 60Hz	110 VAC – 60Hz	Condiciones de alimentación para los elementos electrónicos
Alimentación neumática	Aire comprimido 50 ± 10 psig	Aire comprimido 50 ± 10 psig	Presión necesaria para la operación de las válvulas pilotadas neumáticamente
Fluido de Calibración	Aire seco Industrial	Aire seco Industrial	
Fluido de Calibración Opcional	Gas Inerte	Gas Inerte	Para condiciones especiales
Presión de Suministro del fluido de calibración	20 ± 5 mbar	20 ± 5 mbar	Opcionalmente es posible la alimentación a alta presión para calibración de elementos de flujo crítico a presión.
Comunicación a PC	RS-232	RS-232	Cualquier PC que permita instalar y correr OPTO 22
Software de Adquisición y Control	Factory Floor	Factory Floor	Toda la estrategia de control del patrón se encuentra basada en esta plataforma
Condiciones Ambientales			
Temperatura de Operación	20 ± 2 °C	20 ± 2 °C	Para evitar atascamientos del pistón a temperatura elevadas o escurrimiento del sello de mercurio para bajas temperaturas
Temperatura Máxima de Almacenamiento	28 °C	28 °C	Evitar posible ruptura del cilindro por excesiva dilatación del pistón
Presión Atmosférica	900 ± 100 mbar	900 ± 100 mbar	Condiciones de caracterización del patrón tipo pistón
Humedad Relativa	50 ± 20 %	50 ± 20 %	Condiciones de caracterización del patrón tipo pistón

Tabla 35. Características Finales del Nuevo Patrón Tipo Pistón

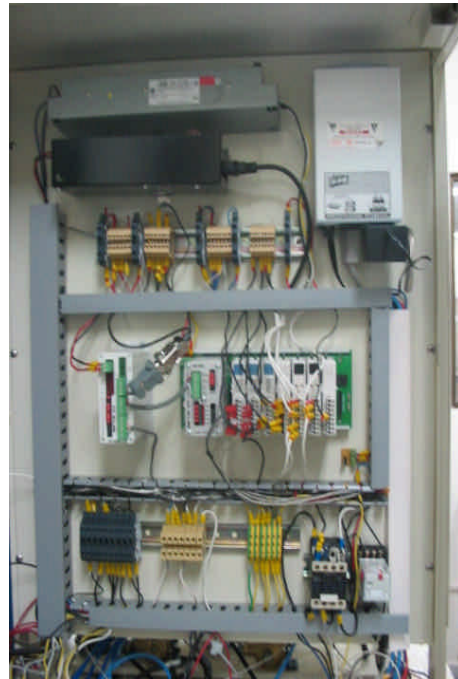


Figura 66. Patrón primário tipo pistón vista frontal (Izq) Sistema de control (Der)

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- Con la puesta en operación del nuevo Patrón Pistón Tipo, hoy pueden ser calibrados en Colombia medidores de volumen, caudal volumétrico y caudal másico de gas a bajos caudales entre los que se cuentan: cámaras húmedas, microturbinas, másicos, buretas, elementos de flujo crítico, Rotámetros, etc. que operen a caudales comprendidos entre 0.05 a 45 dm³/h con niveles de incertidumbre muy cercanos a los ofrecidos por patrones similares a nivel internacional brindando la oportunidad de poseer una única cadena de trazabilidad para Colombia a un bajo costo para la industria nacional y sin los problemas de tiempo y riesgos que implica el envío de los medidores para su calibración en el extranjero.
- El elemento primario de medición, y en especial el ajuste entre el pistón y el cilindro constituyó el punto mas crítico en el proceso de fabricación y ensamble del patrón, debido a la precisión que se debe manejar en la medida de los diámetros del cilindro de borosilicato y el pistón, para que no se presenten problemas de escurrimiento del sello de mercurio ni atascamiento del pistón durante su recorrido.
- La temperatura es un factor fundamental para el adecuado funcionamiento del patrón, ya que si su valor excede 22°C la dilatación del material del cual está fabricado el pistón provoca el atascamiento del mismo. En el caso contrario que la temperatura alcance un valor por debajo de 18°C la disminución en el diámetro pistón causa el escurrimiento del sello de mercurio.
- Para el adecuado funcionamiento del patrón se requiere que el encoder presente bajo torque de arrastre, ya que esto influye en el desplazamiento constante del pistón y por consiguiente en la estabilidad de la presión interna de operación principalmente en el pistón pequeño. Para el caso de los encoder adquiridos para el patrón, fue necesario desarmarlos y remplazar los rodamientos originales por otros con menor torque de arrastre.

- Se evidenció la importancia que tiene una adecuada nivelación del patrón y un perfecto alineamiento del conjunto encoder con el sistema pistón contrapeso para garantizar un desplazamiento uniforme del pistón a través del cilindro logrando una baja incertidumbre y evitando posibles errores en la cuantificación del volumen.
- El sistema de control implementado con tecnología OPTO 22 permite el funcionamiento automático del patrón, además de realizar un monitoreo constante de las variables de influencia, haciendo que la calibración sea un proceso confiable y seguro, facilitando no solo su ejecución sino la generación de resultados de la misma.
- Aunque es posible lograr caudales hasta $45 \text{ dm}^3/\text{min}$ en ascenso o descenso, el volumen neto de calibración disponible se reduce drásticamente debido a los estados transitorios durante el arranque y parada del Pistón, por lo cual es preferible operarlo por debajo de $30 \text{ dm}^3/\text{min}$ tal y como lo recomendaron los expertos del CENAM. Así mismo para alcanzar caudales por encima de los $30 \text{ dm}^3/\text{min}$, solo es posible incrementando la presión de alimentación hasta aproximadamente 25 mbar para operación en ascenso o utilizando una bomba de vacío para operación en descenso.
- La caracterización del patrón fue un proceso netamente experimental que permitió determinar las condiciones de operación, además de la obtención de una curva de ajuste del volumen muerto en función del caudal.
- Se logró fortalecer el vínculo existente entre la Universidad Industrial de Santander y el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, obteniéndose excelentes resultados a nivel personal y profesional, reflejados en el conocimiento adquirido por ambas partes en la rama del flujo de fluidos compresibles y en el cumplimiento a cabalidad del proyecto presentado ante colciencias titulado "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS QUE OPERAN A BAJOS CAUDALES".

- Se realizaron el procedimiento técnico de calibración y el manual técnico del equipo de acuerdo con los lineamientos del sistema de gestión de calidad implantado en el CDT DE GAS. Estos procedimientos describen los pasos a seguir para realizar la calibración de los diferentes tipos de medidores de flujo de gas con el patrón primario tipo pistón. Los procedimientos se encuentran almacenados en el archivo de documentos controlados del CDT de GAS.

- Los resultados obtenidos en la comparación tanto con el patrón tipo pistón del CENAM a través de la calibración orificios de flujo crítico como con la campana gasométrica del CDT DE GAS a través de la calibración de una cámara húmeda muestran que los resultados obtenidos con el nuevo patrón tipo pistón son válidos y su nivel de incertidumbre es muy bueno, lo cual permite tener plena confianza en los mismos.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que la metrología de fluidos es una ciencia que requiere de trabajo permanente de investigación y mejoramiento continuo de los procesos, se considera de vital importancia plantear una lista de recomendaciones a seguir las cuales servirán para ir perfeccionando el desarrollo obtenido de manera que permita garantizar mayor confianza entre los usuarios y afianzar las relaciones con la comunidad nacional e internacional.

Se requiere entonces:

- Calibrar los instrumentos secundarios (Presión y temperatura) contra patrones que permitan obtener un menor nivel de incertidumbre (*P. Ej. Laboratorios secundarios acreditados o SIC*), con el objeto de disminuir aún más el buen nivel de incertidumbre obtenido para el nuevo Patrón tipo Pistón.
- Acreditar el procedimiento “Calibración de Medidores de Volumen y Caudal de Gas Utilizando Patrón Tipo Pistón” ante la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) de manera que el nuevo patrón se constituya en la referencia nacional en las magnitudes de volumen y caudal de gas a muy bajos caudales.
- Proyectar la adquisición e implementación de un manifold de controladores de flujo másico que reemplace el manifold de válvulas manuales (tipo aguja) y permita el ajuste automático de los caudales de calibración.

REFERENCIAS

- Calibration Services for Gas Flow Meters NIST SP-250-49 Piston Prover and Bell Prover Gas Flow Facilities NIST J. D. Wright, and G. E. Mattingly USA Aug. 1998.
- Calibración del Patrón Nacional de Flujo de Gas Tipo Pistón. J. Gervacio, J. M. Maldonado, R. H. Lushinger. CENAM, 2002.
- Instructions For Califlow A200 System MKS, 1992.
- Instructions For Califlow A150 System MKS, 1990.
- GTC 51, Guía Para la Expresión de Incertidumbre en las Mediciones, ICONTEC 1997.
- International Vocabulary of Fundamental and General Terms in Metrology, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1993).
- Instrumentation Reference Book Third Edition, Elsevier Science United States of America 2003
- NTC 2194, Vocabulario de Términos Básicos y Generales en Metrología. ICONTEC 1997
- What Is The “Best” Transfer Standard For Gas Flow? John D. Wright, National Institute of Standards and Technology.
- Guía para Estimar la Incertidumbre de la Medición, Centro Nacional de Metrología, México, W. Schmid y R. Lazos, mayo 2000.
- Gas Property Equations for the NIST Fluid Flow Group Gas Flow Measurement Calibration Services. John D. Wright, February, 2004

- Inter-Laboratory Comparisons And Application Uncertainties Of Dry Piston Provers, Harvey Padden, Bios International Corporation, 2003.
- OptoControl User's Guide, Opto22 United States of America 2003.
- OptoDisplay User's Guide, Opto22 United States of America 2002.
- OptoControl Command Reference, Opto22 United States of America 2003.
- The Need For Evolution In Standards And Calibration To Improve Process Measurement And Control Of Low Mass Flow, Pierre Delajoud & Martin Girard, CalTechnix S.A. France - DH Instruments, Inc USA.1996.
- Intercomparison Tests of the NRLM Transfer Standard with the Primary Standards of NIST, BNM-LNE, OFMET and PTB for Small Mass Flow Rates of Nitrogen Gas, Shin-ichi Nakao, NRLM, Japan, 2003.
- Using small sonic nozzles as secondary flow standards, N. Bignell, CSIRO National Measurement Laboratory, Australia, december 1999.
- VALIDATING UNCERTAINTY ANALYSES FOR GAS FLOW STANDARDS VIA INTRA- AND INTER-LABORATORY COMPARISONS. Wright, Ward, and Mattingly, National Institute of Standards and Technology, Fluid Flow Group, 1999.

APÉNDICES

APÉNDICE A. METROLOGÍA Y CONCEPTOS BÁSICOS

La percepción inicial de metrología deriva de su etimología: del griego *metros* medida y *logos* tratado. Concepto que debe ser casi tan antiguo como el ser humano: “*tengo nada*”, “*tengo algo*”, “*tengo mucho*”; expresiones que reflejan una comparación muy primitiva pero que perdura en la raza humana bajo muchos aspectos, al punto que actualmente podemos decir que metrología es la ciencia de las mediciones y que medir es comparar con algo (*unidad*) que se toma como base de comparación.

A menudo es necesario referirse a otras unidades de medida que, por hacer uso o basarse en las anteriores, se denominan derivadas. Las unidades derivadas son las más numerosas. Una unidad es un valor en términos del cual, puede definirse la magnitud medida

Patrón

Anteriormente se citó algo con que comparar; ese algo se conoce como patrón. Originalmente, se entendía por patrón a una representación o materialización física de la unidad. En la actualidad, y dado que los avances de la ciencia han permitido definiciones más exactas y confiables de las unidades basadas en constantes físicas universales, se define como patrón a: una medida materializada, instrumento de medir, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores conocidos de una magnitud, a fin de transmitirlos por comparación a otros instrumentos de medir.

Los patrones pueden clasificarse inicialmente según sus cualidades metrológicas en:

Patrón primario

Patrón que es designado o reconocido ampliamente como un patrón que tiene las mas altas cualidades metrológicas y cuyo valor es aceptado sin referencia a otros patrones de la misma magnitud. El concepto de patrón primario es

igualmente valido para magnitudes de base (masa, temperatura, tiempo, etc.) o para magnitudes derivadas (densidad, presión, etc.)

Patrón secundario

Patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud. Es obvio que la incertidumbre que manejan estos patrones es mayor que las de los primarios.

Patrón de transferencia

Patrón intermediario para comparar patrones primarios.

Patrones de trabajo

Patrón que se utiliza rutinariamente para calibrar o comprobar instrumentos de medición, en el sitio de trabajo.

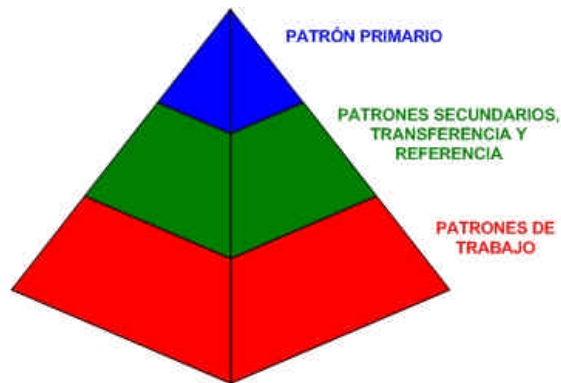


Figura 67. Jerarquía de los patrones

Si ahora vemos la estructura jerárquica de los patrones, notamos que podemos describirla como una pirámide en cuyo vértice tenemos el conjunto de patrones que corresponden a las unidades de base del SI. La segunda posición corresponde al conjunto de patrones nacionales. En el siguiente nivel se localizan los patrones de referencia, conjunto que sirve para preparar los

Trazabilidad

Un concepto importante en la metrología es el de la llamada trazabilidad. Por ello se entiende la propiedad de una medición o del valor de un patrón, de estar relacionado a referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena continua de comparaciones, todas ellas con incertidumbres establecidas. La posibilidad de determinar la trazabilidad de cualquier medición descansa en el concepto y las acciones de calibración y en la estructura jerárquica de los patrones de la que ya hablamos.

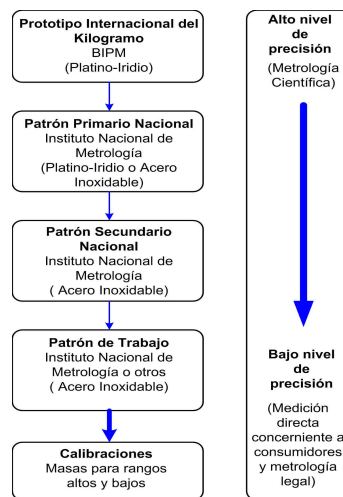


Figura 69. Concepto de trazabilidad en las mediciones (Cadena de trazabilidad)

Calibración

Para los metrólogos, se entiende por calibración: un conjunto de operaciones que establece, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición, sistema de medición, valores representados por una medida materializada o un material de referencia y los valores correspondientes a las magnitudes establecidas por los patrones. Algunos, indebidamente, le llaman calibración a un proceso de comprobación o verificación que permite asegurar que entre los valores indicados por un aparato o un sistema de medición y los valores conocidos correspondientes a una magnitud medida, los desvíos sean inferiores a los errores máximos tolerados.

Incertidumbre

Se parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que, con fundamento, pueden ser atribuidos al mensurando. Dicho de otra forma es el intervalo de confianza de los resultados de las mediciones.

La incertidumbre, al contrario del error, puede calcularse, siendo la misma un estimativo del error. Errores aleatorios y sistemáticos generan correspondientemente incertidumbres aleatorias y sistemáticas en los resultados de una medición.

Debe quedar clara la distinción, las incertidumbres aleatorias pueden estimarse estadísticamente y tienen asociadas a las mismas un nivel de probabilidad, las incertidumbres sistemáticas, se estiman normalmente por otros medios.

APÉNDICE B. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS Y EL CONCEPTO DE CAUDAL

Para poder trabajar en metrología de caudal de fluidos es importante que el profesional tenga pleno conocimiento y entendimiento de algunos conceptos fundamentales relacionados con el tema.

Fluidos continuos

Un fluido es simplemente cualquier sustancia que fluya. Normalmente, los fluidos se clasifican según sus estados más comunes en la naturaleza, es decir, líquidos y gases. Un líquido, a pesar de que fluye con relativa facilidad, se caracteriza por la dificultad de ser comprimido. Un gas, por otra parte, debido al hecho de no poseer fronteras, hace que su volumen dependa del volumen del recipiente que lo contiene. De acuerdo con la literatura convencional, el fluido, tanto líquido como gas, es un medio continuo cuyo flujo también es continuo.

El movimiento de un fluido genera y es generado por fuerzas de corte presentes entre las capas del fluido. Cuando el fluido “fluye” en una tubería, es normal imaginarnos la existencia de una frontera clara entre el fluido y la pared de la tubería, de tal forma que podamos despreciar la relación entre el fluido adyacente y la pared. Siendo así, se admite que la velocidad del fluido es igual a cero junto a la pared, y que esta velocidad aumenta gradualmente en la medida en que nos distanciamos de la misma.

La Ecuación P-V-T

La ecuación P-V-T relaciona el volumen ocupado por un fluido (V) con su temperatura (T) y la presión (P) que actúa sobre el fluido. Esta relación es especialmente importante cuando el fluido en cuestión es un gas.

Para un “gas ideal”, es válida la siguiente relación:

$$\frac{PV}{T} = \text{constante}$$

En la práctica, las propiedades presión-volumen-temperatura de un fluido raramente son así de simples, así se trate de productos químicos puros. En el caso de los gases denominados gases naturales, todavía falta mucho por descubrir.

Generalmente, la ecuación de los “gases ideales” puede extrapolarse para los denominados “gases reales” introduciendo un factor Z denominado factor de compresibilidad, coeficiente de desvío de la ley de los gases ideales, o también factor de supercompresibilidad. Esta ecuación es dada por:

$$P V = Z N \mathfrak{R} T$$

donde N es el número de moles del gas y \mathfrak{R} es la constante universal de los gases ($\mathfrak{R} = 8314,41 \text{ J/kmol K}$).

Densidad y volumen específico

La densidad de un fluido (ρ) es la relación entre su masa (m) y su volumen (V) ocupado, mientras que el volumen específico (V_s) es su recíproco. Es decir,

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{V_s}$$

Coefficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica de un fluido (β), también conocido como coeficiente de expansión volumétrica, es el aumento diferencial en el volumen específico del fluido o una disminución diferencial en la densidad provocada por un aumento de 1 °C en la temperatura. Es decir,

$$\beta = \frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

Compresibilidad

La compresibilidad de un fluido (κ) es la disminución diferencial en su volumen específico (o el aumento diferencial en su densidad) ocasionados por un aumento unitario en la presión.

$$\kappa = -\frac{1}{V_s} \frac{dV_s}{dP} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dP}$$

El concepto de caudal

Cuando tomamos un punto o una sección transversal de referencia en una tubería, el caudal es la cantidad de fluido, expresada en masa o en volumen, que pasa por dicho punto o sección en una unidad de tiempo. Por lo tanto, el parámetro caudal se expresa en unidades de volumen o de masa por unidad de tiempo (m^3/h o kg/h).

Podemos decir también, que el caudal volumétrico de un fluido Q_v (m^3/s) es igual al producto de la velocidad media del flujo \bar{V} (m/s) por el área de la sección transversal de la tubería A (m^2).

$$Q_v = \bar{V} \cdot A$$

Por otra parte, el caudal másico \dot{m} (kg/s) es igual al producto del caudal volumétrico Q_v (m^3/s) por la densidad del fluido ρ (kg/m^3).

$$\dot{m} = Q_v \cdot \rho$$

A partir del caudal volumétrico o másico, es posible obtener su totalización, por medio de la integración a lo largo del tiempo de los caudales instantáneos medidos.

TIPOS BÁSICOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

El término genérico *medición de caudal* puede referirse a cualquiera de los seis tipos de medición más comunes. Estos tipos se describen brevemente en los ítems que se enuncian a continuación.

Medición de la velocidad puntual

Existen diversos tipos de instrumentos disponibles para la medición de la velocidad puntual, v , de un determinado fluido. Estos medidores son llamados generalmente *anemómetros* cuando se utilizan para medir la velocidad del aire, *corrientómetros* si se emplean en agua y *medidores de inserción* si se utilizan específicamente dentro de tuberías y ductos.

Medición de la velocidad media en tuberías

La velocidad media en una tubería, \bar{v} , está relacionada con el caudal volumétrico, Q_v , y el área de su sección transversal, a través de la siguiente expresión:

$$\bar{v} = \frac{Q_v}{A}$$

Medición del caudal volumétrico

El caudal volumétrico, Q_v , se define como el flujo de un determinado volumen de fluido por un intervalo de tiempo, es decir:

$$Q_v = \frac{V}{t}$$

Muchos medidores se diseñan para indicar directamente el valor de Q_v , dichos medidores se denominan *medidores de caudal volumétrica*.

Medición de volumen total

Algunos medidores se diseñan para indicar directamente el volumen total V de fluido que pasa a través del medidor. Normalmente, se llaman *medidores volumétricos*, o *totalizadores*.

Es posible obtener el valor del volumen total V de fluido que pasa a través del medidor de caudal por medio de la integración de su señal de salida a lo largo de un intervalo de tiempo determinado.

Medición de caudal másico

El caudal másico de un fluido, Q_M , representa el paso de una determinada masa de fluido durante un intervalo de tiempo, es decir:

$$Q_M = \frac{m}{t}$$

Algunos medidores de caudal se diseñan para indicar directamente el caudal másico del fluido. Estos reciben el nombre de *medidores másicos*, o *medidores másicos verdaderos*.

Generalmente, el parámetro Q_M se determina realizando varias medidas simultáneas de Q_V y ρ , y aplicando la siguiente relación:

$$Q_M = \rho Q_V$$

Medición de la masa total

En la actualidad, se encuentran disponibles comercialmente medidores capaces de medir directamente la masa total, m , del flujo de un fluido durante un determinado intervalo de tiempo. Para determinar m , es necesario medir Q_M e integrar las mediciones en un tiempo determinado, o también, medir el volumen total de fluido V y la masa específica ρ y utilizar la ecuación $m = \rho V$.

APÉNDICE C. PRINCIPIO DE OPERACIÓN Y PARAMETROS RELEVANTES DE UN PATRÓN PRIMARIO TIPO PISTÓN

Principio de Medición de los Patrones Tipo Pistón

Un patrón tipo pistón puede configurarse para trabajar como patrón de caudal volumétrico y másico de gas o como patrón de volumen, dependiendo de si son medidas o estimadas variables tales como tiempo y densidad. De cualquier forma, su principio se basa en la medición del volumen de gas acumulado o entregado a unas condiciones de temperatura y presión medidas. Está diseñado para operar cerca de la presión y temperatura ambiente.

El patrón consta principalmente de un dispositivo como el mostrado en la Figura 70, el cual consiste de un tubo de vidrio con un diámetro interno (de alta precisión) en el cual es colocado un pistón plástico de diámetro ligeramente menor al diámetro interno del tubo. El sistema se halla limitado a un volumen de calibración nominal entre el inicio y final de la carrera del pistón.

El volumen es limitado por medio de sensores de posición usados para propósitos de temporizar el tiempo de calibración. El pistón se eleva debido a un pequeño exceso de presión (0,5 kPa) del gas introducido por el fondo del tubo, iniciando y deteniendo un cronometro al pasar por puntos de medición previamente determinados.

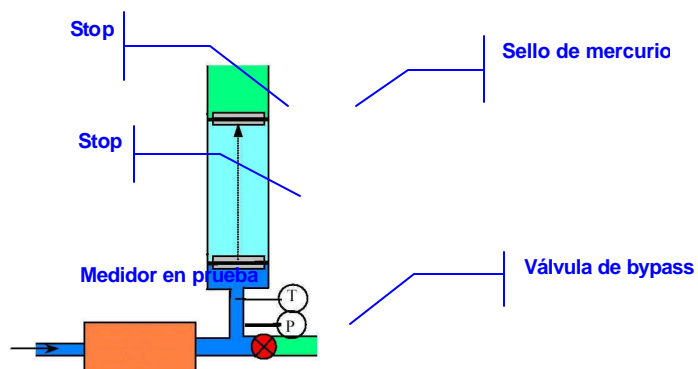


Figura 70. Principio de medición de un patro tipo piston

Los principales aspectos evaluados en los patrones tipo pistón son el número de pistones para un rango de caudal determinado, su funcionamiento y el sistema de detección de la posición vertical del pistón.

Número de Pistones

Aunque convencionalmente es llamado patrón tipo pistón, dando entender que se halla constituido por solo un pistón, la verdad es que se trata de un conjunto de pistones, cuyo número determina el rango de caudal total sobre el cual el patrón puede operar, mientras mantiene las cualidades metrológicas propias de un patrón, tales como repetibilidad y reproducibilidad.

En el mercado de instrumentación para medición de caudal, existen diferentes compañías que ofrecen dentro de sus productos sistemas para medición de bajo caudal mediante pistones, las características metrológicas ofrecidas por estos instrumentos presentan una alternativa viable para algunos INM. Las marcas más representativas en cuanto a patrones tipo pistón son: Brooks, MKS y Cal-Bench. En la Tabla 36 se registra el número de pistones y la procedencia de los patrones tipo pistón de algunos INM.

INM	Pais	No. de Pistones	Procedencia
NIST	E.U.	3	Propio*
KRISS	Corea	5	Brooks
CENAM	México	2	MKS
PTB	Alemania	3	Propio
NML	Australia	5	Propio
CMS	Taiwan	5	Brooks
SPRING	Singapur	3	Brooks

* Indica fabricado por el INM que lo posee

Tabla 36. Procedencia de los Patrones tipo Pistón en los Principales INM del Mundo

Funcionamiento

En relación al funcionamiento, los patrones tipo pistón se pueden clasificar de acuerdo al sentido de desplazamiento del pistón durante su operación, en ascendente o descendente (ver Tabla 37) aunque algunos poseen la flexibilidad en sus sistemas auxiliares de permitir la operación en cualquiera de los dos

sentidos, aunque lo más usual es que solo opere en uno de ellos, con lo cual se disminuye la operatividad del patrón.

Operando en forma ascendente, el patrón tipo pistón puede calibrar medidores que no requieran medir la caída de presión para estimar el caudal (cámaras húmedas, diafragmas, turbinas, etc), ya que para los medidores que lo requieren (elementos de flujo crítico como orificios y boquillas sónicas) se presenta el inconveniente de mantener una presión de entrada estable con el fin de obtener un buen grado de repetibilidad. Sin embargo este inconveniente puede ser salvado con el uso de un sistema de regulación de presión de alta precisión.

Cuando se opera el patrón en forma descendente se requiere que este ejerza una presión sobre el medidor de tal forma que se obtenga flujo a través de este, para los medidores del tipo flujo crítico, esta presión debe ser suficiente para producir una diferencia de presión que garantice el bloqueo o condición de flujo crítico y la obtención de resultados repetibles, por este motivo es necesario en estos casos utilizar una bomba de vacío que permita generar la caída de presión necesaria para el correcto funcionamiento de este tipo de medidores.

En términos generales la operación ascendente o descendente del Pistón es definida por la facilidad para obtener condiciones adecuadas durante la ejecución de una Calibración acorde con el principio de operación del medidor a calibrar, por tal motivo no es extraño que se realice calibración de ciertos medidores en ascenso o descenso de manera indistinta.

Las consultas realizadas permitieron establecer que el modo de operación más común en los patrones tipo Pistón de los diversos INM es el ascendente.

Operación	Ventaja	Desventaja	Medidor a calibrar
Ascendente	<ul style="list-style-type: none"> • Es posible lograr fácilmente caudales sobre todo su alcance de medición a pesar de las pérdidas generadas en las tuberías y válvulas del Patrón, así como las debidas al medidor en calibración. • Es menor el tiempo de transición para obtener un caudal estable, debido a la energía disponible en las etapas previas de regulación • En los elementos de flujo crítico no es necesario el uso de bomba de vacío para lograr una relación de presiones que permita el bloqueo o condición crítica del elemento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es difícil mantener constante un determinado nivel de presión • Las temperaturas de operación son menos estables debido a las etapas de regulación de presión. • Si no se realiza o se previene sistemas redundantes de seguridad, el Pistón podría ser forzado fuera de su máximo recorrido, rompiendo el sello en el caso de los pistones con sello de mercurio 	<ul style="list-style-type: none"> • Cámaras Húmedas • Medidores de Diafragma • Medidores tipo Pistón • Rotámetros • Boquillas sónicas • Elementos de Flujo Laminar • Medidores Másicos • Micro turbinas
Descendente	<ul style="list-style-type: none"> • La calibración se ejecuta a un nivel de presión más constante. • Se obtiene una mejor estabilidad de temperatura. • Es posible calibrar elementos de flujo crítico, utilizando una bomba de vacío y obtener excelente nivel de repetibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • El alcance de caudal es limitado a las pérdidas de presión causadas por las válvulas y tuberías del patrón • No es posible calibrar medidores cuya caída de presión sea mayor a la presión de operación del Pistón (generalmente 500 Pa) • Si no se realiza o se previene sistemas redundantes de seguridad, el Pistón podría ser forzado fuera de su máximo recorrido, rompiendo el sello en el caso de los pistones con sello de mercurio 	<ul style="list-style-type: none"> • Cámaras Húmedas • Medidores de Diafragma • Medidores tipo Pistón • Medidores Tipo Burbuja • Buretas • Boquillas sónicas • Elementos de Flujo Laminar • Medidores Másicos • Micro turbinas

Tabla 37. Operación de Sistemas Patrón Tipo Pistón

Sistema de Detección de la Posición Vertical del Pistón

El principio de funcionamiento del patrón tipo pistón requiere el conocimiento del desplazamiento exacto del pistón, para obtener el volumen y el caudal; por esta razón es el sistema al que mayor atención se presta por parte de los fabricantes como de los institutos de metrología que poseen este tipo de patrón.

Dentro de los métodos utilizados se identificaron tres que pueden ser clasificados de acuerdo al número de mediciones que es posible realizar a lo largo de la carrera del pistón.

El primer método que hemos denominado “medición total del desplazamiento” se basa en la determinación con la mayor exactitud posible de las posiciones inicial y final del desplazamiento del pistón, sin tener en cuenta posiciones intermedias, obteniendo así, el volumen desplazado por el pistón con gran exactitud (Figura 71a).

El segundo método “Medición parcial del desplazamiento” es similar al anterior pero permite la detección de posiciones intermedias, mediante la ubicación de un mayor número de sensores a lo largo de la carrera del pistón (Figura 71b), este método presenta ventajas en cuanto a la operabilidad del patrón con medidores de diferente capacidad volumétrica, pero sacrificando la exactitud e incertidumbre del patrón, ya que la utilización de un mayor número de sensores impide la utilización de sensores finos debido a su elevado costo.

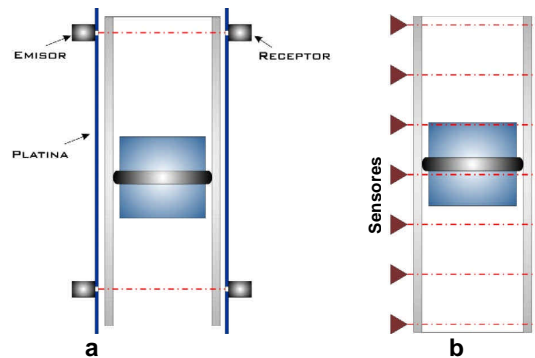


Figura 71. a- Medición total del desplazamiento, b- Medición parcial del desplazamiento

El tercer método “Medición continua del desplazamiento” permite discretizar la carrera del pistón de tal forma que puede considerarse continua. Esto se logra mediante la implementación de sistemas que registran continuamente la posición del pistón, en esta clasificación se destacan dos: el sistema que emplea un encoder y el sistema de medición por sonar o por interferómetro láser (Figura 72).

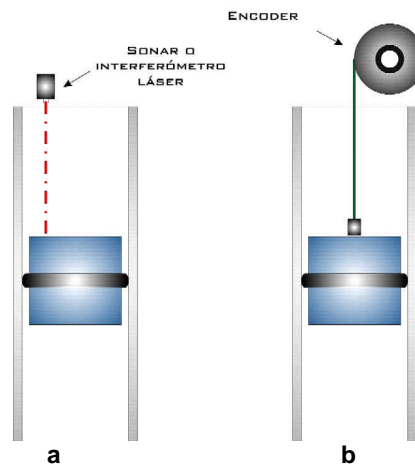


Figura 72. Medición Continua del desplazamiento a- Por sonar, b- Por encoder rotativo

Instrumento Primario de Medición

El instrumento primario de medición esta conformado por el cilindro de vidrio, el pistón y el sello. En la Figura 73 se aprecia una configuración de estos tres elementos, en esta el cilindro utilizado es de vidrio Borosilicato, el pistón de PVC y el sello se realiza por medio de un anillo de mercurio.

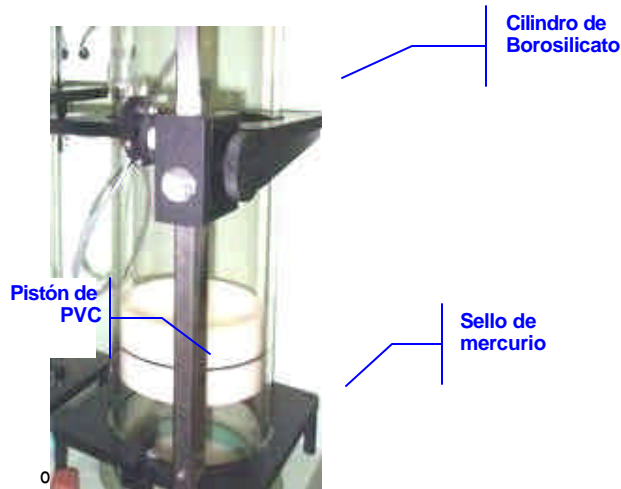


Figura 73. Elemento Primario de Medición

Una de las variables de mayor influencia sobre la incertidumbre del patrón tipo pistón son las características dimensionales del cilindro de vidrio que conforma el elemento primario de medición. Entre dichas características dimensionales se hallan las pequeñas tolerancias en su diámetro, concentricidad y cilindridad, por cuanto el costo de los cilindros es elevado y el número de fabricantes que puede proveerlos es reducido.

Sistema de Alimentación y Evacuación de Gas

El subsistema de alimentación y evacuación de gas comprende todos los elementos auxiliares necesarios para operar el patrón tipo pistón, estos incluyen elementos tales como: fuente de suministro de aire, tuberías de conexión, reguladores de presión, filtros de partículas, secadores de aire, acondicionadores de flujo y válvulas reguladoras de caudal, entre otros.

Estos elementos no influyen directamente en la estimación del volumen o caudal de gas, pero son los encargados de generar y mantener las condiciones necesarias para que el gas que ingresa al pistón mantenga estables sus condiciones de flujo (presión, temperatura, humedad, etc.), garantizando un permanente control sobre estas variables de influencia.

Sistemas de alimentación: Los sistemas de alimentación de gas al pistón pueden variar dependiendo de la fuente de gas que se utilice, se distinguen dos métodos para suministrar gas al pistón, el primero es la alimentación desde una línea de aire comprimido proveniente de un compresor y el segundo la utilización de una fuente de almacenamiento (cilindros); cada opción de estas requiere elementos específicos que le permitan preparar el gas para su utilización en el patrón, mediante acondicionamiento de las condiciones de presión, humedad y limpieza.

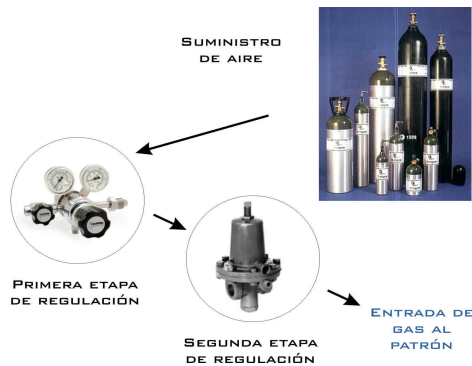


Figura 74. Montaje de Entrada de Gas Proveniente de una Fuente de Almacenamiento

Cuando se utiliza una fuente de almacenamiento (cilindro) como suministro de gas al patrón, se tienen mayores ventajas pues se pueden garantizar ciertas especificaciones de humedad y composición. Los instrumentos necesarios para acondicionar el flujo para el patrón como se muestra en la Figura 74 se reducen al sistema de regulación de presión, el cual debe regular la presión desde la presión de almacenamiento (generalmente superior a 800 psi) hasta la presión de operación del pistón (10 mbar). Adicionalmente permite realizar calibraciones con otros fluidos de trabajo diferentes al aire, tales como, nitrógeno, dióxido de carbono, etc.

Sistema de evacuación: El conjunto de elementos necesarios para la evacuación del gas, permiten controlar y adecuar la dirección del flujo que proviene del patrón, este sistema cambia de acuerdo a las necesidades. Si el patrón es utilizado en descenso, requiere de un sistema de vacío que genere la caída de presión necesaria, ya que el peso del pistón no es suficiente. Lo usual es la utilización de una bomba de vacío que genere el caudal apropiado (alrededor de 50 dm³/min según lo estipulado para las condiciones de cada patrón) con una presión de vacío superior a los 600 mbar.

En todo sistema de calibración de flujo de gas, el caudal debe ser regulado para lo cual se utilizan diversos dispositivos, tales como controladores de caudal másico, medidores de flujo crítico o un simple arreglo de válvulas tipo aguja que permita ajustar los caudales de prueba, la cantidad de válvulas esta definida por el rango de caudal que maneja el patrón.

Instrumentación

Como en todos los sistemas de medición de gas, la instrumentación permite realizar las correcciones en la medición de volumen o caudal, desde condiciones de calibración hasta condiciones base, los instrumentos utilizados normalmente son sensores y transductores de temperatura y presión.

En los sistemas de medición de bajos caudales los cambios de presión y temperatura son muy críticos; y para el caso específico de los pistones esto puede ser clave debido a la imposibilidad de medir directamente la presión y la temperatura del gas al interior del cilindro, incurriendo en un error cuya cuantificación debe ser realizada, dependiendo del nivel de exactitud incertidumbre que se requiera para el patrón.

La solución al inconveniente mencionado anteriormente es la caracterización del comportamiento de la temperatura y la presión del gas a través de la línea de entrada, incluyendo el comportamiento transitorio de la presión presentado al iniciar la carrera del pistón.

Medios Sellantes para la Cámara De Medición

El pistón y el sello empleado para brindar hermeticidad a la cámara de medición (formada entre el cilindro y el pistón) son los elementos mas importantes desde el punto de vista funcional, ya que garantizan la hermeticidad de la cámara durante el desplazamiento del pistón. En el diseño de estos elementos se deben considerar aspectos dinámicos del pistón y del sello, así como constructivos dada la estrecha tolerancia que se debe manejar en respecto al cilindro de vidrio.

Sello con Mercurio: El sello tipo mercurio consiste de un fino anillo de mercurio que descansa entre una ranura maquinada en el pistón y la pared interior del cilindro de Borosilicato. La cantidad de mercurio utilizada depende del diámetro del pistón pero generalmente se trata de un par de centímetros cúbicos, un volumen muy pequeño comparado con el que poseen los tradicionales manómetros de mercurio, tan populares aun en ciertos laboratorios. A pesar de lo contradictorio que pueda ser el uso del mercurio debido a sus efectos contaminantes, este medio sellante sigue siendo el mas popular para los patrones tipo pistón, ya que garantiza total hermeticidad a la cámara de medición con un nivel de fricción despreciable. Para evitar la posible contaminación con vapores de mercurio se utilizan filtros para purificar las corrientes de aire que ingresen en contacto con el mercurio, tal y como se describió con anterioridad para sistema de evacuación de gas.

Sello con Grafito: Este tipo de sello es producto de los nuevos desarrollos de materiales que poseen características especiales tales como excelente maquinabilidad, estabilidad dimensional, bajo peso y bajo coeficiente de fricción.

El sello se logra ajustando el pistón tan estrechamente al cilindro que la viscosidad del gas bajo prueba resulte en una fuga lo suficientemente pequeña como para ser considerada insignificante. Para caudales de fuga razonables, tal tolerancia debe ser del orden de 5 micrones. Un probador de pistón seco portátil permite altas velocidades del pistón y pequeñas distancias de medición. Aunque ya existen varias patentes registradas que utilizan diversos materiales para la fabricación del pistón, la combinación pistón en grafito y cilindro en vidrio boro-silicato ha empezado a ganar popularidad, pues poseen bajos y similares

coeficientes de expansión térmica, baja fricción, son de forma esencialmente invariable e impermeables. A pesar que los patrones que utilicen este sello pueda desarrollar muy altas velocidades para el pistón, permitiendo una rápida medición de caudales, la exactitud ha sido limitada hasta ahora a un máximo de de 0.5% o en los mejores casos de 0.2%, esto debido, claro esta, a los caudales de fuga que se generan entre el pistón y el cilindro.

Métodos de Calibración

La calibración de un patrón tipo pistón que utiliza un encoder como sistema de detección de la posición del pistón, consiste en la obtención de un factor K (o Constante K) que relaciona el número de pulsos emitidos por el encoder con el volumen desplazado por el pistón.

Para obtener dicha constante existen dos métodos comúnmente utilizados: dimensional y Gravimétrico.

Método dimensional: Por este método se obtiene trazabilidad a patrones de longitud y consiste en medir el diámetro interno del cilindro y obtener la relación de los pulsos generados por el encoder sobre el desplazamiento del pistón para estimar el factor K.

- Por comparación directa del desplazamiento vertical
- Por estimación cinemática del desplazamiento

Método Gravimétrico: Por este método se obtiene trazabilidad a patrones de masa. Es llamado “desplazamiento de agua” o “*water Draw*” y se utiliza comúnmente en la calibración de medidas volumétricas. El método consiste en desplazar agua acumulada en el cilindro mientras se registran los pulsos generados del encoder. El volumen de agua desplazado se obtiene a través de la densidad y la masa del agua. El factor K se calcula relacionando el número de pulsos con el volumen de agua desplazada.

- Por pesaje directo o por doble sustitución

La ejecución de estos dos métodos en forma independiente permite comparar resultados entre ellos y validar el método aplicado, adicionalmente de la incertidumbre de calibración por medio de simulaciones previas, permite obtener evidencia que soporte los métodos de calibración.

APÉNDICE D. GENERALIDADES DE LOS PATRONES PARA GAS A BAJO CAUDAL

Campana Gasométrica

Este patrón consiste de un tanque que rodea un pozo seco para formar una doble pared. El volumen anular formado por las dos paredes se llena casi completamente con un aceite de baja presión de vapor que sirve de sello.

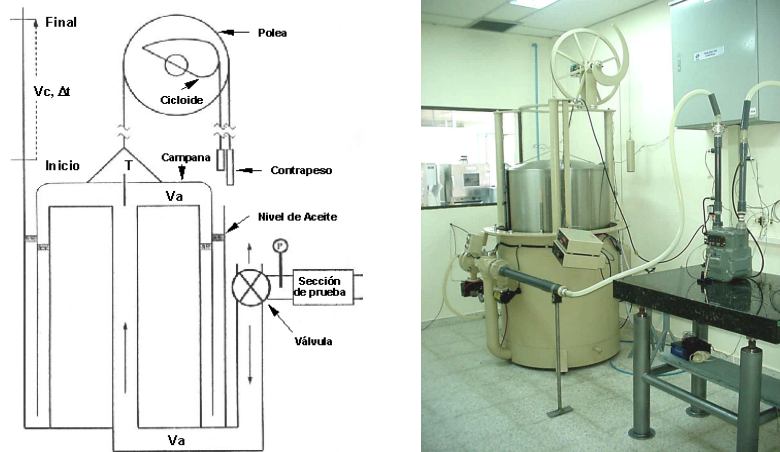


Figura 75. Patrón Tipo Campana Gasométrica

En medio de esta área anular se introducen las paredes de un cilindro metálico abierto en el fondo y sellado por un domo en su parte superior, este se suspende por medio de un cable a un conjunto de poleas y contrapesos. El contrapeso mayor, ligado a una polea circular, sirve para balancear el peso de la campana, su masa se ajusta de manera que se mantenga una presión determinada al interior de la campana. Otro contrapeso de menor tamaño se suspende de una polea con perfil cicloidal, proyectado para compensar la fuerza de flotación que el aceite ejerce sobre el volumen de la campana inmerso en el fluido, conforme esta se desplaza verticalmente.

De esta forma se logra mantener la presión del gas constante al interior de la campana. Un juego de rodillos y varillas guías mantienen la campana concéntrica en el tanque y la dotan de estabilidad lateral.

Para la calibración de la campana, existen diversos métodos que son reconocidos internacionalmente:

- Comparación volumétrica empleando una botella o recipiente de volumen calibrado (cubil foot bottle).
- Calibración gravimétrica a través del desplazamiento de líquido.
- Calibración dimensional (strapping) para determinar geoméricamente el volumen interno de la campana.

La incertidumbre de la medición que se puede obtener con este patrón oscila entre 0.06% y 0.35%.

Método Desplazamiento de Líquido

Los aparatos necesarios para implementar el método de desplazamiento de líquido es un tanque hermético elevado a una altura determinada, lleno con un líquido de baja presión de vapor, más un sistema de desplazamiento de líquido desde el tanque hasta la válvula diverter. Durante la operación del patrón, el flujo de gas que pasa a través del medidor bajo ensayo, va hacia el tanque hermético lleno de aceite.

El aceite desciende hasta una válvula diverter que se encarga enviar el flujo hacia un tanque localizado sobre una balanza o hacia un tanque de recolección intermedio, ligado a una bomba hidráulica que posibilita el retorno del aceite al tanque elevado luego de realizada la calibración.

Un juego de válvulas entre el tanque y el diverter se manipula para obtener el caudal de calibración deseado, estando el flujo desviado hacia el tanque intermedio, una vez ajustado el caudal, se desvía el flujo hacia el tanque de pesaje. Cuando el volumen de calibración ha pasado por el medidor de prueba, se desvía de nuevo el flujo y se registra el peso en la balanza, tratándose en este caso de pesaje estático.

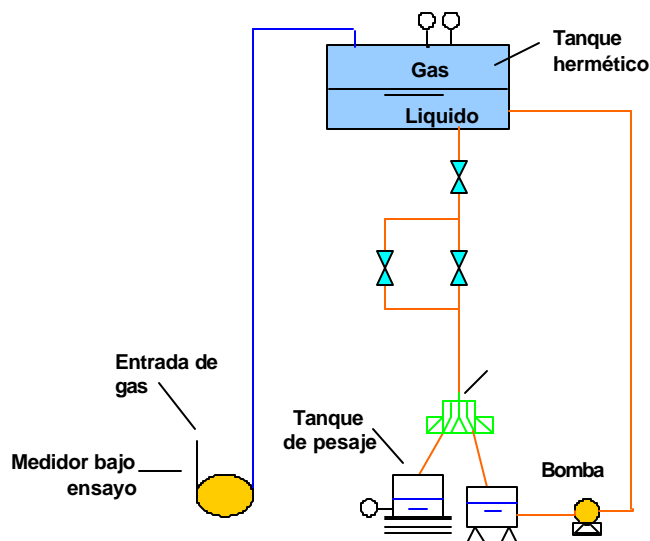


Figura 76. Método de Desplazamiento de Líquido

La masa registrada es convertida en volumen por medio de la densidad del aceite y comparada con el volumen de gas indicado por el medidor de prueba, obteniéndose de esta forma el error.

El método de desplazamiento de líquido tiene la ventaja de ser relativamente simple.

Los patrones que operan bajo el método de desplazamiento de líquido permiten obtener incertidumbres alrededor del 0.2%.

PVTt (Presión – Volumen – Temperatura– Tiempo)

El sistema generalmente se compone de una fuente de flujo estable, válvulas para direccionamiento del flujo, un tanque de almacenamiento, bomba de vacío, varios sensores de presión y temperatura, y un venturi de flujo crítico o regulador de presión antes del medidor bajo ensayo. El venturi para flujo crítico aísla al medidor bajo ensayo de las variaciones de presión en la tubería aguas abajo y en el tanque. El venturi de flujo crítico es necesario para mantener estable las

condiciones de presión y temperatura aun cuando las variaciones de extrema presión ocurran aguas abajo debido a la operación de las válvulas de direccionamiento y cambios de presión cuando el tanque de almacenamiento esta lleno.

El sistema PVTt permite medir el caudal usando una técnica de tiempo de almacenamiento volumétrico. El flujo estable es desviado hacia al tanque de almacenamiento casi vacío de volumen conocido durante un tiempo moderado. La temperatura y la presión media del gas en el tanque son medidas antes y después del proceso de llenado. En principio, la rata de masa puede ser determinada multiplicando el cambio de densidad, por el volumen del recipiente de almacenamiento y dividiendo el producto por el tiempo de almacenamiento. La ecuación final para la rata de masa en el sistema PVTt incluye una corrección por el cambio de masa que ocurre en el volumen de inventario y esta dado por:

$$W_{PVTt} = \frac{(\rho_{tanque2} * V_{Tanque} - \rho_{tanque1} * V_{Tanque}) + (\rho_{tanque2} * V_{Tanque} - \rho_{tanque1} * V_{Tanque})}{(t_2 - t_1)}$$

Donde ρ_t^f es la densidad promedio final en el tanque de almacenamiento, ρ_t^i es la densidad promedio inicial en el tanque de almacenamiento, V_1 es el volumen de inventario y Δt es el intervalo de tiempo de almacenamiento del gas.

Donde las densidades son determinadas con la ecuación de estado del gas real:

$$\rho = \frac{P}{Z * R * T}$$

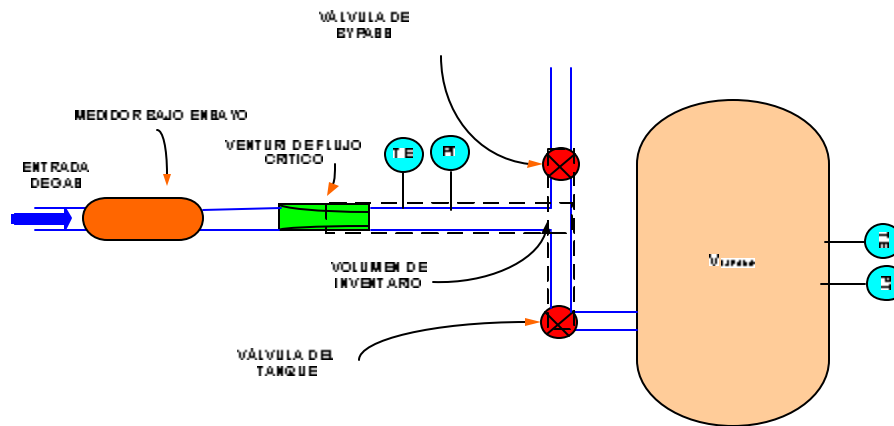
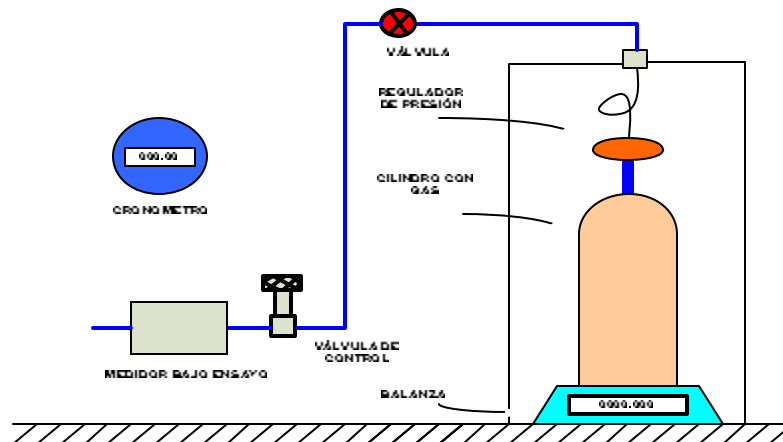


Figura 77. Sistema Primario para Calibración de Medidores de Gas Tipo PVTt

La incertidumbre lograda mediante este tipo de Patrones PVTt es del orden de 0.02 a 0.15%.

Patrón Gravimétrico Dinámico

El caudal másico puede ser obtenido usando una balanza para medir el cambio de masa del volumen almacenado y un cronometro para integral la magnitud tiempo. La inclusión de una balanza elimina la necesidad de medición de presión y temperatura en el volumen de almacenaje para calcular la densidad, la necesidad de una ecuación de estado para el gas, como también la necesidad de determinar con exactitud el volumen almacenado. El patrón gravimétrico dinámico para flujo de gas opera en modo "blow down" como se muestra en la Figura 78 Para operar el patrón, el cilindro de gas es llenado y el flujo es estabilizado a través del medidor bajo ensayo, ajustando el regulador de presión. Continuos puntos de mediciones de masa en un intervalo de tiempo se promedian. La rata de cambio de tiempo de estas mediciones de masa (corregido por flotación) es calculada numéricamente para obtener el flujo de masa.



una medición de flujo. Es necesario detectar cambios pequeños de masa con una balanza de capacidad relativamente grande. Afortunadamente se encuentran balanzas con resoluciones mejores que una parte por millón (Pero para muy bajos caudales de gas, es necesarios tiempo de ensayo más largos). Otra fuente de incertidumbre en el patrón gravimétrico dinámico es la conexión entre el cilindro de gas y el medidor bajo ensayo. Este tubo es generalmente de forma de “coleta” o alguna otra conexión flexible que puede generar fuerzas al cilindro de gas causando falsas indicaciones de cambio de masa. Es útil tener la regulación de presión aguas arriba del tubo de conexión, de tal forma que el tubo no experimente cambios en la presión y esfuerzos en el tubo “tipo bourdon”. La disponibilidad de que la balanza tenga la opción de taraje, minimiza los cambios debido a la fuerza en la conexión del tubo. Una cubierta protectora elimina errores causados por el flujo de aire del sistema de ventilación del cuarto. La descarga de gas desde el cilindro causa cambios de temperatura en el cilindro y origina corrientes por convección a lo largo del exterior del cilindro. Esas corrientes aportan incertidumbre a la medición de masa. La incertidumbre reportada para este patrón se encuentra entre 0.13% a 0.60%.

Patrón Gravimétrico Estático

Este patrón es similar al PVTt en equipos y en operación, pero la determinación de la masa final e inicial es hecha colocando el recipiente de almacenamiento sobre una balanza en vez de calcular la densidad con la presión, temperatura, volumen de tanque y la ecuación de estado del gas. Aunque este método requiere de un largo tiempo para obtener cada caudal de gas, y no puede ser fácilmente automatizado

La ecuación base para el cálculo del caudal de gas es:

$$W_{grav} = \frac{(m_{\text{tank}2} - m_{\text{tank}1}) + (r_{in2} * V_{inv} - r_{in1} * V_{inv})}{t_2 - t_1}$$

Los bajos niveles de incertidumbre alcanzados con este patrón se deben a que la incertidumbre en las mediciones de presión del tanque, temperatura del tanque, volumen del tanque, y la ecuación de estado del gas, son reemplazadas por la incertidumbre de la medición de masa del tanque. En este caso debe existir una válvula diverter y una válvula de separación del tanque del suministro

de flujo de gas, de tal forma que el flujo pueda ser discontinuado y el pesaje se realice sin flujo de gas. Existirán dos volúmenes de inventario que pueden ser tratados separadamente, cada uno con sus propias mediciones de presión y temperatura. Un término es adicionado en el numerador de la ecuación que corresponde a la diferencia de masa al final y al inicio en el volumen de inventario.

La medición de la masa en el tanque debe ser corregida por flotación, de ahí que la medición de temperatura, presión, humedad en el medio en que se encuentra el tanque de almacenamiento y la ecuación de estado del aire del cuarto son necesarios.

Adicionalmente los cambios significativos en el volumen del tanque que ocurren debido a los cambios de presión interna, son necesarios para la corrección por flotación.

Así como para el método gravimétrico dinámico, se requiere de una balanza de alta resolución, pero el problema radica en el gran peso del tanque de almacenamiento. Por tanto se requiere de una balanza de gran capacidad y altas cualidades metrológicas. Otra opción es sumergir el tanque de almacenamiento en líquido, de tal forma que la fuerza de flotación contrabalancee la masa del recipiente y el valor medido por la balanza sea menor, obteniendo un equipo con un alcance de medición menor y una alta resolución. Pero las corrientes por convección en líquido pueden ejercer fuerzas en el tanque y originar problemas de repetibilidad en la medición.

Los análisis de incertidumbre publicados para el método gravimétrico estático indican que la incertidumbre se encuentra entre 0.01% y 0.25%.

Alcance de medición para los patrones primarios

Las siguientes figuras muestran el alcance de medición y la cantidad existente de algunos patrones primarios a nivel mundial.

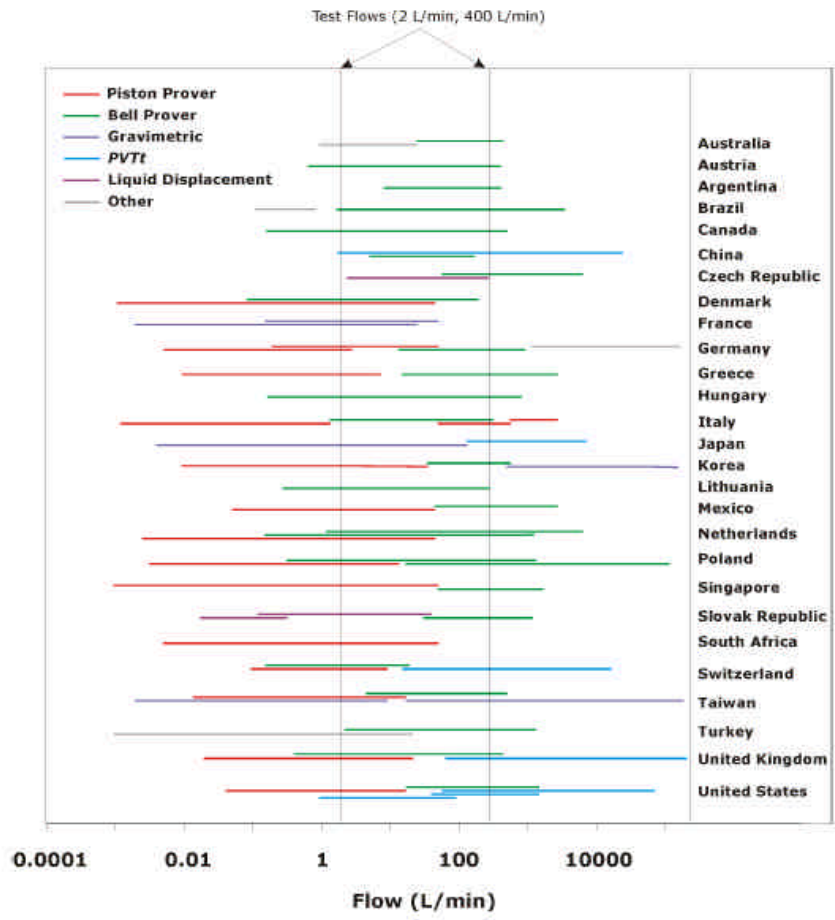


Figura tomada del documento 'What is the "best" transfer standard for gas flow?' John D. Wright, National Institute of Standards and Technology

Figura 79. Alcance de medición de patrones primarios en el mundo

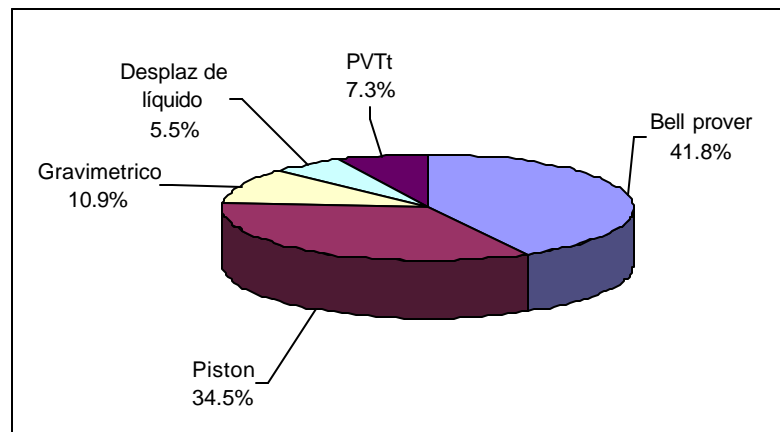


Figura 80. Porcentaje de Patrones Primarios en los Principales INM

APÉNDICE E. CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE CAUDAL

Una curva de calibración (o curva característica o de desempeño) es un gráfico que muestra la forma en que el desempeño de un medidor varía con el caudal, con la velocidad, o con el número de Reynolds.

Generalmente, esta curva se obtiene por medio de una calibración, es decir, a través de una serie de pruebas a lo largo del rango de operación del medidor, comparando las lecturas mostradas por el instrumento (volumen, masa o velocidad) contra los valores obtenidos utilizando un patrón o un medidor de clase de exactitud mayor.

Medidores de caudal lineales y no-lineales

Los resultados de una calibración pueden dibujarse en un gráfico que relacione la indicación del medidor, Y , con el caudal convencionalmente verdadero Q . Si el gráfico forma una línea más o menos recta pasando por el origen como en la Figura 81, el medidor se considera lineal.

Muchos medidores no-lineales poseen características como la que se muestra en la Figura 82, donde Q es proporcional a Y^2 . Medidores de caudal tipo Venturi, placas de orificio, boquillas y tubos de Pitot, pertenecen a esta clase de medidores, donde Y es el valor de presión diferencial medido.

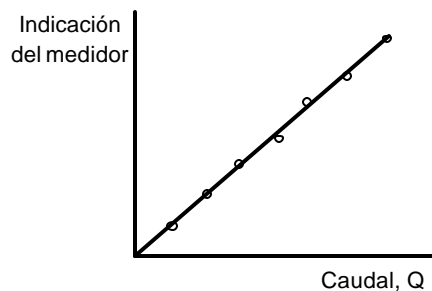


Figura 81. Curva característica de un medidor de caudal lineal

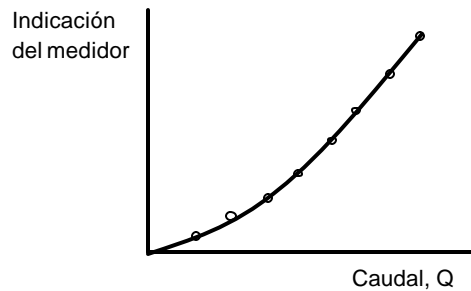


Figura 82. Curva característica de un medidor de caudal no-lineal

Uso del índice de desempeño del medidor

En la práctica, gráficos como los mostrados en la Figura 81 y Figura 82 no son comúnmente usados porque ellos no suministran detalles suficientes acerca de la calibración. Lo ideal es la utilización de un gráfico que muestre claramente cualquier pequeño desvío del comportamiento ideal del medidor.

Por lo tanto, es común graficar algún tipo de índice de desempeño del medidor contra el caudal, o contra cantidades comparativas como por ejemplo el número de Reynolds o el porcentaje del caudal máximo (ver Figura 83). Cuanto más se aproxime el gráfico resultante a una línea horizontal recta, el desempeño del medidor se acercará más al ideal.

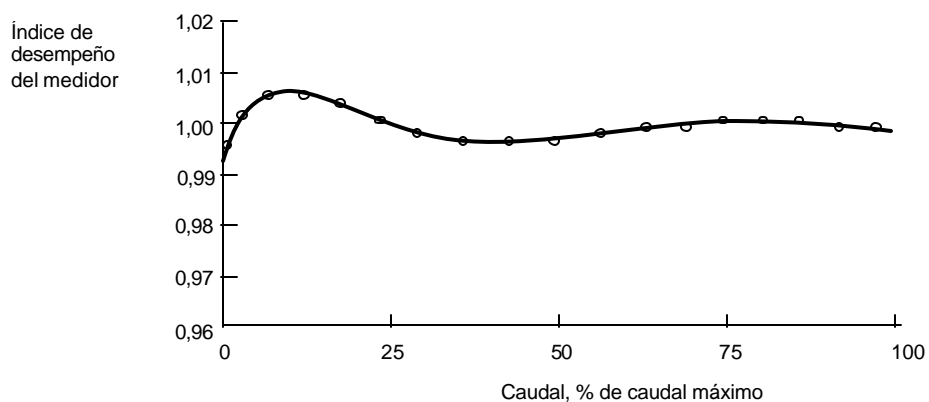


Figura 83. Curva del índice de desempeño de un medidor de caudal.

Existen varios tipos de índice de desempeño, pero solamente cuatro son de uso común. A continuación se describirán

Coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga C se define para medidores de caudal como:

$$C = \frac{Q_t}{Q_i}$$

y, para medidores de velocidad, como:

$$C = \frac{v_t}{v_i}$$

donde Q_t e v_t son comúnmente llamados *caudal convencionalmente verdadero* y *velocidad convencionalmente verdadera*, respectivamente, indicando que estos valores se obtienen a partir de medidores con una clase de exactitud mayor, normalmente utilizados en la calibración de otros medidores. Los parámetros Q_i y v_i representan, respectivamente, el caudal y la velocidad indicada por el medidor, o calculadas a partir de la lectura en los medidores.

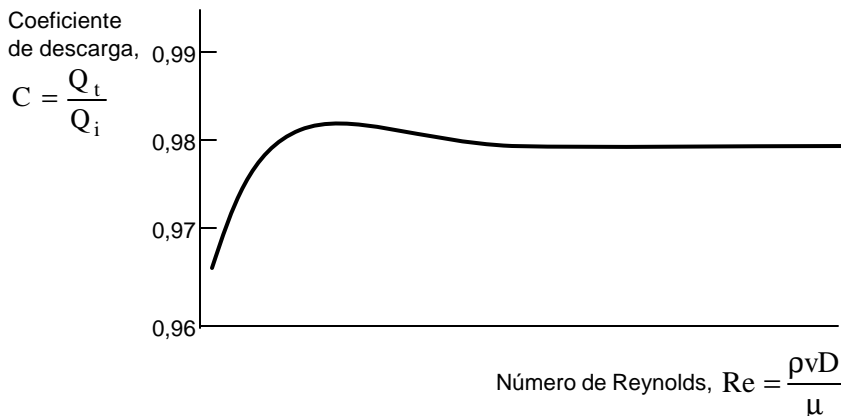


Figura 84. Ejemplo de curva característica basada en el coeficiente de descarga de un medidor de caudal.

El coeficiente de descarga, que generalmente es menor que la unidad, es ampliamente aplicado en el caso de medidores por presión diferencial. Normalmente, el coeficiente de descarga, C , se grafica en relación al número de Reynolds calculado para la garganta del medidor, Re_d , aunque deba utilizarse, siempre que sea posible el número de Reynolds basado en el diámetro de la tubería, Re_D .

Error de indicación del medidor

El término error del medidor, ε , es utilizado en conjunto con medidores volumétricos cuya indicación se da directamente en unidades de volumen, principalmente medidores de desplazamiento. El error se define como:

$$e = \frac{V_i - V_t}{V_t} \quad \text{o, porcentualmente, } \varepsilon = \frac{V_i - V_t}{V_t} \cdot 100 \quad [\%]$$

Donde: V_t e V_i indican, respectivamente, el volumen convencionalmente verdadero y el indicado. Generalmente, el error se expresa en términos de porcentuales respecto al valor convencionalmente verdadero.

Factor F del medidor

El factor del medidor, F , es un término aplicado principalmente a medidores utilizados para medir volumen total y, especialmente, con medidores tipo turbina y desplazamiento positivo. Desafortunadamente, en el pasado, cada operador utilizaba ese factor de manera diferente, y eso generaba mucha confusión. Actualmente, existe un consenso respecto a la correcta definición del factor del medidor:

$$F = \frac{V_t}{V_i}$$

Este representa el factor por el cual el volumen indicado por el medidor debería multiplicarse a fin de obtener el “volumen verdadero”.

Factor K

El factor K es un término utilizado para evaluar el desempeño de medidores como turbinas, por ejemplo, cuya señal de salida está disponible en forma de una serie de pulsos eléctricos, y donde, normalmente, el número de pulsos total, n , es nominalmente proporcional al volumen total de flujo que ha pasado, la frecuencia de pulsos, dn/dt , es nominalmente proporcional al caudal del fluido.

El factor K de un medidor se define como: $K = \frac{n}{V_t}$

Las curvas características de medidores tipo turbina se presentan generalmente en un gráfico del factor K en función del caudal, como se ilustra en la Figura 85.

El recíproco del factor K, es decir el factor $1/K$, es un parámetro de gran importancia práctica, puesto que cuando el medidor va a utilizarse, el número de pulsos medido, n , debe multiplicarse por el factor $1/K$ para obtener el volumen de fluido que pasó por el medidor.

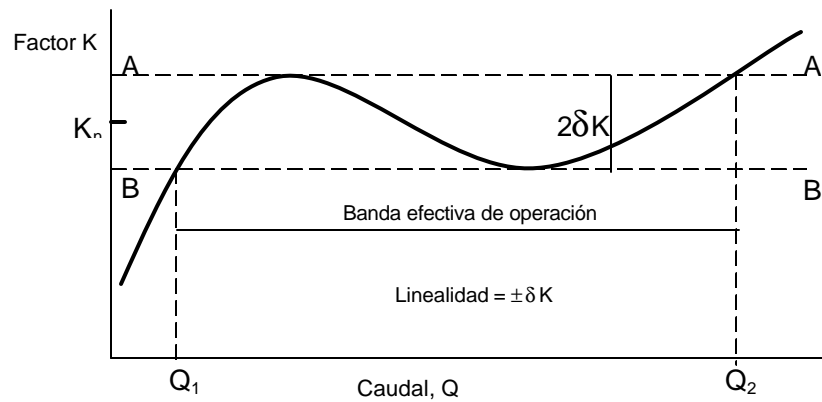


Figura 85. Ejemplo de curva característica basada en el factor K.

APÉNDICE F. MEDIDORES DE CAUDAL

Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de caudal deseado. Entre los medidores más importantes figuran los siguientes:

Medidores de desplazamiento positivo

En términos simples, un medidor de desplazamiento positivo recibe la corriente del flujo, la divide en varios compartimientos y, posteriormente, la entrega aguas abajo, operando en forma cíclica. Cada compartimiento posee un volumen definido, de esta forma, al contar el número de veces que se llenan los compartimientos, puede determinarse el volumen total que fluyó a través del medidor.

El espacio entre que llena el fluido, formado entre la parte móvil y las paredes internas del medidor, se conoce como cámara de medición. Los elementos mecánicos móviles, al interior de la cámara de medición se denominan mecanismos de desplazamiento y dividen el flujo en paquetes discretos, los cuales se definen como segmentos volumétricos. El mecanismo de desplazamiento es la característica que más varía entre cada diseño de medidor. El mecanismo de desplazamiento es la particularidad que diferencia los diferentes principios de operación. Algunos de los tipos más comunes de mecanismos de desplazamiento son:

- Disco oscilante
- Pistón oscilante
- Pistón alternativo
- Rotativos
- Diafragma

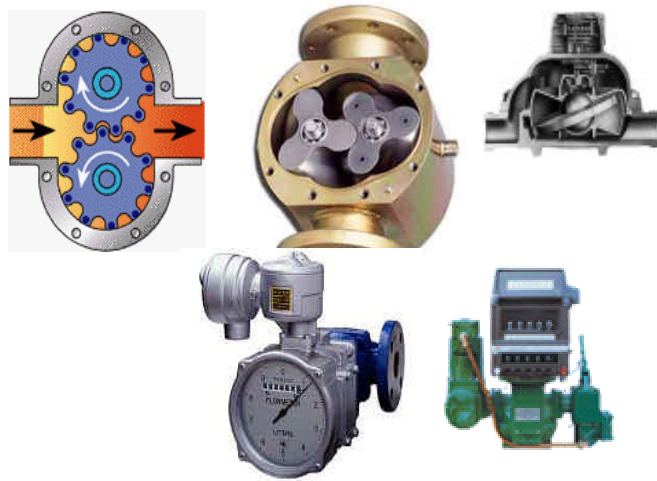


Figura 86. Medidores de desplazamiento positivo

Medidores tipo turbina

Las turbinas proveen sus mejores características metrológicas cuando trabajan con fluidos limpios de baja viscosidad cinemática y flujo estable, presentando un comportamiento bastante lineal con flujos turbulentos, pero subsónicos.

El gas ingresa al medidor incrementando su velocidad a través del pasaje anular formado por el difusor de entrada y el interior del cuerpo del medidor. El flujo de gas a través de los alabes ocasiona el giro del rotor. Bajo condiciones ideales, la velocidad de giro del rotor es proporcional al caudal volumétrico, pero en la realidad es una función de la forma, tamaño y diseño del rotor, dependiendo también de ciertas fuerzas que se oponen al movimiento del rotor debidas a la fricción de mecanismos una onda de baja frecuencia en un tren de pulsos, una señal analógica de 4 a 20 mA u otra especificada. Las señales de salida son adicionalmente linealizadas para compensar las desviaciones del medidor debidas a los torque que se oponen al giro del rotor, así como otros fenómenos asociados al flujo.

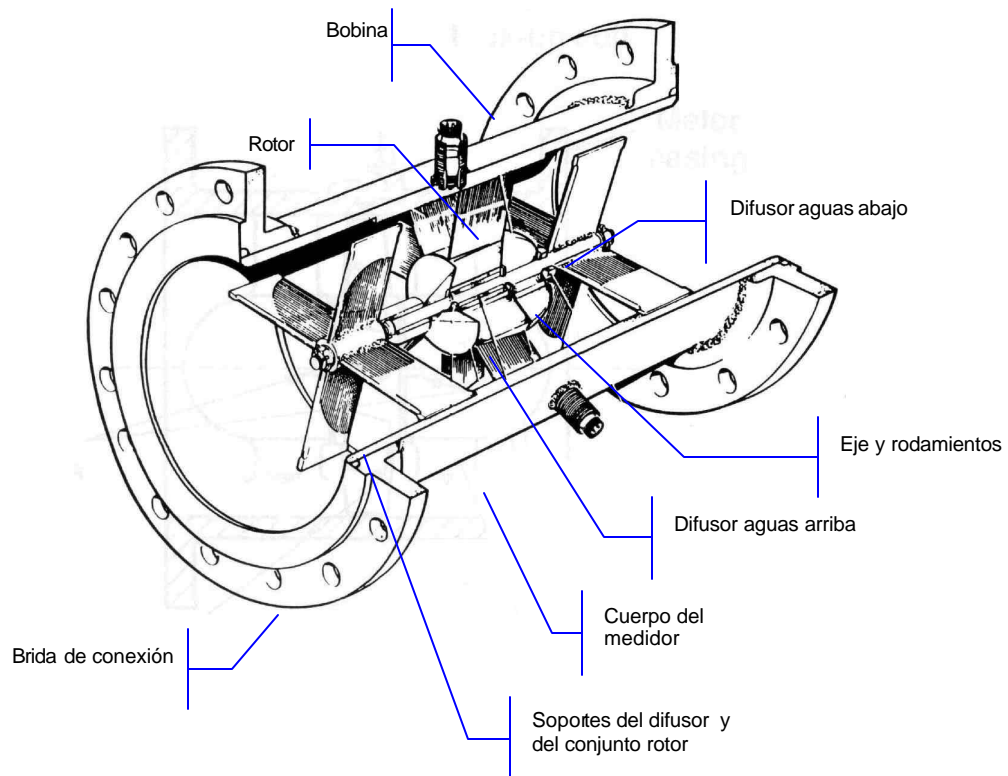


Figura 87. Diagrama de un medidor tipo turbina

Medidores ultrasónicos de tiempo de tránsito

Las ondas sonoras viajan con una velocidad específica a través de un medio. En el caso de los gases se determina a través de su composición, presión y temperatura. Si una onda sonora se origina en un medio en movimiento, su velocidad de propagación es el vector suma de la velocidad de la onda original y la velocidad promedio del medio. Este efecto se usa para medir la velocidad de gas.

En la Figura 88 se muestra el sistema básico de los medidores ultrasónicos (MUS). En ambos lados de la tubería, se encuentran montados los transductores en las posiciones A y B, los cuales pueden emitir y recibir las ondas ultrasónicas. Las ondas acústicas se generan como un haz perpendicular a la superficie del transductor.

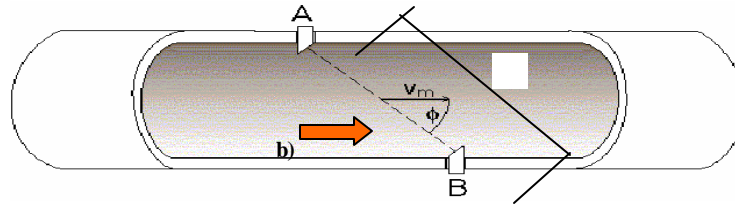


Figura 88. Sistema básico de un medidor ultrasónico

Medidores de efecto Doppler

Los medidores ultrasónicos tipo Doppler, miden el caudal en forma externa a la tubería, empleando sensores con abrazaderas. Los transductores emiten altas frecuencias sonoras, del orden de 0,5 MHz, las cuales viajan a través de la pared de la tubería y a través del fluido líquido objeto de medición. El sonido es reflejado de vuelta hacia el sensor, al instante en que se encuentra con sólidos, partículas o burbujas en suspensión. Si el fluido está en reposo, los ecos retornan con la misma frecuencia que fueron emitidos originalmente. Cuando el fluido está en movimiento, los ecos retornan con una frecuencia diferente de la original, el caudal es proporcional a la relación entre la diferencia de las frecuencias (original – reflejada) y la frecuencia original.

En la práctica, los medidores tipo Doppler están conformados por un cuerpo en el cual se instalan dos cristales piezoeléctricos, uno actúa como transmisor y el otro como receptor, el conjunto completo se instala sobre la tubería, como se muestra en la Figura 89

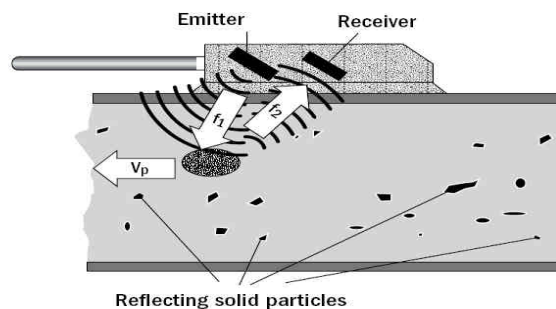


Figura 89. Diagrama medidor efecto Doppler

Medidores de caudal por presión diferencial

Este tipo de dispositivos se basa en la generación de una restricción en la corriente del fluido que ocasiona una presión diferencial, entre dos puntos, uno aguas arriba y otro aguas abajo del elemento restrictor. El caudal que fluye a través de la restricción proporcional a la raíz cuadrada de la presión diferencial, por esta razón también se les conoce como medidores de raíz cuadrada o como medidores de cabeza.

Los medidores de caudal por presión diferencial pueden usar diferentes diseños de elementos restrictores de flujo. Los elementos más comunes son los siguientes:

- Placa de orificio
- Venturi
- Tobera
- Tubos Pitot
- Cuña (wedge)
- V-Cone



Figura 90. Tipos de medidores de presión diferencial