

**RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD OPERATIVA Y OPTIMIZACIÓN DEL
BANCO PATRÓN GRAVIMETRICO DEL CDT DE GAS PARA CALIBRACIÓN
DE MEDIDORES DE GAS POR EL METODO DE ASPIRACIÓN**

JOSE AUGUSTO FUENTES OSORIO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2004

**RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD OPERATIVA Y OPTIMIZACIÓN DEL
BANCO PATRÓN GRAVIMETRICO DEL CDT DE GAS PARA CALIBRACIÓN
DE MEDIDORES DE GAS POR EL METODO DE ASPIRACIÓN**

JOSE AUGUSTO FUENTES OSORIO

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

Director

JAVIER RUGELES

Ingeniero Mecánico

Codirector

HENRY ABRIL BLANCO

Director del laboratorio

Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

1

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2004

DEDICATORIA

A mi papá, descansa en paz,
A mi querida madre, Ruth Estela Osorio,
A mis Hermanas, Lili y Mile,
Y a toda mi familia.

Jose Augusto

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Javier Rugeles, docente de la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander por la colaboración durante la realización de este proyecto.

Al grupo de trabajo del CDT de GAS por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

Y a todos mis amigos y compañeros de la universidad.

Jose Augusto Fuentes Osorio.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
1. SISTEMAS DE CALIBRACIÓN.....	3
1.1. MEDICION.....	3
1.2. CALIBRACION.....	4
1.3. PATRONES DE CALIBRACIÓN.....	6
1.3.1. Patrones primarios.....	7
1.3.2. Patrones secundarios	11
1.3.3. Patrones de trabajo.....	13
1.4. TRAZABILIDAD DE LOS PATRONES.....	14
2. EVALUACIÓN DEL ESTADO INICIAL DEL PATRÓN GRAVIMÉTRICO DEL CDT DE GAS PARA CALIBRAR MEDIDORES DE FLUJO DE GAS POR EL METODO DE ASPIRACIÓN.....	17
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PATRON GRAVIMÉTRICO.....	17
2.2. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN.....	20
2.3. EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PATRON GRAVIMETRICO.....	22
2.3.1. Reservoirio hermético.....	22
2.3.2. Sistema de tubería de descarga y realimentación del aceite.....	23
2.3.3. Válvula diverter.....	27
2.3.4. Aceite hidráulico.....	30
2.3.5. Estructura soporte.....	32
2.4. INSTRUMENTOS PARA ADQUISICIÓN DE DATOS.....	33
2.4.1. Medición de la temperatura.....	33
2.4.2. Medición de la presión.....	33
2.4.3. Señal de inicio y parada de la prueba.....	34
2.5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	35
3. RECUPERACION DE LA CAPACIDAD OPERATIVA DEL PATRON GRAVIMETRICO.....	38
3.1. METODO DE PESAJE.....	38
3.1.1. Método de pesaje dinámico.....	38
3.1.2. Método de pesaje estático	39
3.2. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PESAJE.....	41
3.3. SISTEMA DE TUBERÍA DE DESCARGA DE ACEITE.....	42
3.3.1. Requerimientos de rediseño.....	42
3.3.2. Selección diámetro de la tubería y cabeza mínima de fluido necesaria	44
3.3.3. Tubería de descarga	47
3.3.4. Selección de las válvulas de regulación de caudal	60
3.4. RESERVORIO HERMÉTICO	66
3.4.1. Requerimientos de rediseño.....	66

3.4.2.	Dimensionamiento del reservorio hermético	67
3.4.3.	Selección material a utilizar para el reservorio hermético.....	70
3.4.4.	Calculo del espesor del reservorio hermético.....	72
3.4.5.	Conexiones para el reservorio hermético	76
3.4.6.	Construcción del reservorio hermético.....	77
3.4.7.	Prueba de hermeticidad para el reservorio hermético	79
3.5.	VALVULA DIVERTER.....	81
3.5.1.	Requerimientos de diseño de la válvula diverter	81
3.5.2.	Diseño del diverter.....	86
3.5.3.	Alineación de las boquillas con la válvula diverter.....	90
3.6.	ESTRUCTURA SOPORTE DEL PATRON GRAVIMETRICO.....	92
3.6.1.	Diseño de la estructura soporte	92
3.6.2.	Construcción de la estructura metálica.....	97
3.7.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	98
3.7.1.	Medición de la masa	99
3.7.2.	Medición de la densidad.....	100
3.7.3.	Medición de la temperatura del aceite en el reservorio hermético ..	103
3.7.4.	Medición de la temperatura del aire en el reservorio hermético.....	104
3.7.5.	Señales de posición de la válvula diverter.....	104
3.7.6.	Modulo de i/o para el acondicionamiento de las señales de temperatura.....	104
3.7.7.	Medición del tiempo de prueba.....	105
3.8.	MONTAJE DEL PATRON GRAVIMETRICO.....	106
4.	CALIBRACIÓN Y TRAZABILIDAD DEL PATRON GRAVIMETRICO.....	109
4.2.	CALIBRACION DEL PATRON GRAVIMETRICO 110	
4.2.1.	Calibración de la balanza.....	111
4.2.2.	Verificación de la balanza	115
4.2.3.	Calibración del picnómetro.....	116
4.2.4.	Verificación del Picnómetro.....	116
4.2.5.	Calibración de sensores temperaturas.....	117
4.2.6.	Calibración del higrómetro y sensores de presión	117
4.3.	TRAZABILIDAD DEL PATRON GRAVIMÉTRICO.....	118
5.	CALIBRACION DE MEDIDORES DE VOLUMEN DE GAS CON EL PATRON GRAVIMETRICO.....	120
5.2.	MEDICION DE LA DENSIDAD DEL ACEITE.....	123
5.3.	CALIBRACION DE UN MEDIDOR TIPO DIAFRAGMA G 1.6 CON EL PATRON GRAVIMETRICO	124
	RECOMENDACIONES.....	130
	CONCLUSIONES.....	131
	BIBLIOGRAFIA.....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. Campana gasométrica.....	9
Figura 3. Probador tipo pistón.....	10
Figura 4. Cámara Húmeda	12
Figura 5. Boquilla Sonica.....	13
Figura 6. Jerarquía de los patrones según su incertidumbre	14
Figura 7. Pirámide de la red metrológica	16
Figura 8. Patrón Gravimétrico inicial.....	18
Figura 9. Comportamiento ideal del flujo en los intervalos de medición ΔT	21
Figura 10. Reservorio hermético y tapa bridada.	22
Figura 11. Conjunto de regulación de caudal del banco de aspiración.....	26
Figura 12. Sistema de recirculación de aceite.....	26
Figura 13. Válvula diverter	27
Figura 14. Direccionamiento del flujo de aceite de una posición a otra	29
Figura 15. Estructura soporte del patrón Gravimétrico.....	32
Figura 16. Sensor óptico para señal de inicio y parada	34
Figura 17. Sistema de adquisición de datos	36
Figura 18. Esquema de pesaje dinámico	39
Figura 19. Esquema de pesaje estático.....	40
Figura 20. Espacio que debe recorrer la placa de la válvula diverter.....	43
Figura 21. Disminución de la distancia de recorrido del diverter, por medio del cambio de sección transversal de la salida de la boquilla.	49
Figura 22. Bosquejo de la boquillas.....	51
Figura 23. Boquilla de prueba construida en el laboratorio	55
Figura 24. Boquillas del patrón gravimétrico	57
Figura 25. Diversor.	58
Figura 26. Montaje del diversor en el patrón gravimétrico.....	59
Figura 27. Montaje de las boquillas	59
Figura 28. Válvulas de globo	64
Figura 29. Válvula de bola	64
Figura 30. Conexión tanques.....	65
Figura 31. Dimensionamiento reservorio hermético.....	67
Figura 32. Espesor del reservorio hermético.....	72
Figura 33. Diseño del reservorio hermético para montaje	75
Figura 34. Simplificación del análisis de la unión de la brida con el tanque	75
Figura 35. Análisis grafico de la unión de la brida con el tanque	75
Figura 36. Detalles de un coupling.....	77
Figura 37. Montaje de los couplings en el reservorio hermético	77

Figura 38. Montaje del reservorio Hermético	78
Figura 39. Montaje de la prueba de hermeticidad.....	79
Figura 40. Características de direccionamiento de flujo de aceite en el tanque de pesaje	82
Figura 41. Proceso de desviación del caudal en el tanque de pesaje.	84
Figura 42. Asimetría en el perfil de velocidades.....	86
Figura 43. Válvula Diverter	87
Figura 44. Requerimientos de actuación de la válvula diverter.	87
Figura 45. Válvula electroneumática.	89
Figura 46. Montaje válvula diverter	90
Figura 47. Alineador del diverter y su despiece	90
Figura 48. Montaje del diverter en el alineador.	91
Figura 49. Montaje del alineador con el diverter , en la estructura metálica	91
Figura 50. Montaje de la válvula electroneumática y el cilindro neumático en el alineador	92
Figura 51. Estructura metálica, soporte para el patrón gravimétrico	93
Figura 52. Análisis de deformación y esfuerzos de la estructura en SAP 2000.....	93
Figura 53. Ubicación de los tramos 1 y 39.....	94
Figura 54. Estructura metálica con reservorio hermético montado	98
Figura 55. Picnómetro de volumen nominal de 50 ml	102
Figura 56 Sensor de temperatura tipo RTD	103
Figura 57. Vistas isométricas del montaje del patrón final gravimétrico.....	106
Figura 58. Conexiones del sistema de tubería de descarga	107
Figura 59. Montaje final del Patrón primario gravimétrico	108
Figura 60. Esquema de prueba de excentricidad	112
Figura 61. Histeresis de la balanza	113
Figura 62. Esquema de trazabilidad de los instrumentos del patrón gravimétrico ..	119
Figura 63 Trazabilidad de las mediciones de volumen.	121
Figura 64. Representación grafica de los resultados en una intercomparación	122
Figura 65. Verificación de trazabilidad por comparación.	122
Figura 66 Curva de desempeño del patrón gravimétrico y de la campana gasométrica	128
Figura 67 Verificación grafica de la intercomparación del gravimétrico con la campana.	129
Figura A.68. Viscosidad de un fluido newtoniano	138
Figura A.69. Flujo laminar y turbulento	142

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades admisibles del aceite mineral a utilizar	30
Tabla 2. Propiedades del aceite mineral utilizado.....	31
Tabla 3. Módulos SNAPs para el acondicionamiento de señales	37
Tabla 4. Iteración para hallar el diámetro y la cabeza piezométrica optimas.	48
Tabla 5. Iteración para ramificación de la tubería.....	50
Tabla 6. Dimensionamiento preliminar de las boquillas.....	53
Tabla 7. Pérdidas totales en la tubería del gravimétrico.	54
Tabla 8. Resultados de la iteración final para hallar las dimensiones de la sección transversal de la boquillas	57
Tabla 9. Conexiones del divisor.....	58
Tabla 10. Selección de válvulas	62
Tabla 11. Especificaciones de la válvula de globo seleccionadas para las boquillas C y D.....	63
Tabla 12. Especificaciones de la válvula de aguja seleccionada para bajos caudales	63
Tabla 13 Matriz solución del calculo del reservorio hermético	70
Tabla 14.Comparación de las alternativas de material para la construcción del reservorio	71
Tabla 15. Propiedades de la fibra de vidrio	74
Tabla 16. Tipo reconexiones utilizadas para el reservorio hermético	76
Tabla 17. Especificaciones para la construcción del reservorio hermético.....	78
Tabla 18. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de 8963.18Pa (860 mm deH ₂ O).	80
Tabla 19. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de 5486.23 Pa (560 mm de H ₂ O).	80
Tabla 20. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de 3262.35 Pa (860 mm de H ₂ O).	80
Tabla 21. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de -2605 Pa.....	81
Tabla 22. Características generales del cilindro neumático para la actuación del diverter.	88
Tabla 23. Características generales de la válvula electroneumática.	89
Tabla 24. Propiedades del material al utilizar en la estructura metálica.	93
Tabla 25. Desplazamiento y rotación de cada nodo para evaluar deformación.	95
Tabla 26. Análisis de esfuerzos de la estructura metálica por el método AISC-ASD89.	96
Tabla 27. Cargas y esfuerzos máximos en la estructura metálica.....	97
Tabla 28. Material utilizado para la construcción de la estructura metálica.....	97
Tabla 29 Instrumentación necesaria para la adquisición de datos	99
Tabla 30. Especificaciones de la balanza	100
Tabla 31 Características generales del Picnómetro	102

Tabla 32 Características generales de la balanza	102
Tabla 33 Características generales del sensor de temperatura del aceite en el reservorio hermético.	103
Tabla 34 Características generales del sensor de temperatura del aire en el reservorio hermético	104
Tabla 35. Especificaciones del modulo, para acondicionamiento de las RTD.	105
Tabla 36. Especificaciones del modulo, para acondicionamiento de las RTD	105
Tabla 37. Datos del informe de calibración de la balanza	115
Tabla 38. Resultados calibración del picnómetro.	116
Tabla 39. Calibración Higrómetro.	117
Tabla 40. Calibración sensor de presión marca Vaisala	117
Tabla 41. Medición de la densidad con el picnómetro	124
Tabla 42 Datos de la calibración de un medidor de diafragma con el patrón gravimétrico	125
Tabla 43 Datos de la calibración de un medidor tipo diafragma con la campana gasométrica.....	125

LISTA DE APENDICES

APENDICE A. GENERALIDADES DE MEDICION DE FLUJO	134
APENDICE B. METROLOGÍA.....	154
APENDICE C. INCERTIDUMBRE DE LA MEDICION.....	160
APENDICE D. ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE DEL PATRON GRAVIMÉTRICO	182
APENDICE E. PROCEDIMIENTO PARA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE DIAFRAGMA CON EL PATRON GRAVIMÉTRICO.....	200
APENDICE F. PROCEDIMIENTO PARA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES TIPO CAMARA HUMEDA CON EL PATRON GRAVIMETRICO.....	¡Error!

Marcador no definido.

RESUMEN

TÍTULO:
RECUPERACION DE LA CAPACIDAD OPERATIVA Y OPTIMIZACIÓN DEL BANCO PATRON GRAVIMETRICO DEL CDT DE GAS PARA CALIBRACION DE MEDIDORES DE GAS POR EL METODO DE ASPIRACION.

AUTOR:
Jose Augusto Fuentes Osorio. **

PALABRAS CLAVES:
Metrología, Medición de gas, Patrón primario, trazabilidad, intercomparación.

DESCRIPCIÓN:

Este documento contiene la información detallada del rediseño, optimización y puesta en marcha del patrón gravimétrico del CDT de Gas para calibrar medidores de gas por debajo de los 50 dm³/min, por el método de aspiración. Este proyecto hace parte de una propuesta realizada por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) a COLCIENCIAS, para realizar en conjunto con la Escuela de Ingeniería Mecánica apropiación de tecnología, mediante el diseño, construcción y calibración de medidores de gas tipo cámara húmeda. Donde se utiliza el patrón gravimétrico para calibrar las cámaras húmedas en los bajos caudales.

Este libro presenta en primer lugar que el sistema esta ubicado dentro del nivel de jerarquía, como un patrón primario por sus altas cualidades metrológicas y por estar referenciadas a patrones nacionales de masa, densidad, temperatura, presión. Posteriormente se describe el estado inicial de cada componente del banco, se realiza una evaluación de los inconvenientes que presenta el sistema en su parte física y la insuficiencia en instrumentación para una completa adquisición de datos y se da una propuesta de solución a todos los problemas. Luego se realiza el rediseño y construcción de todos los componentes y adquisición de instrumentos que hacen parte del patrón gravimétrico, según requerimientos definidos por la evaluación y análisis hecho al anterior sistema, y requerimientos necesarios para obtener un patrón primario para medición de volumen de Gas.

Para realizar mediciones confiables con el patrón gravimétrico, se calibran todos los instrumentos de medición, como son la balanza, picnómetro, sensores de presión, sensores de temperatura, etc. Obteniendo además trazabilidad a la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC). El procedimiento de calibración del gravimétrico se valida realizando una intercomparación con otro patrón primario, que en este caso es la campana gasométrica, obteniendo resultados metrológicos, que lo admiten como patrón primario.

* Trabajo de Grado

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

SUMMARY

TÍTULO:

RECOVERY OF THE OPERATIVE CAPACITY AND OPTIMIZATION OF GRAVIMETRIC STANDARD OF CDT DE GAS USED TO CALIBRATE GAS METER THROUGH SUCTION METHOD.*

AUTHOR:

Jose Augusto Fuentes Osorio. **

KEYWORDS:

Metrology, gas measurement, primary standard, traceability, intercomparison.

DESCRIPTION:

In this document there is a specific information about redesign, optimization and set the operation the gravimetric standard of CDT de GAS to calibrate gas meters lower than 50dm³/min, by means of suction method. This project is an proposition. CDT de GAS to COLCIENCIAS, together with mechanical engineering school to advance technologically, by means of the design, construction and test meter calibration is made with the gravimetric standard in low fluid flows.

This book describe the project like a primary standard for its metrologic characteristics and all gravimetric instrumentation calibrate with national standards in (pressure, temperature, density, mass, thus the gravimetric standard a make sure that balance, pycnometer, pressure transmitters, RTD's display real values, the sic give traceability a gravimetric instruments. a second parts of this book is as descriptions of initial condition of calibration bench parts , physical problems, optimisation of data acquisition through a good selection of new instruments, carefully propositions and solutions of each one of them.

Finally, redesign, construction of each one of parts and shopping of the instruments gravimetric in accordance with the analysis made to old system to get the requirements for a primary standard in gas volume measurement.

* Degree Work

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

INTRODUCCION

El crecimiento sostenido de la industria del gas en Colombia, impulsado por el constante aumento de la demanda de este fluido en sus múltiples aplicaciones, el que ha ido sustituyendo en virtud de sus ventajas a otros energéticos motivando que la industria del gas pase a tomar importancia como factor de desarrollo económico.

Si bien es una realidad que el gas en Colombia ha adquirido un papel protagónico en la balanza de energéticos, por diversos motivos la infraestructura y los sistemas de medición de gas con que cuenta el país, no ofrecen un respaldo suficiente que garantice credibilidad en las mediciones.

El Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) ha promovido el fortalecimiento de la infraestructura y el soporte tecnológico para la realización de calibraciones de medidores de gas hasta un caudal de 500 m³/h brindando de esta forma, soporte confiable en el campo de la medición del gas. Las calibraciones se realizan con diferentes tipos de patrones, asociado cada uno a una tecnología diferente.

En el rango de 0.016 a 25 m³/h emplea un patrón primario tipo campana gasométrica, con una alta confiabilidad en sus mediciones en caudales por encima de 0.5 m³/h, aunque por debajo de este caudal su rendimiento disminuye considerablemente.

El CDT de GAS junto con la Universidad Industrial de Santander, conscientes del compromiso de brindar al país alternativas de solución, desarrollo tecnológico y soporte técnico en la medición de flujo de gas para bajos caudales, desarrollaron un proyecto ejecutado por los estudiantes David Hernández Mendoza y Bossuet Leonardo Cely Guezguán, en el año 2002, del cual se obtuvo la construcción de un

prototipo de patrón gravimétrico para calibrar medidores de volumen de gas por el método de aspiración de aire para caudales inferiores a $3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Este proyecto demostró viabilidad para la construcción de un patrón gravimétrico para calibración de medidores de gas, dejando las bases para su diseño y construcción definitiva. El prototipo construido reproduce los fenómenos de flujo que soportan su concepción, pero no posee las características metroológicas adecuadas, dada su calidad de prototipo.

El presente proyecto de grado continúa la línea de investigación y conserva el proceso evolutivo para la obtención de un patrón primario tipo gravimétrico a través del rediseño, optimización y construcción del patrón definitivo gravimétrico para calibrar medidores de gas por el método de aspiración. Para tal fin se hizo un barrido tecnológico orientado hacia los diferentes centros nacionales de metrología donde poseen este tipo de patrones y de artículos científicos relacionados, no obstante, las bases suministradas por el anterior proyecto, la experiencia y el soporte tecnológico con que cuenta el Laboratorio de Calibración y Ensayos del CDT de GAS sirvieron para alcanzar los objetivos propuestos mediante el empleo de bases teóricas de mecánica de fluidos y el uso de herramientas computacionales.

Este trabajo de grado se enmarca dentro de un proyecto patrocinado por COLCIENCIAS, cuyo objetivo principal es el diseño, construcción y calibración de medidores de gas tipo Cámara Húmeda. El patrón gravimétrico se construyó para poder calibrar las cámaras húmedas en los bajos caudales.

El resultado del desarrollo de este proyecto de grado es la obtención de un patrón primario gravimétrico para calibrar medidores de gas en el rango de 0.016 a $3 \text{ m}^3/\text{h}$, con una incertidumbre relativa de 0.15% y trazabilidad de todos sus instrumentos a la Superintendencia de Industria y comercio.

1. SISTEMAS DE CALIBRACIÓN

1.1. MEDICION

Medir es comparar con algo (**unidad**) que se toma como base de comparación. Ese algo con lo que se va a comparar debe tener ciertas características de estabilidad para que siembra se pueda medir lo mismo a través del tiempo.

El procedimiento de cómo medir para obtener resultados reproducibles también es importante y de hecho existen instrucciones precisas sobre cómo hacer la acción, qué unidades emplear y qué patrón utilizar.

En el mundo real la forma de medir obedece a lo siguiente:

- decidimos qué mediremos,
- seleccionamos la unidad acorde a la medida,
- seleccionamos el instrumento de medición (calibrado),
- aplicamos el procedimiento acordado.

La metrología es una ciencia en constante evolución que genera cambios y mejoras que se dan en todos los aspectos relacionados con mediciones.

La creciente colaboración entre metrologos de diversos países está, por su parte, ayudando a crear enfoques y formas de trabajo aceptados a nivel internacional. Los métodos uniformes de medición se han establecido para que todos podamos trabajar sobre la base de una misma magnitud o unidad conocida y asegurar que los resultados de toda calibración, verificación y ensayo, en cualquier laboratorio o empresa, garantice la compatibilidad y la calidad.

En la actualidad, acorde con el enfoque global, cada vez son más los países que están adoptando por ley el **Sistema Internacional de Unidades SI**, basado en el sistema métrico decimal, con la consiguiente adopción de los patrones y técnicas de medición correspondientes.

Cuarenta y ocho naciones han suscrito el Tratado de la Convención del Metro, en el que se adoptó el Sistema Internacional de Unidades (SI). La Convención otorga autoridad a la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM – Conferencia General de Pesas y Medidas), al Comité International des Poids et Mesures (CIPM –

Comité Internacional de Pesas y Medidas) y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM – Oficina Internacional de Pesas y Medidas), para actuar a nivel internacional en materia de metrología.

La CGPM está constituida por representantes de los países miembros y se reúne cada cuatro años en París, Francia; en ella se discuten y examinan los acuerdos que aseguran el mejoramiento y diseminación del Sistema Internacional de Unidades (SI); se validan los avances y los resultados de las nuevas determinaciones metrológicas fundamentales y las diversas resoluciones científicas de carácter internacional, y se adoptan las decisiones relativas a la organización y desarrollo del BIPM.

Para asegurar la unificación mundial de las mediciones físicas, el BIPM:

- establece los patrones fundamentales y las escalas de las principales magnitudes físicas,
- efectúa y coordina las determinaciones relativas a las constantes físicas,
- conserva los prototipos internacionales,
- coordina las comparaciones de patrones mantenidos en los laboratorios nacionales de metrología,
- asegura la coordinación de las técnicas relacionadas con las mediciones.

1.2. CALIBRACION

La calibración se define como el conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un aparato o sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada y los valores conocidos correspondientes de una magnitud medida a partir de un patrón estándar¹.

La única forma de saber si la lectura de un instrumento cualquiera de medición (termómetro, manómetro, etc.) es correcta, es si está calibrado con un patrón de

¹ Definición tomada del VIM (Vocabulario Internacional de Metrología)

referencia reconocido, y que este patrón sea trazable a los patrones nacionales mantenidos por el Centro Nacional de Metrología. El costo de no atender esto puede llegar a ser desastroso. La calibración es crucial para las empresas, principalmente en las actividades de producción, desarrollo e investigación.

El envejecimiento de los componentes, los cambios de temperatura y el estrés mecánico que soportan los equipos deteriora poco a poco sus funciones. Cuando esto sucede, los ensayos y las medidas comienzan a perder confianza y se resienten tanto el diseño como la calidad del producto. Esta realidad no puede ser eludida, pero sí detectada y limitada, por medio del proceso de calibración.

La correcta calibración de los equipos proporciona la seguridad de que los productos o servicios que se ofrecen reúnen las especificaciones requeridas. Cada vez son más numerosas las razones que llevan a los fabricantes a calibrar sus equipos de medida, con el fin de:

- Mantener y verificar el buen funcionamiento de los equipos
- Responder a los requisitos establecidos en las normas de calidad
- Garantizar la fiabilidad y trazabilidad de las medidas.

La calibración de un instrumento permite determinar su incertidumbre, valor fundamental, dentro de un sistema de calidad, para la agrupación de los instrumentos en categorías metroológicas para su posterior utilización. El resultado de una calibración es lo que se recoge en el certificado de calibración.

A partir de la calibración de un instrumento se puede concluir que:

- El resultado de una medición permite estimar los errores de indicación del aparato de medición, del sistema de medición y de la medida materializada.
- Se puede también determinar otras propiedades metroológicas del instrumento en calibración.
- El resultado de una calibración debe ser consignado en un documento, algunas veces llamado "certificado de calibración" o "informe de calibración".

- El resultado de una calibración es algunas veces expresado en forma de un "factor de calibración" o de una serie de factores en forma de una "curva de calibración".

Cuando se evalúa un programa de calibración se debe estar enterado de ciertos términos y técnicas básicas, y estar preparado para preguntar al agente de calibración si éste dispone de los requerimientos básicos para la trazabilidad² con el organismo nacional de metrología.

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.

Paras que un proceso sea considerad calibración, el laboratorio debe estar acreditado, y con lo que se va comparar el elemento a calibrar sea considerado como patrón de calibración ante el organismo encargado de vigilar las mediciones de cualquier parámetro a nivel nacional.

1.3. PATRONES DE CALIBRACIÓN

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.

Algo con que comparar; ese algo se conoce como patrón.

Originalmente, se entendía por patrón a una representación o materialización física de la unidad. Es necesario destacar que un patrón es una representación confiable de la unidad solamente bajo un conjunto de condiciones claramente definidas para

² Ver definición de trazabilidad en la sección 1.4

asegurar que no cambien estas condiciones por motivo de variaciones, por ejemplo, de temperatura, humedad, presión atmosférica, etc.

Por sus características, el patrón físico no se empleaba directamente para hacer mediciones. Era, eso sí, el punto de referencia para construir y utilizar instrumentos de medición.

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 medición .³

Los patrones pueden ser internacionales, es decir, que esta reconocidos por acuerdo internacional, y nacionales, es decir, que están reconocidos por acuerdo nacional y tienen la responsabilidad de diseminar las unidades **SI** a los laboratorios acreditados de calibración a sus respectivos países.

Los patrones pueden clasificarse en:

1.3.1. Patrones primarios

Los patrones primarios son los de mayor jerarquía metrológica (con las mejores características metrológicas) dentro de un área específica, obtenidos como resultado de la realización o reproducción de la definición de la unidad. En estos patrones su valor se acepta sin referenciarse a otro patrón de la misma magnitud.

Este procedimiento de calibración garantiza el menor error posible de precisión, y a través de la trazabilidad⁴ minimiza el error sistemático.

Ejemplo de patrones primarios están los calibradores de desplazamiento positivo, calibradores de flujo en circuito continuo y calibradores tiempo-peso.

³ Definición Tomada del VIM (Vocabulario Internacional de Metrología)

⁴ Definición de trazabilidad, consúltela en la seccion1.4.

En la medición de flujo de gas existen varios patrones primarios. Y La selección de un patrón para una prueba metrológica específica, depende del rango de capacidad de presión del medidor de gas bajo prueba y de la incertidumbre generada por el patrón. Debe asegurarse además, que no se presente una interacción metrológica entre el estándar y el medidor, es decir, que la correcta operación del estándar no dependa en ningún momento del medidor bajo prueba.

Entre los patrones mas reconocidos internacionalmente se encuentran:

Patrón primario tipo Campana Gasométrica. El Patrón consta de un tanque que rodea un pozo seco para formar una doble pared. El volumen anular formado por las dos paredes se llena casi hasta su borde con un aceite sellante. Un tanque invertido abierto en el fondo y terminando en un domo en la parte superior, llamado campana, está suspendido mediante unos contrapesos y se mueve en el espacio ocupado por el aceite sellante. El aceite actúa como sello, impidiendo que el gas entre o salga de la campana excepto a través de una tubería que va al pozo seco. Un contrapeso mayor es usado para mantener la presión deseada en el probador, compensando el peso de la campana. Otro contrapeso menor es suspendido desde una polea cicloide para compensar la fuerza de flotación de la campana, que cambia con la inmersión de ésta en el líquido sellante. La cicloide y el contrapeso mantienen la presión constante durante la prueba. La campana está localizada concéntricamente en el tanque por medio de rodillos y varillas guías que proveen estabilidad lateral cuando ésta se mueve hacia arriba o hacia abajo. (Véase la Figura 1).

Figura 1. Campana gasométrica



Fuente: Centro de desarrollo tecnológico del gas

Patrón primario tipo Pistón. El uso del Patrón tipo pistón está basado en la medición de un volumen recolectado en una unidad de tiempo a temperatura y presión dadas. Este probador está diseñado para operar a presión y temperatura ambiente. El mecanismo, (véase la Figura 2) consiste en un tubo de vidrio dentro del cual está posicionado un pistón plástico con un diámetro ligeramente menor. Una ranura horizontal retiene al mercurio el cual disminuye la fricción y sirve de sello entre el pistón y el tubo de vidrio.

En el tubo de vidrio se establecen el punto muerto superior e inferior que limitan la carrera del pistón. En estos puntos son instalados sensores ópticos o encóderes que indican la posición del pistón, dando la señal a la válvula diverter de suspender la operación de entrega de fluido o indicar la finalización de la prueba, cuando el volumen contenido en el probador es totalmente desalojado. El incremento de la presión durante la ejecución de la prueba no debe ser mayor a 5 mBar.

Figura 2. Probador tipo pistón



Fuente: Centro Nacional de Metrología -Mexico

Patrón primario gravimétrico por aspiración.

El patrón gravimétrico por aspiración consiste de un recipiente hermético que contiene un aceite de baja presión de vapor (con lo cual se garantiza una baja evaporación), el aceite desciende hasta una válvula “diverter” que se encarga de 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 luego de realizada una calibración.(Ver figura 7)

Un juego de válvulas entre el tanque y el diverter se manipula para obtener el caudal de calibración deseado, estando el flujo desviándose hacia el tanque intermedio, una

vez ajustado el caudal, se da la orden de desviar el flujo hacia el tanque de pesaje, mediante el accionamiento de un cilindro neumático, cuando el volumen de calibración ha pasado por el medidor en prueba, se desvía de nuevo el flujo y se registra el peso en la balanza, siendo un pesaje estático.

El medidor en prueba está conectado a la parte superior del reservorio hermético, donde se genera una diferencia de presiones por el aceite en descenso, generándose una aspiración de aire.

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

(Vea mas detalles en el siguiente capitulo)

1.3.2. Patrones secundarios

Un patrón secundario es un medidor que al ser verificado y calibrado previamente por un patrón primario, presenta porcentajes de error⁵ e incertidumbre⁶ bastante bajos; por lo tanto, puede utilizarse como patrón para calibrar otros instrumentos de medición.

Dentro del ámbito de la medición del volumen de gas, los patrones secundarios más representativos se describen a continuación.

Medidor tipo cámara húmeda

Las cámaras húmedas son medidores de flujo volumétrico de desplazamiento positivo, con alta exactitud y baja incertidumbre para mediciones de volumen y caudal de gas relativamente pequeñas, por tal motivo son ampliamente utilizadas como patrón secundario para calibrar otros tipos de medidores.

⁵ Ver apéndice A

⁶ Ver apéndice C

Al iniciar la medición, el volumen de gas es confinado en las cámaras del tambor que es la parte rotativa y primaria del medidor, constituida por una serie de láminas dobladas en un ángulo determinado. Cuando se intenta desalojar el aceite o el agua se produce una fuerza que, por su baja inercia y fricción, hace girar el eje del tambor. El eje del tambor es conectado a un indicador a través de un juego de engranajes. La carátula del indicador es graduada para la máxima capacidad del medidor. Algunos modelos pueden leer hasta 0.003 litros.

Este tipo de probador consta de un tambor que contiene cuatro cámaras de medición, separadas por igual número de compartimientos radiales montados sobre un eje rotatorio. Un cilindro contiene al tambor; dicho cilindro se llena aproximadamente al 60% de su volumen con agua o con un aceite de baja presión de vapor y baja viscosidad, que permite sellar las cámaras radiales. (Véase la Figura 3).

Figura 3. Cámara Húmeda



Fuente: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

Medidor tipo Boquilla Sónica

La tobera sónica, también conocida como boquilla sónica, es uno de los dispositivos más exactos utilizado en medición de flujo de gas a alta y/o baja presión, con buena trazabilidad de masa y tiempo. Al no poseer partes móviles, las boquillas no son

afectadas por las perturbaciones propias del flujo. Estos dispositivos no solamente proveen una manera confiable y precisa de medir flujo de gas, sino que también son muy estables y garantizan una alta repetibilidad. (Véase la Figura 4)

Figura 4. Boquilla Sonica



Fuente: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

En este tipo de sistema de medición de gas el flujo es acelerado a una velocidad crítica en la garganta, igual al valor local de la velocidad del sonido ($M = 1$). A esta velocidad crítica, la rata de flujo de gas atravesando la tobera vénturi es la máxima posible para las condiciones existentes aguas arriba de la tobera sónica. El flujo una vez alcanza su condición crítica, no es influenciado por las condiciones aguas abajo.

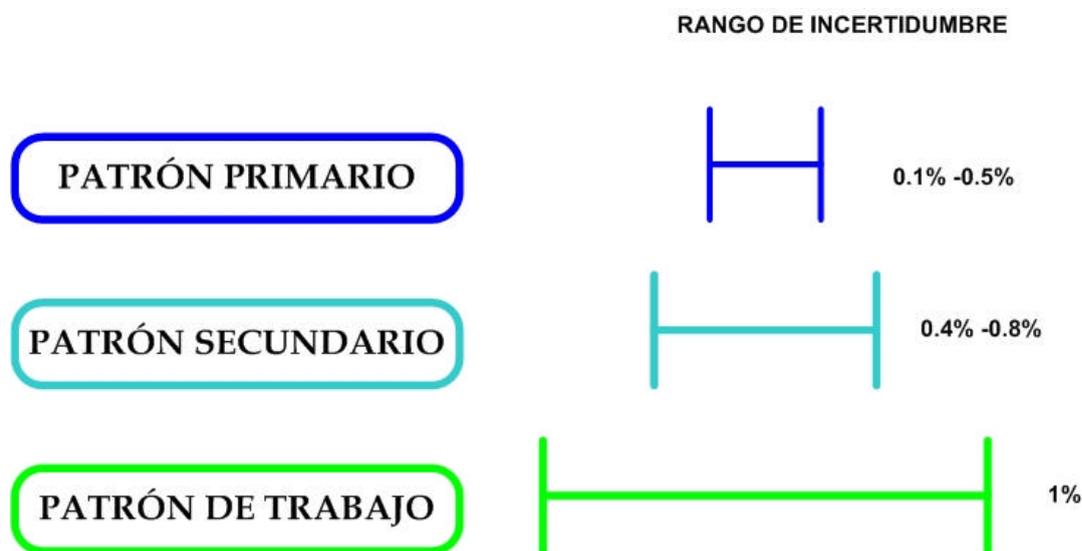
1.3.3. Patrones de trabajo

Es el patrón utilizado corrientemente para controlar medidas materializadas, aparatos de medición o materiales de referencia

Patrón que se utiliza rutinariamente para calibrar o comprobar instrumentos de medición, en el sitio de trabajo. Los patrones de trabajo mas comunes son los Medidores tipo diafragma que se explican en el apéndice A.

En la figura 5, se representan los tipos de patrones de acuerdo a un orden de jerarquía con respecto a la incertidumbre. A mayor jerarquía, el patrón tiene porcentajes de incertidumbre más bajo, pero su utilización se hace poco práctica; a menor jerarquía se inducen errores sistemáticos y de precisión que deben tenerse en cuenta, pero su utilización es más generalizada.

Figura 5. Jerarquía de los patrones según su incertidumbre



Fuente: El autor

1.4. TRAZABILIDAD DE LOS PATRONES

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 a continuación hablaremos.

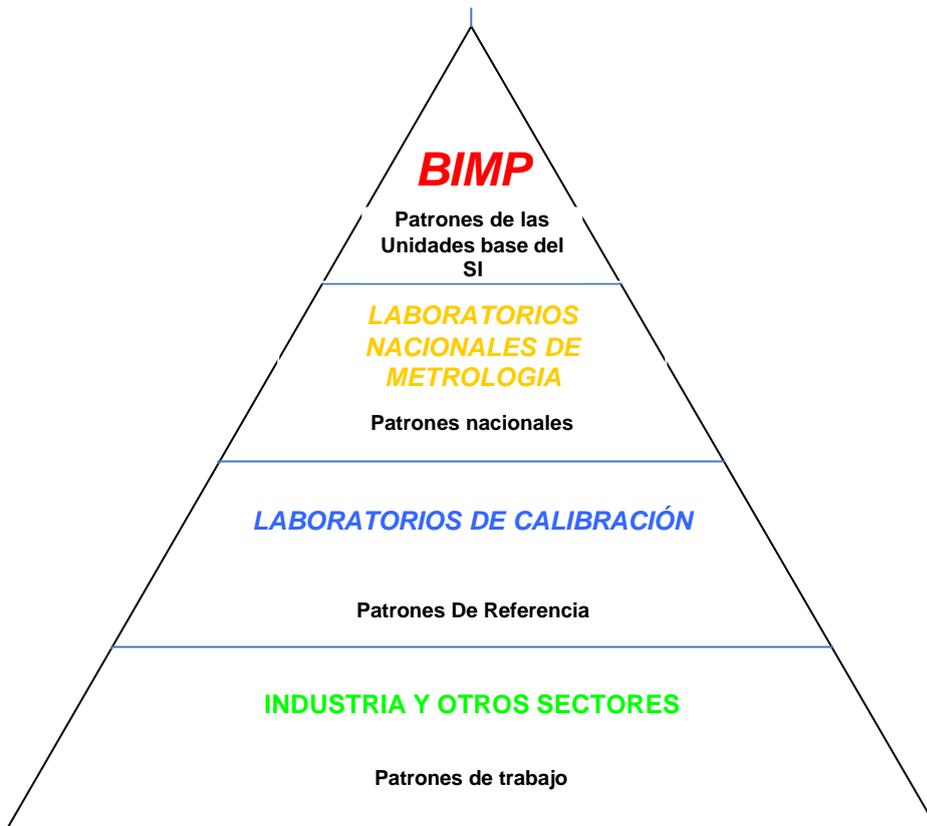
La calibración de los instrumentos se debe realizar en función de patrones que sean trazables. Para ello, existen organismos encargados de custodiar patrones de distintas características de medición.

Podemos describir esta red metrológica 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 patrones de trabajo a nivel operativo. El conjunto de patrones del nivel operativo (patrones de trabajo) constituye la base de la pirámide. La cadena de instituciones encargadas de operar el **SI** está encabezada por el BIPM, le siguen los laboratorios Nacionales de Metrología, a continuación están los Laboratorios de Calibración y por último los Laboratorios de Trabajo. Los laboratorios nacionales de metrología, custodian los **patrones nacionales** y tienen la responsabilidad de diseminar las unidades SI a los laboratorios acreditados de calibración de sus respectivos países.

Los laboratorios de calibración aseguran que los equipos de medición así como los patrones de referencia y de trabajo estén acordes con los patrones nacionales. Los laboratorios de ensayos, en el nivel de trabajo, son los encargados de evaluar la conformidad de productos que van a ser certificados. Para sus trabajos, utilizan **patrones de referencia**, que son calibrados contra los patrones nacionales del estrato anterior y son los de la mas alta calidad en una organización dada, de la cual se derivan las mediciones que se hacen en dicho lugar.

Finalmente, encontramos las organizaciones o instituciones que utilizan los **patrones de trabajo** para controlar las medidas materializadas, aparatos de medición o materiales de referencia empleados por la industria y otros sectores, los cuales suelen ser calibrados contra patrones de referencia y éstos a su vez contra patrones nacionales.

Figura 6. Pirámide de la red metrológica



Fuente: El autor

Hay que aclarar que los patrones primarios no se calibran con ningún otro patrón de la misma magnitud. Para obtener trazabilidad se realiza una intercomparación con un patrón también primario de la misma magnitud que tenga mejores cualidades metrológicas y que tenga trazabilidad a la BIMP. La intercomparación se realiza a través de los **patrones de transferencia**.

2. EVALUACIÓN DEL ESTADO INICIAL DEL PATRÓN GRAVIMÉTRICO DEL CDT DE GAS PARA CALIBRAR MEDIDORES DE FLUJO DE GAS POR EL METODO DE ASPIRACIÓN.

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PATRON GRAVIMÉTRICO

El Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de gas), realiza la calibración de medidores de flujo de gas hasta los 416.66 dm³/min, con un patrón primario tipo campana gasométrica. Sin embargo, el desempeño de este patrón para caudales inferiores a 8 dm³/min es muy bajo y se hace necesario el desarrollo de un patrón de calibración que supla esta deficiencia.

Después de un análisis preliminar y evaluación de costos realizado en el proyecto anterior entre un sistema de calibración de desplazamiento positivo, sistema de calibración por transferencia y sistema de calibración por el método de aspiración de aire, se encontró que este último, era el más indicado para suplir las necesidades planteadas. Posteriormente se construyó un prototipo basado en la Norma ASTM D – 1071, Standard Test Methods for Volumetric Measurement of Gaseous Fuel Samples, y Proyecto e construção de Sistema de Aferição de Medidores de Vazão de Gás por Aspiração (IX Congreso Brasileño de Ingeniería Mecánica) y el cual se describe a continuación.

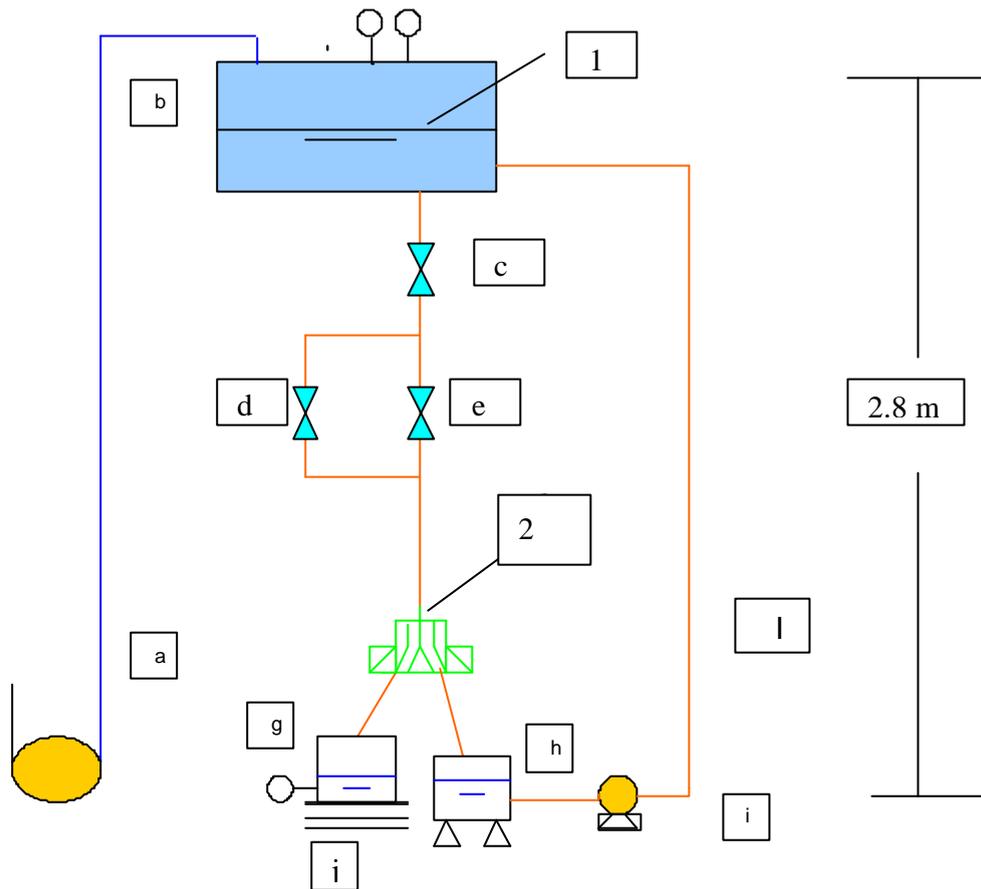
Una tubería A (Vea figura 7) aguas abajo del medidor, se conecta a la parte superior del reservorio hermético B, ubicado a una altura de 2.5 m. El reservorio hermético contiene un volumen total de 150 litros de aceite de baja presión de vapor y baja viscosidad.

La válvula de bola C, funciona como un dispositivo de corte de flujo, es decir, todo o nada. Las válvulas de globo D y E funcionan como un primer dispositivo de regulación de caudal, mientras que la válvula F proporciona un ajuste fino del caudal para las diferentes pruebas.

La válvula diverter G, ubicada en la parte inferior del sistema y accionada neumáticamente, deriva el flujo de aceite desde el reservorio hermético hacia el

tanque de pesaje H o hacia el tanque de recolección I.

Figura 7. Patrón Gravimétrico inicial



Fuente: El autor

Sobre la balanza J se encuentra ubicado el tanque de pesaje, que está comunicado con el tanque de recolección por medio de una tubería K y una válvula de bola L.

El aceite del tanque de pesaje pasa por gravedad al tanque de recolección, mientras que el aceite depositado en el tanque de recolección, es retornado al reservorio hermético a través del sistema hidráulico de recirculación de aceite M.

En la parte superior del reservorio hermético se instala un termopozo y una termocupla tipo J, que censa la temperatura del aceite.

La caída de presión en el medidor bajo prueba, se determina a partir de un diferencial de presión instalado a la entrada y a la salida del medidor, según recomendaciones de la PTB⁷.

Para determinar la temperatura a la entrada y a la salida del medidor, se utilizan RTDs ubicadas según recomendaciones de la PTB.

- Sala de ensayo. Según recomendaciones de la PTB, las instalaciones de ensayo para medidores de volumen de gas deben estar ubicadas en salas de ensayo suficientemente amplias, para asegurar que los medidores de gas a ser ensayados y los medios utilizados para el ensayo no estén sometidos unilateralmente a influencias del calor provenientes de la radiación solar, calefactores u otras fuentes. La temperatura en los lugares de ensayo no debe fluctuar en más de 1 °C por día, respetando siempre el rango de temperatura de 20 ± 1 °C. Por lo tanto las salas destinadas a los ensayos deben tener en lo posible pocas paredes exteriores, no estar ubicadas inmediatamente debajo del techo y de ser posible no deben tener ventanas. Las puertas de acceso o de comunicación con salas contiguas con temperaturas sustancialmente diferentes deberían tener una esclusa o ser puertas dobles y las salas deben tener un sistema de circulación de aire de capacidad adecuada, sin que la aireación perturbe la constancia requerida en la temperatura.

Motores y otras máquinas productoras de vibración no deben ubicarse en el interior de la sala. El aire de ensayo debe estar libre de polvo y aceite. Bajo ninguna circunstancia, la humedad relativa debe producir condensación.

La estabilidad global de la temperatura en las salas de ensayo debe ser tal que todos los puntos de medición de temperatura que sean significativos para el ensayo, en los patrones y en los elementos a ser ensayados (después de haber alcanzado una

⁷ PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt), (Instituto Nacional de Metrología Alemán)

estabilización de temperatura suficiente), antes de comenzar los ensayos, la temperatura no difiera en más de 1°C de la temperatura media medida en las vecindades de los patrones y elementos a ensayar.

2.2. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Procedimiento técnico de calibración.

Ajuste del caudal deseado para la prueba. La válvula diverter se coloca hacia el tanque de recolección, se abre la válvula de bola y con las válvulas de globo y aguja se regula el caudal deseado para la prueba. Se toma como volumen de referencia el entregado por el medidor en un ciclo completo. Con un cronómetro se determina el tiempo del ciclo y con la relación $V - t - Q$, se evalúa el caudal que está pasando a través del medidor y se verifica si el caudal está acorde con la norma estipulada para la calibración de estos medidores de gas. Una vez establecido el caudal de prueba, se cierra la válvula de bola y se regresa al reservorio hermético el aceite almacenado en el tanque de recolección, a través del sistema hidráulico de recirculación. De esta forma se pueden obtener los caudales de prueba requeridos para la calibración.

Ejecución de la prueba. Se abre la válvula de bola (C) y se permite un tiempo de escurrimiento de aceite Δt_1 , a partir del cual se estabiliza y uniformiza el flujo. Se determina el valor de la masa m registrado por la balanza y una vez alcanzada la lectura del volumen inicial de prueba, se acciona la válvula diverter hacia el tanque de pesaje. El cambio de dirección ocasiona una perturbación del flujo durante un tiempo Δt_2 . Debido a este tiempo, se almacena un volumen de aceite en el tanque de pesaje que afecta la medición. Se fija el volumen de prueba para el medidor (en un intervalo de tiempo Δt_3). Una vez alcanzado el volumen en el medidor, éste genera una señal que acciona nuevamente la válvula diverter hacia el tanque de recolección en un intervalo Δt_4 . Se almacena un volumen de aceite residual durante la

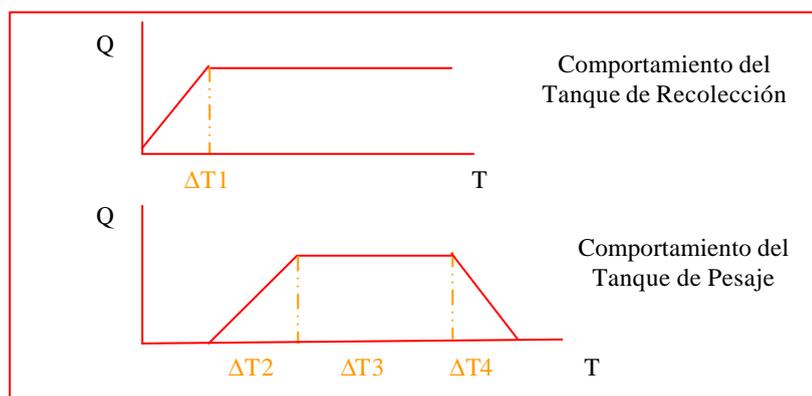
culminación de la prueba y se registra el valor de la masa m_f almacenada durante toda la prueba. (Véase la Figura 8).

La evaluación del volumen de aceite desalojado por el patrón de aspiración se determina por la relación entre la diferencia de lecturas entregada por la balanza y la densidad del aceite a las condiciones ambientales presentes en el laboratorio.

El método de pesaje del aceite utilizado, se denomina pesaje dinámico, porque registra los valores de masa inicial y final con el chorro de aceite actuando sobre la balanza.

En el procedimiento de calibración se detecta que el método de pesaje dinámico presenta el inconveniente, que en la medición de la masa se adiciona un valor por efecto de la cantidad de movimiento del chorro sobre la balanza. Para corregir este error en la medición de la masa se debe tener una completa información de la velocidad del chorro en cada instante de la prueba, con la cual no se cuenta.

Figura 8. Comportamiento ideal del flujo en los intervalos de medición ΔT



Fuente: Centro de Desarrollo tecnológico del Gas

2.3. EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PATRON GRAVIMETRICO

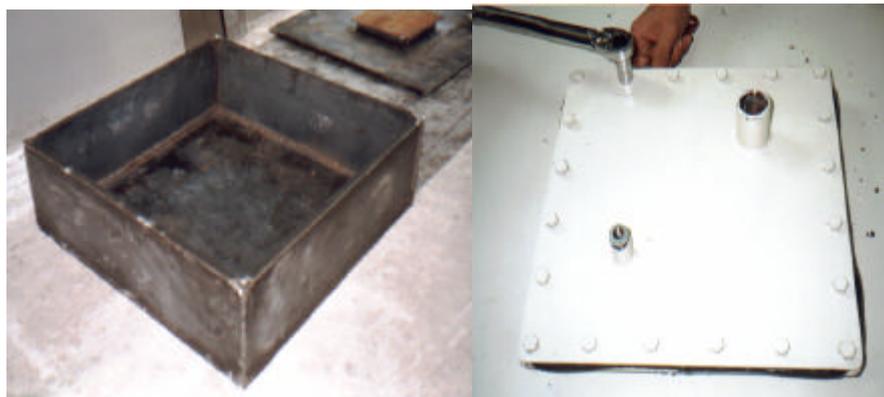
Después de la descripción general y la explicación del procedimiento de calibración del patrón gravimétrico con el fin de mostrar en que consiste el banco, a continuación se da una descripción y evaluación detallada de cada una de los componentes del patrón gravimétrico para poder detectar las partes en las cuales hay que realizar cambios y mejoras a fin de lograr una optimización del patrón. También se menciona para cada componente una propuesta para solucionar el problema que se presente.

2.3.1. Reservorio hermético

➤ Estado inicial

El reservorio hermético es un tanque de forma prismática con dimensiones interiores de 1 m * 1m * 0.3m y construido en lamina de acero carbono, laminada en frío, calibre 12. El reservorio tiene una tapa con la misma lámina y una brida con espesor de ¼" (Ver figura 9).

Figura 9. Reservorio hermético y tapa bridada.



Centro de Desarrollo tecnológico del Gas

➤ Evaluación

El reservorio hermético presenta los siguientes inconvenientes:

- La forma prismática del tanque no es recomendable, porque durante el procedimiento técnico de calibración, en el reservorio se genera vacío por efecto de la aspiración del aire, ocasionando una variación del volumen en el reservorio hermético y por tanto variando el volumen del gas y a su vez adicionado mayor incertidumbre² en la medición de esta.
- El tanque se construyó en lámina de acero al carbono y aunque se le dio un acabado con pintura electrostática, existe el riesgo de que se caiga la pintura y se corroa el tanque, por tanto existe el peligro de deterioro del tanque y contaminación del aceite hidráulico.

➤ **Propuesta**

- Diseñar y construir el reservorio de una forma geométrica que garantice la mínima deformación posible, por efecto del vacío generado.
- Construir el reservorio en un material que no presente corrosión ante la presencia del aceite mineral utilizado en el gravimétrico.

2.3.2. Sistema de tubería de descarga y realimentación del aceite

➤ **Estado inicial del sistema de tubería de descarga**

La conformación del sistema de tubería de descarga del aceite, que va desde el reservorio hermético a la válvula diverter, se puede observar en la figura 10.

Compuesto por tubería acero comercial 1" SCH 40, por tubería acero comercial ½" SCH 40, 2 tes, 2codos, válvula de globo de 1½", válvula de globo de ½", válvula de aguja de ¼", y a la salida una boquilla de acrílico (vea figura 12)

➤ **Evaluación**

- Este sistema de tubería de descarga, como se puede observar en la figura 10 , presenta muchas perturbaciones por la forma en que esta dispuesta la tubería, debido a que presenta muchos cambios de dirección del flujo, y por lo tanto contribuye a la formación de espumas que ocasiona una falsa medición de la masa de aceite.
- El sobredimensionamiento de la válvula de globo de 1 ½” con respecto a la tubería que es de 1”, origina una expansión y contracción del flujo, y a su vez genera formación de espuma en el aceite
- Se presentan cambios innecesarios de diámetro de tubería, por lo tanto contracciones y expansiones, generando en el flujo muchas mas turbulencia, y presentando el mismo fenómeno de formación de espumas que se presenta en los ítems anteriores.
- En el procedimiento técnico de calibración se contempla la medición con siete caudales diferentes para medidores tipo diafragma (41.666 dm³/min, 29.166 dm³/min, 16.666 dm³/min, 8.333dm³/min, 4.166dm³/min, 0.8dm³l/min, 0.266 dm³/min). Se observa para los 5 caudales menores, que el sistema de tubería de descarga entrega un flujo a la salida que no ocupa totalmente el área del tubo. En el espacio de tubería que no es ocupado por el aceite, se forman cámaras de aire que se convierten en restricción para el flujo y por tanto una variación del caudal al requerido.

➤ **Propuesta**

- Rediseñar el sistema de tubería de descarga, que garantice un desplazamiento de fluido mas “suave”(menor contracciones, expansiones, y cambios brusco de dirección del flujo.
- Este sistema de tubería debe tener varias ramificaciones de sección transversal de diferentes dimensiones, garantizando que para todos los

⁸ Estos caudales son definidos por la norma NTC 2728 para los medidores de diafragma

caudales se manejan, el fluido llene toda la sección transversal a la salida de la descarga.

➤ **Estado inicial de la tubería de realimentación**

Por otro lado, el sistema de recirculación es el encargado de regresar el aceite desde el tanque de recolección hasta el reservorio hermético, una vez finalizadas las pruebas de calibración. (Vea la figura11).

El sistema está compuesto por:

- Motor monofásico de ½ hp
- Acople del motor con la bomba
- Bomba de engranajes rectos con capacidad de bombeo de 1gpm
- Tubería de pvc de ½" y accesorios
- Válvula antirretorno.
- Válvula de bola.

➤ **Evaluación**

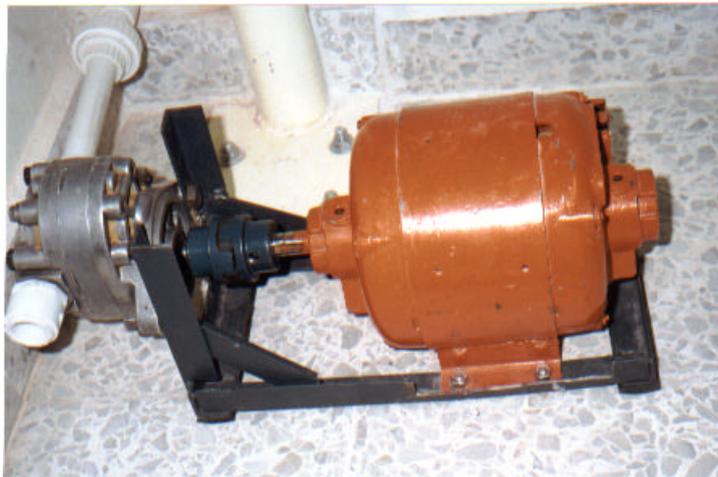
El sistema de tubería de realimentación no requiere de ningún atención especial, solo se exige verificación de fugas y posiblemente se cambiara la forma en que esta dispuesta por cuestiones de cambio de geometría del patrón.

Figura 10. Conjunto de regulación de caudal del banco de aspiración



Fuente: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

Figura 11. Sistema de recirculación de aceite



Fuente: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

➤ **Evaluación tanque de pesaje y recolección**

Adicionalmente se observa para los tanques de pesaje y recolección, una serie de fugas que afectan la medición del volumen de aceite. Y también estos tanques presentan un abombamiento cuando están parcialmente llenos de aceite, por la fuerza hidrostática que ejerce el fluido sobre las caras de los tanques, poniendo en duda la estabilidad de estos.

➤ **Propuesta**

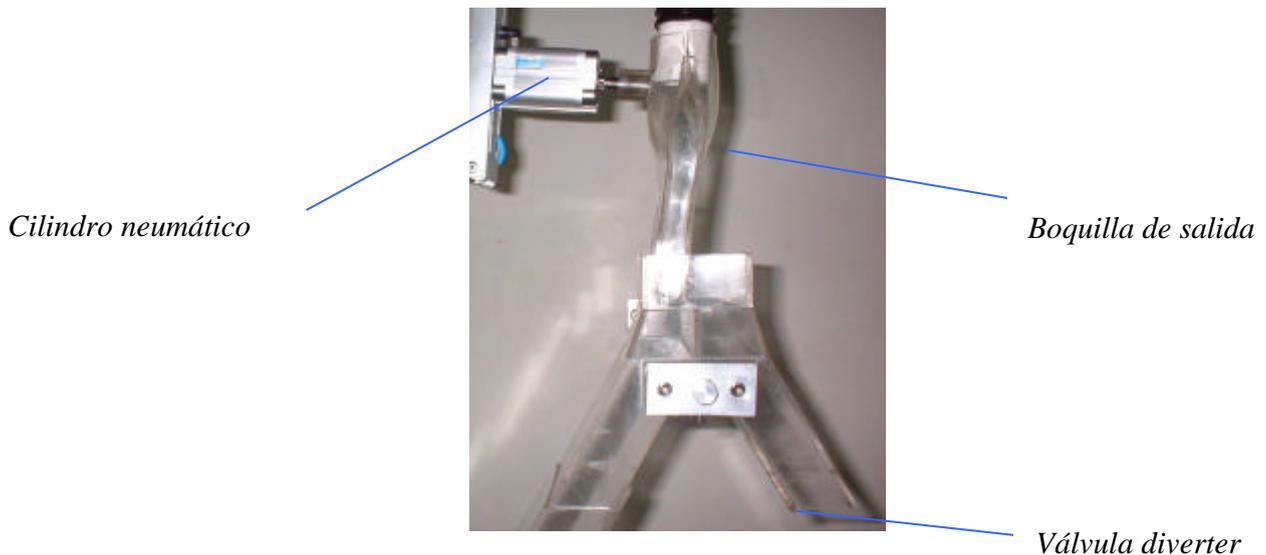
Se propone entonces construir otros tanques con laminas de mayor espesor y dimensiones longitudinales mayores para obtener mayor volumen de calibración, y verificar fugas antes de instalarla.

2.3.3. Válvula diverter

➤ **Estado inicial**

La válvula diverter se muestra en la figura 12

Figura 12. Válvula diverter



Fuente: Centro de desarrollo tecnológico del Gas

La válvula diverter es un elemento hecho en acrílico, que se encarga de direccionar el flujo hacia el tanque de pesaje o hacia el tanque de recolección. También contiene un actuador neumático que mueve la salida de tubería descarga, hacia la derecha o izquierda de la válvula diverter.

➤ **Evaluación**

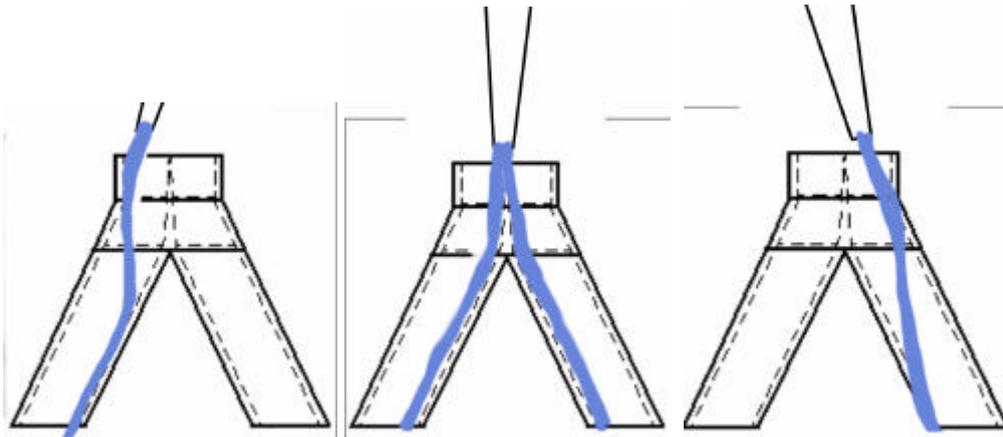
Durante el cambio de posición de la válvula diverter para direccionar el flujo de aceite del tanque de recolección al tanque de pesaje o viceversa, que se inicia y finaliza con la señal de arranque y la señal de parada respectivamente, se observa que parte de la masa de aceite de medición no llega al tanque de pesaje después de la señal de inicio y parte de la masa no llega al tanque de recolección después de la señal de parada. Porque:

- El actuador que mueve la boquilla se activa un tiempo después de la señal de arranque de la prueba (similar sucede después de la señal de parada). Esto es, porque la señal enviada por el odómetro viaja hasta el módulo de acondicionador de señal, luego el módulo envía una señal a la válvula electro neumática, y por último la válvula deja pasar aire comprimido hacia el cilindro neumático. Todo esto gasta un tiempo, y por tanto un volumen no medido y que no se está teniendo en cuenta.
- Se observa en la figura 13 que en el cambio de una posición a otra del tiempo t_2 a t_3 no todo el caudal se dirige hacia el tanque de pesaje, o hacia el tanque de recolección según ya sea el inicio o parada de medición.

La masa de aceite que se pierde en el proceso de diversión del flujo al inicio de la prueba se contrarrestaría con la masa que se adiciona al final de la prueba, solo si la velocidad del actuador neumático de efecto simple fuera la misma en la extensión del vástago y en la recogida del vástago, lo cual no sucede en esta clase de actuadores, a esto se le suma que el caudal al final y al inicio de la medición del

aceite debería ser igual y no es así, esto es porque el nivel de aceite en el tanque es menor al final de la medición.

Figura 13. Direccionamiento del flujo de aceite de una posición a otra



Fuente: El autor

Como se puede observar en la figura 12, el cilindro neumático actúa directamente sobre la boquilla de salida, generando cambios de dirección bruscos del flujo, y por tanto perturbaciones que provocan un flujo inestable y formación de espumas.

➤ **Propuesta**

- Se propone rediseñar el sistema de actuación de la válvula diverter, teniendo en cuenta la pérdida o adición de volumen no medido en la actuación al inicio y al final del diverter.
- Que el sistema actúe sobre la válvula diverter y no sobre la parte final del sistema de tubería descarga para evitar cambios de dirección bruscos en este sistema de tubería.
- Diseñar una estructura soporte para la válvula diverter, garantizando rigidez, y alineación con el sistema de tubería de descarga.

2.3.4. Aceite hidráulico

➤ Estado inicial

El fluido utilizado en el patrón según la Norma ASTM D – 1071, Standard Test Methods for Volumetric Measurement of Gaseous Fuel Samples, y Projeto e construação de Sistema de Aferição de Medidores de Vazão de Gás por Aspiração (IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica) se establece que el fluido debe ser un aceite u otro medio que presente entre sus propiedades:

Baja presión de vapor y baja viscosidad. (Véase la Tabla 1).

Tabla 1 Propiedades admisibles del aceite mineral a utilizar

PROPIEDAD	VALORES ACEPTABLES
Viscosidad cinemática a 37 °C	2.4 mm²/s
Presión de Vapor a 100 °C	Menos de 80 Pa.
Gravedad Específica	0,848 a 0,858 [Kg/l]
Punto de Fluidez	No mas de -3.88 °C
Punto de Inflamación	No menor de 150 °C

El aceite seleccionado y utilizado es el shell Tellus 10 con las siguientes especificaciones de la tabla 2:

Tabla 2. Propiedades del aceite mineral utilizado

PRUEBAS	MÉTODO ASTM	VALORES
Gravedad Específica a 15,6 °C Kg/l	D-1298	0,870
Viscosidad Cinemática, cSt a 40°C mm ² /s	D-445	9.7
cSt a 100°C mm ² /s	D-445	2.6
Punto de Inflamación °C	D-92	152
Punto de Fluidez °C	D-97	-30
Índice de Viscosidad	D-2270	34

Evaluación

Los inconvenientes que presenta el fluido hidráulico son:

- El aceite presenta bastante suciedad entre los que se encuentran insectos, polvo, costras de pintura, etc. Esto origina un aumento en su viscosidad y variación en su densidad y por tanto un posible error en la medición de la masa del aceite.
- El aceite presenta con cualquier perturbación, una formación considerable de espumas. Este aceite no contiene aditivo antiespumante, porque de lo contrario su presión de vapor sería mayor, lo que implicaría un mayor problema, debido a que el requerimiento básico es su baja presión de vapor.
- No se tiene un valor confiable de la densidad del aceite puesto que no se cuenta con un instrumento de medición de esta con certificado de calibración, que nos pueda dar el grado de confiabilidad que se requiere.

El instrumento con el cual se cuenta para medir la densidad del aceite es un picnómetro sin certificado de calibración con un volumen de 5ml.

Propuesta

Se propone para la mejora de la medición de la masa y densidad del aceite:

- Realizar un simple filtrado, teniendo en cuenta que se necesita estabilidad a la formación de espuma y una baja presión de vapor del aceite.
- Obtener una instrumentación calibrada que garantice una medición confiable de la densidad del aceite.

2.3.5. Estructura soporte

➤ Estado inicial

La estructura metálica que soporta el reservorio hermético y el sistema de tubería se muestra en la figura14.

Figura 14. Estructura soporte del patrón Gravimétrico



Fuente: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

El material utilizado es tubería de acero comercial de diámetro nominal de 2" , ángulo L1*1* ¼" y tubería comercial de diámetro nominal de ¾".

Para el montaje se utilizaron 16 tornillos de acero de ½", atravesando la pared de lado y 8 tornillos.

➤ **Evaluación**

La estructura soporte no presenta ningún inconveniente, sin embargo su redimensionamiento y rediseño se hacen necesario debido a que los cambios de geometría y carga del patrón final son inminentes.

2.4. INSTRUMENTOS PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

En cuanto a la instrumentación para la adquisición de datos, también se realiza una descripción detallada

➤ **Estado inicial**

Los instrumentos con que cuenta el banco para una adquisición de datos, se muestran a continuación:

2.4.1. Medición de la temperatura

Las temperaturas que son sensadas se describen a continuación:

- **Temperatura ambiente.** Se tiene una RTD Pt-100 rango : 0 - 400° C.
- **Temperatura a la entrada y salida del medidor.** Para cada medición se tiene una RTD Pt-100 rango : 0 - 400° C.

2.4.2. Medición de la presión

La presión debe ser tomada en dos puntos relevantes del sistema:

- **Medición de la presión barométrica.** Un barómetro marca **VAISALA**, mide la presión ambiente de trabajo de la unidad. Tiene un rango de trabajo de 800 a 1060 mbar.
- **Medición de la presión diferencial en el medidor.** Se cuenta con un medidor de presión diferencial marca **ASCHOFT** con rango de medición desde 0" hasta 3" de agua .

2.4.3. Señal de inicio y parada de la prueba

La señal de inicio y parada de la prueba se realiza con la activación de un sensor óptico de denominación UZF 1201 NAIS tipo autoflex, que tiene el emisor y el reflector en el mismo punto y se excita cuando es expuesto sobre una superficie reflectiva.

El volumen leído por el medidor bajo prueba se determina por medio de este sensor óptico que se ubica frente al dispositivo indicador del medidor. Este sensor registra cada vuelta dada por el odómetro, que corresponde a un volumen de 10 litros

Figura 15. Sensor óptico para señal de inicio y parada



Fuente: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

➤ **Evaluación**

- La instrumentación con la cual cuenta el banco, no suministra la información necesaria, para obtener una medición confiable del volumen del gas, y mucho menos una estimación de la incertidumbre del banco. Esta instrumentación es por ejemplo una balanza para medición del masa de aceite que no se posee, el instrumento para medición de la densidad ya mencionado, sensores de temperatura, cronometro, etc.

➤ **Propuesta**

- Realizar una estimación de la incertidumbre preliminar para determinar que instrumentación es necesaria y que características (resolución, linealidad, sensibilidad, etc.) debe tener. Para luego su posterior compra.
- Que la instrumentación obtenida deba estar calibrada con trazabilidad a patrones nacionales de la Superintendencia de Industria y Comercio, obteniendo así, un patrón trazable.

2.5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

➤ **Estado inicial**

Los datos obtenidos por los sensores son presentados mediante señales análogas y/o digitales, que requieren una interfase de acondicionamiento para su procesamiento, análisis y control. El sistema de adquisición y control seleccionado es el sistema OPTO-22.

El sistema OPTO22 registra los datos adquiridos durante la realización del ensayo y una vez finalizado, Excel efectúa los cálculos necesarios para la determinación del error del medidor en prueba, basado en el registro obtenido. Las hojas de cálculo se generan automáticamente por medio de tablas dinámicas, en orden a determinar la información necesaria para expedir un informe.

Los módulos SNAPs hacen parte del sistema de adquisición de datos usado por OPTO 22, las señales eléctricas generadas por los transductores son acondicionadas de tal forma que la tarjeta de adquisición de datos pueda aceptarlas. Se utilizan

señales de acondicionamiento de Hardware para amplificar, aislar, filtrar señales y proveer de excitación a los sensores.

Las características de estos módulos se encuentran en la Ta bla 3.

Los módulos implementados por el sistema OPTO utilizados dentro de la estrategia de adquisición de datos en el patrón para calibrar medidores por el método de aspiración son: módulo SNAP-AIRTD, módulo SNAP-AIV, módulo SNAP-AIMA, módulo digital SNAP-IDC5FAST.

Las señales provenientes de los sensores, una vez acondicionadas en los SNAPs son llevadas a una tarjeta cerebro SNAP BRAIN-BOARD 3000.

El B3000 es un procesador utilizado para manejar conjuntamente señales digitales y analógicas procedentes de los módulos SNAP citados anteriormente. Este controlador se comunica con el procesador vía serial RS-485 con altas velocidades de comunicación (115 Kbaud), permitiendo al procesador G4LC321SA-LT el acceso directo a la información recopilada en los SNAPs. (Vea la figura 16)

Figura 16. Sistema de adquisición de datos



Fuente: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

Tabla 3. Módulos SNAPs para el acondicionamiento de señales

MÓDULO (cantidad)	DESCRIPCIÓN	SEÑAL QUE SE MANEJA
SNAP-AIMA (1)	Dos canales entrada de corriente análoga de 0 a +/- 20 mA	<ul style="list-style-type: none"> - Presión barométrica - Presión diferencial en el medidor
SNAP-AIRTD (2)	Dos canales de entrada para RTD Pt-100	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura a la entrada del medidor. - Temperatura al la salida del medidor. - Temperatura ambiente
SNAP-AIV (1)	Dos canales entrada de voltaje análogo -10VDC a 10 VDC	Humedad relativa
SNAP-IDC5FAST (1)	4Canales de entrada de señales digitales de alta velocidad	Señal de inicio y parada dela prueba

➤ **Evaluación**

Con la obtención de más sensores, para garantizar una completa adquisición de datos, se necesitaran también otro u otros módulos para el acondicionamiento de esas señales, puesto que todos los puertos de estos módulos se están utilizando completamente.

➤ **Propuesta**

Después de obtener la instrumentación faltante para la completa adquisición de datos, se propone comprar los módulos necesarios para acondicionar las señales faltantes.

3. RECUPERACION DE LA CAPACIDAD OPERATIVA DEL PATRON GRAVIMETRICO

Las condiciones en las cuales se encuentra el banco gravimétrico, las cuales se mencionaron en el capítulo anterior, imposibilitan su utilización como patrón primario para calibrar medidores de gas, debido a que no suministra una medición confiable en la calibración de medidores de gas.

Se plantea por lo tanto las siguientes soluciones a los diferentes inconvenientes del banco gravimétrico.

3.1. METODO DE PESAJE

El método de pesaje es aquel asociado al valor de la masa de aceite desplazado en el procedimiento de calibración. Es un aspecto fundamental porque define si se va a utilizar válvula diverter y que factores de corrección se van a utilizar en la ecuación de mensurando. Existen dos métodos de pesaje:

1. El método de pesaje dinámico
2. El método de pesaje estático

3.1.1. Método de pesaje dinámico

Este método de pesaje es el que se utilizó en el prototipo anterior.

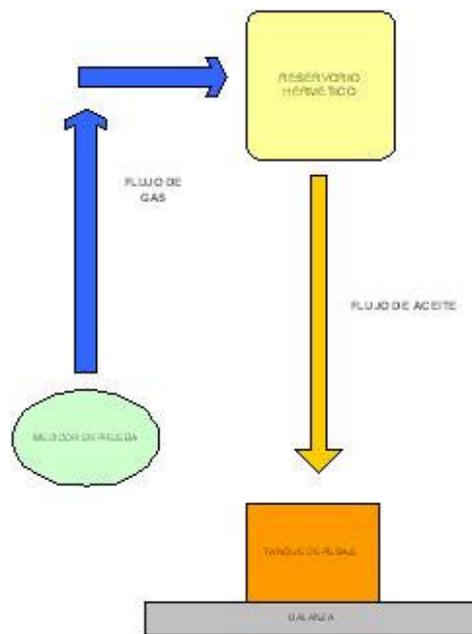
Como ya se había explicado en la sección 2.1., consiste en:

- Desplazar el aceite por gravedad desde el reservorio hermético hacia el tanque de pesaje ubicado sobre la balanza.
- Después de estabilizarse el flujo, se arranca el cronometro y se toma el valor de masa indicado por la balanza en ese instante.

- Luego se da la señal de parada después de un tiempo determinado, y se toma el valor de la masa final indicada por la balanza en ese instante.
- La diferencia de la masa final menos la inicial, da como resultado el valor de la masa de aceite de calibración.

El desempeño de este método de pesaje se ve afectado por la fuerza de impacto del chorro en el tanque de pesaje, ocasionando el registro de un valor de masa adicional. Se debe tener en cuenta también el retraso del tiempo causado por el tiempo de respuesta de los sensores utilizados para activar el contador o cronometro. Ver figura 17.

Figura 17. Esquema de pesaje dinámico

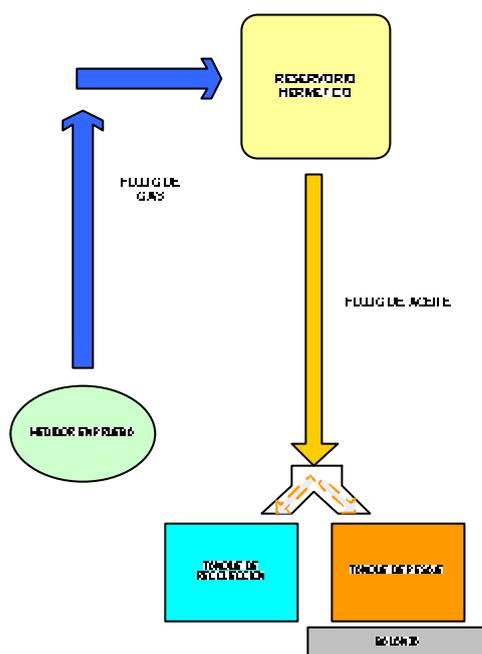


Fuente: El autor

3.1.2. Método de pesaje estático

El método de pesaje estático consiste en especificar la masa neta colectada en el intervalo de tiempo de la calibración, registrando la diferencia de masa en el tanque de pesaje antes y después de la prueba. Ver figura 18.

Figura 18. Esquema de pesaje estático



Fuente: El autor

El procedimiento del método es el siguiente:

- Tarar la balanza a cero, antes del inicio de la prueba.
- Desviar el flujo de aceite desde el tanque de recolección hacia el tanque de pesaje. Esta desviación de flujo se realiza a través de la válvula diverter activándose simultáneamente el cronómetro que mide el tiempo de pesaje.
- Desviar el flujo de aceite desde el tanque de pesaje hacia el tanque de recolección, en el instante en que se registra un valor de volumen predeterminado en el medidor que se está calibrando.

- Registrar el valor de la masa del tanque de pesaje, después de cierto tiempo para esperar que se eliminen las burbujas formadas.

En este método, es necesario utilizar la válvula diverter para dirigir el flujo de aceite. Diferente a como se maneja en el pesaje dinámico en el cual el flujo no se desvía.

Se debe tener en cuenta también el retraso del tiempo causado por el tiempo de respuesta de los sensores utilizados para activar el contador o cronometro.

3.2. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PESAJE

Los dos sistemas de pesajes tienen sus pros y sus contras descritos a continuación:

- En el sistema de pesaje dinámico solo necesita dirigirse el flujo hacia el tanque de pesaje, por tanto no es necesario la válvula diverter. En el sistema de pesaje estático si es necesaria la utilización de la válvula diverter y esta durante su funcionamiento genera una medición falsa de volumen debido al tiempo que demora en saltar de una posición a otra.
- En el sistema de pesaje dinámico el valor de la masa neta registrada, esta afectada por el impacto de chorro (cantidad de movimiento) en el tanque de pesaje, ocasionando un registro de valor de masa adicional en la balanza; en el método de pesaje estático, en el instante en que se registra los valores de masa inicial y final, no hay flujo sobre el tanque de pesaje, el chorro de aceite esta desviado hacia el tanque de recolección sin afectar la lectura de la balanza.
- En los dos métodos de pesaje se debe tener en cuenta el retraso del tiempo causado por el tiempo de respuesta de los sensores utilizados para activar el contador o cronometro.

El error ocasionado por el uso de una válvula diverter en el método de pesaje estático, se puede solucionar utilizando un factor de corrección. Para su determinación es necesario el uso de sensores de posición (ej: sensor óptico) para registrar el tiempo en el instante en que el diverter pasa por determinada posición (Vea la sección 3.4.1).

El error ocasionado por el efecto del impacto de chorro sobre la balanza, en el método de pesaje dinámico, es más difícil de corregir porque se necesita saber los valores puntuales de caudal al inicio y al final de la prueba. Para esto se necesitaría instrumentos sofisticados y costosos como anemómetros de ultrasonido.

La selección del método de pesaje se reduce a limitantes de costo, por la gran diferencia en precio que existe en el bajo costo de un sensor óptico para el pesaje estático, y el elevado costo de un anemómetro ultrasónico.

Por tanto el método seleccionado es el de **pesaje estático**.

Con el método de pesaje estático se hace necesario diseñar un nuevo sistema de desviación de flujo y sistema de tubería de descarga que garantice una mayor información acerca de la medición del volumen de aceite de prueba y estimación de la incertidumbre del patrón.

3.3. SISTEMA DE TUBERÍA DE DESCARGA DE ACEITE

3.3.1. Requerimientos de rediseño

De acuerdo a lo estudiado en el anterior capítulo se concluye que el sistema de tubería de descarga que posee el antiguo banco, no es el más adecuado para obtener un patrón primario con las características metrológicas que se requieren, por tanto se decide rediseñar este sistema.

Las consideraciones a tener en cuenta para el rediseño del sistema de tubería de descarga son las siguientes:

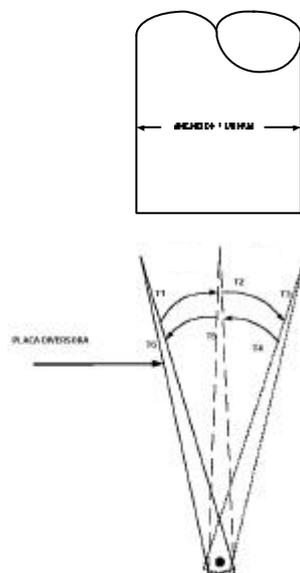
- La dimensiones del sistema de tubería de descarga debe ser tal que, suministre la cabeza mínima disponible de fluido que garantice la ejecución de las pruebas de calibración a máximo caudal ($3\text{m}^3/\text{h}$).
- El área transversal de la salida del flujo hacia el diverter, debe ser igual al área transversal interna de la tubería para todos los valores de caudales de calibración, es decir, el chorro debe llenar totalmente la salida de la tubería de descarga. Esto con el objetivo de obtener un mejor desarrollo del flujo y un valor más confiable de la velocidad promedio del fluido.

- Proyectar una disposición adecuada del sistema de tubería de descarga, que garantice menor turbulencia, y por tanto menor formación de espumas en el fluido. (Ver figura 19).
- El ancho de la tubería que recorra la placa del diverter debe ser lo menor posible con el fin de obtener una disminución del error ocasionado en la medición del volumen, que ocurre en el trayecto de esta placa de una posición a otra.

Se menciona en la sección 2.3.2. el estado del sistema de tubería de descarga, recordando principalmente que la disposición de la tubería no es la adecuada para evitar formación de espumas y a la salida de la tubería hacia la válvula diverter, para algunos caudales el chorro no llena totalmente la sección transversal de la tubería.

Ante estas situaciones se plantea el rediseño de todo el sistema de tubería de descarga.

Figura 19 Espacio que debe recorrer la placa de la válvula diverter



Fuente: El autor

3.3.2. Selección diámetro de la tubería y cabeza mínima de fluido necesaria

El primer paso es determinar el diámetro óptimo del sistema de tubería de descarga y la cabeza mínima necesaria que garantice la prueba a máximo caudal. Para su selección se determina la velocidad para caudal máximo (50 dm³/min o 0.0008333 m³/s) :

$$Q = 0.008333 \text{ m}^3 / \text{seg.}$$

$$V_2 = \frac{4 * Q}{\rho * D^2} \text{ Ecuación 1}$$

Donde,

V_2 : Velocidad promedio del fluido.

D : Diámetro de la tubería.

Q : Caudal promedio

Al reemplazar Q en la ecuación 1:

$$V_2 = \frac{0,001061}{D^2} \text{ Ecuación 2}$$

Para un diámetro cualquiera se halla la velocidad máxima a la que trabaja el patrón. Se supone un patrón con dimensiones aproximadas basadas en el sistema desarrollado anteriormente, ver figura 7.

Área transversal al flujo del tanque = 1m

Longitud de tubería =1.6 m

Válvula de bola

Válvula de globo

Contracción del tanque a la tubería

Te para desviación del flujo a 90°

Con estos datos se obtiene un valor de la cabeza de pérdidas H_{perd} aproximado⁹:

$$H_{perd} = (Leq_{tuberia} + Leq_{valvulaboh} + Leq_{valvulagldho} + Leq_{contraccion} + Leq_{te}) \frac{ft}{D} \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

H_{perd} : Cabeza de perdidas totales.

Leq : se refiere a la longitud equivalente del elemento (especificado en el subíndice).

ft : Factor de perdidas.

$$H_{perd} = 11,64 \frac{ft}{D} \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 4}$$

Aplicando la ecuación de energía se puede determinar la altura necesaria del sistema para que suministre la velocidad o caudal requerido:

$$\frac{V_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{g} + Z_2 + H_{perd} \quad \text{Ecuación 5}$$

P : Presión manométrica en el punto.

Z : Nivel piezometrico en el punto

G : Peso especifico del aceite (8830 N/m³)

Para una iteración aproximada que suministra los valores necesarios para seleccionar el diámetro de la tubería, se asume lo siguiente:

El termino $\frac{V_1^2}{2 * g} = 0$ en comparación con las demás cabezas, debido a que el área del tanque en el nivel determinado es muy grande lo que causa una velocidad muy baja.

El termino $\frac{P_1}{g} = 0$ debido a que las variaciones de presión dentro del tanque son muy pequeñas.

⁹ Para ver ecuaciones de perdidas, ir al apéndice A.

El nivel Z_2 se toma como nivel de referencia, por lo tanto $Z_2=0$.

Simplificando la ecuación 18, obtenemos que:

$$Z_1 = \frac{V_2^2}{2 * g} + H_{perd} \text{Ecuación 6}$$

y combinando la ecuaciones 14,17 y 19 obtenemos que:

$$Z_1 = \frac{\left(\frac{4Q}{PD^2}\right)^2}{2g} \left(11.64 \frac{ft}{D^2} + 1\right) \text{Ecuación 7}$$

Para caudal máximo $Q=0.00833 \text{ m}^3/\text{seg}$ ($50 \text{ dm}^3/\text{min}$)

Se supone un diámetro y se halla un valor de cabeza piezometrica Z_1

Ver los resultados de iteración en la tabla 4.

Según los valores de la tabla 4 y teniendo en cuenta que la altura del patrón Gravimétrico esta limitada por el cielo raso de las instalaciones del laboratorio del CDT de Gas(2.8 m) y que se necesita cierta longitud de tubería para un buen desarrollo del flujo a la salida de la descarga de aceite (valor asumido como 1,7 m), se selecciona que diámetro de tubería es acorde con el rango de nivel piezometrico Z_1 debe ser menor que 2,2 metros porque se necesita una altura de aproximadamente de 0,6m para colocar otros instrumentos según las limitaciones dadas(2,8 metros de altura al cielo raso menos 0,6m de otros elementos, nos da 2,2 m de nivel máximo).

En conclusión del análisis de la tabla 4, **se selecciona un diámetro nominal de tubería de 1" con un nivel piezometrico (Z_1) de 2,16 m para suministrar un máximo de caudal de $50 \text{ dm}^3/\text{min}$.**

Con el diámetro de 0,028m obtenemos un nivel piezometrico menor pero este no es una diámetro estándar que se pueda conseguir en el comercio.

3.3.3. Tubería de descarga

El segundo paso es diseñar un sistema de tubería que suministre un flujo completamente desarrollado, que el **ancho** (Ver figura 20) de la tubería que va recorrer la válvula diverter sea lo menor posible y que a la salida entregue una área transversal de salida de flujo igual al área correspondiente al área interna de la tubería, con el fin de garantizar un flujo lo mas estable posible.

Para que la dimensión del chorro a la salida de la tubería que va recorrer la válvula diverter sea lo menor posible, se decide diseñar un sistema de tubería con salida hacia el diverter de sección transversal rectangular, esto es porque para una misma área, la sección transversal circular requiere atravesar una mayor distancia que en la rectangular (Ver figura 21).

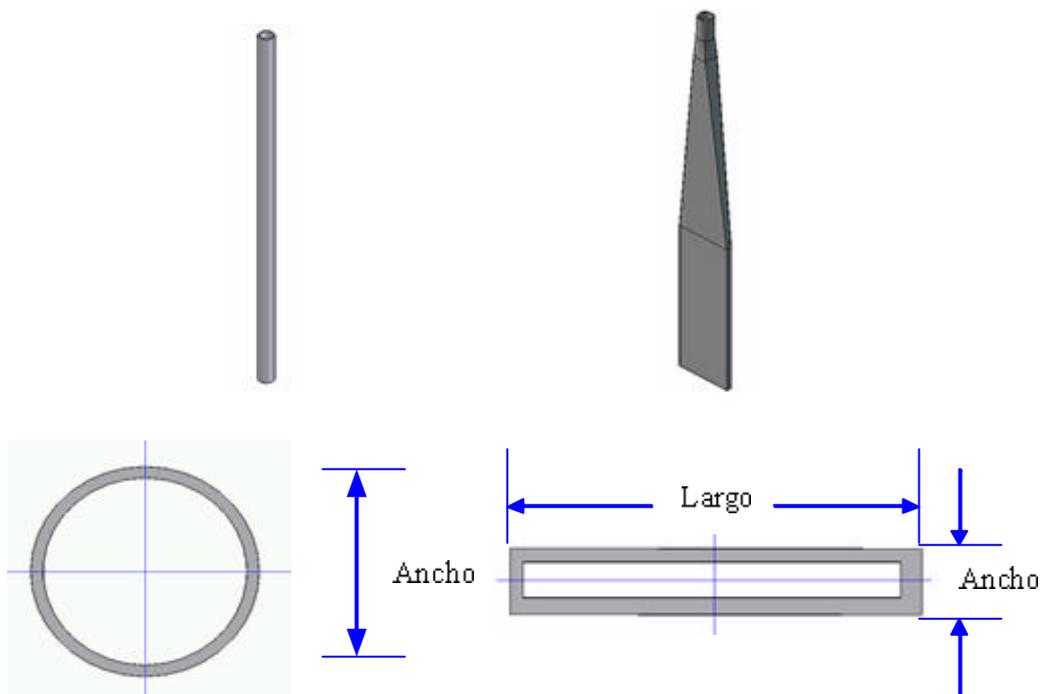
Tabla 4. Iteración para hallar el diámetro y la cabeza piezometrica optimas.

Caudal (lit/min)	Diámetro interno (m)	Velocidad del fluido (m/seg)	Numero de Reynolds	Longitud equivalente (m)	Altura tubería (m)	Perdidas totales (m)	Z1 (m)
50	0,02	2,65	2973	8,96	1,7	6,61	6,97
48,75	0,02	2,58	2899	8,96	1,7	6,34	6,68
50	0,0254	1,64	2341	10,9202	1,7	2,63	2,77
48,75	0,0254	1,60	2282	10,92	1,7	2,52	2,65
50	0,0266	1,49	2235	11,35	1,7	2,45	2,57
48,75	0,0266	1,46	2180	11,35	1,7	2,36	2,47
50	0,0266	1,41	2170	11,64	1,7	2,07	2,16
48,75	0,0266	1,37	2116	11,64	1,7	2,06	2,16
50	0,0266	1,41	2170	11,64	1,7	2,13	2,237
48,75	0,0266	1,37	2116	11,64	1,7	2,08	2,18
50	0,0266	1,41	2170	11,64	1,7	2,17	2,27
48,75	0,0266	1,37	2116	11,64	1,7	2,08	2,182
50	0,028	1,35	2124	11,86	1,7	2,06	2,15
48,75	0,028	1,31	2071	11,86	1,7	1,97	2,06
50	0,028	1,35	2124,	11,86	1,7	1,93	2,026
48,75	0,028	1,31	2071	11,86	1,7	1,	1,946

Ahora bien, se tiene en cuenta el siguiente criterio que nos dice que la sección transversal del chorro debe ser igual a el área interna de la tubería, mencionado al principio del capítulo. Para asegurar esto, por experiencia de lo observado en el proceso de calibración con el Gravimétrico anterior se encontró que comienza el chorro a separarse de las paredes de la tubería a partir del caudal de 30 dm³/min, correspondiente a una velocidad promedio del chorro de 0.3 m/seg, para una tubería de 1" de diámetro .

Según esto, se realiza un diseño preliminar teórico de la disposición a la salida del sistema de tubería de descarga. Asumiendo que:

Figura 20. Disminución de la distancia de recorrido del diverter, por medio del cambio de sección transversal de la salida de la boquilla.



Fuente: El autor

1. La velocidad promedio máxima del chorro del fluido debe ser 1.4 m/seg. (para caudal máximo de 50 dm³/min),
2. la velocidad promedio mínima del chorro del fluido debe ser 0.3 m/seg.

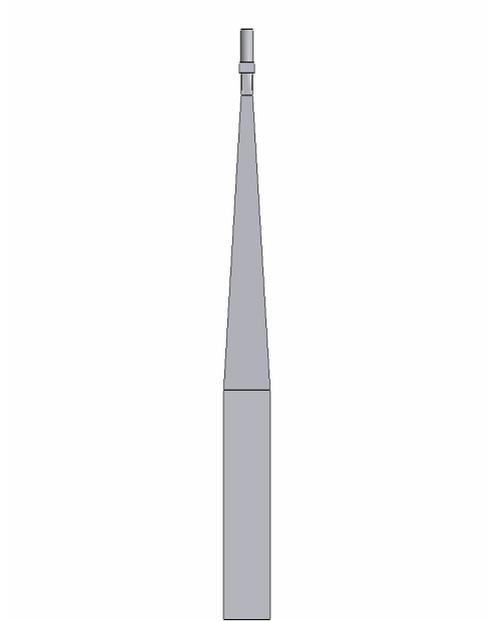
Se halla un área transversal para cada caudal de calibración, que este dentro del rango de velocidades dicho anteriormente. (Vea tabla 5)

Tabla 5. Iteración para ramificación de la tubería

CAUDAL (dm ³ /min)	CAUDAL (m ³ /seg)	VELOCIDAD MAXIMA (m/seg)	AREA TRANSVERSAL (m ²)
50	0,00083333	1,4	0,000595
41,666	0,00069443	1,16711485	0,000595
29,1666	0,00048611	0,8169916	0,000595
16,664	0,00027773	0,46677871	0,000595
8,3333	0,00013889	0,23342577	0,000595
4,1666	6,9443E-05	0,11671148	0,000595
0,8	1,3333E-05	0,02240896	0,000595
0,266	4,4333E-06	0,00745098	0,000595
16,664	0,00027773	1,38866667	0,0002
8,3333	0,00013889	0,69444167	0,0002
4,1666	6,9443E-05	0,34721667	0,0002
0,8	1,3333E-05	0,06666667	0,0002
0,266	4,4333E-06	0,02216667	0,0002
0,8	1,3333E-05	0,6790595	0,000019635
0,266	4,4333E-06	0,334	0,000019635

Los datos de la tabla 5 que aparecen en rojo, son valores que se salen del criterio de selección del valor mínimo de velocidad del chorro (el valor mínimo es 0,3 m/seg.), por tanto va limitando el rango de caudal teórico a la cual trabajaría cada ramal. Del la tabla 5 se concluye, que se deben utilizar tres secciones transversales diferentes para suministrar todo el rango de caudal, por tanto el sistema de tubería se debe ramificar en tres salidas de forma cuadradas que se denominan boquillas en este proyecto y se muestra un bosquejo en la figura 22.

Figura 21. Bosquejo de la boquillas

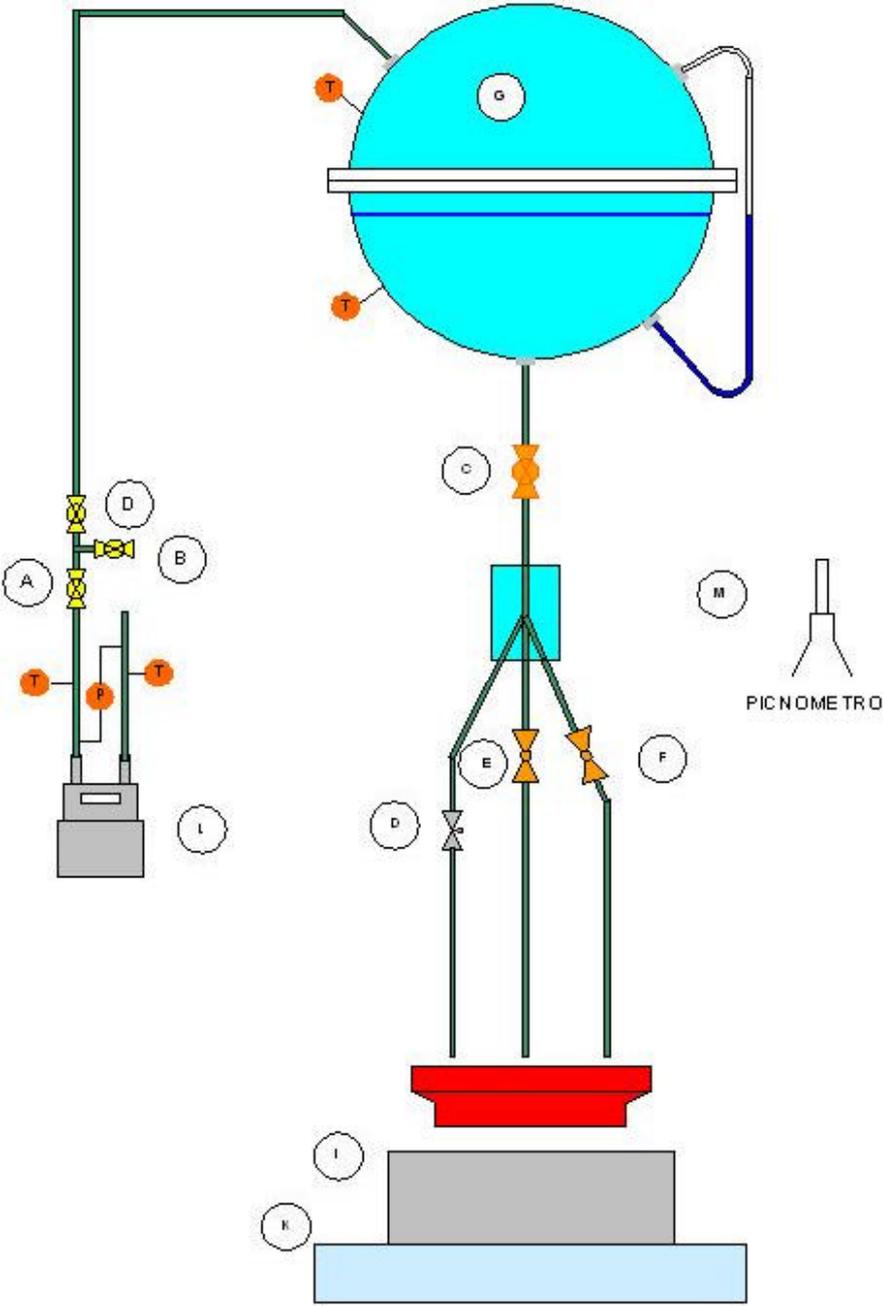


Fuente: El autor

Es posible verificar que después de 20 diámetros de tubería, el perfil es bastante asimétrico, y teniendo en cuenta que hay una reducción después de la válvula, se toma 35 veces el diámetro en la primera sección de la tobera para que se desarrolle el flujo y 10 veces el diámetro de tubería en la segunda sección

Para el dimensionamiento de las secciones transversales de las boquillas, se hallan las pérdidas teóricas del banco Gravimétrico.

Figura 22 Esquema general del nuevo patrón gravimétrico



Fuente: El autor

El dimensionamiento preliminar de las boquillas se plantea, teniendo en cuenta los valores de áreas transversales de flujo a la salida de la tubería de descarga que se hallaron en la tabla 5, y tomando como criterio que el ancho de la boquilla debe ser aproximadamente 5 mm, para todas las boquillas. Esta longitud se determina de la experiencia obtenida en la observación del flujo de aceite en el prototipo anterior.

Tabla 6. Dimensionamiento preliminar de las boquillas

CAUDAL (dm ³ /min)	CAUDAL (m ³ /seg)	VELOCIDAD MAXIMA (m/seg)	ANCHO (m)	LARGO (m)
50	0.00083	1.4	0.005	0.119
41.666	0.0007	1.16	0.005	0.119
29.1666	0.00041	0.81	0.005	0.119
16.664	0.00027	1.4	0.005	0.0396
8.3333	0.00014	0.70	0.005	0.0396
4.1666	6.94E-05	0.350	0.005	0.0396
0.8	1.3E-05	0.679	Tubing diámetro 5mm	
0.266	4.43E-06	0.223	Tubing diámetro 5mm	

Con estas dimensiones de las boquillas, se procedió a plantear la ecuación de energía entre el punto 1 y 2 de la figura 7, y mediante un proceso de iteración se determina si el dimensionamiento entrega los requerimientos de caudal a la salida de cada boquilla.

Para la cabeza de perdidas se tiene en cuenta los siguientes accesorios y tubería:

Tubería de 1" acero comercial, de longitud de 1.1 m

Contracción de la conexión del tanque con la tubería

Válvula de bola 1"

Válvula de globo 1 1/2"

- **Boquillas**

Para hallar las perdidas en las toberas por ser rectangular se tiene en cuenta que para tubería no circulares se usa el criterio el radio hidráulico R_h^{10} :

¹⁰ Para definición de radio hidráulico, ver el bendice A.

$$Rh = \frac{A_c}{(2 * b + 2 * h)} \text{ para relación } \frac{a}{b} \leq 4 \text{ Ecuación 8}$$

$$Rh \gg 0,5 * h \text{ para } \frac{a}{b} = 4 \text{ Ecuación 9}$$

Donde

a = ancho de la sección transversal de la boquilla.

b = largo de la sección transversal de la tobera.

Obteniendo el radio hidráulico se halla el No de Reynolds(Re):

$$Re = \frac{V * 4 * Rh_1}{n} \text{ Ecuación 10}$$

Se supone flujo laminar y se hallan las pérdidas:

Ecuación 11

las perdidas totales son :

$$H_{perdidastotales} = (Leq_{tuberia} + Leq_{valvulabal} + Leq_{valvulagbo} + Leq_{contraccio} + Leq_{le}) \frac{ft V_2^2}{D 2g} + H_{perdidastboquilla} \text{ Ecuación 12}$$

donde,

$H_{perdidastotales}$: son las perdidas totales en todo el sistema de tubería.

$L_{boquilla}$ = longitud total de la boquilla.

Los resultados de la iteración se ven en la tabla 7

Tabla 7. Pérdidas totales en la tubería del gravimétrico.

CAUDAL (dm ³ /min)	DIAMETRO TUBERÍA CIRCULAR (m)	VELOCIDAD (m/seg)	REYNOLDS TUBERÍA CIRCULAR	RADIO HIDRÁULICO (m)	REYNOLDS EN LAS BOQUILLAS	PERDIDAS TOTALES (m)	PERDIDA EN LA VALVULA DE REGULACION (m)
50	0.0274	1.41	2170		792.	2.06	1.1
41.67	0.0274	1.177	1808	0.0025	660	0.559	0.25
29.16	0.0274	0.824	1265	0.0025	462	0.345	0.25
16.66	0.0274	0.474	723	0.0025	263	0.17	0.1
8.33	0.016	0.690	619	0.0025	232	0.78	0.4000
4.167	0.016	0.345	309	0.0025	116	0.327	0.50
0.8	0.005	0.679	190	Tubing 5mm	0.001	1.47	0,110
0.267	0.005	0.225	63	Tubing 5mm	0.0003	0.47	0,0200

El autor

El flujo para todos los caudales es laminar, como se puede observar en la tabla, los valores de Reynolds.

Los valores teóricos de las dimensiones de las toberas son los siguientes:

a) Tobera central para que entregue un rango de caudal entre 20-50 [dm³/min]

a =0.12m

b =0.005m

b) Tobera lateral para que entregue un rango de caudal entre 4-20 [dm³/min]

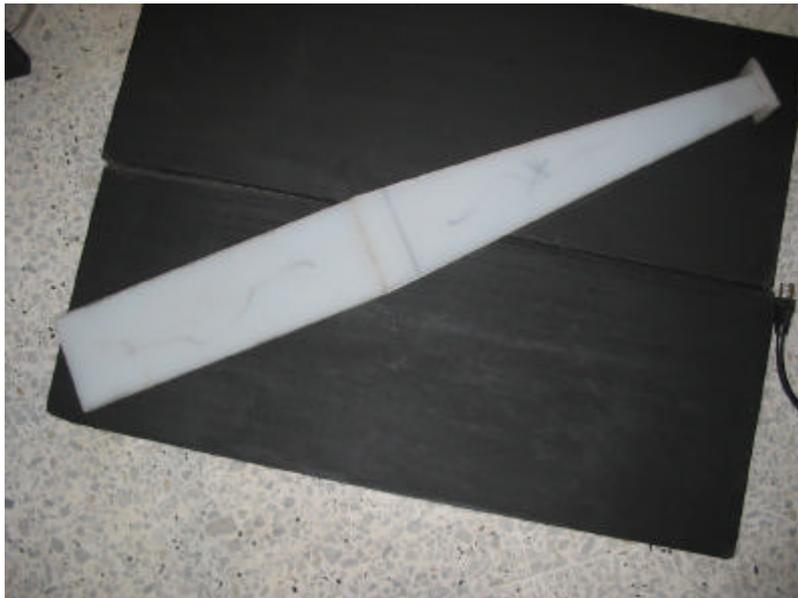
a =0.06 m

b =0.005 m

c) Para el rango de caudal de 0,20 - 1 [dm³/min] se decide utilizar tubing de 5mm de diámetro interno, puesto que no es viable la manufactura de una boquilla rectangular con las dimensiones dadas en la tabla 7.

Después de realizada el calculo teórico se construye en el laboratorio dos toberas en acrílico con las dimensiones determinadas en los cálculos teóricos, para verificar los cálculos de perdidas y dimensiones. (ver figura 22)

Figura 22. Boquilla de prueba construida en el laboratorio



Fuente: El autor

Las observaciones hechas en el proceso de medición de flujo en el gravimétrico con las boquillas, son:

- Para la boquilla de dimensiones h=0.12m y b=0.005m, que se identificará en adelante como boquilla **A**, se observa que entrega un caudal de 51

[dm³/min] con la válvula de globo totalmente abierta, y verificándose que el flujo ocupa toda el área transversal de la tobera hasta 35 [dm³/min]. Por debajo de este rango de caudal, el flujo comienza a ser inestable, y no se mantiene un caudal constante.

- El flujo para la boquilla **A**, se desarrolla totalmente después de 20 seg. ,y de acuerdo a su comportamiento , el flujo es laminar ,como se predijo en el calculo de perdidas.
- Para la boquilla de dimensiones h=0.08 y b=0.005m, que se identificará en adelante boquilla **B**, se encuentra que entrega un caudal de 24 dm³/min con la válvula de globo totalmente abierta, y entrega un flujo ocupando toda el área transversal de la tobera hasta 5 dm³/min. Por debajo de este rango de caudal, el flujo comienza a ser inestable, y no se mantiene un caudal constante.
- El flujo para la boquilla **B**, se desarrolla totalmente después de 10 seg. ,y es laminar ,como se predijo en el calculo de perdidas.

En conclusión se puede decir que, solo las boquillas **A** y **B** , el rango entre 35 y 24 dm³/min , no se podría manejar confiablemente, debido a que en este rango ninguna boquilla entrega un flujo de aceite que llene totalmente el area transversal de la salida de la boquilla, ocasionando que el flujo sea inestable e intermitente. Por tanto con los datos experimentales se realiza otra iteración que se muestra en la Tabla 8.

En conclusión se puede decir que lo óptimo es construir dos boquillas (C y D) con las siguientes dimensiones, a la salida.

Boquilla **C**

b = 0.08 m

h = 0.005 m

Boquilla **D**

b = 0.045 m

h = 0.005 m

Y para los caudales más bajos utilizar tubing de 5mm con su respectiva válvula de regulación de caudal.

Tabla 8. Resultados de la iteración final para hallar las dimensiones de la sección transversal de la boquillas

CAUDAL (dm ³ /min)	CAUDAL (m ³ /seg)	VELOCIDAD MAXIMA (m/seg)	ANCHO (m)	LARGO (m)
35	0,00058	1,16	0,005	0,1
20	0,00033	0,56	0,005	0,119047619
26	0,00043	1,4	0,005	0,06
4	6,6E-05	0,22	0,005	0,06
0,8	1,33E-05	0,67	Tubing diámetro 5mm	
0,266	4,43E-06	0,22	Tubing diámetro 5mm	

Con este montaje, para la obtención de caudales mayores de 35 dm³/min, se debe realizar una combinación de dos boquillas. Es decir para obtener el caudal de 50 dm³/min, se realiza el ajuste con las dos boquillas mayores. Abarcando de esta manera todo el rango de caudal de 0.2666- 50 dm³/min.

- **Construcción de las diferentes Boquillas del sistema de tubería de descarga**

El material en que fueron hecho las boquillas **C** y **D** es acrílico transparente de espesor de 3 mm. El material se seleccionó con el objetivo de observar el comportamiento del fluido dentro de la boquilla y poder detectar en que puntos se debe mejorar el diseño de esta, si es necesario (Ver figura 23).

Las boquillas se hicieron según a partir de moldes con el desarrollo de las mismas, hechos en cartón paja, luego fueron cortadas en lámina de acrílico y posteriormente unidas con pegante acrilato, posteriormente se adiciona un sellante para evitar que haya fugas en las uniones.

Figura 23. Boquillas del patrón gravimétrico



Fuente: El autor

En la boquilla para bajos caudales, se utilizó tubing de ¼” de acero inoxidable 304, no se justifica hacerlo en acrílico, por los altos costos de manufactura.

- **Diversor**

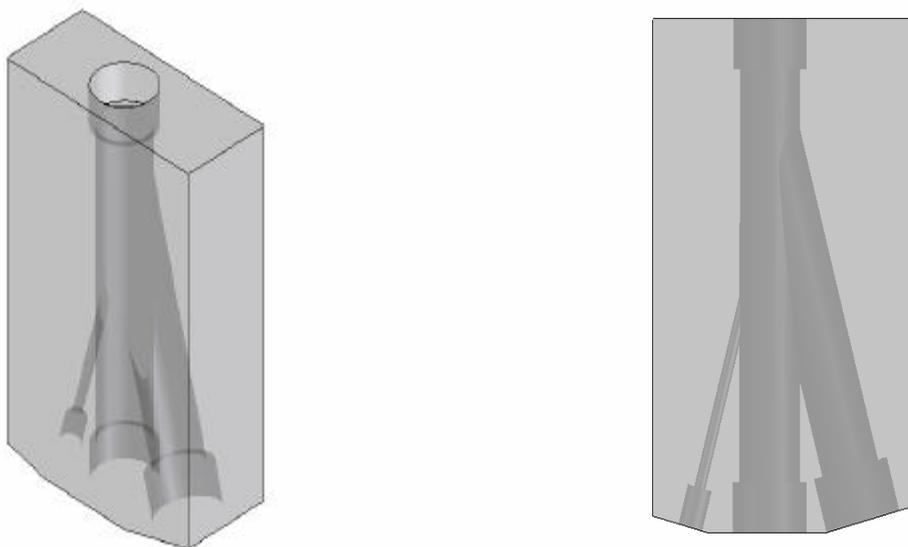
Para direccionar el flujo de aceite que proviene del reservorio hermético hacia cada boquilla se diseña una pieza que llamamos diversor y su modelamiento se muestra en la figura 24.

Las especificaciones de conexiones se muestran en la tabla 9:

Tabla 9. Conexiones del diversor

	DIMENSION
Conexión de entrada.	1" NPT
Conexión de salida para la boquilla central.	1" NPT
Conexión de salida para la segunda boquilla.	1" NPT
Conexión de salida para el tubing.	¼" NPT

Figura 24. Diversor.



Fuente: El autor

Esta pieza fue hecha en material acrílico transparente y tiene un espesor 0.05 m , para obtener un bloque de estas dimensiones, se pegaron dos laminas de 0.02 m y una lamina de 0.01 m , y posteriormente se maquinó en un torno para obtener las medidas y conexiones requeridas. Vea la figura 25.

0Como se puede observar en la figura 25, al divisor se le montan dos láminas de aluminio y dos tornillo de $\frac{1}{2}$ " que esta montado sobre la estructura y llegan hasta las laminas de aluminio con el fin de fijar el divisor con la estructura soporte.

Teniendo estos detalles, se puede mostrar el montaje de las boquillas en el patrón gravimétrico que se observa a continuación en la figura 26.

Figura 25. Montaje del divisor en el patrón gravimétrico



Fuente: El autor

Figura 26. Montaje de las boquillas



Fuente: El autor

3.3.4. Selección de las válvulas de regulación de caudal

Las válvulas de regulación de flujo normalmente utilizadas son :

➤ Válvulas de Compuerta

La válvula de compuerta se utiliza siempre que la caída de presión en la válvula tenga alguna importancia y cuando su función tenga que ver en detener el paso del fluido en lugar de regularlo.

Las válvulas que tienen por misión dividir en secciones una instalación, las válvulas de cierre de las turbinas y calderas y las válvulas de protección son casi siempre de compuerta.

Este tipo de válvula ofrece (cuando está parcialmente abierto) un orificio para el flujo cuya sección o superficie varía de modo extremadamente rápido para ligeras variaciones de la posición de la rueda a mano o volante. Por tal motivo, este tipo de válvula resulta poco recomendable para una regulación cuidadosa del fluido.

➤ Válvulas de Diafragma

Las válvulas de diafragma resultan muy convenientes en sistemas herméticos debido a que el fluido no tiene contacto con las partes exteriores. Estas válvulas contienen una membrana flexible accionada en el exterior por un móvil el cual desplaza a la membrana hasta que se cierra totalmente al entrar en contacto con un saliente en la pared interna de la tubería. Debido a que en la mayoría de los casos la membrana es de un material elástico, tiene una duración limitada y no puede resistir presiones muy altas.

➤ Válvulas de Globo

La principal función que desempeñan estas válvulas es la regulación del caudal.. Estas válvulas cuentan con la ventaja en que los discos pueden girar libremente sobre los vástagos, evitando raspaduras entre el disco y el asiento.

➤ Válvulas de Aguja

Las válvulas de aguja se utilizan para caudales pequeños y donde se requiera una regulación cuidadosa. Los parámetros a tener en cuenta en las válvulas de globo y de aguja, son el **Cv** (el cual varía con el tamaño del orificio, la densidad del fluido a utilizar, el tipo de obturador, y el número de vueltas dadas en la válvula, la presión de trabajo) material con la que está construida y sus conexiones.

El coeficiente Cv se determina a partir de una fórmula la cual es usada para determinar el caudal que pasa por una válvula bajo varias condiciones, usualmente se usa para seleccionar la válvula correcta para una aplicación específica de flujo de fluidos.

Para líquidos, Cv expresa el caudal en galones por minuto de agua a 60°F con una caída de presión a través de la válvula de 1 Psi. La siguiente fórmula¹¹ es el Cv para líquidos:

$$Cv = \frac{Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{S.G.}}} \text{ Ecuación 13}$$

Q= Caudal en galones por minuto

ΔP = Caída de presión en la válvula de regulación de caudal. Las unidades son Psi absolutas.

S.G.= Gravedad específica del medio, donde la gravedad específica del agua es 1 a 60 F.

En la tabla 10 se muestra la selección de las válvulas y se tiene en cuenta las siguientes necesidades:

- La caída de presión en la válvula (totalmente abierta) de regulación de flujo para la boquilla "C" debe ser aproximadamente 1.1 m, para la boquilla "D" debe ser 0.7 m y para el tubing 0.02 m (tomado de la tabla 7 de pérdidas).
- La densidad del aceite es aproximadamente 840 kg/m³.
- Los Cv para las válvulas de cada ramal de el sistema de tubería de descarga, se hallan de acuerdo al máximo caudal que van a manejar (

¹¹ Tomado del catálogo de válvulas de regulación de flujo de Hooke (Flor Facts)

para el tubing 0.8[dm³/min.], para la tobera “C” 35 [dm³/min.] y para la tobera “D” 26 [dm³/min.]).

Tabla 10. Selección de válvulas

SELECCIÓN DE VALVULAS DE REGULACION DE FLUJO						CABEZA(mj)
Q(dm ³ /min)	CAUDAL(Gal/min)	SG	CV	CAIDA(Psig)	CAIDA(Pa)	
50	13.20	0.847	14.2	0.732	5052.9	0.60
50	13.20	0.847	13	0.874	6028.8	0.72
50	13.20	0.847	12	1.02	7075.48	0.85
50	13.20	0.847	11	1.22	8420.41	1.01
50	13.20	0.847	10	1.477	10188.70	1.22
50	13.20	0.847	9	1.82	12578.	1.51
50	13.20	0.847	8	2.30	15919.8	1.92
50	13.20	0.847	7	3.01	20793.2	2.51
50	13.20	0.847	6	4.104	28301.94	3.41
41.67	11.0	0.847	9	1.26	8736.56	1.05
41.67	11.008	0.847	8	1.603	11057.21	1.33
41.67	11.008	0.847	7	2.09	14442.08	1.74
41.67	11.008	0.847	6	2.851	19657.2	2.37
29.167	7.705	0.847	6	1.396	9630.74	1.16
29.167	7.705	0.847	5	2.01	13868.2	1.67
29.167	7.70	0.847	4	3.142	21669.1	2.615
29.167	7.705	0.847	3	5.587	38522.97	4.65
16.67	4.403	0.847	5	0.65	4530.123	0.54
16.67	4.403	0.847	4	1.02	7078.31	0.85
16.67	4.403	0.847	3	1.82	12583.6	1.51
16.67	4.403	0.847	2	4.10	28313.2	3.41
8.334	2.201	0.847	4	0.25	1769.1	0.21
8.334	2.201	0.847	3	0.45	3145.1	0.37
8.334	2.201	0.847	2	1.02	7076.61	0.85
8.334	2.201	0.847	1.5	1.82	12580.65	1.51
8.334	2.201	0.847	1	4.10	28306.47	3.41
4.167	1.10	0.847	3	0.11	786.29	0.0949
4.167	1.10	0.847	2	0.25	1769.15	0.21
4.167	1.10	0.847	1	1.026	7076.61	0.856
4.167	1.10	0.847	0.5	4.10	28306.47	3.44
0.8	0.211	0.847	1	0.037	260.83	0.03148
0.8	0.211	0.87	0.8	0.060	418.614	0.02
0.8	0.211	0.847	0.4	0.105	724.52	0.027
0.266	0.070	0.847	0.6	0.011	80.10	0.009
0.266	0.070	0.847	0.37	0.026	180.22	0.021

Según los cálculos condensados en la tabla 10 se define que:

Para la boquilla “C” se necesita una válvula de regulación de flujo, con $C_v = 7$, mínimo para cuando este totalmente abierta.

Para la boquilla “D” se necesita una válvula de regulación de flujo, con $C_v = 4$

Para el ramal del tubing se necesita una válvula de regulación de flujo, con $C_v = 0.6$ mínimo para totalmente abierta.

Las válvulas a utilizar en la tobera “C” y “D” son válvulas de globo, porque ofrecen una buena regulación de flujo y porque fácilmente abarca los valores de C_v requeridos para estas.

Las válvula seleccionada y utilizada se especifica en la tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones de la válvula de globo seleccionadas para las boquillas C y D.

ESPECIFICACIONES	
Marca	MIPEL
Tipo conexión	1” NPT hembra - hembra
C_v para válvula totalmente abierta	8
Material	Bronce

El autor

La válvula a utilizar en el tubing es una válvula de aguja, debido a que suministra el C_v requerido ($C_v = 0.37$) y proporciona una buena regulación de flujo a bajos caudales.

La válvula seleccionada y utilizada se especifica en la tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones de la válvula de aguja seleccionada para bajos caudales

ESPECIFICACIONES	
Marca	Whitey
Tipo conexión	1/4” gyrolock
C_v para válvula totalmente abierta	0.6
Material	Bronce

El autor

El material de la válvulas es bronce, recomendado para trabajar a presiones por debajo de 100 psi y de bajo costo.

La disposición de las válvulas de globo y aguja se muestra en la figuras 26 y 27.

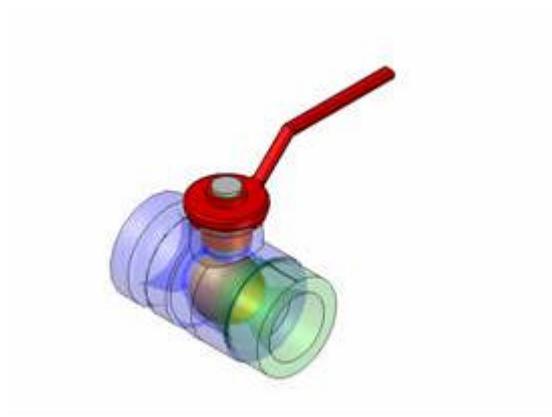
Figura 27. Válvulas de globo



Fuente: El autor

Antes de estas válvulas de regulación de flujo en el sistema de descarga, se coloca una válvula de bola para cortar el flujo cuando sea necesario. La válvula de bola es de 1" , de material bronce. Vea la figura 28.

Figura 28. Válvula de bola

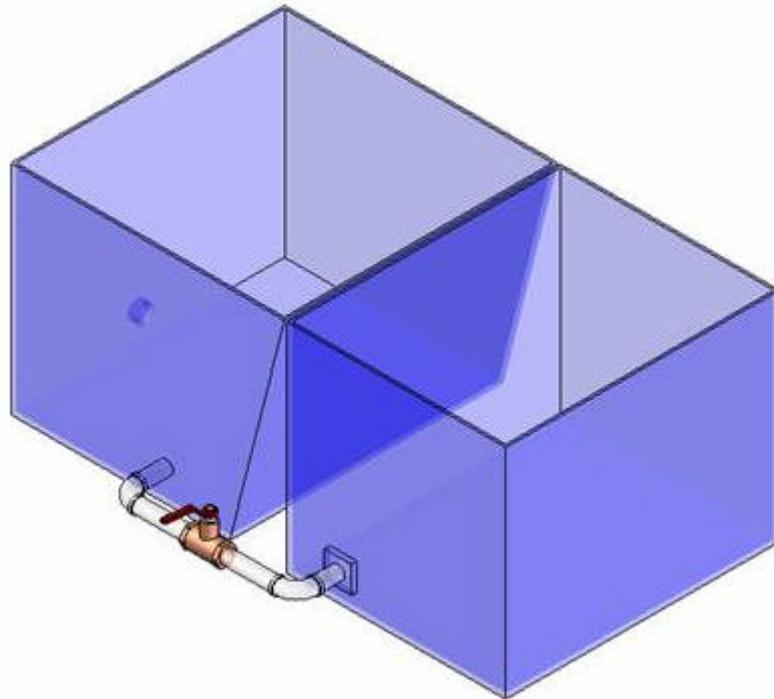


Fuente: El autor

Adicionalmente para el sistema de tubería de descarga, se redimensionaron y construyeron los tanques de pesaje y recolección. Sus dimensiones aumentaron para obtener una mayor capacidad en la calibración y se construyeron en lámina de acrílico de 5mm de espesor para garantizar que los tanques no sufran

abombamiento, como sucedía con los tanques anteriores. Estos dos tanques se comunican a través de una tubería de 1/2" y una válvula de bola de 1/2" , para permitir o impedir el paso, según el procedimiento de calibración lo necesite. En la figura 29 se muestra un bosquejo de la conexión de los tanques de pesaje y recolección.

Figura 29. Conexión tanques



Fuente: El autor

3.4. RESERVORIO HERMÉTICO

3.4.1. Requerimientos de rediseño

Todos los parámetros que se explicaron en la sección 3.3.1., imposibilitan utilizar ese reservorio hermético para el patrón gravimétrico, por lo tanto es necesario un nuevo diseño.

Los requerimientos que debe cumplir el nuevo reservorio hermético, se obtienen de las necesidades iniciales y los problemas detectados en reservorio hermético del antiguo banco, y se especifican a continuación:

1. Establecer la cabeza mínima disponible de fluido que garantice la ejecución de las pruebas de calibración a máximo caudal 50 [dm³/min].
2. Determinar la variación de caudal al inicio y al final de la prueba, esta variación debe estar dentro del rango de $\pm 5\%$ ¹².
3. Determinar la variación de la presión en el reservorio hermético, esta no debe ser mayor de 2 mbar.
4. Se requiere que el volumen del recipiente no presente ninguna variación por efectos de vacío generado durante la aspiración de aire.
5. El reservorio debe estar construido de un material que no se corra, evitando la contaminación del fluido.
6. Verificar la estanqueidad del reservorio hermético mediante las pruebas de presión positiva y negativa.
7. Las pruebas de calibración para caudal máximo debe durar un tiempo mayor a 40 segundos¹³.

La cabeza mínima disponible de fluido que garantiza la ejecución de las pruebas de calibración a máximo caudal ya esta establecida y es de 2.16 m.

Para evitar la variación del volumen en el reservorio hermético se decide diseñarla en forma esférica, la razón obedece a que en un casco esférico, la distribución de esfuerzos debida a la presión es mas homogénea que cualquier otra forma geométrica y por lo tanto ofrece la mayor rigidez.

¹² Según la norma NTC 2728, la variación del caudal debe ser inferior a $\pm 5\%$.

¹³ El PTB recomienda una variación de la prueba mayor a 30 segundos.

3.4.2. Dimensionamiento del reservorio hermético

Para el dimensionamiento del reservorio hermético, se definen los siguientes parámetros a tener en cuenta:

La máxima capacidad volumétrica para las pruebas de calibración será de 50 dm³, de tal forma que para máximo caudal, la prueba dure aproximadamente 60 segundos, tiempo mayor que el mínimo necesario, planteado en las consideraciones de diseño (40 segundos).

Se plantea una variación de caudal de 2.5 %, menor que la máxima permisible planteadas en la consideraciones de diseño (rango de variación 5%) .

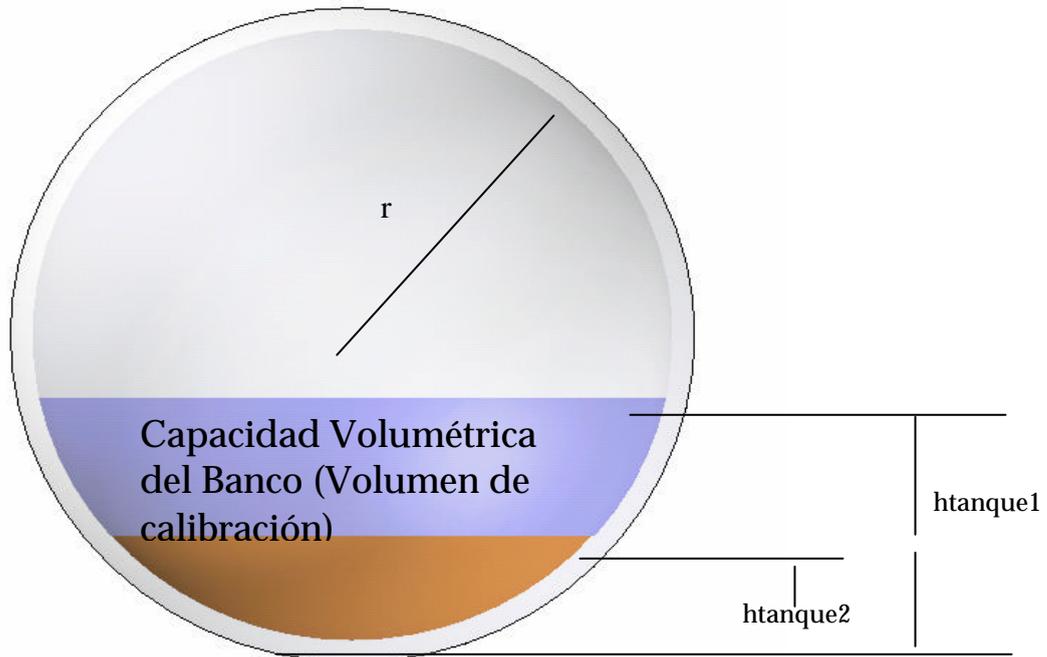
Teniendo en cuenta que el volumen de una sección esférica (Ver figura32) es :

$$V = \pi * r^3 \left(\frac{2}{3} - \frac{r - h_{tanque1}}{r} - \frac{1}{3} * \left(\frac{r - h_{tanque1}}{r} \right)^3 \right) - \left(\frac{2}{3} - \frac{r - h_{tanque2}}{r} - \frac{1}{3} * \left(\frac{r - h_{tanque2}}{r} \right)^3 \right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde V es la capacidad volumétrica =50 litros

r = radio del tanque esférico (reservorio hermético).

Figura 30. Dimensionamiento reservorio hermético.



Fuente: El autor

$h_{tanque1}$ = nivel de fluido en el reservorio hermético al inicio de la prueba.

$h_{tanque2}$ = nivel del fluido en el reservorio hermético al final de la prueba.

$$A_1 = p * (2 * r * h_{tanque1} - h_{tanque1}^2) \text{ Ecuación 15}$$

$$A_2 = \frac{p}{4} D^2 \text{ Ecuación 16}$$

Donde,

A_1 = Área transversal del tanque esférico que corresponde al nivel de aceite

A_2 = Área transversal de la tubería seleccionada

$D = 0.0266$ m , diámetro de la tubería seleccionada

Para Q_{max} (50[dm³/min] ó 0.000833[m³/seg]) obtenemos la velocidad a la salida del sistema de tubería de descarga :

$$V_2 = \frac{Q_{max}}{A_2} = 1.499 \text{ m/seg}$$

De la ecuación de continuidad tenemos que:

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2 \text{ Ecuación 17}$$

Reemplazando A_1 y A_2 y despejando V_1 , obtenemos:

$$V_1 = V_2 * \frac{\frac{p}{4} * 0.0266^2}{p * (2 * r * h_{tanque1} - h_{tanque1}^2)} \text{ Ecuación 18}$$

Al final de la prueba obtenemos también que :

$$V_3 = V_4 * \frac{\frac{p}{4} * 0.0266^2}{p * (2 * r * h_{tanque2} - h_{tanque2}^2)} \text{ Ecuación 19}$$

La variación de la presión es muy pequeña en el reservorio hermético, por tanto se puede suponer que la cabeza de presión es 0.

Para las condiciones iniciales, al inicio de la prueba de calibración y Q_{max} , tenemos que la ecuación de energía es:

$$\frac{V_2^2 * \frac{\rho}{4} * 0.0266^2}{\rho * (2 * r * h_{tanque1} - h_{tanque1}^2) * 2g} + h_{tuberia} + h_{tanque1} = \frac{V_2^2}{2 * g} + hp \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde $h_{tuberia}$ es el nivel de altura desde la salida de las boquillas, hasta la conexión del tanque con la tubería.

Para condiciones finales, al terminar la prueba, y un caudal de $0.975Q_{max}$, garantizando una variación de caudal de 2.5%, por lo tanto $V_3=0.975V_2$

$$\frac{(0.975V_2)^2 * \frac{\rho}{4} * 0.0266^2}{\rho * (2 * r * h_{tanque2} - h_{tanque2}^2) * 2g} + h_{tuberia} + h_{tanque2} = \frac{(0.975V_2)^2}{2 * g} + hp \quad \text{Ecuación 21}$$

Con las ecuaciones 14, 20 y 21, teniendo en cuenta que $V = 50 \text{ dm}^3$ y suponiendo varios $h_{tuberia}$ hallamos los radios correspondientes a cada $h_{tuberia}$ supuesto. El criterio utilizado para hallar cual es el radio optimo en este caso es encontrar la menor altura posible $H_{menor} = \text{Diámetro del tanque } (2*r) + h_{tuberia}$, esto es debido a las limitaciones de espacios en el cuarto donde será ubicado el patrón gravimétrico definitivo que tiene una altura de 2.8 m. Por tanto $H_{menor} = 2.1$, debido a que se necesita aproximadamente 0.6m para ubicar los tanques de pesaje, diverter y otros accesorios.

La herramienta que se utiliza para el sistema de ecuaciones debido a su grado de complejidad, es Matlab 5.3.

La matriz solución se muestra en la tabla 13.

La solución seleccionada según el criterio ya mencionado hallando el H_{menor} , es :

$$r = 0.45 \text{ m}$$

$$h_{tuberia} = 1.7 \text{ m}$$

Tabla 13 Matriz solución del calculo del reservorio hermético

Htanque1 (m)	Htanque2 (m)	radio del reservorio hermético(m)
-0,029	0,291147511	-0,02
-0,013	0,883069195	-0,018782269
-0,00089	-0,21881752	-0,272376425
0,00084	0,907916356	0,291054251
$0,5928e-2-0,3184*i$	$-0,9793e-1+0,1989*i$	$0,003 - 0,159*i$
$0,5928e-2+0,318*i$	$-0,97934e-1 - 0,19891*i$	$0,00300 + 0,1591*i$
0,3208	0,525542228	0,160604766
$0,502 -0,2662e-3*i$	$0,7526 - 0,1430*i$	$0,0268-0,05571e-1*i$
$0,5029+0,3467488e-3*i$	$0,7526663+ 0,14301*i$	$0,29601+0,055719*i$
0,502996357	-0,298271675	0,40073
0,403024481	0,313724566	0,44984544
0,503223395	-0,667558985	-0,785803492
0,774581496	-0,365175153	0,387232646
0,879482544	0,722400197	0,489704366

El autor.

3.4.3. Selección material a utilizar para el reservorio hermético.

La selección del material a utilizar, se realiza mediante una comparación de las posibilidades existentes y que sean económicamente viables. (Ver tabla14)

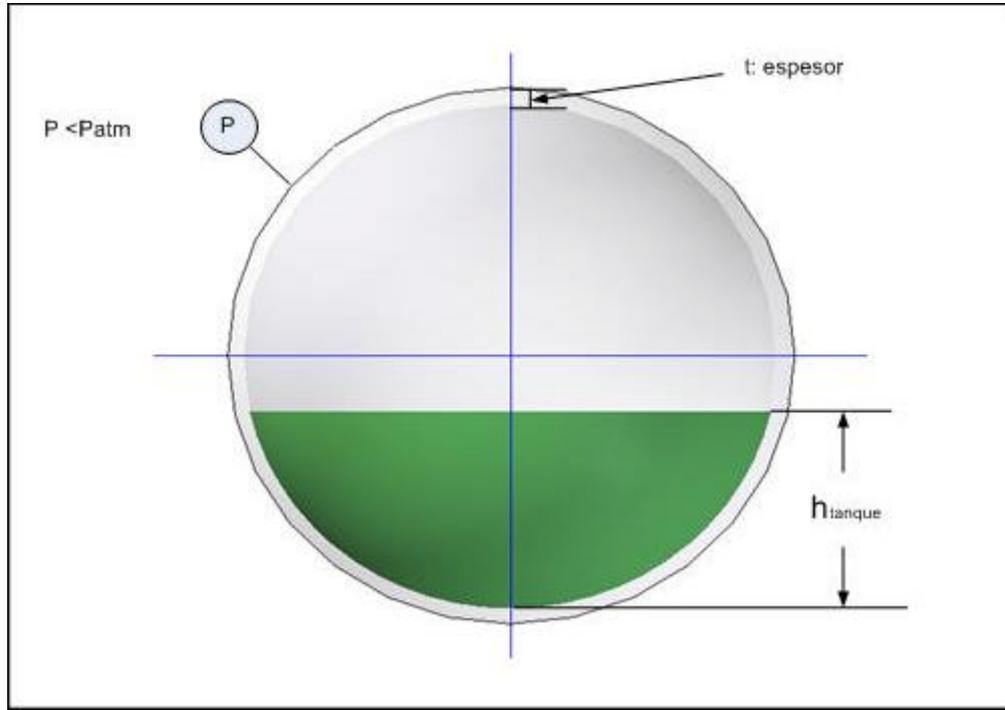
Según la tabla 14, la **fibra de vidrio** es el material adecuado para la construcción del reservorio hermético, por su bajo costo, y fácil manufactura.

Tabla 14 Comparación de las alternativas de material para la construcción del reservorio

MATERIAL	PROCESO DE MANUFACTURA	PROPIEDAD ANTICORROSIVA	COSTO APROX (pesos col)	OBSERVACION
ACRÍLICO	Soplado de aire sobre una lamina de acrilico a alta presión, formando una burbuja	El acrilico no tiene problemas de corrosión.	1.800.000	El proceso de manufactura, no garantiza que el espesor sea constante en el tanque
ACERO AL CARBONO	Construcción por casquetes , y unión con soldadura	El acero al carbono es susceptible a la corrosión.	1.000.000	La construcción por casquetes , hace que tenga una gran cant. de soldaduras por las cuales puede haber fugas en estas.
ACERO INOXIDABLE	Construcción por casquetes , y unión con soldadura	El acero inoxidable no tiene problemas de corrosión.	5.000.000	La misma observación que para el acero carbón
FIBRA DE VIDRIO	Construcción contra molde en yeso. Posteriormente molde en fibra mak. Y por ultimo construcción tanque en fibra de vidrio	La fibra de vidrio no tiene problemas de corrosión.	700.000	El tanque se realiza en dos media esferas con espesor constante aprox.

3.4.4. Cálculo del espesor del reservorio hermético

Figura 31. Espesor del reservorio hermético



Fuente: El autor

Las presiones a las que está sometido el reservorio hermético son:

- La presión de vacío originada por el desplazamiento del aceite hacia el tanque de pesaje. Esta presión de vacío es del orden de 2 mbar por debajo de la atmósfera.
- La presión positiva, debido al volumen de aceite almacenado.

La mayor presión a la que es sometido el reservorio hermético, es cuando tiene el mayor volumen de aceite almacenado, es decir que :

$$P_{\max} = \frac{\rho_{\text{aceite}} * g * V_{\text{aceite}}}{(A_{\text{anular}})} \quad \text{Ecuación 22}$$

donde :

P_{\max} : es la presión máxima a la que es sometido el reservorio hermético

ρ_{aceite} : densidad del aceite almacenado (aprox. 840 kg/m³)

g : gravedad (9.78 m/seg²)

A_{anular} : Área del anillo de la sección en el centro del casquete esférico

El área anular es:

$$A_{anular} = \frac{P}{4}(d_{ext}^2 - d_{int}^2) \text{ Ecuación 23}$$

$$A_{anular} = \frac{P}{4}(0.455^2 - 0.45^2) \text{ m}^2$$

$$A_{anular} = 0.00355 \text{ m}^2$$

V_{aceite} = Volumen de aceite en el reservorio hermético.

Este volumen de aceite lo hallamos con la ecuación 37, y la altura máxima

$$V = p * r^3 \left(\frac{2}{3} - \frac{r - h_{tanque}}{r} - \frac{1}{3} * \left(\frac{r - h_{tanque}}{r} \right)^3 \right) \text{ Ecuación 24}$$

$$h_{tanque1} = 0.4 \text{ m}$$

$$V_{aceite} = 0.148 \text{ m}^3$$

Si en algún momento se decide aumentar el volumen de calibración, entonces el reservorio se diseña para un mayor volumen e igual a $V_{aceite} = 0.2 \text{ m}^3$

Por lo tanto reemplazado de la ecuación 22 se halla P_{max} :

$$P_{max} = \frac{847,2 * 9.78 * 0.2}{(0.00355)} Pa = 473463 Pa$$

Cuando un recipiente esférico es sometido a presión, el material del que esta hecho soporta una carga desde todas las direcciones. Y como su relación de radio del tanque esférico con el espesor del tanque esférico (r/t) seguramente es mayor que 10, se considera de “**pared delgada**”, por lo tanto la distribución de esfuerzo a través de su espesor t no variará significativamente y se supone que es uniforme¹⁴ (Ver figura 31).

Con esa suposición podemos utilizar la ecuación 25:

$$s_2 = \frac{P_{max} * r}{2 * t} \text{ Ecuación 25}$$

Donde:

s_2 : esfuerzo normal mínimo requerido (de la tabla 14 se obtiene que $s_2 = 147 \text{ MPa}$)

P_{max} : Presión interna máxima a la que es sometido el reservorio hermético.

¹⁴ Tomado de el libro Mecanica de materiales de hebbeler

r: radio del reservorio hermético (0,45 m).

t: espesor del reservorio hermético .

El material a utilizar como ya se sabe es fibra de vidrio y a continuación se muestran sus propiedades¹⁵ más importantes.

Tabla 15. Propiedades de la fibra de vidrio

	UNIDADES	VALOR PROMEDIO
DENSIDAD	Kg/m ³	1600
FLEXION		
Modulo de flexión	Gpa	13,3
TRACCIÓN		
Resistencia a la tracción	Mpa	147
Modulo de tracción	GPa	14,7
RESSITENCIA AL DESGARRE	Kg	60
COEFICIENTE DE DILATACION LINEAL	1/°C	10*10 ⁻⁶
COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA	Kca/Mh°C	0,2

Despejando “t” de la ecuación 25 tenemos que:

$$t = \frac{P_{\max} * r}{2 * S_2} \quad \text{Ecuación 26}$$

y reemplazando obtenemos que :

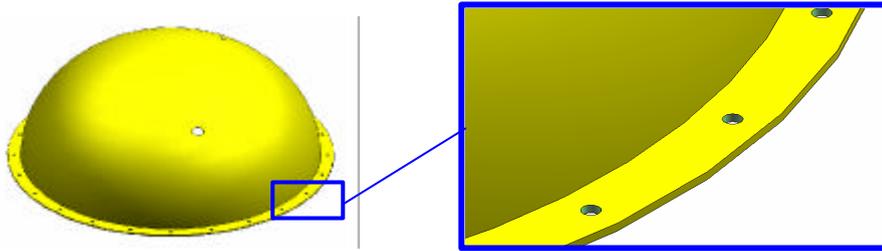
$$t = \frac{473463 Pa * 0.45m}{2 * 147000000 Pa} = 7.25 * 10^{-4} m$$

Por experiencia de los fabricantes de tanques en fibra de vidrio, se decide construir el reservorio hermético con 5 capas de fibra de vidrio mak que garantiza una pared con espesor de **5 mm** aproximadamente.

El reservorio hermético va ser soportado por una estructura metálica (vea el diseño de la estructura en la seccion 4.5.) y para instalarlo sobre esta estructura se diseña una brida que se muestra en la figura 32 y acoplada con tornillos. Se dimensiona la brida del reservorio, según un análisis de cargas y esfuerzos realizado en el paquete de elementos finitos de simulación Cosmos. Para la simplificación del cálculo se toma un diferencial de la unión tanque con brida que sea simétrico, el cual se muestra en la figura 33.

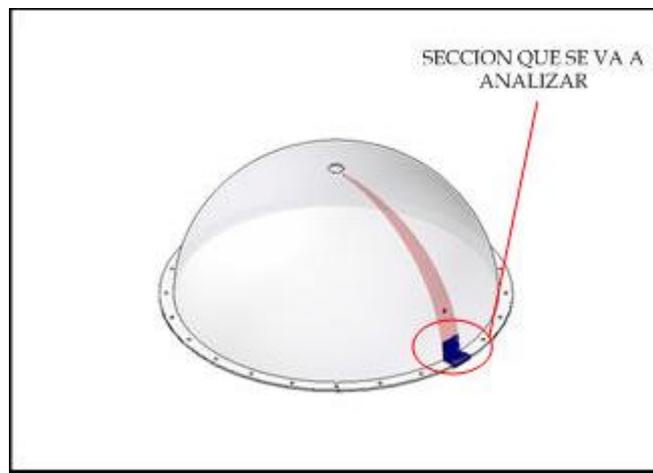
¹⁵ Las propiedades de la fibra de vidrio fueron obtenidas de la pagina www.exclusivasjefer.com/propiedades.htm

Figura 32. Diseño del reservorio hermético para montaje



Fuente: El autor

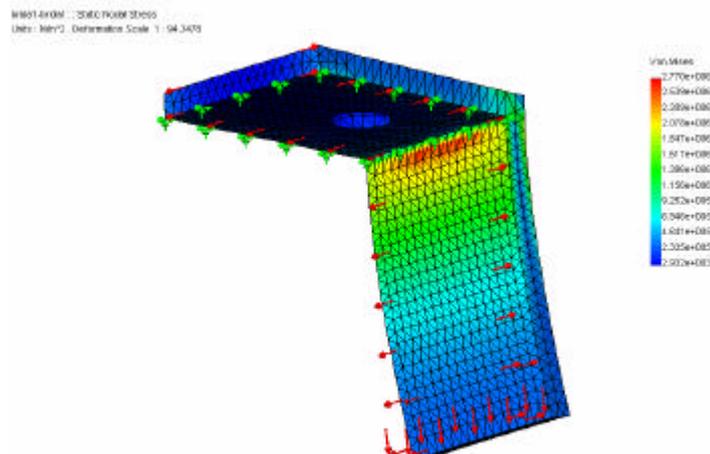
Figura 33. Simplificación del análisis de la unión de la brida con el tanque



Fuente: El autor

La simulación de esfuerzos en Cosmos se realiza , basado en el método de Misses- Goodman. El análisis gráfico se muestra en la figura 34.

Figura 34. Análisis grafico de la unión de la brida con el tanque



El autor

La brida tiene un espesor de 0.005 m y ancho de 0.05 m.

Para estos valores el esfuerzo máximo a que esta sometido según el método Von Mises es de $\sigma_{VonMises} = 2.77E+6 \text{ N/m}^2$ y el esfuerzo limite de la fibra de vidrio es $\sigma_{Limite} = 1.4E+8 \text{ N/m}^2$ por lo tanto se cumple que :

$$\frac{\sigma_{VonMises}}{\sigma_{Limite}} \leq 1 \text{ Ecuación 27}$$

3.4.5. Conexiones para el reservorio hermético

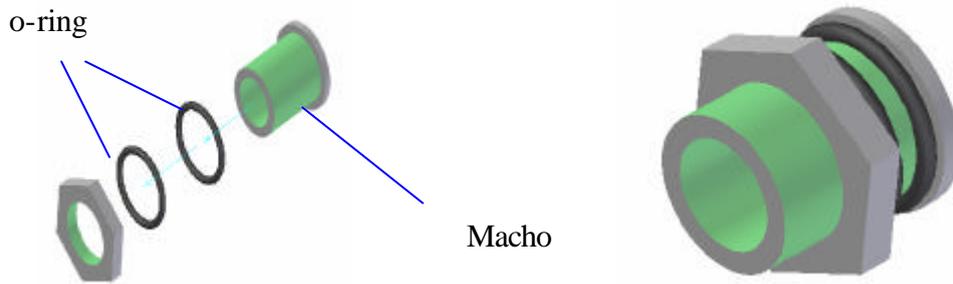
El reservorio hermético debe tener conexiones (también llamados couplings) para el funcionamiento del patrón gravimétrico (En la tabla 16 se describe las conexiones necesarias para el reservorio hermético):

Tabla 16. Tipo reconexiones utilizadas para el reservorio hermético

DESCRIPCION	TIPO DE CONEXION
Sistema de tubería de descarga de aceite	1" NPT con tubo de PVC
Sistema de tubería de realimentación de aceite	½ " NPT con tubería de PVC
Manguera de neopreno para conexión con medidor de prueba	¾ " NPT con tubería de neopreno
Dos Sensores de temperatura RTD para liquido	¼ " NPT con cabezal de RTD en acero inoxidable 306
Medidor de nivel	Se necesitan dos conexiones de ¼ " NPT

El autor

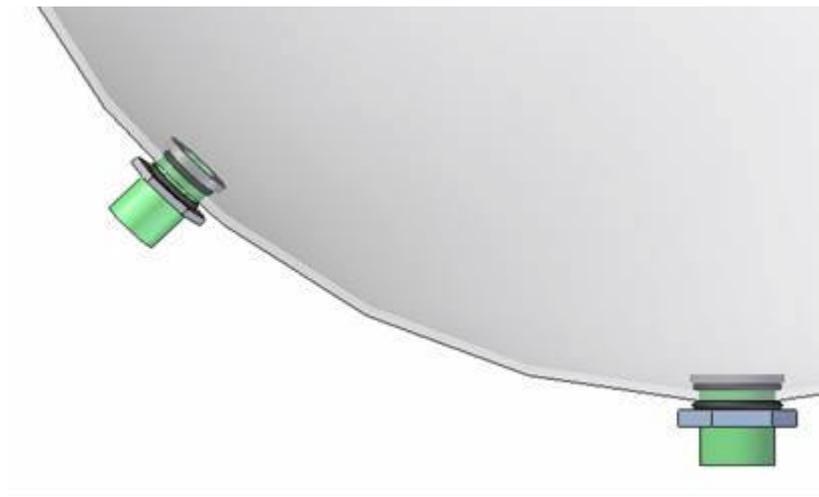
Figura 35. Detalles de un coupling



Fuente: El autor

El montaje de los couplings en el tanque se muestra en la siguiente figura:
En las figura 37 y 38 se muestra el modelamiento de los couplings y su montaje.

Figura 36. Montaje de los couplings en el reservorio hermético



Fuente: El autor

3.4.6. Construcción del reservorio hermético

EL reservorio hermético se construye en fibra de vidrio Mak con las siguientes especificaciones:

Tabla 17. Especificaciones para la construcción del reservorio hermético.

ESPECIFICACIONES	
Material	Fibra de vidrio Mak, Resina 859, Yelmo 809, Estileno, Cobalto, Peroxido.
Diámetro	Interno: 0.45 m Externo: 0.455 m
Ancho Brida	0.05 m
Taladrados para tornillos de 3/8 ”	32.

El autor

El proceso de manufactura fue el siguiente:

- Elaboración de molde de esfera elaborado en yeso.
- Fabricación de molde del casco esférico en fibra de vidrio, compuesto por una capa.
- Construcción de los dos cascos esféricos finales en fibra Mak , compuesto por 5 capas de fibra que corresponden cada una a un espesor de 1mm, obteniendo de esta forma el espesor requerido. (vea las figura 37)

Figura 37. Montaje del reservorio Hermético



Fuente: El autor

3.4.7. Prueba de hermeticidad para el reservorio hermético.

El reservorio Hermético es sometido a dos pruebas; presión positiva y presión negativa para verificar que esta hermético.

La verificación de la hermeticidad con presión positiva se realiza en 3 fases:

La primera fase se aplica 8963.18 Pa, para la segunda fase se aplica 5486.23 Pa y para la ultima fase 3262.35 Pa, y se detecta fugas con una solución jabonosa.

El montaje consiste en:

- Suministro de aire
- Válvula reguladora de presión
- Válvula de bola
- Accesorios de tubería
- Tubería de ½ “
- Manómetro de columna de agua

En la primera prueba se detectaron fugas en tres couplings montados sobre el tanque esférico.

Para las otras dos pruebas no se detectaron fugas

Las respectivas correcciones se realizaron, aplicando una masilla de fibra de vidrio Mak con Peroxido y luego se aplicó silicona.

El montaje de la prueba se observa en la figura 38 :

Figura 38. Montaje de la prueba de hermeticidad



Fuente: El autor

Los datos de la prueba final para las tres valores de presión positiva, se muestran en las tablas 18, 19 y 20.

Tabla 18. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de 8963.18Pa (860 mm deH₂O).

PRUEBA DE HERMETICIDAD			
Hora	mm de H ₂ O	Temp. Amb (°C)	Pres. Amb (mbar)
16:30	860,5	20	904,4
17:00	860	19,5	904,5
17:30	860	19,5	904,5
18:00	859	20	904,7
18:30	858	20	905
19:00	857,5	20	905
19:30	866	20,5	905
20:00	866	20,5	904,5

Tabla 19. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de 5486.23 Pa (560 mm de H₂O).

PRUEBA DE HERMETICIDAD			
Hora	Mm de H ₂ O	Temp. Amb (°C)	Pres. Amb (mbar)
13:30	560	20	903.4
13:45	560	20	903.8
14:00	560	20	903,4
14:15	559	20	904
14:30	559	19,5	904
14:45	559	19,5	904
15:00	559	19,5	904,5
15:15	558	19,5	904,5

Tabla 20. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de 3262.35 Pa (860 mm de H₂O).

PRUEBA DE HERMETICIDAD			
Hora	mm de H ₂ O	Temp. Amb (°C)	Pres. Amb (mbar)
15:16	333	20	904,5
15:31	333	20	904,5
15:46	336	20	904
16:01	336	20	904
16:16	335	20	903,8

La prueba de hermeticidad con presión negativa se realizó en una fase. Vea el montaje en la figura 0. La verificación de fugas para presión negativa se realizó una presión de vacío de 2605.96 Pa por debajo de la atmosférica, equivalente a 266 mm de H₂O. Ver tabla 21.

Tabla 21. Prueba de hermeticidad del reservorio hermético para un valor de presión de -2605 Pa.

PRUEBA DE HERMETICIDAD			
Hora	Mm de H ₂ O	Temp Amb (°C)	Pres. Amb (mbar)
16:12	266	20.01	901.77
16:25	266	20.18	901.77
16:40	267	19.3	902.06
16:55	267	19.93	902.13
17:10	267	19.65	902.1
17:25	267	20	902.15

3.5. VALVULA DIVERTER

La válvula diverter es uno de los más importantes componentes del Patrón Gravimétrico para calibrar medidores de gas.

Se hace necesario el rediseño de este componente, debido a los nuevos requerimientos de diseño del patrón gravimétrico para su optimización.

3.5.1. Requerimientos de diseño de la válvula diverter

Los requerimientos de diseño para la válvula diverter, son los que se especifican a continuación¹⁶:

- El diseño de las boquillas tiene que garantizar que en todo el rango del caudal, estén completamente llenas, obteniéndose una sección transversal del chorro conocida, igual al área transversal interna de la tobera de salida, y por tanto un flujo más estable mayor información en algún momento dado, acerca del perfil de velocidades.
- La sección del tubo de alimentación del diverter tiene que ser diseñarse de tal forma que el flujo pase del tubo circular a un tubo de sección

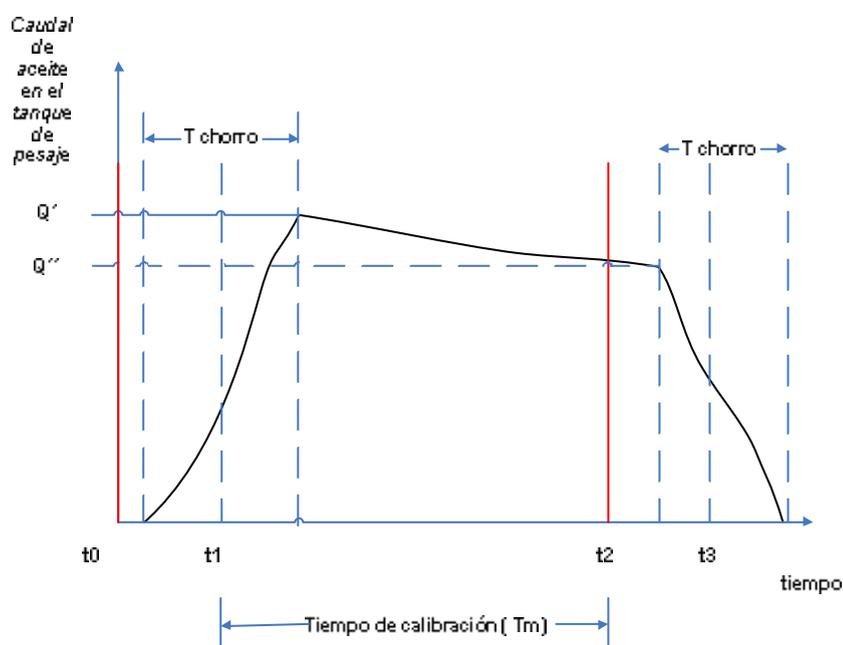
¹⁶ Los requerimientos son tomados de N.P. Yende, "ERROR FREE LIQUID FLOW DIVERTERS FOR CALIBRATION FACILITIES". NIST

transversal rectangular con un perfil de velocidades aproximadamente simétrico a la salida.

- El plato divisor tiene que cortar el flujo de aceite sin que haya salpicadura. Por lo tanto el ángulo de impacto entre la dirección de flujo de chorro y el plato divisor no deben exceder un valor de 10° .
- El movimiento de la válvula diverter debe ser lo suficientemente rápido (0.1 seg.) para disminuir la fuente de un error sistemático significativo en la medición del volumen . Esto es para atravesar rápidamente el chorro de líquido formado por las boquillas.
- El movimiento de la válvula diverter puede generarse por varios dispositivos eléctricos o mecánicos, ya sea, un par de torsión o actuadores eléctricos o neumáticos.

Las características de direccionamiento del flujo hacia el tanque de pesaje se observa en la siguiente grafica :

Figura 39. Características de direccionamiento de flujo de aceite en el tanque de pesaje



Fuente: El autor

En esta figura se muestra la el caudal que se dirige hacia el tanque de pesaje en función del tiempo.

A continuación se describe la grafica:

El caudal es cero, cuando el chorro se esta dirigido hacia el tanque de recolección. Después se da la señal de inicio de la prueba ,y el caudal sigue siendo cero en un intervalo de tiempo($t'0-t0$), debido que al tiempo que se demora en activar el actuador neumático. La válvula diverter es actuada, durante el tiempo de transición (T_{chorro}) , que demora en atravesar el chorro hacia el tanque de pesaje , incrementando el valor del caudal hasta el caudal de prueba que se ha ajustado. En el centro de las boquillas, esta ubicado un sensor óptico que registra el valor del tiempo($t1$ y $t3$)en el cual la placa diversora pasa por ese punto.

Para el final de la prueba sucede algo similar con el proceso de direccionamiento de flujo , pero en sentido contrario. Después de la señal de cambio de tanque (del tanque de pesaje a al tanque de recolección) el tiempo de respuesta hasta la activación del cilindro origina un adición de volumen en el tanque de pesaje ($t'2-t2$). . La válvula diverter es actuada, durante el tiempo de transición (T_{chorro}) , que demora en atravesar el chorro hacia el tanque de recolección, disminuyendo el valor de caudal hasta , enviar todo el caudal hasta que todo el caudal es dirigido hacia el tanque de recolección.

Las características del flujo dependen principalmente de las características de velocidad de la placa diversora, la forma de la sección transversal y el perfil de velocidades transversal a lo largo del ancho del chorro.

La señal de inicio y parada son generados por el paso de una banda reflectiva que tiene el odómetro del medidor de gas, y activa un sensor óptico que envía la señal al computador que toma los datos.

El análisis del proceso de direccionamiento del flujo de un tanque hacia otro, conduce a un modelo matemático dado en la ecuación 28¹⁷.

$$C_{div} = \frac{t''s - t's}{Tm} + \frac{Q' - Q''}{Q_{prom}} * \frac{t's - t''s + ts}{Tm} + \frac{Q_{izq} - Q_{der}}{Q_{prom}} * \frac{T_{chorro}}{Tm} \quad \text{Ecuación 28}$$

y este factor afecta el mensurando de la siguiente forma:

¹⁷ Ecuación tomada de Poschel, W. et al., A unique fluid diverter design for water flow calibración facilities. FLOMEKO 2000.

$$V_{med} = \frac{\Delta m}{r_{aceite}} * (1 + C_{div}) \text{ Ecuación 29}$$

C_{div} : Factor de corrección relativa al diverter.

T_m : tiempo de medición.

T_s : tiempo promedio de t 's y t ''s.

t 's : tiempo de señal de inicio de la prueba (al enviar la primera señal el óptico ubicado en el centro del chorro).

t ''s : tiempo de señal de final de la prueba (al enviar la ultima señal el óptico ubicado en el centro del chorro).

Q' : Caudal al inicio de la medición .

Q'' : Caudal al final de la medición .

Q_{prom} : Caudal de rata promedio.

Q_{izq} : Caudal a la izquierda desde la línea central del chorro.

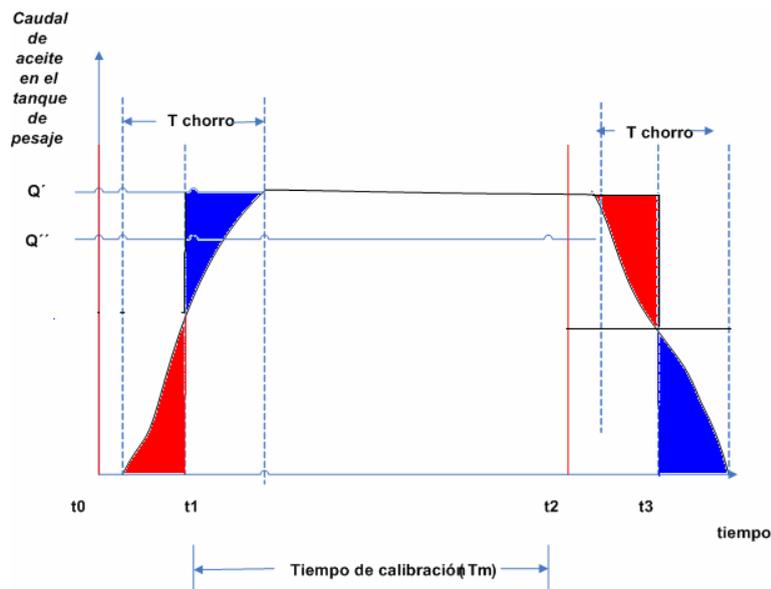
Q_{der} : Caudal a la derecha desde la línea central del chorro.

T_{chorro} : tiempo promedio de transición del chorro.

El factor comprende tres componentes, representados por los tres términos de la ecuación 29.

El primer termino considera diferencia de el tiempo t 's y t ''s , depende de la sincronización exacta de las señales de inicio y parada de la prueba con la actuación del diverter hacia el tanque de pesaje o

Figura 40. Proceso de desviación del caudal en el tanque de pesaje.



hacia el tanque de recolección. Este termino considera el caudal de prueba constante, obteniendo de esta forma que las áreas azules de la figura 40 son iguales entre si, y las áreas rojas son iguales entre si el tiempo que demorara de ir t0 a t1 fuera el mismo que ir de t2 a t3, pero como el movimiento es generado por un cilindro neumático de efecto simple, estos tiempos no son iguales, y por tanto se hace necesario este termino.

El segundo termino de la ecuación considera la diferencia de caudal al inicio y al final de la medición, y hay que tener en cuenta que si $\frac{Q' - Q''}{Q} < 5 * 10^{-2}$

entonces este termino al evaluarse en la en la determinación del mensurando es despreciable y en la estimación de la incertidumbre global del patrón gravimétrico, se encuentra que este termino es considerable, por tanto no se considera en el factor de corrección, pero si en la estimación de la incertidumbre.

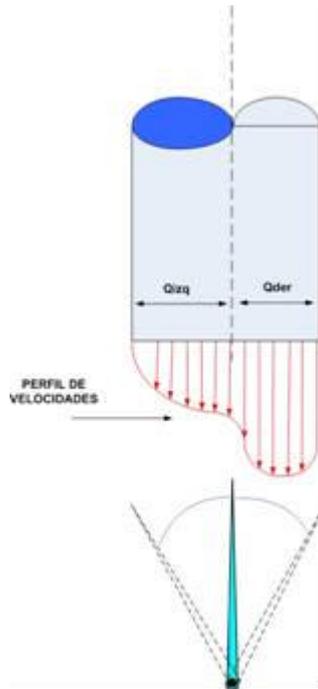
El tercer término considera la asimetría del perfil de velocidades (Vea la figura 41), y al evaluarse con respecto al valor del mensurando total y estimación de la incertidumbre global se detecta que su efecto es despreciable, esto es debido a que las boquillas tienen una longitud considerable para garantizar un perfil simétrico.

por lo tanto el factor de corrección del diverter queda reducido a :

$$C_{div} = \frac{t's - t''s}{Tm} \text{Ecuación 30}$$

Se hace necesario por lo tanto adicionar un sensor de posición que registre los valores de t's y t''s.

Figura 41. Asimetría en el perfil de velocidades



Fuente: El autor

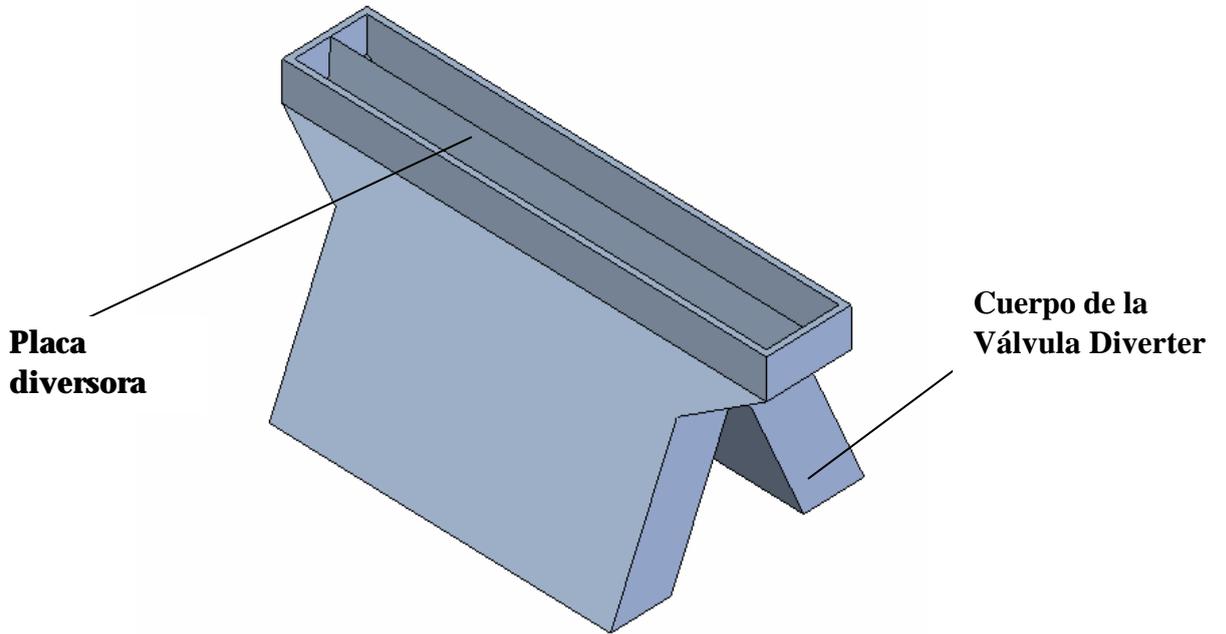
3.5.2. Diseño del diverter

Las dimensiones del diverter se determinan según las medidas con las cuales quedaron las boquillas y el espaciamiento de estas en el montaje general del gravimétrico.

El diseño de las boquillas, se detalla en la sección 3.2.2. Este diseño es importante en el modelamiento de la actuación del diverter, para saber sus dimensiones. Para esto, el modelamiento de la válvula diverter se realiza en solid edge.(Ver figura 42)

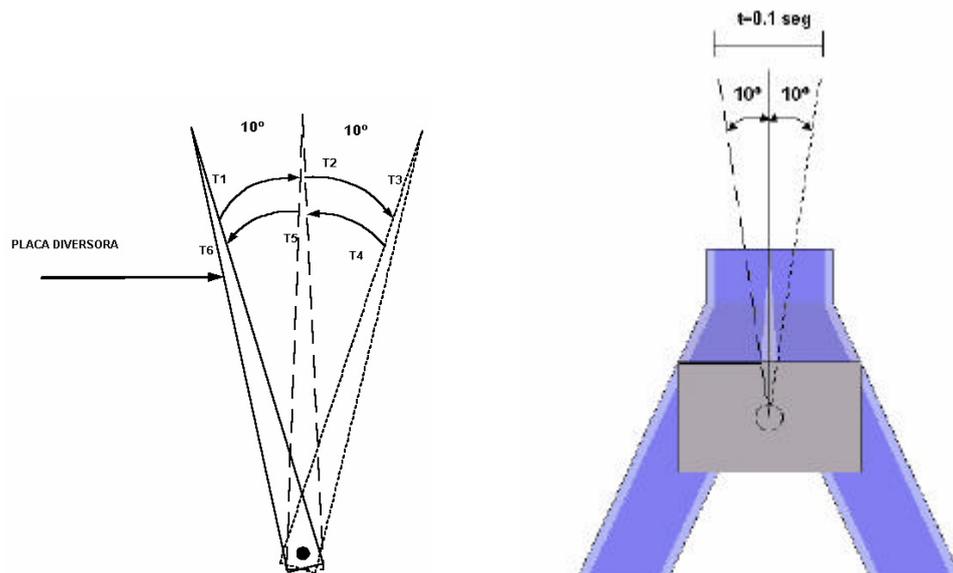
Ahora bien según los requerimientos, el tiempo de actuación de la placa diversora debe ser menor a 0.2 seg. y el ángulo de impacto entre la dirección de flujo de chorro y el plato diversor no deben exceder en valor de 10° . Además según el diseño y construcción de las boquillas la distancia a recorrer por parte de la placa diversora debe ser un poco mayor que 5 mm, equivalente al ancho de las boquillas. (Vea la figura 43)

Figura 42. Válvula Diverter



Fuente: El autor

Figura 43. Requerimientos de actuación de la válvula diverter.



Fuente: El autor

Como el movimiento lo suministra un actuador neumático debido a que es un equipo que puede suministrar la velocidad necesaria a mas bajo costo , se debe

hallar los requerimientos las dimensiones necesarios que debe tener este actuador neumático y que electro válvula seleccionar (ver figura 43).

- Angulo máximo entre la dirección entre el chorro : 10°
- Tiempo de actuación: 0.1 seg.

Según la figura 41, la velocidad angular de la placa diversora es :

$$w = \frac{0.13rad}{0.1seg} = 1.3 rad/seg$$

La velocidad constante aproximada del actuador neumático debe ser (ver figura 43):

$$v_{placa} = w * r_{placa} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$v_{placa} = 1.3 rad/seg * 0.1m = 0.13 m/seg$$

Si el actuador esta ubicado a la misma altura que la punta de la placa diversora, la velocidad necesaria a la que debe actuar es la misma, por lo tanto la velocidad a la cual debe salir el pistón del cilindro es de aproximadamente 0.2 m/seg.

Teniendo en cuenta que la presión de suministro en el laboratorio es de 8 bar.

Se selecciona un cilindro con las siguientes características:

Tabla 22. Características generales del cilindro neumático para la actuación del diverter.

ESPECIFICACIONES	
Marca	Festo (Cilindro compacto)
Diámetro del cilindro	32 mm
Velocidad mínima admisible	0.05 m/seg.
Velocidad máxima admisible	1.5 m/seg.
Fuerza del cilindro máxima	640N
Carrera	20 mm

Se selecciona una electroválvula que reciba la señal la señal que envía el odómetro del medidor en prueba. La electroválvula tiene las siguientes características:

Tabla 23. Características generales de la válvula electroneumática.

ESPECIFICACIONES	
Marca	Festo (Cilindro compacto)
Diámetro del pisto del cilindro	32 mm
Velocidad mínima admisible	0.05 m/seg.
Velocidad máxima admisible	1.5 m/seg.
Fuerza del cilindro máxima	640N
Carrera	20 mm

Figura 44. Válvula electroneumática.



Fuente: El autor

El montaje del sistema de actuación del diverter se muestra en la figura 49.

➤ **Construcción de la válvula diverter**

La válvula diverter se construyó en lamina de acrílico transparente de espesor de 3mm.

De la misma forma en la construcción de las boquillas; Se fabricaron moldes en cartón paja que se usaron de base para el posterior corte y doblado de la lamina de acrílico, la unión se realizó con el liquido pegante cloruro de metileno, y luego se adiciona el polvo sellante para evitar fugas en las uniones.

A continuación se muestra en la figura 45 el montaje de la válvula diverter

Figura 45. Montaje válvula diverter



Fuente: El autor

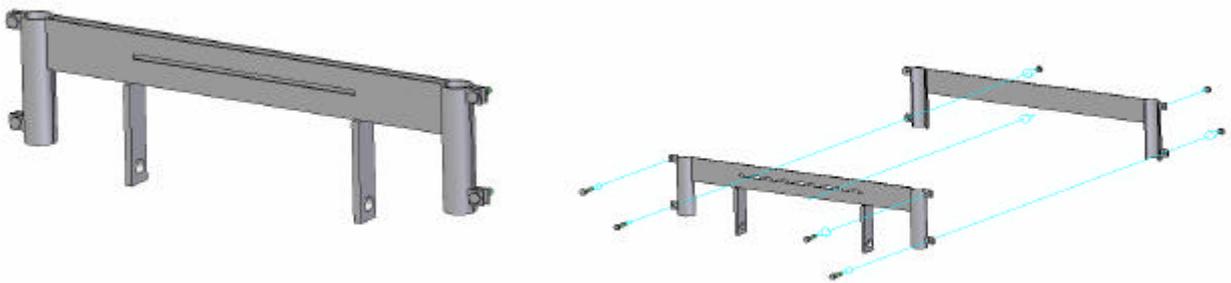
3.5.3. Alineación de las boquillas con la válvula diverter

Para que la desviación del flujo en el sistema boquilla-diverter sea el adecuado, el centro de las boquilla debe estar alineado con el eje central del diverter, de lo contrario se generara un error en la medición del volumen de aceite.

Para esto se hace necesario emplear una pieza que alinee las boquillas con el diverter y que esté fija sobre la estructura soporte.

Su modelamiento tridimensional se realiza en Solid Edge. Esta pieza llamada alineador, se muestra en la figura 46.

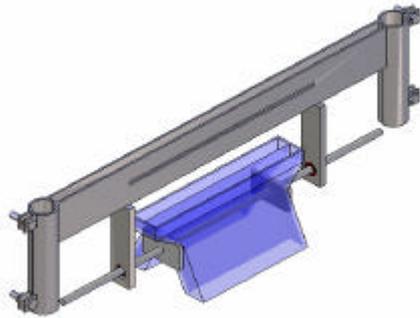
Figura 46. Alineador del diverter y su despiece



Fuente: El autor

En la figura 47 se muestra el modelamiento del montaje de la válvula diverter en el alineador.

Figura 47. Montaje del diverter en el alineador.



Fuente: El autor

➤ **Construcción del alineador**

Su construcción se realizó en un taller de metalmecánica, en acero A36 y soldadura de arco eléctrico 839.

Durante la construcción del alineador, se realizaron unos cambios al diseño dimensional, con el objeto de facilitar el montaje del cilindro neumático y la válvula electro neumática.

Figura 48. Montaje del alineador con el diverter , en la estructura metálica



Fuente: El autor

Figura 49. Montaje de la válvula electro neumática y el cilindro neumático en el alineador



Fuente: El autor

3.6. ESTRUCTURA SOPORTE DEL PATRON GRAVIMETRICO

La estructura soporte se tiene que rediseñar debido a que la carga que tiene que soportar varia considerablemente y que el tanque que va soportar tiene forma y dimensiones diferentes.

La carga a soportar es la siguiente:

Volumen de aceite: 150 litros, correspondiente aproximadamente a 140 Kg.

- Peso del tanque esférico: 20 Kg.
- Peso válvula de globo: 0.5 Kg. c/u (dos válvula de globo)
- Peso válvula de globo: 0.7 Kg.
- Peso de las boquillas: 1 Kg. c/u aproximado
- Peso divisor: 5 Kg.
- Otros: 32 Kg.

Peso total: 210 Kg.

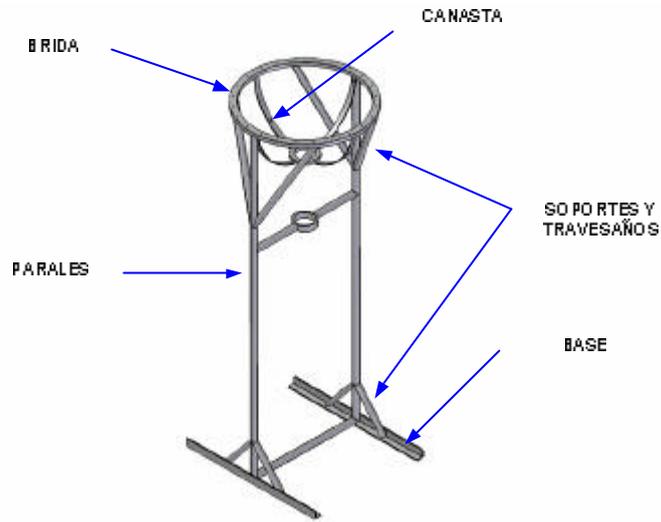
La forma de la estructura se muestra en la figura 50.

3.6.1. Diseño de la estructura soporte

El diseño de la estructura metálica para los nuevos requerimientos de cargas y dimensiones se realiza con base en el modelamiento en SAP 2000.

El método seleccionado en SAP 2000 para la solución es el del esfuerzo admisible.

Figura 50. Estructura metálica, soporte para el patrón gravimétrico



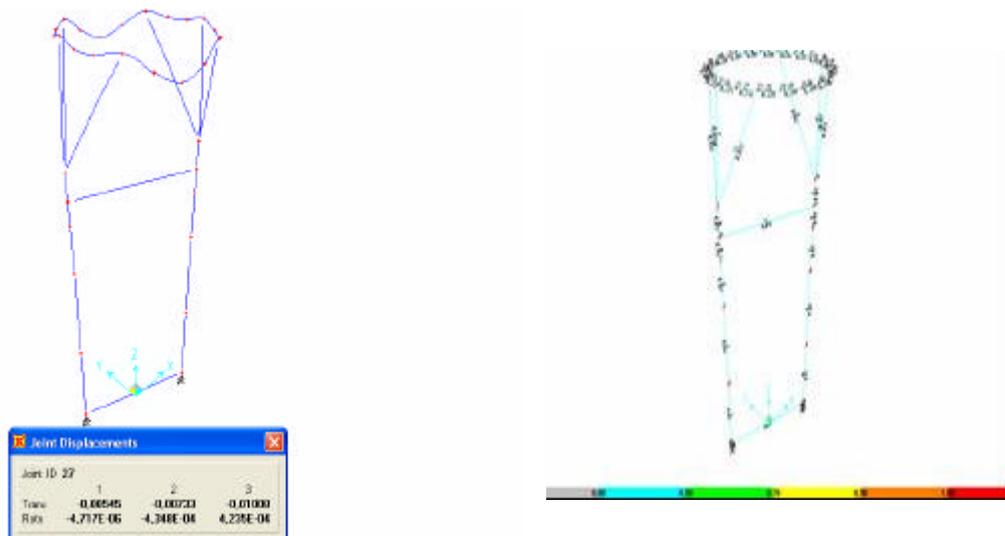
Fuente: El autor

Tabla 24. Propiedades del material al utilizar en la estructura metálica.

MATERIAL	MODULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm ²)	RAZON DE POISSON	COEF. TERMICO ()	DENSIDAD Kg/cm ³)	ESFUERZO DE TENSION (Kg/cm ²)
ACERO CARBONO A 36	2038901,92	0,3	1,17E-05	7,98E-06	2531,051

La evaluación grafica se observa en la figura 51.

Figura 51. Análisis de deformación y esfuerzos de la estructura en SAP 2000



Fuente: El autor

El análisis de las deformaciones es resumido en la tabla 25. Los nodos mencionados en las tablas son los correspondientes a la figura 51.

Después de una iteración variando las secciones de la estructura, se obtiene una solución con las siguientes secciones:

Rectangular maciza de 0.05 m de ancho y espesor de 0.01 m para la brida de la estructura metálica (En la tabla 26 es identificado como “RECTANG”).

Tubo circular de diámetro exterior de 0,055 m y espesor de 0.005 m, para los dos párales principales (En la tabla 26 es identificado como “TUBO”).

Tubo circular de diámetro externo de 0.035m y espesor de 0.005 m, para todos los tubos que van en diagonal (En la tabla 26 es identificado como “TUBO2”).

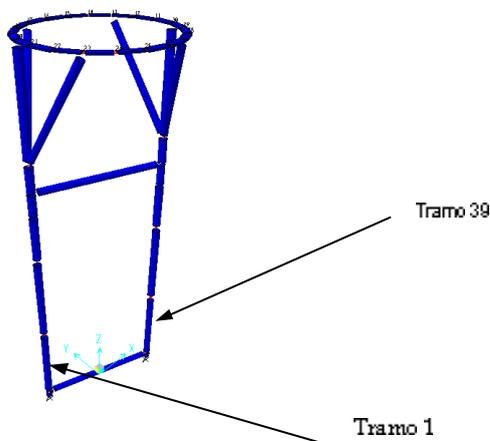
Cabe aclarar que en la simulación en SAP 2000 no se incluyeron las secciones que se utilizan como asentamiento en el piso, para simplificar y hacer mas fácil la simulación. Estas fueron reemplazadas por dos apoyos empotrados.

Los valores del análisis de esfuerzos para todos los tramos se observa en la tabla 26.

El mayor desplazamiento se presenta en el nodo 15 y en dirección z y con un valor de $8,20E-02$ cm.

En el análisis de esfuerzos se detecta que el tramo que esta sometido a mayor esfuerzos es numero 1 y 39 ubicados, como se muestra la figura 52, y sus valores de cargas se muestran en la tabla 27.

Figura 52. Ubicación de los tramos 1 y 39.



Fuente: El autor

Tabla 25. Desplazamiento y rotación de cada nodo para evaluar deformación.

	DESPL X (cm)	DESPL Y (cm)	DESPL Z (cm)	ROT X (rad)	ROT Y (rad)	ROT Z (rad)
1	4,52E-05	2,25E-06	-1,22E-04	1,81E-06	1,50E-05	-1,98E-07
2	4,52E-05	2,25E-06	-1,22E-04	1,81E-06	1,50E-05	-1,98E-07
3	1,34E-03	-2,83E-04	-1,19E-03	4,51E-06	1,69E-05	-1,06E-06
4	-1,34E-03	2,83E-04	-1,19E-03	-4,51E-06	-1,69E-05	-1,06E-06
5	1,69E-03	-3,74E-04	-2,32E-03	-4,16E-06	-1,33E-05	-1,99E-06
6	-1,69E-03	3,74E-04	-2,32E-03	4,16E-06	1,33E-05	-1,99E-06
7	7,08E-04	-6,38E-05	-2,87E-03	-1,30E-05	-4,09E-05	-2,45E-06
8	-7,08E-04	6,38E-05	-2,87E-03	1,30E-05	4,09E-05	-2,45E-06
9	-1,14E-03	5,26E-04	-3,42E-03	5,34E-06	1,57E-05	-2,66E-06
10	1,14E-03	-5,26E-04	-3,42E-03	-5,34E-06	-1,57E-05	-2,66E-06
11	-1,27E-02	4,44E-03	-1,95E-02	-1,03E-03	1,52E-04	-2,86E-04
12	-6,62E-03	5,47E-03	-2,11E-02	7,05E-04	4,38E-04	-4,70E-04
13	6,07E-05	8,92E-03	-1,01E-02	-2,52E-04	-3,54E-04	-4,29E-04
14	3,93E-03	1,28E-02	-5,15E-02	-2,83E-03	-2,05E-03	-2,47E-04
15	4,86E-03	1,45E-02	-8,20E-02	-1,96E-03	6,37E-04	-2,66E-06
16	4,59E-03	1,26E-02	-5,15E-02	-1,09E-03	3,32E-03	2,41E-04
17	5,45E-03	7,33E-03	-1,01E-02	4,72E-06	4,35E-04	4,23E-04
18	8,78E-03	6,87E-04	-2,11E-02	3,13E-04	-7,69E-04	4,65E-04
19	1,31E-02	-3,68E-03	-1,95E-02	-9,20E-04	4,81E-04	2,81E-04
20	1,50E-02	-4,75E-03	-3,73E-03	1,04E-04	3,20E-04	-2,67E-06
21	1,27E-02	-4,44E-03	-1,95E-02	1,03E-03	-1,52E-04	-2,86E-04
22	6,62E-03	-5,47E-03	-2,11E-02	-7,05E-04	-4,38E-04	-4,70E-04
23	-6,07E-05	-8,92E-03	-1,01E-02	2,52E-04	3,54E-04	-4,29E-04
24	-3,93E-03	-1,28E-02	-5,15E-02	2,83E-03	2,05E-03	-2,47E-04
25	-4,86E-03	-1,45E-02	-8,20E-02	1,96E-03	-6,37E-04	-2,66E-06
26	-4,59E-03	-1,26E-02	-5,15E-02	1,09E-03	-3,32E-03	2,41E-04
27	-5,45E-03	-7,33E-03	-1,01E-02	-4,72E-06	-4,35E-04	4,23E-04
28	-8,78E-03	-6,87E-04	-2,11E-02	-3,13E-04	7,69E-04	4,65E-04
29	-1,31E-02	3,68E-03	-1,95E-02	9,20E-04	-4,81E-04	2,81E-04
30	-1,50E-02	4,75E-03	-3,73E-03	-1,04E-04	-3,20E-04	-2,67E-06
31	1,40E-04	-2,07E-04	-3,13E-03	1,81E-05	5,66E-05	-2,67E-06
32	-1,40E-04	2,07E-04	-3,13E-03	-1,81E-05	-5,66E-05	-2,67E-06
33	0	0	0	0	1,15E-05	0
34	-4,52E-05	-2,25E-06	-1,22E-04	-1,81E-06	-1,50E-05	-1,98E-07
35	0	0	0	0	-1,15E-05	0

Tabla 26. Análisis de esfuerzos de la estructura metálica por el método AISC-ASD89.

TRAMO	SECCION	CHEQUEO DE INTERACCION DEL ESFUERZO NORMAL				CORTANTE	
		RAZON	AXL	B33	B22	CORTANTE 33	CORTANTE 22
1	TUBO2	0,441	0,44	0,001	0	0,001	0
2	TUBO	0,012	0,005	0,007	0	0	0
3	TUBO2	0,433	0,432	0,001	0	0	0
4	TUBO2	0,433	0,432	0,001	0	0	0
5	TUBO2	0,429	0,424	0,004	0,001	0	0
6	TUBO2	0,429	0,424	0,004	0,001	0,009	0,003
7	TUBO2	0,081	0,035	0,035	0,011	0	0
8	TUBO2	0,426	0,42	0,005	0,001	0,001	0,001
9	TUBO	0,039	0,014	0,017	0,008	0,002	0,001
10	TUBO2	0,045	0,006	0,029	0,01	0,001	0,001
11	TUBO	0,039	0,014	0,017	0,008	0,001	0,001
12	TUBO	0,039	0,014	0,017	0,008	0,001	0,001
13	TUBO	0,039	0,014	0,017	0,008	0,002	0,001
14	TUBO2	0,045	0,006	0,029	0,01	0,002	0,003
15	RECTANG	0,121	0,005	0,072	0,044	0,007	0,006
16	RECTANG	0,217	0,004	0,177	0,036	0,009	0,002
17	RECTANG	0,328	0,002	0,299	0,027	0,005	0,001
18	RECTANG	0,199	0,003	0,145	0,051	0,005	0,001
19	RECTANG	0,199	0,003	0,145	0,051	0,009	0,002
20	RECTANG	0,328	0,002	0,299	0,027	0,007	0,006
21	RECTANG	0,217	0,004	0,177	0,036	0,002	0,003
22	RECTANG	0,121	0,005	0,072	0,044	0,007	0,001
23	RECTANG	0,227	0,005	0,163	0,059	0,007	0,001
24	RECTANG	0,227	0,005	0,163	0,059	0,007	0,001
25	RECTANG	0,227	0,005	0,163	0,059	0,002	0,003
26	RECTANG	0,121	0,005	0,072	0,044	0,007	0,006
27	RECTANG	0,217	0,004	0,177	0,036	0,009	0,002
28	RECTANG	0,328	0,002	0,299	0,027	0,005	0,001
29	RECTANG	0,199	0,003	0,145	0,051	0,005	0,001
30	RECTANG	0,199	0,003	0,145	0,051	0,009	0,002
31	RECTANG	0,328	0,002	0,299	0,027	0,007	0,006
32	RECTANG	0,217	0,004	0,177	0,036	0,002	0,003
33	RECTANG	0,121	0,005	0,072	0,044	0,007	0,001
34	RECTANG	0,227	0,005	0,163	0,059	0,009	0,003
35	TUBO2	0,081	0,035	0,035	0,011	0	0
36	TUBO2	0,426	0,42	0,005	0,001	0,001	0
37	TUBO	0,004	0,001	0,003	0	0,003	0,001
38	TUBO	0,092	0,086	0,004	0,002	0	0
39	TUBO2	0,441	0,44	0,001	0	0,003	0,001
40	TUBO	0,092	0,086	0,004	0,002	0	0

Tabla 27. Cargas y esfuerzos máximos en la estructura metálica

CARGAS Y ESFUERZOS DE LOS TRAMOS 1 Y 39	APLICADA	ADMISIBLE	RELACION DE INTERACCION
Carga axial (kg.)	31,45	71,51	0,43979863
Mayor momento de flexión (kg-cm)	1,5	1670,5	0,00089793
Menor momento de flexión (kg-cm)	0,72	1670,5	0,00043101
Mayor cortante	0,096	1012,3	9,4834E-05
Menor cortante	0,034	1012,3	3,3587E-05

3.6.2. Construcción de la estructura metálica.

La construcción de la estructura metálica se realizó en el taller de mecánica industrial “Industrias Acero”. El material y las secciones utilizadas se presentan a continuación:

Tabla 28. Material utilizado para la construcción de la estructura metálica

MATERIAL	PARTE	SECCION
A 36	PARALES	TUBO 2" SCH 40
A 36	BRIDA	RECTANGULAR 2" X 3/8"
A 36	SOPORTES Y TRAVESAÑOS	TUBO ½" SCH 40
A 36	BASE	ANGULO 1/4"X 2-1/2"
A 36	CANASTILLA ESFERICA	RECTANGULAR ¼"X 2"

Se utilizó soldadura de arco eléctrico 839, el acabado final de la estructura se realizó con pintura electrostática. Vea la figura 53.

Figura 53. Estructura metálica con reservorio hermético montado



Fuente: El autor

3.7. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Por medio de un análisis preliminar hecho sobre la incertidumbre global del banco Gravimétrico, se obtuvo el factor de incidencia de cada uno de los componentes que hacen parte este (Ver apéndice D)¹⁸.

Según el análisis hecho en el apéndice D se obtiene una incertidumbre expandida global del 0.3% para el mayor caudal y del 0.2% para el menor caudal , con una confiabilidad del 95%.

A continuación se muestra una tabla de los instrumentos necesarios, detallando aquellos con cuales se cuenta y no se cuenta:

¹⁸ Apéndice D informa acerca del análisis de la incertidumbre de cada componente

Tabla 29 Instrumentación necesaria para la adquisición de datos

Variable	Instrumento	Disponibilidad
Temperatura Ambiente	RTD	Existe
Temperatura aceite en el reservorio hermético	RTD	No existe
Temperatura del aire en el reservorio hermético	RTD	No existe
Temperatura Medidor In	RTD	Existe
Temperatura Medidor Out	RTD	Existe
Presión Atmosférica	Barómetro	Existe
Δ Presión Medidor	Barómetro	Existe
Humedad	Higrómetro	Existe
Masa	Balanza	No existe
Volumen medidor	Sensor Óptico	Existe
Corrección del diverter	Sensor Óptico	No existe
Densidad	Picnómetro	No existe
Tiempo	Cronometro	No existe

Los instrumentos con los cuales no se cuenta, evalúan parámetros que son críticos en la medición del mensurando (Volumen de gas), y la estimación de la incertidumbre del patrón.

3.7.1. Medición de la masa

Para la medición de la se requiere adquirir una balanza con la capacidad necesaria para las pruebas (capacidad de 50 litros aproximadamente 44 kg de aceite), siendo este un aspecto crítico dado que el patrón se basa en gravimetría.

Es de importancia mencionar que la balanza que se use debe tener un informe de calibración con trazabilidad a la Superintendencia de Industria y Comercio, con el objetivo de asegurar un valor confiable del valor de la masa.

Según el estudio de la estimación incertidumbre global del patrón Gravimétrico, la medición de la masa es el parámetro que mas aporta el presupuesto de fuentes de error. Por tanto se debe seleccionar una balanza de las características optimas para lograr alcanzar los niveles de incertidumbre esperados, y que los costos sean los mas bajos.

Los requisitos se especifican a continuación y son tomados según el análisis de incertidumbre (apéndice D). Capacidad = mayor que 60000 gr. Para garantizar que el patrón trabaje con el volumen de calibración (volumen de calibración: 50 dm³). Repetibilidad= +/- 1 gr.

Resolución = 1 gr.

Las especificaciones de la balanza seleccionada y comprada se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 30. Especificaciones de la balanza

ESPECIFICACIONES	
Marca	Mettler toledo
Modelo	KCC 150
Rango de operación	0 - 150 Kg
Unidad de medida	Gramos
Escala mínima	1 gr.

3.7.2. Medición de la densidad

La densidad del fluido del aceite se ve afectado por diversos aspectos como son: el desgaste de los aditivos, la contaminación con polvo, insectos y partículas del ambiente externo, aumentando o disminuyendo la densidad.

Por esto se hace necesario medir la densidad del fluido antes del procedimiento de calibración.

Para la medición de la densidad se selecciona un picnómetro, este instrumento consiste de un frasco de reducidas dimensiones (de 10 a 100ml) con un tapón esmerilado y hueco, que permite mantener dentro del mismo un volumen de líquido constante.

Algunos modelos constan de un termómetro adosado a él, de modo de conocer la temperatura del fluido. En el caso del laboratorio del CDT de Gas no es necesario debido a que las condiciones ambientales se mantienen controladas y los instrumentos están siempre dentro del cuarto de manera que todo se mantenga a una misma temperatura.

El procedimiento para hallar la densidad del fluido es el siguiente:

- Se pesa el picnómetro sin fluido (m_1)
- Se adiciona fluido al picnómetro hasta que quede lleno totalmente y se pesa para hallar la masa (m_2).
- Se halla la densidad del fluido (r_{aceite}) con la ecuación:

$$r_{aceite} = \frac{m_2 - m_1}{V_{picnometro}} + r_{aire} \quad \text{Ecuación 32}$$

Esta ecuación fue tomada de la recomendación hecha por el ente que calibró el picnómetro (Metrocalidad). Como ya se mencionó este método mantiene un volumen constante que es calibrado con una incertidumbre bastante baja. Esto hace que la precisión en la determinación de la densidad por esta técnica dependa fundamentalmente de la precisión de la balanza usada. El laboratorio del CTD de Gas cuenta con una balanza calibrada y adecuada para bajas valores de masa, debido a que se va trabajar con un valor aprox. de masa de 40 gr. de aceite.

Las especificaciones del picnómetro y la balanza se muestran a continuación:

Tabla 31 Características generales del Picnómetro

ESPECIFICACIONES	
Marca	BRAND
Material	Boro silicato 3.3.
Volumen nominal	50 cm ³
Volumen calibrado	51,613 cm ³
Incertidumbre de calibración	0.0064 cm ³
Tipo de tapón	NS 10/19 con capilar. Extremo superior del tapón esmerilado

Figura 54. Picnómetro de volumen nominal de 50 ml



El autor

Tabla 32 Características generales de la balanza

ESPECIFICACIONES	
Marca	Mettler Toledo
Unidad de medida	Gramos
Rango de operación	0 – 310 gr.
Incertidumbre de calibración	0.01 gr.
Escala mínima	1 mg.

3.7.3. Medición de la temperatura del aceite en el reservorio hermético

En la recirculación del aceite se emplea una bomba que moviliza el aceite del tanque de recolección al reservorio hermético pudiendo variar levemente la temperatura del aceite.

Por tal motivo, la temperatura de aceite en el reservorio hermético es diferente a la temperatura del instante que se determina la densidad de este ($20 \pm 1^\circ\text{C}$), por la técnica del picnómetro. La densidad del aceite se ve afectada considerablemente por un cambio de temperatura, por tanto para saber el volumen que ocupa el aceite en el reservorio hermético, se necesita saber la temperatura del aceite en este y con el cual no se cuenta.

Se requiere entonces un sensor de temperatura para corregir el volumen por efecto de expansión volumétrica del aceite. El sensor de temperatura seleccionado y adquirido se especifica a continuación:

Tabla 33 Características generales del sensor de temperatura del aceite en el reservorio hermético.

ESPECIFICACIONES	
Marca	Watlow
Longitud del bulbo	0.125 m
Rango de operación	-50 a 260 C
Conexión	¼ " NPT

Figura 55 Sensor de temperatura tipo RTD



Fuente: El autor

3.7.4. Medición de la temperatura del aire en el reservorio hermético.

En el antiguo banco gravimétrico del CDT de Gas, las condiciones del aire en el reservorio hermético no se podían registrar debido a que no se contaba con instrumentación necesaria.

Es importante conocer la temperatura del aire en el reservorio hermético con el fin de corregir después el volumen de las condiciones del reservorio a las condiciones ambientales a las cuales entra el aire en el medidor con la ecuación de PV T.

El sensor de temperatura seleccionado y comprado se especifica a continuación:

Tabla 34 Características generales del sensor de temperatura del aire en el reservorio hermético

ESPECIFICACIONES	
Marca	Watlow
Longitud del bulbo	0.05 m
Rango de operación	-50 a 260 C
Conexión	¼ " NPT

3.7.5. Señales de posición de la válvula diverter

De la sección 3.4. se concluye que se necesita registrar el tiempo que le toma a la placa desviadora del diverter pasar por la línea central de las boquillas.

Se instaló un sensor de posición que envía una señal en el instante en que la placa desviadora pasa por el centro de su trayectoria

3.7.6. Modulo de i/o para el acondicionamiento de las señales de temperatura

Las señales eléctricas generadas por las RTDs del aceite y del gas en el reservorio hermético no cuentan con módulos acondicionadores, por tanto se selecciona y compra un modulo SNAP-AIRTD que proporciona dos canales de conversión analógica digital. El rango nominal de entrada es de -200 a 850 C , adecuado para las RTDs seleccionadas anteriormente.

Las características del SNAP-AIRTD se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 35. Especificaciones del modulo, para acondicionamiento de las RTD.

ESPECIFICACIONES	
Variable de medición	Temperatura
Sensor a instalar	RTD
Rango de operación	-200 a 850 C
Tiempo de respuesta	A 598 C / 25 ms
Precisión	0.6 C

3.7.7. Medición del tiempo de prueba

La medición del tiempo de prueba, como también la medición del tiempo que le toma a la placa desviadora pasa por la línea de centro de las boquillas es primordial para la obtención del factor de corrección del diverter y el caudal medio del cual se habló en la sección 4.4. Por tanto se utiliza un cronometro con las siguientes especificaciones:

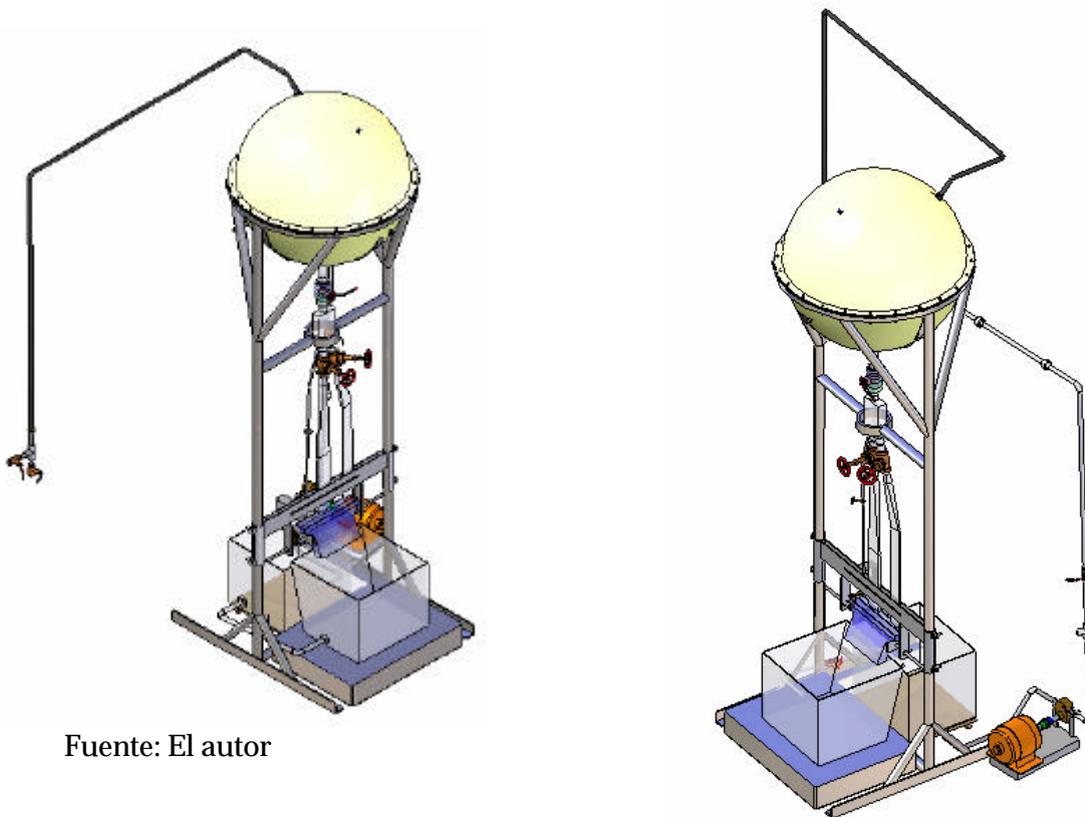
Tabla 36. Especificaciones del modulo, para acondicionamiento de las RTD

ESPECIFICACIONES	
Variable de medición	Tiempo
Elaborado por:	Ing. Edwin Cordoba
Rango de operación	Hasta 518460 seg.
Tiempo de respuesta	25 ms
Resolución	0.001 seg.

3.8. MONTAJE DEL PATRON GRAVIMETRICO

Después de haber diseñado, seleccionado y comprado los elementos constitutivos del banco, se procede a realizar su montaje definitivo para conformar el patrón gravimétrico. El modelamiento del montaje del patrón gravimétrico se muestra en la figura 56.

Figura 56. Vistas isométricas del montaje del patrón final gravimétrico



Fuente: El autor

El primer paso consistió en ensamblar los couplings o conexiones para tubería y sensores, en el reservorio hermético. Estas conexiones se montaron con o-rings y aplicación de masilla de fibra Mak, para garantizar hermeticidad en el reservorio. El segundo paso fue el montaje del reservorio hermético en la estructura soporte. Este fue montado, ajustando treinta y dos tornillos de 3/8" con su respectiva tuerca y dos arandelas en la brida del reservorio y la estructura. Entre los dos cascos esféricos del reservorio, se colocó un empaque de neopreno de 3/8" de espesor, asegurando hermeticidad en la unión de los dos cascos.

El tercer paso fue montar el sistema de tubería de descarga. Se utilizó tubería de PVC transparente de 1", para las secciones donde se necesitaba tubería circular. Las conexiones entre tubería y válvulas se realizaron con adaptadores macho de PVC de 1".

Figura 57. Conexiones del sistema de tubería de descarga



Fuente: El autor

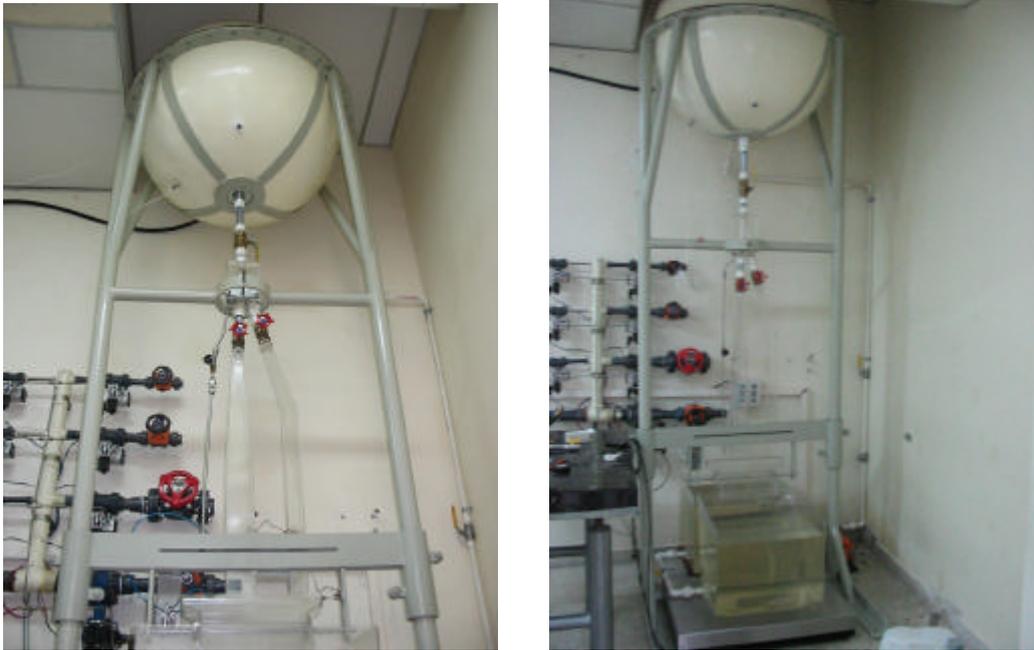
El cuarto paso consistió en el montaje del sistema de recirculación. Para el sistema de recirculación, se utilizó tubería de PVC de 1/2", y accesorios de PVC (codos 1/2", universales, etc). La bomba, el motor y la válvula antirretorno utilizados no se cambiaron, pues no había necesidad.

Con el objetivo de que el gas que circule hacia el patrón, circule también por el medidor se utiliza un sistema de conexión constituido por una manguera de neopreno de 3/4" de diámetro, y un juego de válvula de bola para permitir o impedir el paso de aire hacia el gravimétrico o hacia el medidor, o que circule por los dos.

La instalación de la instrumentación (RTDs, balanza, sensor óptico, etc.) se realiza como último paso en el montaje.

El montaje del patrón final se muestra en la figura 58.

Figura 58. Montaje final del Patrón primario gravimétrico



Fuente: El autor

4. CALIBRACIÓN Y TRAZABILIDAD DEL PATRON GRAVIMETRICO

La medición es la base de todo comercio entre productores, transportadores, plantas de procesos, vendedores, autoridades federales y estatales y el público en general; por lo tanto, siempre es indispensable mantener niveles de incertidumbre adecuados en cada instalación o sistemas de medición relacionados con la transferencia de custodia de algún fluido valioso como el gas natural; para lograrlo es necesario establecer y mantener trazabilidad a patrones nacionales o internacionales, reduciendo de esta manera los errores asociados a las mediciones.

Por tal razón, es esencial tener un control permanente en el mantenimiento y mejora de los equipos de medición de flujo de gas establecidos como patrones nacionales o internacionales.

El patrón primario gravimétrico, establecido por el CDT de Gas como patrón para medición de flujo de gas para bajos caudales, debe garantizar una medición correcta; para esto la principal responsabilidad del laboratorio es la de preservar y mejorar las características metrológicas del patrón.

La confiabilidad en las mediciones que realiza un determinado laboratorio, con un patrón específico, se soporta sobre lo siguiente:

- a. Que sus mediciones estén referidas al sistema internacional de medidas (**SI**).
- b. Que se realice la calibración al patrón.
- c. Que los instrumentos que intervienen en la medición del mensurando tengan trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.
- d. Que el procedimiento de calibración utilizado para realizar las mediciones, este validado. Esta validación es realizada a través de una intercomparación con otro patrón con mejores o iguales cualidades metrológicas y referenciado a estándares de exactitud consistentes.

- e. Que se obtenga la información necesaria para poder estimar las incertidumbres asociadas a las mediciones realizadas.

Las mediciones del patrón gravimétrico están referidas al sistema internacional de medidas, utilizando como unidad en sus resultados, dm³, K, mBar, cumpliendo de esta forma el requisito a.

4.2. CALIBRACION DEL PATRON GRAVIMETRICO

Para obtener la calibración de un patrón primario, se calibran los instrumentos que miden las magnitudes que intervienen en la obtención del mensurando. En el caso del patrón gravimétrico, los instrumentos que intervienen en la medición del volumen de gas son:

- Balanza (medición de masa del aceite) es el instrumento mas importante y con el cual por medir una magnitud pura, se obtienen mejores cualidades metrológicas en la obtención del valor del mensurando.
- Picnómetro (medición de volumen). Es el segundo en importancia, por tanto su calibración y mantenibilidad se hace esencial en la obtención de una medición de volumen de gas confiable.
- RTDs (medición de temperatura)
- Sensores de Presión (medición de presión)
- Higrómetro (Medición de la humedad)
- Cronometro (Medición del tiempo)

Es necesario realizar las calibraciones de los instrumentos periódicamente. El lapso de tiempo entre calibración y calibración lo establece el ente que realice dicha prueba.

Pero para garantizar el mantenimiento de la fiabilidad de la medición, no basta solo con las calibraciones periódicas; es necesario que el laboratorio CDT de Gas realice verificaciones a cada instrumento. Esta verificaciones son menos estrictas que las calibraciones y suministran información acerca del comportamiento normal o anormal del instrumento, del tal forma que después de cierto tiempo de realizada la calibración, se verifique que no haya anomalías.

Las verificaciones, obviamente se realizan entre lapsos de tiempos mas cortos que las calibraciones, y se establece de acuerdo a la importancia, sensibilidad y condiciones a las que esta sometida cada instrumento.

A continuación se describe las calibraciones realizadas a los instrumentos que hacen parte del gravimétrico, con el objetivo de definir que tipo de verificación realizar a cada instrumento.

4.2.1. Calibración de la balanza

La calibración de la balanza, como ya se había mencionado fue realizada por Vansolix. Esta calibración fue realizada en las instalaciones del laboratorio del CDT de Gas, específicamente en el sitio donde normalmente trabaja, por recomendaciones del metrologo encargado de la calibración.

La calibración de la balanza comprende la realización de un conjunto de operaciones metrológicas y técnicas, que tienen como fin la determinación de los desvíos en los parámetros a considerar : " *Excentricidad - Histéresis - Movilidad - Efecto del dispositivo de puesta a cero* ". Y se describen a continuación.

✓ Excentricidad.

Sobre cada uno de los puntos de apoyo del dispositivo receptor de carga, se coloca una carga de prueba.

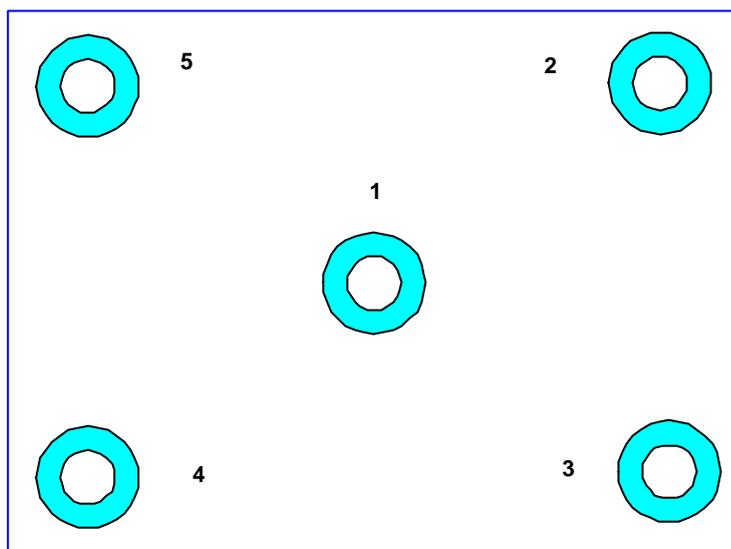
Cuando dos puntos de apoyo están muy próximos y la carga de prueba no puede entonces ser ubicada en las condiciones precedentes, dicha carga se duplica y se reparte sobre una superficie doble, a ambos lados del eje de los puntos de apoyo. Antes de realizar la carga de los puntos de apoyo se verifica que la indicación del instrumento sea cero, esta verificación se efectúa antes de iniciar la carga de cada punto de apoyo.

Esta prueba consistió en ubicar una masa determinada en ciertos puntos de la plataforma de la balanza y que se muestran en la figura 59.

Las masas utilizadas para todas las pruebas son patrones de masa con trazabilidad a la Superintendencia de Industria y Comercio. El valor de la masa utilizada para esta prueba es de 50 kg.

Para la primera toma de dato, se coloca la masa en la posición 1 de la figura 59 y se toma el valor de la indicación de la balanza. Luego para la segunda toma de dato se coloca la masa en la posición 2 de la figura 59 y se toma la indicación de la balanza, y así sucesivamente de tal forma que se obtiene la secuencia 1-2-3-4-5-1.

Figura 59. Esquema de prueba de excentricidad



Fuente: El autor

✓ **Invariabilidad (repetibilidad)**

Es la diferencia entre los resultados obtenidos en el transcurso de 10 ciclos de pesada de una misma carga.

Las cargas utilizadas son 10Kg, 40 Kg y 80 Kg, con la posibilidad de que estas cargas sean pesas patrones o bien que garanticen su masa en el tiempo que transcurre el ensayo. Y para cada valor de masa se toman 10 valores de indicación de la balanza.

Con esta prueba se obtiene el reporte de la incertidumbre de la balanza.

✓ **Movilidad.**

Con el instrumento cargado en equilibrio, se debe colocar sin choque una sobrecarga equivalente como máximo a 1,4 veces el valor de la división discontinua, esta deberá provocar un cambio en la indicación o impresión, equivalente a una división discontinua. En el caso de que al aplicar la sobrecarga

igual a 1,4 veces el valor de la división discontinua, se produzca un cambio en la indicación equivalente a 2 divisiones discontinuas, se retira la sobrecarga aplicada, para posteriormente ir adicionando sin choque de una en una sobrecargas iguales a un décimo del valor correspondiente a la división discontinua, hasta que se produzca el cambio de indicación o de impresión. A partir de ese momento se vuelve a colocar sin choque una sobrecarga equivalente como máximo a 1,4 veces el valor de la división discontinua, esta deberá provocar un cambio en la indicación o impresión, equivalente a una división discontinua. Estos ensayos se realizan para los siguientes estados de carga:

en la capacidad mínima (0 Kg);

en el 50 % de la carga aplicada(40Kg);

en el 100 % de la carga aplicada(80Kg).

El valor de sobrecarga es de 1400mg. Equivalente a 1.4 veces El valor de la mínima división o división discontinua.

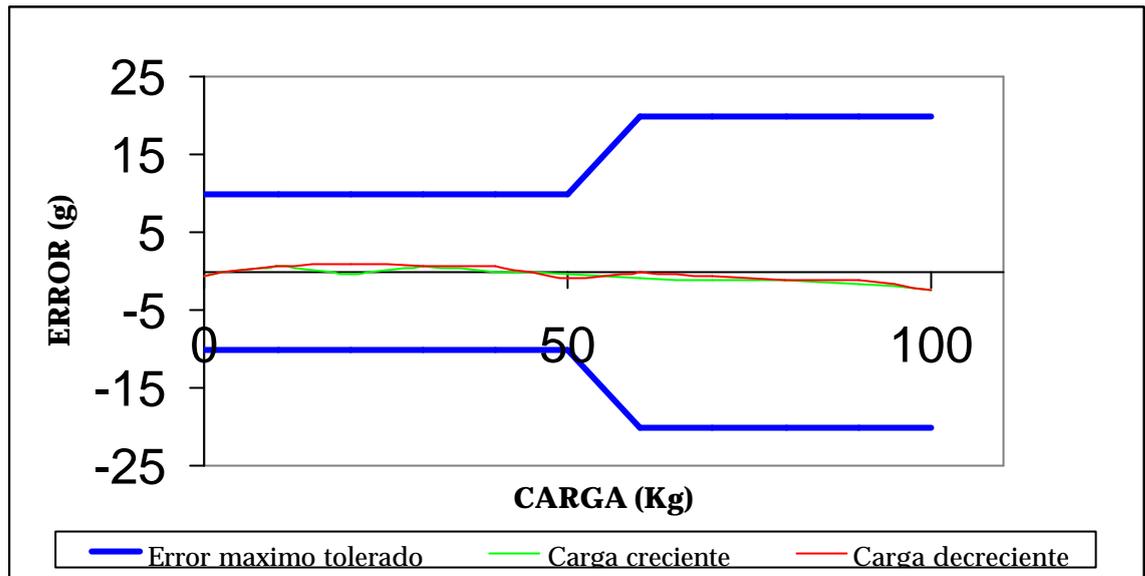
✓ **Histéresis**

Con los datos obtenidos entre la carrera ascendente y descendente hasta la carga alcanzada con pesas homologadas, se obtiene el valor de histéresis con la diferencia de indicación en cada uno de los puntos entre la carrera descendente y la ascendente, tomando la mayor de éstas diferencias como el valor de histéresis de la balanza.

En la prueba realizada, se realizaba la carrera creciente, adicionando de 10 Kg. hasta 100 Kg. , y luego decreciente se retiraba de 10 Kg. hasta retirada toda la carga.

Los resultados de esta prueba se pueden observar en la figura 60.

Figura 60. Histeresis de la balanza



Fuente: Calibración de Vansolix

✓ **Efecto del dispositivo de puesta a cero.**

Este ensayo consiste en determinar si el efecto del dispositivo puesta a cero de la báscula no supera el 4 % de la capacidad máxima del instrumento. La realización de este ensayo se efectúa colocando sobre el receptor de carga de la báscula el valor correspondiente al de la capacidad máxima del instrumento en pesas, una vez cargada báscula se debe pulsar el comando de puesta a cero y observar indicador del instrumento vuelve a cero.

En esta prueba se realiza la prueba, tomando el valor de la indicación de la balanza sin carga al inicio, con carga de 50 Kg. al inicio, después se mantiene con carga 30 min., sin carga al final y por ultimo con carga al final.

De los resultados de la calibración, según Vansolix ,se concluye que la balanza cumple con los errores máximos tolerados según la norma Técnica Colombiana No. 2031, para balanzas de clase II. Algunos Resultados de la calibración se muestra en la tabla 37.

Tabla 37. Datos del informe de calibración de la balanza

CARGA	INCERTIDUMBRE PESA PATRON	DIVISION ESCALA BALANZA	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA K=2	ERROR MAXIMO PERMISIBLE	ERROR MAXIMO BALANZA
10 Kg	0,0034g	1g	1,15g	10g	0,6g
40 Kg	0,0095g	1g	1,15g	10g	0,6g
80 Kg	0,0312g	1g	0,83g	20g	2,3g

4.2.2. Verificación de la balanza

La descripción de las operaciones realizadas en la calibración es importante, porque de acuerdo a ella, se define el procedimiento de verificación de la balanza que debe realizar el laboratorio del CDT de Gas.

En el certificado de calibración se recomienda, realizar la calibración cada año, pero que se realice una verificación periódicamente.

El procedimiento de verificación es recomendado para todo instrumento con el objetivo de vigilar que no haya cambios bruscos en la medición para un mismo valor durante el tiempo.

En el caso de la balanza del gravimétrico, que es el instrumento más importante en la calibración con el patrón de volumen, se define el siguiente procedimiento de verificación:

Después de realizado el procedimiento de calibración de la balanza, se procedió a pesar unas masas con las cuales el laboratorio cuenta, y se registró el valor de la masa indicado por la balanza.

Con estas masas se permite realizar el procedimiento de verificación de la balanza, periódicamente.

Las operaciones que se realizarán son:

- Invariabilidad.
- Excentricidad.
- Histéresis
- Efecto del dispositivo de puesta a cero.

Los pasos a seguir para la realización de estas pruebas es la misma que en la calibración

Movilidad no se puede realizar, debido a que el laboratorio no cuenta con las masas que se requieren, que son alrededor de los 500 mg.

Se aclara que este procedimiento que realiza el Laboratorio CDT de Gas a la balanza no es calibración; sencillamente es una verificación periódica que se realiza para vigilar el comportamiento de la balanza. En caso tal se detecte mediciones extrañas se procede a solicitar calibración de la balanza a un ente que tenga trazabilidad a la Superintendencia de Industria y Comercio.

4.2.3. Calibración del picnómetro

La calibración del picnómetro fue realizada por Metrocalidad, en sus instalaciones.

El método que se utilizó es el gravimétrico según la norma NTC 2454 y 2311. Este método es el de referencia para la determinación de la capacidad de cualquier elemento volumétrico y consiste en determinar la masa del líquido y dividirla sobre su densidad, en este caso el líquido que se usa como material de referencia es el agua. Las condiciones ambientales son: Temperatura 20 ± 1 °C y humedad relativa 55 ± 5 %. Los resultados de la calibración del picnómetro se muestra en la tabla 38.

Tabla 38. Resultados calibración del picnómetro.

VOLUMEN NOMINAL	VOLUMEN EFECTIVO	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA	FACTOR K
51,612 cm ³	51,613 cm ³	0,0064 ml	2

4.2.4. Verificación del Picnómetro

En el caso del picnómetro, aparte de su calibración, se debe realizar antes de cada prueba para hallar la densidad, una verificación visual que garantice que no haya vencimiento del recipiente.

Este picnómetro esta hecho de borosilicato, el cual es un material que tiene excelente propiedades térmicas debido a su alto punto de fusión y a su pequeño coeficiente de dilatación ($3,3 \times 10^{-6}$ °C⁻¹). Por tanto el picnómetro es muy estable dimensionalmente con el transcurrir del tiempo, debido a que el parámetro que mas influye considerablemente en la variación del volumen del picnómetro es la temperatura. A esto se le suma que los cambios de temperatura en el laboratorio

son pequeños, porque se controla la temperatura en 20 ± 1 °C. Por esto no es necesario verificar la variación del volumen del picnómetro.

4.2.5. Calibración de sensores temperaturas

Las RTDs fueron calibradas directamente en la Superintendencia de Industria y Comercio por el método de comparación con los patrones de la SIC en un baño líquido, obteniendo una incertidumbre expandida para todas las RTD,s calibradas de 0.1°C, con una confiabilidad del 95.45%.

Según la influencia de las magnitudes medidas con estos instrumentos en la medición del mensurando del patrón gravimétrico, se concluye que no hay necesidad de realizar la verificación, porque no son tan relevantes como la masa y la densidad del aceite. Basta con realizar las respectivas calibraciones periódicas.

4.2.6. Calibración del higrómetro y sensores de presión

El higrómetro marca Durotherm y el sensor de presión fueron calibrados en la Superintendencia de Industria y Comercio y arrojó los siguientes resultados:

Tabla 39. Calibración Higrómetro.

Humedad relativa indicada(%)	Humedad relativa correcta(%)	Incertidumbre(%)
75	75	± 2.9
55	55	± 2.9

Tabla 40. Calibración sensor de presión marca Vaisala

Presión indicada("Hg) Prueba	Presión indicada("Hg) patron	correccion("Hg)
902,73	902,59	-0,14
903,1	902,99	-0,11
903,39	903,129	-0,261
903,68	903,39	-0,29
904,24	903,79	-0,45

Estos dos últimos instrumentos, no son tan influyentes en la medición del volumen, por tanto con realizar las respectivas calibraciones periódicas es suficiente.

Todas las calibraciones arrojan certificados e informes de calibración que suministran la información para obtener la incertidumbre asociada a cada instrumento, pudiendo de esta forma obtener la estimación de la incertidumbre del patrón gravimétrico. Por tanto se cumple con el requisito b y e que se necesitan para obtener una medición confiable.

4.3. TRAZABILIDAD DEL PATRON GRAVIMÉTRICO

Como ya se mencionó en el capítulo 1, la trazabilidad es la comparación de cualquier dispositivo o sistema de medición con un estándar conocido y de mayor exactitud, y con lo cual se puede estar seguro de la medición de la magnitud.

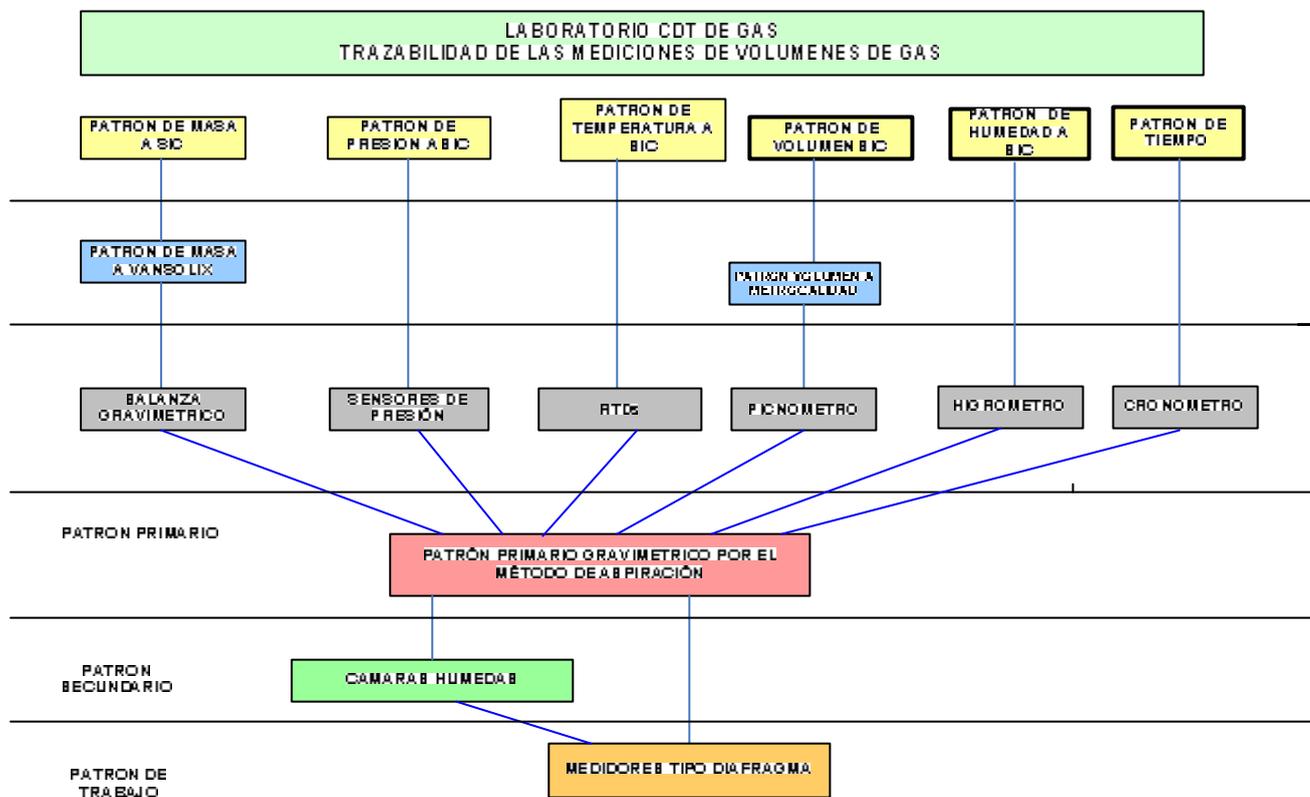
El organismo nacional de metrología en Colombia, encargado de proporcionar los estándares con exactitud consistente, es la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC). Por lo tanto para que el patrón gravimétrico tenga trazabilidad a la SIC, todos los instrumentos deben estar calibrados por este ente o por otros organismos que tengan trazabilidad a la SIC, como es el caso de Vansolix y La Corporación Mixta Metrocalidad.

Uno de las evidencias que deben mostrarse para comprobar la trazabilidad de los resultados de medición es el certificado de calibración. Certificados con los cuales el Laboratorio cuenta y garantiza la trazabilidad de todos los instrumentos que constituyen el patrón Gravimétrico, obteniendo de esta forma que el patrón Primario gravimétrico sea trazable a la SIC.

Vea de forma esquemática la trazabilidad de medición de volumen de gas del Patrón Gravimétrico primario por el método de aspiración del CDT de Gas, en la figura 61.

Se cumple de esta forma el requisito c, especificado en el inicio del capítulo.

Figura 61. Esquema de trazabilidad de los instrumentos del patrón gravimétrico .



Fuente: El autor

5. CALIBRACION DE MEDIDORES DE VOLUMEN DE GAS CON EL PATRON GRAVIMETRICO

Con el patrón gravimétrico se pueden calibrar medidores de volumen gas:

- Tipo cámara húmeda.
- Tipo diafragma.
- Rotámetros.

Estos medidores manejan valores de errores admisibles, desviación estándar y caída de presión entre la entrada y salida del medidor.

El procedimiento de calibración mediante el patrón gravimétrico informa acerca de estos requerimientos si son o no aceptados.

Pero para que este patrón entregue valores que sean aceptados como verdaderos, se debe calibrar sus instrumentos como ya se explico en el capítulo anterior, y además se debe validar su procedimiento de calibración, realizando una intercomparación con otro patrón primario de la misma magnitud y que los valores que arroje en su medición sean lo suficientemente confiables y este referenciado a unos estándares de exactitud.

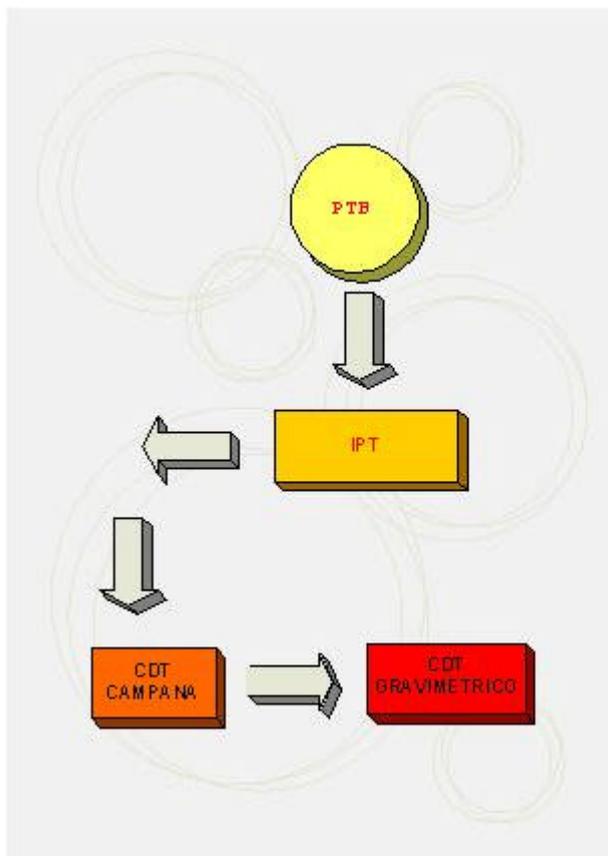
En el caso del gravimétrico, este se puede intercomparar con la campana gasométrica de el CDT de Gas, que cuenta con altas cualidades metrológicas y tiene trazabilidad al IPT¹⁹ de Brasil , y este a su vez tiene trazabilidad al PTB de Alemania, a través de una serie de intercomparaciones. Obteniendo de esta forma una cadena continúa de trazabilidad. (Vea la figura 62)

La intercomparación, o comparación de resultados, sirve para comprobar la eficiencia de un método de trabajo y determina las características de un patrón o instrumento, con un nivel de exactitud dado.

Para la realización de una intercomparación, se hace necesario un patrón de transferencia, el cual se calibra con los patrones primarios que están siendo comparados. Los resultados obtenidos con los patrones se confrontan y se determina si son trazables o no los resultados.

¹⁹ IPT Instituto do pesquisas Tecnológicas, do Brasil.

Figura 62 Trazabilidad de las mediciones de volumen.

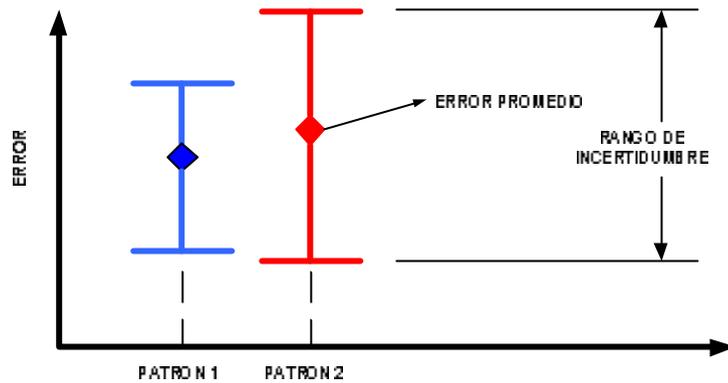


Fuente: El autor.

El procedimiento para analizar los resultados de una intercomparación es el siguiente:

- ✓ Después de obtener los resultados de cada calibración, se halla los errores medios y se grafica con su respectiva incertidumbre asociada, para cada patrón, como se muestra en la figura 63.

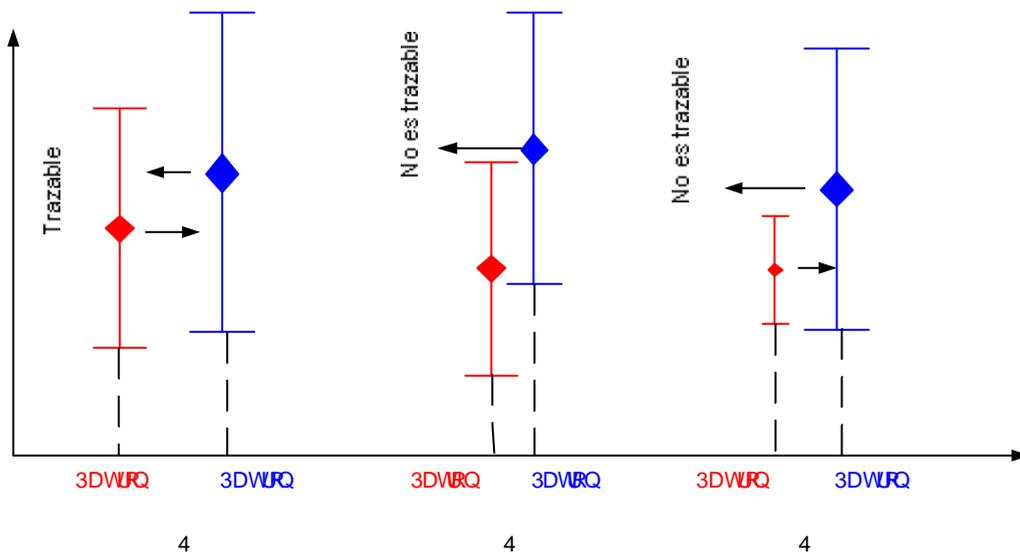
Figura 63. Representación gráfica de los resultados en una intercomparación



Fuente: El autor

- ✓ Determinar a través de la grafica si el patrón intercomparado es trazable en todos los caudales de calibración al patrón referenciado. Esto se verifica si se observa que el error promedio de cada patrón esta dentro del rango de incertidumbre del otro. (Vea la grafica64)

Figura 64. Verificación de trazabilidad por comparación.



Fuente: El autor

- ✓ El patrón se considera trazable en sus mediciones si en todos los caudales de calibración, se cumple la verificación mencionada anterior.
- ✓ En el caso de que no se cumpla la verificación, se procede aplicar un factor de corrección al punto o puntos en que no es trazable y obviamente este factor se le asocia una incertidumbre, obteniendo así, un patrón trazable pero con mayor rango de incertidumbre.

Para realizar la intercomparación se utilizará un medidor de diafragma G1.6.

Los cuales son calibrados primero con la campana gasométrica y posteriormente con el gravimétrico, para luego comparar y analizar los datos arrojados por cada uno.

Antes de la Calibración de cualquier medidor de volumen de gas con el patrón gravimétrico, se debe caracterizar el aceite mineral utilizado.

Por tanto se hace necesario la medición de la densidad del aceite, parámetro importante en la medición del volumen en el gravimétrico.

5.2. MEDICION DE LA DENSIDAD DEL ACEITE

Para la medición de la densidad del aceite, se cuenta con un picnómetro calibrado que se describió en la sección 4.6.2. y una balanza de alta resolución también descrita en la sección 4.6.2.

El procedimiento a seguir para la obtención de la densidad del aceite se describe en el apéndice C , y la ecuación utilizada para hallar el valor de la densidad, fue recomendada Por Metrocalidad en el certificado de calibración entregado. La ecuación es :

$$r_{aceite} = \frac{m_f - m_i}{V_{picn}} + r_{aire}$$

Los datos arrojados por el procedimiento de medición de la densidad del aceite se pueden observar en la tabla 41.

Las condiciones ambientales se registran para obtener la densidad del aire en el cuarto de ensayo, que es necesaria para la adquisición de la densidad del aceite.

Para la medición de la densidad del aceite, se registra además la temperatura del aceite en el reservorio, y se establece que se obtiene el valor de la densidad a esa temperatura, para posteriores correcciones en las calibraciones de medidores de gas por efecto de expansión térmica.

Tabla 41. Medición de la densidad con el picnómetro

MEDICION DE LA MASA		CONDICIONES AMBIENTALES		
Masa inicial [gr]	Masa final [gr]	temp. Amb. [C]	pres. amb [mbar]	humedadm [%]
32,259	75,582	19,64	902,12	48,13
32,259	75,582	19	902,24	50
32,259	75,58	19,22	902,31	49,67
32,259	75,579	19,26	902,31	49,41
32,258	75,58	19,39	902,33	49,1
Promedios de prueba				
Masa inicial [gr]	32,2588			
Masa final [gr]	75,5806			
Temperatura ambiente [C]	19,302			
Presión ambiente[C]	902,262			
Humedad relativa [%]	49,262			
densidad del aire [Kg/dm3]	0,001069			
densidad del aceite [Kg/dm3]	0,840427301			

capacidad efectiva	
Picnómetro (dm3.)	51,613

El valor que se obtiene de la densidad del aceite, es altamente confiable, porque todos los instrumentos que intervienen en la medición están calibrados y tienen trazabilidad a la superintendencia de industria y comercio.

5.3. CALIBRACION DE UN MEDIDOR TIPO DIAFRAGMA G 1.6 CON EL PATRON GRAVIMETRICO

El procedimiento de calibración de un medidor de volumen de gas tipo diafragma con el patrón gravimétrico, se muestra en el apéndice E.

Los datos más importantes que arrojó la calibración se muestra en la tabla 42, y se puede observar el error de cada prueba para todos los caudales, el error promedio y la desviación estándar:

Tabla 42 Datos de la calibración de un medidor de diafragma con el patrón gravimétrico

CAUDAL [dm ³ /min]	ERROR %					DESVEST %
	prueba 1	prueba 2	prueba 3	Prueba 4	Error Prom.	
0,266	-3,57%	-4.26%	-3,97%	-3,45%	-3.81%	0.370%
0,8	-2.07%	-1.72%	-1.84%	-1.98%	-1.88%	0.1750%
4,16	-1.27%	-1.34%	-1.36%	-1.40%	-1.34%	0.047%
8,33	-1.17%	-1.15%	-1.10%	-1.10%	-1.14%	0.027%
16,66	-0.89%	-1.12%	-0.95%	-1.10%	-1.02%	0.112%
29,33	-0.87%	-0.85%	-0.87%	-0.89%	-0.87%	0.089%
41,66	-0.56%	-0.53%	-0.60%	-0.48%	-0.55%	0.061%

Los datos arrojados por la campana gasométrica para el mismo medidor se pueden observar en la tabla 43.

Tabla 43 Datos de la calibración de un medidor tipo diafragma con la campana gasométrica.

CAUDAL [dm ³ /min]	ERROR %					DESVEST %
	prueba 1	prueba 2	prueba 3	prueba 4	error prom	
0,266	-3.84%	-2.949%			-3.394%	0.63%
0,8	-0.807%	-0.809%			-0.808%	0.001%
4,16	-0.703%	-1.044%			-0.899%	0.205%
8,33	-0.926%	-1.014%			-0.970%	0.063%
16,66	-0.834%	-0.900%			-0.867%	0.047%
29,33	-0.507%	-0.391%			-0.449%	0.082%
41,66	-0.054%	-0.134%			-0.094%	0.057%

El autor

La desviación estándar del error, representa la dispersión de los datos durante las cuatro pruebas hechas en cada caudal. Una baja desviación estándar, quiere decir que el error que se esta marcando siempre es el mismo, y por tanto el medidor y el patrón son repetibles. Realizando una comparación de la desviación estándar obtenida con el patrón gravimétrico y la obtenida con la campana gasométrica, se puede concluir que:

- Que para los mas bajos caudales (0,26-0,8-4,166 [dm³/min]) el patrón gravimétrico esta obteniendo una mejor repetibilidad que la campana gasométrica, cumpliendo de esta forma uno de los objetivos del proyecto que es obtener una mejor medición de volumen a bajos caudales. Sin embargo esta repetibilidad se puede mejorar, esto es porque al iniciar las pruebas para un mismo caudal se observa que el elemento "diversor"

tiene aire y al comenzar a fluir el aceite, parte de este aire se queda en la tubería como especie de “colchón de aire”, convirtiéndose en una restricción para el flujo y por tanto haciendo variar el caudal. Al garantizar que no haya aire en el divisor, se elimina el efecto de restricción por el “colchón de aire”.

- Que para los altos caudales también se está obteniendo una alta repetibilidad, es decir el patrón gravimétrico está midiendo lo mismo en cada prueba para un mismo caudal.
- Por encima de los 5 dm³/min. , la campana gasométrica está entregando una mejor repetibilidad que el patrón gravimétrico, pero aun así, la repetibilidad del patrón gravimétrico es muy buena.
- Se obtiene de esta forma un patrón repetible en todo el rango de caudal que maneja.

La curva de desempeño (caudal VS error del medidor) que entrega el patrón gravimétrico que corresponde a la calibración del medidor de diafragma, se compara con la curva obtenida con la campana gasométrica en la figura 65.

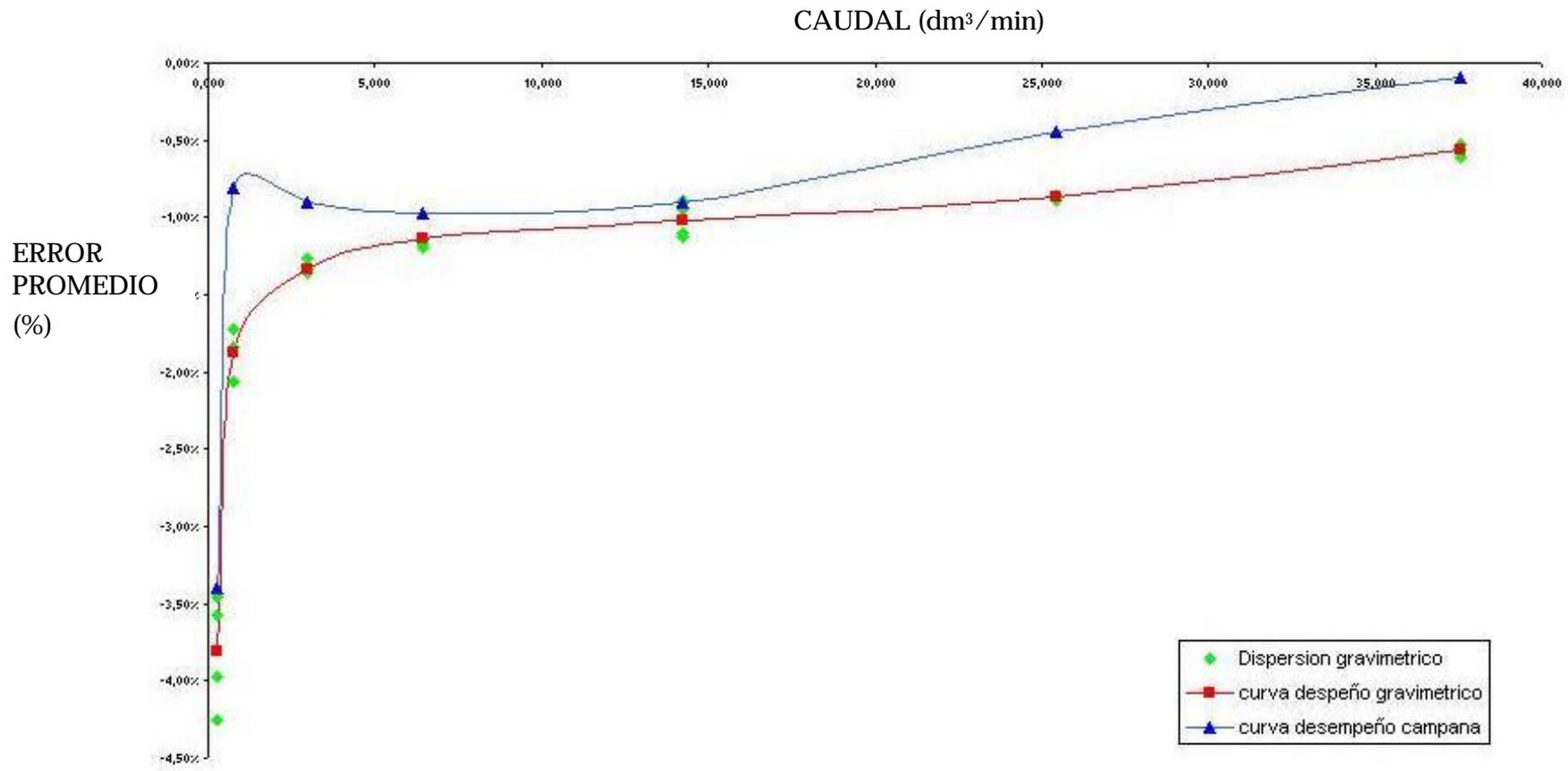
De una observación detallada de la figura 65 se puede concluir que:

- Para el rango de caudal entre 0.267 y 5 dm³/min, el patrón gravimétrico suministra una curva de desempeño más estable y la que se esperaría arrojaría normalmente un medidor de diafragma G 1.6, por tanto los datos dados en este rango por el gravimétrico son más confiables.
- Que para el rango entre 7 a 16 dm³/min el patrón gravimétrico tiene la misma confiabilidad en la medición del volumen que la campana gasométrica, por lo tanto en este rango el patrón gravimétrico es altamente confiable.
- Que para los puntos de 29,166 dm³/min y 41,666 dm³/min la variación del error promedio entre el patrón gravimétrico y la campana gasométrica aumenta, pero es muy pequeña. La causa posiblemente es porque la actuación del diverter se hace más crítica a medida que aumenta el caudal, pues como ya se había explicado, existe cierto volumen que se pierde o adiciona en el movimiento del diverter de un tanque hacia otro ,

que ya se tiene en cuenta, pero se hace necesario un estudio mas a fondo de este fenómeno.

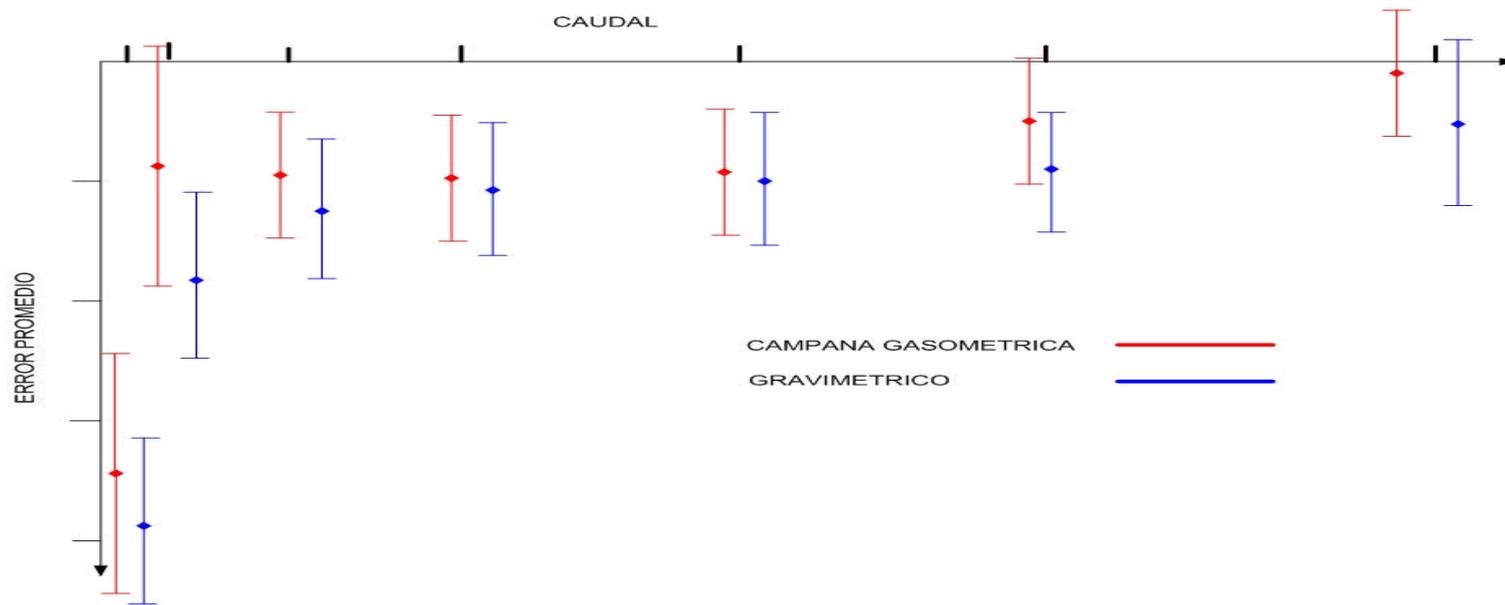
- La ínter comparación realizada entre el patrón gravimétrico y la campana gasométrica, arrojó resultados que nos garantiza que los datos que entregan los patrones primarios son bastantes cercanos y que por tanto el gravimétrico arroja valores confiables, debido a la alta confiabilidad que nos ofrece la campana gasométrica del laboratorio del CDT de Gas.
- Que los resultados obtenidos son muy importantes y aceptables, pero que el proceso para obtener un mejor patrón es evolutivo, y que por tanto estos resultados van enfocados a detectar factores que influyen en la medición, y que no se tuvieron en cuenta en el diseño y construcción del patrón final.

Figura 65 Curva de desempeño del patrón gravimétrico y de la campana gasométrica



Fuente: El autor

Figura 66 Verificación grafica de la intercomparación del gravimétrico con la campana.



Fuente: El autor

RECOMENDACIONES

- Se recomienda no realizar calibraciones con el patrón gravimétrico a medidores de volumen de gas tipo cámara húmeda, que utilizan como liquido sellante agua destilada. Debido a que en estos medidores el aire sale saturado, que luego es almacenado en el reservorio hermético, y se corre el riesgo de que se condense agua y contamine el aceite mineral.
- Se recomienda instalar antes de cada válvula de regulación, una válvula de bola de tal forma que se garantice siempre una columna de aceite en el elemento denomina como divisor. Esto es porque al inicio de cada prueba para un mismo caudal, este elemento se vacía de aceite y se llena de aire que se convierte en una restricción para el flujo, y por tanto haciendo variar el caudal entre prueba.
- Para observar el nivel del aceite hidráulico en el reservorio hermético, se recomienda instalar un “medidor de nivel” que puede ser un tubo de vidrio borosilicato de diámetro interno de 10 mm, conectado en la parte inferior y superior del tanque.

CONCLUSIONES

- ✓ Los elementos llamados “boquillas” en este proyecto suministran un flujo laminar y mas estable para los caudales de prueba que cuando se instala tubería circular, porque para una misma área transversal, el área de contacto con el fluido es mucho mayor y por tanto la relación de fuerzas dinámicas con fuerzas viscosas disminuye.
- ✓ La actuación de la válvula diverter es un fenómeno critico para la medición del volumen de gas, en los mayores caudales durante la calibración, por lo tanto es importante la correcta evaluación del factor de corrección del diverter en el procedimiento de la calibración. Para los bajos caudales La válvula diverter pierde importancia.
- ✓ La repetibilidad del patrón primario gravimétrico aumenta considerablemente si se garantiza siempre, que para todas las pruebas en un mismo caudal, al inicio, la variación del volumen de aceite en el reservorio hermético no exceda en 600dm^3 , que corresponde a una variación de nivel de 1 mm.
- ✓ Para garantizar que la variación del caudal de calibración no exceda en 5% entre prueba, el nivel del aceite en el reservorio hermético debe ser mayor a 0,3 m y menor a 0,5 m.
- ✓ El patrón gravimétrico es poco sensible a los cambios de temperatura ambiente y temperatura aceite, debido a que el coeficiente de expansión térmica del aceite es bajo, obteniendo de esta forma un patrón robusto. Sin embargo , en la obtención del volumen de gas, se tienen en cuenta todos efectos y se evalúan para garantizar confiabilidad en la medición.

- ✓ El parámetro más crítico en la obtención del volumen y la estimación de la incertidumbre es la medición de la masa de aceite, motivo por el cual se adquirió una balanza con altas cualidades metrológicas.
- ✓ Se calibraron todos los instrumentos que influyen en la medición del volumen de gas, con la Superintendencia de Industria y Comercio y antes con trazabilidad a esta, obteniendo de esta forma un patrón primario para medición de flujo de gas con trazabilidad a los patrones nacionales de masa, volumen, temperatura, presión, etc.
- ✓ La intercomparación hecha con la campana gasométrica, mostró que el patrón gravimétrico arroja valores de medición confiables y repetibles, pudiendo así, validar el procedimiento de calibración utilizado.
- ✓ Por último se obtiene un patrón primario gravimétrico para calibración de medidores de flujo de gas por el método de aspiración, en el rango de caudal de 0,25 a 50 dm³/min, con un volumen de calibración de 50dm³ y una incertidumbre estándar de 0,12%.
- ✓ El patrón gravimétrico suministra las cualidades metrológicas que este requiere para ser considerado como patrón primario, pero su estudio para optimizar aún más este banco no debe parar, puesto que se entiende que su proceso es evolutivo y que sin duda alguna pueden mejorar sus cualidades metrológicas.

BIBLIOGRAFIA

CELY, Bossuet. Hernandez, David. Patrón para calibrar medidores de volumen de gas por el método de aspiración. Proyecto de grado Escuela de Ingeniería Mecánica, UIS. 2002. Capitulo 3, 4,5, 6.

FOX, Robert y MACDONALD, Alan. Introducción a la mecánica de fluidos. Mc. Graw Hill. 1992.

NTC 2728 . Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) /Maquinas y equipos medidores de gas tipo diafragma,1994.

ASTM D 941. Standard test methods for density y relative density (specific gravity) of liquids by lipkin bicapillary picnometer, 1988.

MATSCHKE, Rolf y SCHLIETER, Hartmut. Reglamento de prueba del PTB Tomo 4, Contadores Volumétricos de Gas. Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig. 1992.

CRANE. Flujo de fluidos. 1989. Capitulo1

APENDICE A. GENERALIDADES DE MEDICION DE FLUJO

A.1 CONCEPTO DE FLUJO

Con base al comportamiento que desarrollan los fluidos se definen de la siguiente manera: "Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, cuando esta sometido a un esfuerzo de corte o tangencial". De esta definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

La forma mas comúnmente utilizada para el transporte de un fluido entre dos puntos de una planta industrial es a través de una tubería de sección circular. El perfil circular ofrece una mayor resistencia estructural y presenta la mayor área transversal por unidad de superficie de pared.

Ocasionalmente, se encuentran conductos cerrados con sección transversal no circular, o tuberías con sección circular, pero llenas parcialmente con el fluido. Cuando se calcula el número de Reynolds, en estas situaciones, se utiliza el concepto de radio hidráulico que es la relación entre el área transversal y el perímetro mojado.

Podemos decir también que la tasa de flujo volumétrica de un fluido (m^3/s) es igual la producto de la velocidad media del fluido (m/s) por la sección transversal de la tubería (m^2).

A su vez, la tasa de flujo masica (kg/s) es igual al producto entre la tasa de flujo volumétrica (m^3/s) y la densidad del fluido (kg/m^3). Como en la practica es difícil llevar a cabo la medición directa de la densidad del fluido, se realizan mediciones de temperatura y de presión para inferir a partir de estas la densidad. La medición de parámetros fundamentales como masa, tiempo, temperatura, etc., es posible realizarla con incertidumbres de medición bastantes bajas, muchas veces inferiores al 0.3%. Por otra parte la tasa de flujo de un fluido , por ser una magnitud derivada que representa un fenómeno dinámico, normalmente no

permite la medición con incertidumbres inferiores al 1%, excepción aquella cuya mediciones fueron realizadas bajo condiciones de laboratorio.

A.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

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

A.2.1 DENSIDAD Y VOLUMEN ESPECÍFICO

La densidad (ρ) de un fluido es la razón de masa (m) con el volumen (v) contenido, Para medir la densidad de un fluido, basta con conocer el peso (que dividido entre el valor de la constante gravitacional $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ nos da el valor de la masa) y el volumen de una muestra, lo cual es fácilmente obtenible en el laboratorio con ayuda de una balanza y de un picnómetro.

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ Ecuación A. 1}$$

A.2.2 COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA

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) por un aumento de 1°C en la temperatura. Es decir

$$\beta = \frac{1}{V_s} * \frac{dV_s}{dT} = -\frac{1}{r} * \frac{dr}{dT} \text{ Ecuación A. 2}$$

El coeficiente de expansión térmica del agua fría es muy pequeño, del orden de $20 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$ y, generalmente, ese valor es despreciado a no ser que sea requerida una alta exactitud en la determinación. Este factor aumenta rápidamente con el aumento de la temperatura.

La expansión térmica de los aceites y de los líquidos combustibles es muy superior que la del agua menos dependiente de la temperatura. Ella no puede despreciarse cuando se exija una alta exactitud en la medición.

A.2.3 COMPRESIBILIDAD

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

$$k = -\frac{1}{V_s} * \frac{dV_s}{dP} = \frac{1}{r} * \frac{dr}{dP} \text{ Ecuación A. 3}$$

La compresibilidad del agua es alrededor de 20000 veces menor que la del aire a presión atmosférica, y en la mayoría de los casos puede ser despreciada. La compresibilidad de los líquidos derivados del petróleo varía de acuerdo con su composición, siendo los aceites viscosos ligeramente más compresibles que el agua, y los combustibles livianos más de dos veces más compresibles que el agua.

En la medición comercial de volumen a gran escala de aceites y combustibles, debe tenerse en cuenta la compresibilidad de estos fluidos cuando la presión de la línea alcanza niveles superiores a 2 bar. Los gases por su parte, son altamente compresibles a bajas presiones y mucho menos compresibles a presiones elevadas.

A.2.4 ECUACIÓN P-V-T

La ecuación P-V-T para gases relaciona el volumen ocupado por un fluido (V) con su temperatura (T) y con la presión (P) actuante sobre el fluido. Para un “gas ideal” es válida la siguiente relación:

$$\frac{PV}{T} = \text{constante} \quad \text{Ecuación A. 4}$$

En la práctica, las propiedades presión-volumen-temperatura de un fluido raramente son así tan simples, aun cuando se trate de productos químicos puros. Estudios están realizándose, principalmente en Europa y Estados Unidos, con el objetivo de desarrollar ecuaciones generales que permitan calcular las propiedades físicas de esos gases en sus aplicaciones prácticas.

Generalmente, la ecuación de las “gases ideales” puede ser extrapolada hasta los llamados “gases reales” introduciendo un factor Z denominado factor de compresibilidad, o coeficiente de desvío de los gases. Esta ecuación es dada por:

$$PV = ZN\mathfrak{R}T \quad \text{Ecuación A. 5}$$

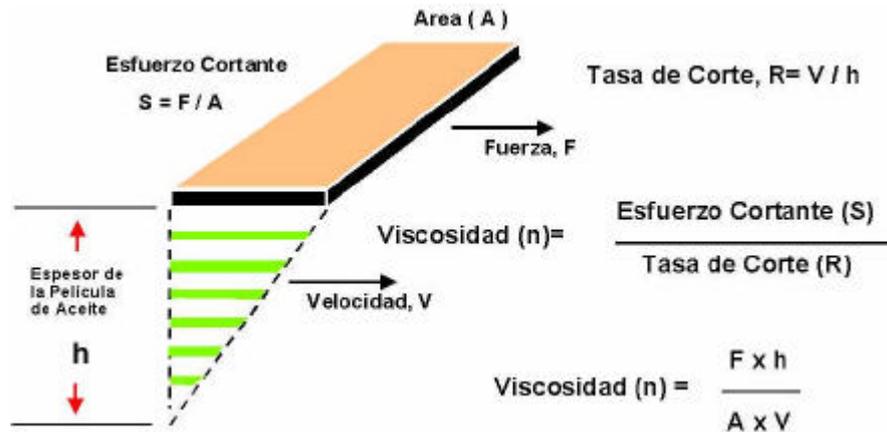
Donde N es el número de moles del gas y \mathfrak{R} es la constante universal de los gases ($\hat{A}=8314,41 \text{ J/Kmol K}$).

A.2.5. VISCOSIDAD

La viscosidad (μ) es la propiedad por la cual un fluido ofrece resistencia al corte o cizalladura.

La ley de newton de la viscosidad establece que, para una velocidad dada de deformación angular de un fluido, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la viscosidad.

Figura A.67. Viscosidad de un fluido newtoniano



De acuerdo con la figura A.1 :

$$m = \frac{t}{dg/dt} \text{ Ecuación A. 6}$$

Donde: τ es el esfuerzo de corte y dy/dt es la tasa de deformación angular.

Generalmente la viscosidad de un fluido es referida como “viscosidad absoluta” o “viscosidad dinámica” , con el objeto de diferenciarla de la viscosidad cinemática (ν). La relación entre las dos viscosidades es dada por $\mu = \rho \nu$.

Las unidades de viscosidad dinámica de un fluido en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el pascal segundo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) , pero es común expresarlo en centipoise (cP) , donde 1cP equivale a $1\cdot 10^{-3}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$. La unidad de viscosidad cinemática en el SI en m^2/s , y la unidad mas común es le centiStoke (cSt) equivale a $1\cdot 10^{-6}$ m^2/s .

La viscosidad de un fluido puede medirse apropiadamente utilizando un viscosímetro de tipo cilindro concéntrico para viscosidad dinámica o con más exactitud por medio de un viscosímetro de tipo tubo en U, para obtener la viscosidad cinemática.

Los fluidos pueden clasificarse como newtonianos o no-newtonianos. Básicamente, el fluido newtoniano obedece a una relación lineal entre el valor del esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación resultante. En el fluido no-newtoniano esta relación no es lineal y su comportamiento es muy complejo, no siendo objeto de estudio en este momento.

A.3 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO

A.3.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD Y BERNOULLI

El principio de la ecuación de continuidad establece que la tasa de flujo masico de un fluido es la misma en cualquiera de las secciones transversales de la tubería. Esto significa que la cantidad de materia que entra en un extremo de la tubería es igual a la que sale. Si el fluido que fluye es un fluido incompresible, la tasa de flujo volumétrica también se mantiene constante. Esto significa que, cuando la sección transversal de una tubería disminuye, la velocidad media de flujo debe aumentar y viceversa. Este principio es de gran importancia cuando estudiamos el comportamiento de un medidor de caudal.

Por otro lado la energía total de un fluido en movimiento es la misma en toda la sección transversal a lo largo de las tuberías. La ecuación de Bernoulli expresa este factor en términos matemáticos.

Si asumimos que la tubería esta en posición horizontal y que el fluido es incompresible, además de despreciar algunos factores como el efecto de fricción en la transformación de la energía mecánica en calor y también de la variación de

la velocidad a lo largo de las tuberías, la Ecuación de Bernoulli se expresa como:

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} = \text{CTE} \quad \text{Ecuación A. 7}$$

A.3.2 FLUJO IDEAL Y FLUJO REAL

Se considera un fluido ideal cuando tiene las siguientes características:

- Fluido no viscoso. Se desprecia la fricción interna entre las distintas partes del fluido.
- Flujo estacionario. La velocidad del fluido en un punto es constante con el tiempo
- Fluido incompresible. La densidad del fluido permanece constante con el tiempo
- Flujo irrotacional. No presenta torbellinos, es decir, no hay momento angular del fluido respecto de cualquier punto.

Este flujo obedece a un modelo idealizado, pero que nunca se obtiene en la práctica. Lo anterior se debe a que todos los fluidos reales son más o menos viscosos, compresibles, rotacionales, etc.

A.3.3 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

Los flujos pueden separarse en dos regiones principales. La región próxima a la superficie está formada por una delgada capa llamada capa límite donde se concentran los efectos viscosos, y por tanto es hay donde se considera el flujo como viscoso. Fuera de esta capa límite, se pueden despreciar los efectos de la

viscosidad, y pueden emplearse las ecuaciones matemáticas más sencillas para flujos no viscosos

Los flujos viscosos se pueden clasificar en laminares o turbulentos teniendo en cuenta la estructura interna del flujo. En un régimen laminar, la estructura del flujo se caracteriza por el movimiento de láminas o capas. La estructura del flujo en un régimen turbulento por otro lado, se caracteriza por los movimientos tridimensionales, aleatorios, de las partículas de fluido, superpuestos al movimiento promedio.

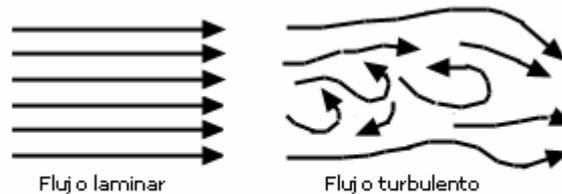
En un flujo laminar no existe un mezclado macroscópico de las capas de fluido adyacentes entre sí. Un filamento delgado de tinta que se inyecte en un flujo laminar aparece como una sola línea; no se presenta dispersión de la tinta a través del flujo, excepto una difusión muy lenta debido al movimiento molecular. Por otra parte, un filamento de tinta inyectado en un flujo turbulento rápidamente se dispersa en todo el campo de flujo; la línea del colorante se descompone en una enredada maraña de hilos de tinta. Este comportamiento del flujo turbulento se debe a las pequeñas fluctuaciones de velocidad superpuestas al flujo medio de un flujo turbulento; el mezclado macroscópico de partículas pertenecientes a capas adyacentes de fluido da como resultado una rápida dispersión del colorante. El filamento rectilíneo de humo que sale de un cigarrillo expuesto a un ambiente tranquilo, ofrece una imagen clara del flujo laminar. Conforme el humo continúa subiendo, se transforma en un movimiento aleatorio, irregular; es un ejemplo de flujo turbulento.

El que un flujo sea laminar o turbulento depende de las características del caso. Así, por ejemplo, la naturaleza del flujo (laminar o turbulento) a través de un tubo se puede establecer teniendo en cuenta el valor de un parámetro adimensional, el número de Reynolds, $Re = \rho VD/\mu$, donde ρ es la densidad del fluido, V la velocidad promedio, D el diámetro del tubo y μ la viscosidad.

El flujo dentro de una capa límite puede ser también laminar o turbulento; las definiciones de flujo laminar y flujo turbulento dadas anteriormente se aplican también en este caso. Como veremos más adelante, las características de un flujo

pueden ser significativamente diferentes dependiendo de que la capa límite sea laminar o turbulenta. Los métodos de análisis también son diferentes para un flujo laminar que para un flujo turbulento. Por lo tanto, al iniciar el análisis de un flujo dado es necesario determinar primero si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento.

Figura A.68. Flujo laminar y turbulento



fuentes: : inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV18.html

A.3.4 PERDIDAS EN FLUJO INTERNO.

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción; tales energías traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo.

La ecuación de Darcy se puede utilizar para calcular la pérdida de energía en secciones largas y rectas de conductos redondos, tanto flujo laminar como turbulento. La diferencia entre los dos está en la evaluación del factor f , que carece de dimensiones.

La pérdida de energía debido a la fricción en un flujo laminar en conductos circulares se puede calcular a partir de la ecuación:

$$h_l = \frac{f}{d} \left(\frac{v^2}{2 * g} \right) \text{Ecuación A. 8}$$

en la que,

$$f = \frac{64}{Re} \text{Ecuación A. 9}$$

Para un flujo turbulento de fluidos en conductos circulares resulta También utilizar la ley de Darcy (ecuación 8) para calcular la pérdida de energía debido a la fricción. No podemos calcular f mediante un simple cálculo, como se puede hacer con el flujo laminar, pues el flujo turbulento no se conforma de movimientos regulares y predecibles. Está cambiando constantemente. Por eso se debe confiar en los datos experimentales para determinar los valores de f .

Las pruebas han mostrado que el número adimensional f depende de otros dos números, también adimensionales, el número de Reynolds y la rugosidad relativa del conducto. La rugosidad puede variar debido a la formación de depósitos sobre la pared, o debido a la corrosión de los tubos después de que este ha estado en servicio durante algún tiempo.

Uno de los métodos más extensamente empleados para evaluar el factor de fricción hace uso del diagrama de Moody.

Existen otros tipos de pérdidas que son muy pequeñas comparativamente, y por consiguiente se hace referencia de ellas como pérdidas menores, las cuales ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria de flujo o en la dirección de flujo, o cuando la trayectoria del flujo se encuentra obstruida como sucede en una válvula.

Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia, K , de la siguiente forma:

$$h_L = K (v^2/2g) \quad \text{Ecuación A. 10}$$

Las pruebas han mostrado que el valor del coeficiente de pérdida K depende tanto de la porción de los tamaños de los dos conductos como de la magnitud de la velocidad del fluido, ya sea para una dilatación súbita o una contracción súbita.

Para calcular el valor del coeficiente de fricción en válvulas o juntas se obtiene con la fórmula:

$$K = (L_e/d)f_i \quad \text{Ecuación A. 11}$$

A veces se tienen conductos con sección transversal que no es circular. Para calcular el número de Reynolds en estas condiciones, el diámetro circular es sustituido por el diámetro equivalente (cuatro veces el radio hidráulico). Deben utilizarse los coeficientes de fricción del diagrama de Moody.

Superficie de la sección transversal de la vena líquida

$$R_h = \frac{\text{Superficie de la sección transversal de la vena líquida}}{\text{Perímetro mojado}} \quad \text{Ecuación A. 12}$$

Perímetro mojado

Esto se aplica a cualquier tipo de conducto (conducto circular no completamente lleno, ovalado, cuadrado o rectangular), pero no a formas muy estrechas, como aberturas anulares largas, donde la anchura es pequeña con relación a la longitud. En tales casos el radio hidráulico es aproximadamente igual a la mitad de la anchura del paso.

La fórmula para obtener el caudal, cuando la tubería es cuadrada se expresa:

$$Q = 0.2087 d_h^2 \sqrt{\frac{hl}{fL}} \quad \text{Ecuación A. 13}$$

donde d^2 está basado en un diámetro equivalente de la sección transversal real del flujo y d_h se sustituye por $4R$.

A.4 TIPOS BÁSICOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

El término genérico medición de caudal puede referirse a cualquiera de los seis tipos de medición comúnmente encontrados, que son:

- ✓ Medición de la velocidad puntual
- ✓ Medición de la velocidad media en tuberías

- ✓ Medición de caudal volumétrico
- ✓ Medición de volumen total
- ✓ Medición caudal másico
- ✓ Medición de masa total

Las mediciones de caudal y de volumen abarcan el sistema de clasificación más común de medidores, que cubre tanto a medidores de volumen como a medidores de masa. Aunque es la más común, no es la manera más adecuada para realizar una clasificación, debido a que un medidor de caudal puede emplearse con facilidad como un medidor de volumen y viceversa.

A continuación se presenta una breve descripción de estos tipos básicos de medición, los cuales están directamente relacionados con la medición de gas.

A4.1 Medición de velocidad

Existen dos maneras para determinar la velocidad: velocidad puntual y velocidad media en tuberías.

Para la determinación de la velocidad puntual, v , de un fluido existen diversos tipos de instrumentos disponible comercialmente. Estos medidores son llamados generalmente anemómetros cuando se utilizan en corrientes libres de aire, flujómetros si son empleados en agua y medidores de inserción si son utilizados específicamente dentro de tuberías y ductos.

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

$$\bar{v} = \frac{Q_v}{A} \text{ Ecuación A. 14}$$

El término \bar{v} puede determinarse de tres maneras diferentes: midiendo Q_v y A y aplicándolo a la ecuación anterior; midiendo v en varios puntos de una

determinada sección transversal y, entonces, determinando una media ponderada apropiada; o con menor precisión, midiendo la velocidad en un punto situado a $\frac{3}{4}$ de distancia entre el centro y las paredes de la tubería para flujo en secciones circulares, pues se sabe que, en flujos completamente desarrollados, la velocidad del fluido en ese punto representa aproximadamente la velocidad media del flujo.

A.4.2 Medición de caudal volumétrico

El caudal volumétrico, Q_v , se define como el flujo de un determinado volumen de fluido por un intervalo de tiempo, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_v = \frac{V}{t} \text{ Ecuación A. 15}$$

Muchos medidores se diseñan para indicar directamente el valor de Q_v , estos medidores se denominan medidores de caudal volumétrico.

A.4.3 Medición de volumen total

Algunos medidores se diseñan para indicar directamente el volumen total (V) de fluido que ha pasado a través del medidor. Normalmente, estos se llaman medidores volumétricos, o totalizadores, con el fin de distinguirlos de los otros tipos de medidores de caudal.

Es posible obtener el valor del volumen total V de fluido que pasa a través del medidor de flujo por medio de la integración de la señal de salida a lo largo de un determinado intervalo de tiempo. También es posible obtener Q_v a partir de un medidor volumétrico derivando la señal de salida con relación al tiempo. Sin embargo, estas operaciones generalmente convergen en una disminución de la exactitud de la medición.

A.4.4 Medición de caudal másico

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

$$Q_m = \frac{m}{t} \text{ Ecuación A. 16}$$

Algunos medidores de flujo se diseñan para indicar directamente el caudal másico del fluido. Estos se llaman medidores másicos, o medidores másicos verdaderos.

Generalmente, el parámetro Q_m se determina efectuando varias mediciones simultáneas de Q_v y densidad (ρ), y aplicando la siguiente relación:

$$Q_m = \rho * Q_v \text{ Ecuación A. 17}$$

A.4.5 Medición de masa total

Actualmente, se encuentran disponibles comercialmente medidores capaces de medir directamente la masa total, m , de un fluido durante un determinado intervalo de tiempo. Para determinar m , es preciso medir Q_m e integrar las mediciones en un determinado tiempo, o de igual forma, medir el volumen total de fluido (V), la densidad (ρ_0) y multiplicarlos.

A.5. CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE GAS

Unos de los equipos o instrumentos más difíciles de seleccionar es un medidor de volumen ó caudal de gas. Los medidores son escogidos con base en muchos factores como: el costo, el tamaño, el fluido que mide y su estado, el rango del medidor y la exactitud deseada.

La clasificación más usual para estos medidores es aquella que los divide en cuatro categorías.

- ✓ Desplazamiento positivo
- ✓ Velocidad
- ✓ Presión diferencial
- ✓ Masa

A continuación se presenta una breve descripción del principio de funcionamiento y algunos ejemplos cada una de estas categorías de medidores.

A.5.1 Medidores de desplazamiento positivo

Miden la rata volumétrica (Q_v) directamente por medio de la repetición de una cámara o volumen muestra de fluido. El volumen total de gas que pasa a través del medidor en un período de tiempo dado es el producto del volumen de muestra por el número de muestras. Los medidores de desplazamiento positivo frecuentemente totalizan el flujo directamente a través de la cuantificación de una integral, pero algunos de estos también pueden generar un pulso de salida el cual puede leerse sobre un display local contador o por medio de la transmisión a un cuarto de control.

Tres tipos comunes de medidores, los de diafragma, los rotativos y la cámara húmeda.

Figura A.3 Medidor de volumen (diafragma)



Fuente: [www.cmsinternational.com.mx/ Distribucionat.htm](http://www.cmsinternational.com.mx/Distribucionat.htm)

A.5.2 Medidores de Cabeza

Estos son el tipo más común de medidores, utilizados en la medición de caudal volumétrico. Ellos infieren el caudal de fluidos, a través de la determinación de la diferencia de presión producto de la restricción al flujo. Los medidores de cabeza son generalmente simples, disponibles y ofrecen una mayor flexibilidad que otros métodos de medición. El medidor de flujo tipo cabeza la mayoría de las veces consta de dos componentes: el dispositivo primario y dispositivo secundario. El dispositivo primario es consiste en la tubería y los elementos para restringir el flujo y desarrollar una diferencia de presión. El dispositivo secundario mide la presión estática, el diferencial de presión y la temperatura, proveyendo una señal al sistema de control. El dispositivo primario se selecciona de acuerdo con el fluido específico o la aplicación y el dispositivo secundario puede seleccionarse por el tipo de recepción de señal. Entre estos dispositivos se encuentran: las placas de orificio, toberas, tubos vénturi, tubos Pitot.

A.5.3 Medidores de Velocidad

Cuando se usa la velocidad para la medición de caudal volumétrico, un dispositivo primario genera una señal proporcional a la velocidad del fluido. Algunos de ellos no generan grandes interferencias en el flujo del fluido, y gracias a que proveen una señal lineal de salida con respecto al flujo, no necesitan relacionarse con la raíz cuadrada del diferencial de presión, con lo cual se elimina esta inexactitud y se amplía el rango de aplicación. Entre estos se encuentran: medidor de turbina y ultrasónico.

Figura A.4 Medidor de velocidad (turbina)



Fuente: www.levelcontrol.com.br/vtg.htm

A.5.4 Medidores Másicos

Estos medidores miden directamente el caudal másico, cada medidor másico combina esencialmente 2 dispositivos, uno para medir la velocidad del fluido y el otro para medir la densidad. Estas dos entradas son típicamente combinadas en un microprocesador para proveer una salida en la que se indique el caudal másico. Entre ellos están los medidores térmicos y los de coriolis.

Figura A.5 Medidor másico (coriolis)



A.6. CURVAS DE DESEMPEÑO DE MEDIDORES

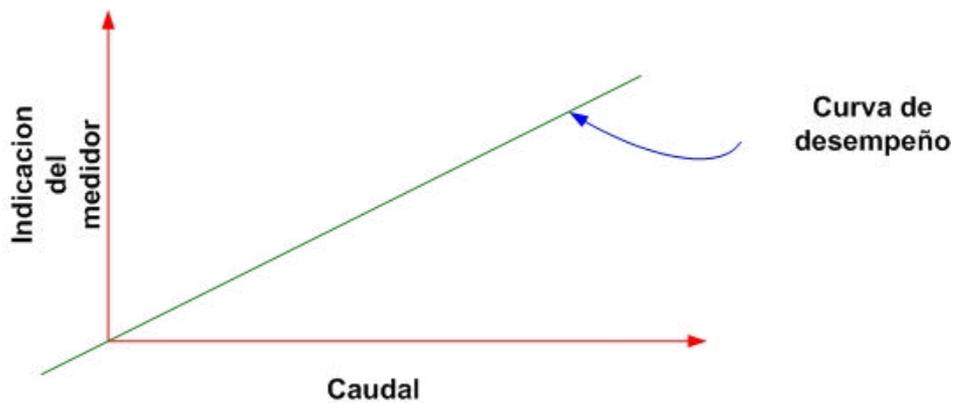
Una curva de calibración (o curva característica) es un gráfico que muestra como varía el desempeño de un medidor con respecto al caudal, con la velocidad o con el Número de Reynolds.

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 a través de un medidor de exactitud mayor.

A.6.1 Clasificación

Si el gráfico forma una línea más o menos recta pasando por el origen como en la Figura 6, el medidor es considerado como lineal.

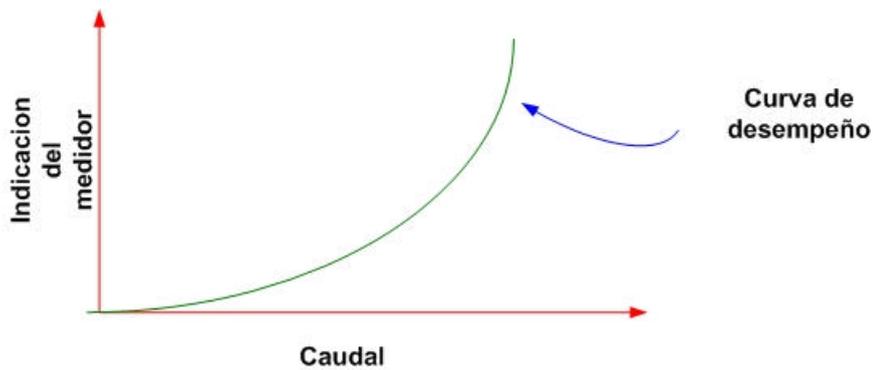
Figura A.6 Curva característica de un medidor tipo lineal



Fuente: El autor

Muchos medidores no-lineales poseen características como la mostrada en la Figura 7, donde Q es proporcional a \sqrt{Y} . Medidores de flujo de tipo tubo de Vénturi, placas de orificio, boquillas y tubos de Pitot, pertenecen a esa clase de medidores, donde Y es el valor medido de la presión diferencial.

Figura A.7 Curva característica de un medidor tipo no lineal



Fuente: El autor

A.6.2 Índices de desempeño

En la práctica, gráficos como los mostrados en las Figuras 6 y 7 rara vez son usados, porque estos no ofrecen detalles suficientes acerca de la calibración. Lo ideal es la utilización de un gráfico que muestre claramente cualquier pequeña desviación del comportamiento ideal del medidor.

Por tanto, es común graficar algún tipo de índice de desempeño del medidor contra el caudal. Existen varios tipos de índice de desempeño, entre ellos:

- ✓ Coeficiente de descarga
- ✓ Factor F del medidor
- ✓ Factor K del medidor
- ✓ Error

A.6.3 Error

El término error del medidor, ϵ , se define como:

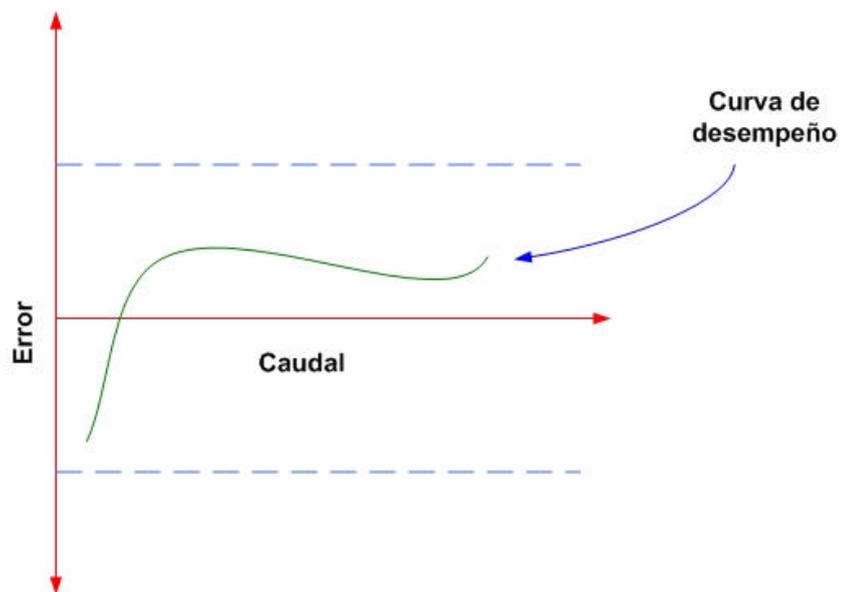
$$e = \frac{V_i - V_t}{V_t} \text{ Ecuación A. 18}$$

o porcentualmente

$$\varepsilon = \frac{V_i - V_t}{V_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Ecuación A.19}$$

donde: V_t e V_i indican, respectivamente, el volumen convencionalmente verdadero y el indicado. Generalmente, el error se expresa en términos de porcentaje del valor verdadero convencional.

Figura A.8 Curva de desempeño característica para el error



Fuente: El autor

APENDICE B. METROLOGÍA

La metrología es definida como la "ciencia de la medición"²⁰, es decir, es una ciencia encargada de determinar el valor cualitativo y cuantitativo de una magnitud, incluye aspectos teóricos y prácticos relacionados con las mediciones, cualquiera que sea su incertidumbre y cualquiera que sea el campo de la ciencia o de la tecnología al cual se aplica, de hecho, la metrología es considerada como la columna vertebral de todas las disciplinas científicas.

Debido a la gran velocidad con la cual las técnicas modernas que dependen de las mediciones crecen en el mundo industrializado, es necesaria la realización de mediciones cada vez más exactas y consistentes, para de esta manera acoplar adecuadamente el engrane de la tecnología a nivel mundial, requiriéndose por supuesto el desarrollo y mejora de referencias en común.

Una de las dificultades con las que se enfrenta la metrología al tratar de comunicar un concepto relacionado con las mediciones, es el vocabulario técnico utilizado, el cual posee significados muy precisos, y hace uso de palabras que en el lenguaje común no necesariamente se emplean con el mismo propósito. Palabras como precisión, exactitud y error son empleadas frecuentemente de manera inadecuada desde el punto de vista de la terminología reconocida internacionalmente. Aun en los medios técnicos existía una falta de consenso sobre el significado de los términos empleados en metrología hasta la publicación en 1993 del VIM, publicada por la ISO a nombre de siete organizaciones internacionales cuya traducción al español se encuentra en la norma NTC 2194.

A continuación se presenta la definición de algunos términos metroológicos, que serán de utilidad más adelante.

²⁰ VIM (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology), 2.2

- ✓ Medición: “Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud”²¹

- ✓ Magnitud: “Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente”²²

- ✓ Mensurado: “Magnitud particular sujeta a medición”

- ✓ Instrumento de medición: “Dispositivo destinado para efectuar mediciones, solo o en conjunto con uno o varios dispositivos adicionales”

B.1 CARACTERIZACIÓN DE LA METROLOGÍA

Por conveniencia, se hace a menudo una distinción entre los diversos campos de aplicación de la metrología; suelen distinguirse como Metrología Científica, Metrología Legal y Metrología Industrial.

B.1.1 Metrología científica

Es el conjunto de acciones que persiguen el desarrollo de patrones primarios de medición para las unidades de base y derivadas del Sistema Internacional de Unidades, SI.

B.1.2 Metrología industrial

La función de la metrología industrial reside en la calibración, control y mantenimiento adecuados de todos los equipos de medición empleados en

²¹ VIM 2.1

²² VIM 1.1

producción, inspección y pruebas. Esto con la finalidad de que pueda garantizarse que los productos están de conformidad con normas. El equipo se controla con frecuencias establecidas y de forma que se conozca la incertidumbre de las mediciones.

La calibración debe hacerse contra equipos certificados, con relación válida conocida a patrones, por ejemplo los patrones nacionales de referencia.

B.1.3 Metrología legal

Según la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) es la totalidad de los procedimientos legislativos, administrativos y técnicos establecidos por, o por referencia a, autoridades públicas y puestas en vigor por su cuenta con la finalidad de especificar y asegurar, de forma regulatoria o contractual, la calidad y credibilidad apropiadas de las mediciones relacionadas con los controles oficiales, el comercio, la salud, la seguridad y el ambiente.

B.2 PROCESO DE MEDICIÓN

La medición generalmente sigue un proceso como el ilustrado en la figura B.1; el mensurado representa el mundo físico del cual se desea medir una propiedad en particular, el instrumento de medición entra en contacto con este mensurado a través del sensor el cual es encargado de adquirir la información, es decir, realizar los procesos de transducción y acondicionamiento, el siguiente paso es el procesamiento de las señales, y por último se termina el proceso de medición dentro del instrumento con la presentación de resultados mediante un indicador.

En cada uno de estos pasos es posible identificar fuentes de incertidumbre, entre las cuales están: la respuesta no lineal del sensor, errores de redondeo de para los sistemas digitales de procesamiento de señales, el número de dígitos en indicadores digitales y la resolución del instrumento si es analógico.

B.3 PROPIEDADES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

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

B.3.1 Repetibilidad y reproducibilidad

Es la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición²³.

Las condiciones de repetibilidad incluyen:

- ✓ El mismo procedimiento de medición
- ✓ El mismo observador
- ✓ El mismo instrumento de medición
- ✓ El mismo lugar
- ✓ Repetición en un corto periodo de tiempo

Un término relacionado con la repetibilidad es la reproducibilidad²⁴. Este término se traduce en la capacidad que un instrumento posee de lograr el mismo resultado cuando es utilizado para medir la misma magnitud en momentos diferentes y bajo condiciones diferentes. Este factor es importante, por ejemplo, para la evaluación de la susceptibilidad de un determinado medidor a las condiciones de instalación.

B.3.2 Precisión

Es una expresión cualitativa de la repetibilidad, no debe asociársele ningún valor numérico y no debe ser usada como sinónimo de la palabra exactitud. La

²³ VIM 3.6

²⁴ VIM 3.7

precisión indica tan solo cuantas cifras decimales nosotros podemos leer, pero ella nada dice respecto a cuantas de esas cifras decimales nosotros podemos confiar.

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

B.3.3 Exactitud

Si repetibilidad es la capacidad de un instrumento de “contar siempre la misma historia”, exactitud²⁵ es la medida de su capacidad de “decir la verdad”.

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

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

La repetibilidad es confundida frecuentemente con exactitud, pero son dos conceptos diferentes (figura B.2).

²⁵ VIM 3.5

Figura B.1 Diferencia entre exactitud y repetibilidad



Fuente: El autor

Si un instrumento posee una repetibilidad pobre, tendrá también una exactitud pobre. Por otro lado, un factor de un medidor que presente una buena repetibilidad no significa necesariamente que presente también una buena exactitud (aunque la pueda tener), ya que puede estar presentando el mismo valor incorrecto repetidamente.

B.3.4 Linealidad

Se refiere a la proximidad de concordancia entre la respuesta del medidor y una referencia lineal o proporcional. Se define usualmente estableciendo la desviación máxima dentro de la cual se espera la respuesta del medidor para un alcance de medición definido.

APENDICE C. INCERTIDUMBRE DE LA MEDICION

C.1. EL MENSURANDO

El propósito de una medición es determinar el valor de una magnitud, llamada el mensurando, que de acuerdo al VIM, es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. La definición del mensurando es vital para obtener buenos resultados de la medición. En no pocas ocasiones se mide algo distinto al propósito original. La imperfección natural de la realización de las mediciones, hace imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de una magnitud: Toda medición lleva implícita una **incertidumbre**, que de acuerdo al VIM (Vocabulario Internacional de Metrología), es un **parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurando.**

Una definición completa del mensurando incluye especificaciones sobre las magnitudes de entrada relevantes.

El término “magnitud de entrada” se usa para denotar también magnitudes de influencia.

El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mensurando y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor. La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectivas. Algunas contribuciones son inevitables por la definición del propio mensurando, mientras otras pueden depender del principio de medición, del método y del procedimiento seleccionados para la medición.

También pueden influir en el resultado de la medición, y por lo tanto en la incertidumbre, algunos atributos no cuantificables en cuyo caso es siempre recomendable reducir en lo posible sus efectos, preferentemente haciendo uso de criterios de aceptación en las actividades tendientes a reducir tales efectos.

El principio de medición es el fundamento científico usado para realizar una medición. El conocimiento del principio de medición permite al metrologo

dominar la medición, esto es, modificarla, diseñar otra, evaluar su conveniencia, etc., además es indispensable para estimar la incertidumbre de la medición.

El principio, el método y el procedimiento de medición son determinantes en el valor de la incertidumbre de la medición. Un conocimiento insuficiente de ellos muy probablemente conducirá a una estimación equivocada, o incompleta en el mejor de los casos, de la incertidumbre de la medición.

C.2. MODELO FÍSICO

Pretender estudiar el proceso de medición de manera exacta y completa está usualmente fuera de las actividades rutinarias del metrologo, más aún, es el propósito de la investigación científica, cuya solución pocas veces se vislumbra. Por lo tanto, es necesaria la simplificación del fenómeno o de la situación real conservando las características más relevantes para el propósito pretendido, mediante la construcción de un modelo para la medición.

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurando y las variables físicas o químicas relevantes para la medición. Estas suposiciones usualmente incluyen:

- a) relaciones fenomenológicas entre variables;
- b) consideraciones sobre el fenómeno como conservación de cantidades, comportamiento temporal, comportamiento espacial, simetrías;
- c) consideraciones sobre propiedades de la sustancia como homogeneidad e isotropía.

Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que sólo aproxima el proceso real.

C.3. MODELO MATEMÁTICO

El modelo físico se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático. El modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre las variables involucradas.

Considerando a la medición como un proceso, se identifican magnitudes de entrada denotadas por el conjunto $\{X_i\}$ expresión en la cual el índice i toma valores entre 1 y el número de magnitudes de entrada N .

La relación entre las magnitudes de entrada y el mensurando Y como la magnitud de salida se representa como una función

$$Y = f(\{X_i\}) = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \text{ Ecuación C. 1}$$

representada por una tabla de valores correspondientes, una gráfica o una ecuación.

Aunque para el propósito de este trabajo se considerará Y como un escalar, puede aplicarse el mismo formalismo para elementos matemáticos más complejos como vectores o matrices.

En este trabajo se denota con x_i al mejor estimado de las magnitudes de entrada X_i .

Los valores de las magnitudes de entrada pueden ser resultados de mediciones recientes realizadas por el usuario o tomados de fuentes como certificados, literatura, manuales, etc.

El mejor estimado del valor del mensurando es el resultado de calcular el valor de la función f evaluada en el mejor estimado de cada magnitud de entrada,

$$y = f(x_1, \dots, x_N)$$

En algunas ocasiones se toma el mejor estimado de Y como el promedio de varios valores y_j del mensurando obtenidos a partir de diversos conjuntos de valores $\{X_i\}_j$ de las magnitudes de entrada.

C.4 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE

Una vez determinados el mensurando, el principio, el método y el procedimiento de medición, se identifican las posibles fuentes de incertidumbre.

Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo,

- los resultados de la calibración del instrumento;
- la incertidumbre del patrón o del material de referencia;
- la repetibilidad de las lecturas;
- la reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos;
- características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.;

- variaciones de las condiciones ambientales;
- la definición del propio mensurando;
- el modelo particular de la medición;
- variaciones en las magnitudes de influencia.

No es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución, comparada con las demás, apoyada en mediciones. Es preferible la inclusión de un exceso de fuentes que ignorar algunas entre las cuales pudiera descartarse alguna importante. No obstante, siempre estarán presentes efectos que la experiencia, conocimientos y actitud crítica del metrologo permitirán calificar como irrelevantes después de las debidas consideraciones.

C.5. CUANTIFICACIÓN

Se distinguen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El *Método de Evaluación Tipo A* está basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras el *Método de Evaluación Tipo B* comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre.

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

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

Evaluación tipo A

La incertidumbre de una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si X_i se determina por n mediciones independientes, resultando en valores q_1 , q_2 , ..., q_n , el mejor estimado x_i para el valor de X_i es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n q_j \text{ Ecuación C. 2}$$

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

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \text{ Ecuación C. 3}$$

La incertidumbre estándar $u(x_i)$ de X_i se obtiene finalmente mediante el cálculo de la

desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \text{ Ecuación C. 4}$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de X_i :

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \text{ Ecuación C. 5}$$

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

La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \text{ Ecuación C. 6}$$

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

Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre tipo A, la cual es proporcional a $1/\sqrt{n}$

Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.

En pocos casos se recomienda o se requiere n mayor de 10

Para determinar el impacto que tiene n en la incertidumbre expandida hay que estimar su influencia en el número de grados efectivos de libertad

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

Evaluación tipo B

Las fuentes de incertidumbre tipo B son cuantificadas usando información externa u obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

Certificados de calibración.

Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.

Normas o literatura.

Valores de mediciones anteriores.

Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

C.5.1 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

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

Distribución normal

Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.

Distribución rectangular:

En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo.

Ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

Distribución triangular:

Si además del conocimiento de los límites superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.

Otras distribuciones

Pueden encontrarse también distribuciones como la U, en la cual los extremos del intervalo presentan los valores con probabilidad máxima, típicamente cuando hay comportamientos oscilatorios subyacentes. También se encuentran distribuciones triangulares con el valor máximo en un extremo como en las asociadas a “errores de coseno”.

C. 6 REDUCCIÓN

Antes de comparar y combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las

incertidumbres originales como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución asignada a cada fuente.

a) Distribución normal:

La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida (Evaluación tipo A) ya representa la incertidumbre estándar.

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida U, como los presentados por ejemplo en certificados de calibración, se divide U entre el factor de cobertura k, obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad \text{Ecuación C. 7}$$

b) Distribución rectangular:

Si la magnitud de entrada Xi tiene una distribución rectangular con el límite superior a+ y el límite inferior a- , el mejor estimado para el valor de Xi está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad \text{Ecuación C. 8}$$

y la incertidumbre estándar se calcula por como:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad \text{Ecuación C. 9}$$

o por

$$u(x_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecuación C. 10}$$

donde $a/2$ es el semiancho del intervalo a con

$$a = a_+ - a_- \quad \text{Ecuación C. 11}$$

c) Distribución triangular:

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

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad \text{Ecuación C. 12}$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{24}} = \frac{a/2}{\sqrt{6}} \quad \text{Ecuación C. 13}$$

con a definido como en la Ecuación C. 12

C. 7 COMBINACIÓN

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$, la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando Y .

La contribución $u_i(y)$ de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar $u(x_i)$ de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Es posible encontrar que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando, y viceversa.

Se determina $u_i(y)$ por el producto de $u(x_i)$ y su coeficiente de sensibilidad c_i (o factor de sensibilidad):

$$u_i(y) = c_i * u(x_i) \quad \text{Ecuación C. 14}$$

C.7.1 Coeficiente de sensibilidad

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

a) Determinación a partir de una relación funcional

Si el modelo matemático para el mensurando $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ describe la influencia de la magnitud de entrada X_i suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se calcula por la derivada parcial de f con respecto a X_i :

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad \text{Ecuación C. 15}$$

b) Otros métodos de determinación:

Si la influencia de la magnitud de entrada X_i en el mensurando Y no está representada por una relación funcional, se determina el coeficiente de sensibilidad c_i por una estimación del impacto de una variación de X_i en Y según:

$$c_i = \frac{DY}{DX_i} \quad \text{Ecuación C. 16}$$

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

C.7.2 Porcentaje de contribución

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

$$\%C = \frac{\sum_{i=1}^N [u_i(y)]^2}{\%C} \quad \text{Ecuación C. 17}$$

$$\%c_i = \frac{[u_i(y)]^2 * 100}{\%C} \quad \text{Ecuación C. 18}$$

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

C.7.3 Propagación de la incertidumbre

Considerando los métodos de combinación y los coeficientes de sensibilidad resulta finalmente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i * u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 * u(x_i)^2} \quad \text{Ecuación C. 19}$$

C. 8 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

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

C.8.1 Factor de cobertura y nivel de confianza

La incertidumbre estándar u_c representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad p de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida U

$$U = k * u_c \quad \text{Ecuación C. 20}$$

La incertidumbre expandida U indica entonces un intervalo que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

Por ejemplo, en una distribución normal, $k=1$ corresponde a $p=68,27\%$, $k=2$ a $p=95,45\%$.

En una distribución rectangular $p=57,7\%$ si $k=1$.

Cuando es necesaria una estimación más rigurosa de la incertidumbre expandida se utiliza la distribución t de Student y los grados de libertad como herramienta.

Estimar la incertidumbre de la medición requiere de un proceso extenso, que para evitar pasar por alto factores importantes en esta estimación, requiere que se haga de la manera más ordenada, por tal motivo son desarrolladas plantillas o formatos con los cuales es posible llevar de manera ordenada un registro de todas las variables que intervienen en el proceso, estos formatos varían de aspecto de acuerdo a factores como el mensurado y la complejidad del modelo matemático que se este manejando.

La incertidumbre de una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si X_i se determina por n mediciones independientes, resultando en valores q_1 , q_2 , ..., q_n , el mejor estimado \bar{x}_i para el valor de X_i es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Ecuación C. 21}$$

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

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad \text{Ecuación C. 22}$$

La incertidumbre estándar $u(x_i)$ de X_i se obtiene finalmente mediante el cálculo de la

desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación C. 23}$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de Xi:

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad \text{Ecuación C. 24}$$

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

La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación C. 25}$$

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

Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre tipo A, la cual es proporcional a $1/\sqrt{n}$

Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.

En pocos casos se recomienda o se requiere n mayor de 10

Para determinar el impacto que tiene n en la incertidumbre expandida hay que estimar su influencia en el número de grados efectivos de libertad

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

Evaluación tipo B

Las fuentes de incertidumbre tipo B son cuantificadas usando información externa u obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

Certificados de calibración.

Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.

Normas o literatura.

Valores de mediciones anteriores.

Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

C.8.2 Distribuciones de probabilidad

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

Distribución normal

Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.

Distribución rectangular:

En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo.

Ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad

de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

Distribución triangular:

Si además del conocimiento de los límites superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.

Otras distribuciones

Pueden encontrarse también distribuciones como la U, en la cual los extremos del intervalo presentan los valores con probabilidad máxima, típicamente cuando hay comportamientos oscilatorios subyacentes. También se encuentran distribuciones triangulares con el valor máximo en un extremo como en las asociadas a “errores de coseno”.

C. 9 REDUCCIÓN

Antes de comparar y combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución asignada a cada fuente.

a) Distribución normal:

La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida (Evaluación tipo A) ya representa la incertidumbre estándar.

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida U , como los presentados por ejemplo en certificados de calibración, se divide U entre el factor de cobertura k , obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad \text{Ecuación C. 26}$$

b) Distribución rectangular:

Si la magnitud de entrada X_i tiene una distribución rectangular con el límite superior a_+ y el límite inferior a_- , el mejor estimado para el valor de X_i está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad \text{Ecuación C. 27}$$

y la incertidumbre estándar se calcula por como:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad \text{Ecuación C. 28}$$

o por

$$u(x_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecuación C. 29}$$

donde $a/2$ es el semiancho del intervalo a con

$$a = a_+ - a_- \quad \text{Ecuación C. 30}$$

c) Distribución triangular:

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

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad \text{Ecuación C. 31}$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{24}} = \frac{a/2}{\sqrt{6}} \quad \text{Ecuación C. 32}$$

con a definido como en la Ecuación C. 12

C.10 COMBINACIÓN

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$, la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando Y .

La contribución $u_i(y)$ de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar $u(x_i)$ de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Es posible encontrar que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando, y viceversa.

Se determina $u_i(y)$ por el producto de $u(x_i)$ y su coeficiente de sensibilidad c_i (o factor de sensibilidad):

$$u_i(y) = c_i * u(x_i) \quad \text{Ecuación C. 33}$$

C.10.1 Coeficiente de sensibilidad

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

a) Determinación a partir de una relación funcional

Si el modelo matemático para el mensurando $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ describe la influencia de la magnitud de entrada X_i suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se calcula por la derivada parcial de f con respecto a X_i :

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad \text{Ecuación C. 34}$$

b) Otros métodos de determinación:

Si la influencia de la magnitud de entrada X_i en el mensurando Y no está representada por una relación funcional, se determina el coeficiente de sensibilidad c_i por una estimación del impacto de una variación de X_i en Y según:

$$c_i = \frac{DY}{DX_i} \quad \text{Ecuación C. 35}$$

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

C.10.2 Porcentaje de contribución

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

$$\%C = \sum_{i=1}^N [u_i(y)]^2 \quad \text{Ecuación C. 36}$$

$$\%c_i = \frac{[u_i(y)]^2 * 100}{\%C} \quad \text{Ecuación C. 37}$$

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

C.10.3 Propagación de la incertidumbre

Considerando los métodos de combinación y los coeficientes de sensibilidad resulta finalmente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i * u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} * u(x_i) \right]^2} \quad \text{Ecuación C. 38}$$

C. 11 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se comunica simplemente como la incertidumbre estándar combinada, otras ocasiones como un cierto número de veces tal incertidumbre, algunos casos requieren se exprese

en términos de un nivel de confianza dado, etc. En cualquier caso, es indispensable comunicar sin ambigüedades la manera en que la incertidumbre está expresada.

C.11.1 Factor de cobertura y nivel de confianza

La incertidumbre estándar u_c representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad p de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida U

$$U = k * u_c \quad \text{Ecuación C. 39}$$

La incertidumbre expandida U indica entonces un intervalo que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

En el medio industrial, a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponda a un factor de cobertura como un número entero de desviaciones estándar en una distribución normal.

Por ejemplo, en una distribución normal, $k=1$ corresponde a $p=68,27\%$, $k=2$ a $p=95,45\%$.

En una distribución rectangular $p=57,7\%$ si $k=1$.

Cuando es necesaria una estimación más rigurosa de la incertidumbre expandida se utiliza la distribución t de Student y los grados de libertad como herramienta.

Estimar la incertidumbre de la medición requiere de un proceso extenso, que para evitar pasar por alto factores importantes en esta estimación, requiere que se haga de la manera más ordenada, por tal motivo son desarrolladas plantillas o formatos con los cuales es posible llevar de manera ordenada un registro de todas las variables que intervienen en el proceso, estos formatos varían de aspecto de acuerdo a factores como el mensurado y la complejidad del modelo matemático que se este manejando.

APENDICE D. ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE DEL PATRON GRAVIMÉTRICO

El mensurando especificado en el patrón gravimétrico es el volumen de gas que entra al reservorio y se determina a partir de la medición de variables como temperatura, presión, densidad, masa y humedad.

El valor del volumen de gas inicialmente se expresa con la siguiente expresión:

$$V = \frac{m_f - m_i}{\rho_{picn}} \text{ Ecuación D 1}$$

Donde,

m_f = Valor de la masa al finalizar la prueba

m_i = Valor de la masa al iniciar la prueba.

Este valor de la masa siempre va ser cero, porque antes de iniciar la prueba, se tara la balanza a cero.

ρ_{aceite} = densidad del aceite el cual se determina por medio de la medición con un picnómetro , una balanza y la siguiente ecuación recomendada por Metrocalidad en el certificado de calibración.

$$\rho_{aceite} = \frac{m_{2picn} - m_{1picn}}{V_{picn}} + \rho_{aire} \text{ Ecuación D 2}$$

donde,

m_{2picn} = Valor de la masa del picnómetro lleno del aceite mineral del gravimétrico

m_{1picn} = Valor de la masa del picnómetro vacío.

V_{picn} = Valor del volumen del picnómetro. Según el certificado de calibración realizado por Metrocalidad el volumen efectivo es 51.613 cm³.

ρ_{aire} = Valor de la densidad del aire a las condiciones ambientales del cuarto.

Este valor de la densidad del aire es calculada según la recomendación del BIPM para la determinación de densidad en aire húmeda³.

$$\rho_{\text{aire}} = \rho_i = \frac{P_{\text{amb}} * M_a}{Z_i * R_0 * T_{\text{amb}}} * [1 - x_v * (1 - \frac{M_v}{M_a})] \text{ Ecuación D 3}$$

donde,

ρ_i = designa la densidad del aire, y el subíndice “i” designa los diferentes estados en el patrón .

Z_i = El factor de compresibilidad

M_a = Masa molar del aire

P_{amb} = presión del aire húmedo (en el ambiente)

R_0 = Constante de gas universal (molar): 8.31441J(mol*K)

x_v = fracción molar del vapor de agua en aire húmedo

M_v = Masa molar del vapor

T_{amb} = Temperatura del aire en el ambiente.

El valor del volumen medido por el patrón gravimétrico, es afectado por una serie factores que se describen y se tienen en cuenta a continuación:

- El cambio de temperatura ocasiona una expansión o contracción volumétrica. Este efecto se tiene en cuenta adicionando un factor de corrección por expansión volumétrica:

$$C_{\text{exp}} = V * \alpha * (T_{\text{aceite}} - 20) \text{ Ecuación D 4}$$

donde,

C_{exp} = Factor de corrección por expansión volumétrica.

V = Volumen medido en el gravimétrico correspondiente a la ecuación ()

α = coeficiente de expansión volumétrica. α : 0.000165/K

T_{aceite} = Temperatura promedio del aceite en el reservorio durante la prueba.

$T_{@p}$ = Temperatura promedio correspondiente a la cual se obtuvo el valor de la densidad.

- El valor de la masa observado en la balanza en el sistema de pesaje estático son valores aparentes que pueden ser ajustada por flotabilidad en el aire del tanque de pesaje . Por tanto el valor del volumen medido debe ser afectado por un factor de corrección debido a este fenómeno:

$$m_c = \frac{m_f - m_i}{1 - \frac{\rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aceite}}}} \quad \text{Ecuación D 5}$$

Donde,

m_c = valor real de la masa medida en la balanza

- La actuación del diverter genera también un error en la medición del volumen en el gravimétrico el cual debe ser corregido. Esta corrección se trata detalladamente en la sección 3.5.1. El factor de corrección del diverter se muestra en la ecuación 3.30.
- Teniendo en cuenta todo estos factores de corrección y expresando la ecuación del mensurando en sus magnitudes mas puras , se obtiene la siguiente ecuación:

$$V(\Delta m, T_m) := \frac{(M) \cdot \left[1 + \left[\frac{(ts1 - ts2)}{T_m} \right] - \alpha \cdot (T_{\text{aceite}} - 293.15) \right]}{\left(\frac{\rho_{\text{picn}}}{V_{\text{picn}}} \right) - \rho_{\text{amb}}} \cdot \frac{\rho_a}{1 - \frac{\rho_{\text{amb}} [a_0 + a_1 \cdot (T_{\text{amb}} - 273.15) + \dots]}{\rho_{\text{amb}}}} \quad \text{Ecuación D 6}$$

D.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE

Los parámetros que inciden en la incertidumbre del patrón gravimétrico, son básicamente los que afectan la ecuación para la obtención del mensurado.

A continuación se muestra en la tabla D.1, las fuentes de incertidumbre que afectan la medición del volumen.

Tabla D.1. Fuentes de incertidumbre

Variable	Descripción	Instrumento	Tipo de incertidumbre	
			Tipo A	Tipo B
m_f	Valor de la masa al final de la prueba	Balanza	•	•
m_{2picn}	Masa del picnómetro totalmente lleno de aceite	Balanza	•	•
m_{1picn}	Masa del picnómetro vacío	Balanza	•	•
V_{picn}	Volumen del picnómetro	Picnómetro		•
T_{oil}	Temperatura del aceite en el reservorio hermético	RTD	•	•
T_{amb}	Temperatura ambiente	RTD	•	•
P_{amb}	Presión atmosférica	Barómetro	•	•
ϕ	Humedad relativa del aire en el ambiente	Higrómetro	•	•
t_{med}	Tiempo que demora la prueba	cronometro		•
t'_1	Tiempo que demora en activarse la válvula diverter hacia el tanque de pesaje	cronometro		•
t'_2	Tiempo que demora en activarse la válvula diverter hacia el tanque de recolección	cronometro		•

Cada una de las variables implica una incertidumbre en su medición, tipo A y tipo B. Cuando se va a obtener la mejor estimación, solo se utilizan las contribuciones tipo B. Para obtener la incertidumbre de la calibración de cualquier medidor, se utilizan las tipo A y tipo B.

D.1.1 Estimación de la incertidumbre en la evaluación de la masa

Tipo B

- **El informe de calibración** entregado por Vansolix, de la balanza utilizada (Mettler Toledo KCC 150) establece las siguientes estimaciones de incertidumbre para determinados rangos de masa:

Tabla D.1 Incertidumbre de la balanza

MASA	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA
10Kg	1,15 gr
40Kg	1,15gr
80Kg	0,83gr

El patrón gravimétrico trabaja con valores de masa menor a 60Kg, por tanto se toma una incertidumbre expandida de 1.15gr con un K= 2 para una confiabilidad del 95%. Con esto hallamos la incertidumbre asociada con la calibración (μ Mcalibración):

$$\mu\text{Mcalibración} = \frac{\text{Mcalibración}}{K} \quad \text{Ecuación D 7}$$

donde,

Mcalibración: incertidumbre expandida de la balanza, registrada en el certificado de calibración. Reemplazando obtenemos:

$$\mu\text{Mcalibración} = \frac{1.15 \text{ gr}}{2} = 5.74 * 10^{-4} \text{ Kg}$$

- **La resolución** o escala mínima de división que registra el display de la balanza es de 1gr. Esta característica del instrumento adiciona un valor en la estimación de la incertidumbre (μ Mresolución), tomando como distribución rectangular (se divide por $\sqrt{3}$) su efecto.

$$\mu\text{Mresolución} = \frac{1 \text{ gr}}{\sqrt{3}} = 5.774 * 10^{-4} \text{ Kg}$$

- En el proceso de calibración, la balanza es afectada por el **flujo de aire** que circula en el ambiente, originando una adición de la incertidumbre en la medición de la masa (μ Mflujo de aire).

En las observaciones hechas se observa que esta variación varía en un rango de 5 gramos. Este valor se supone una distribución rectangular, acorde con la suposición de que existe la misma probabilidad para cualquier valor dentro del rango.

$$\mu M_{\text{flujodea ire}} = \frac{5 \text{ gr}}{\sqrt{3}} = 2.78 * 10^{-3} \text{ Kg}$$

Tipo A

La repetibilidad del patrón en la calibración por ejemplo de un medidor de diafragma se muestra en la siguiente tabla.

D.1.2 Estimación de la incertidumbre en la evaluación de la masa inicial del picnómetro.

Tipo B

Para la medición de la masa del picnómetro vacío, se usa la balanza descrita en la sección 3.7.2. y su incertidumbre asociada es estimada usando los datos de calibración del fabricante.

- **Resolución.** o escala mínima de división que registra la balanza pequeña es de 1 mg. Esta característica del instrumento adiciona un valor en la estimación de la incertidumbre ($\mu M_{\text{resolución}}$), tomando como distribución rectangular (se divide por $\sqrt{3}$) su efecto.

$$\mu M_{\text{resolución}} = \frac{1 \text{ mg}}{\sqrt{3}} = 5.774 * 10^{-7} \text{ Kg}$$

- **Linealidad.** En el certificado de calibración se establece un valor de $\pm 0.5 \text{ mg}$ para la linealidad. El fabricante recomienda el uso de la distribución rectangular para convertir este efecto en incertidumbre estándar (m_{picnolin}).

$$m_{\text{picnolin}} = \frac{0.5 \text{ mg}}{\sqrt{3}} = 4.082 * 10^{-7} \text{ Kg}.$$

- **Sensitividad.** La contribución en incertidumbre al determinar la masa inicial, se considera nula debido a que se utiliza el mismo instrumento de medición y el rango de medición es pequeño.

TIPO A

Se realiza una serie de 5 mediciones para determinar la masa inicial del picnómetro, y se obtiene su desviación estándar.

Tabla D.2. Repetibilidad de la medición de la masa inicial del picnómetro

medicion	MASA [gr]	
1	32,2590	
2	32,259	
3	32,259	
4	32,259	Desviacion std [gr]
5	32,258	0,000447214

La incertidumbre debida a esa desviación estándar se obtiene de la ecuación:

$$m_{\text{picnrepetibilidad}} = \frac{\text{desviaciones tan dard}}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación D 8}$$

Donde,

n: numero de repeticiones para un mismo caudal

Reemplazando se obtiene que:

$$m_{\text{picnrepetibilidad}} = \frac{0.000447214 \text{ gr}}{\sqrt{5}} = 5.774 * 10^{-8} \text{ Kg.}$$

D.1.3 Estimación de la incertidumbre en la evaluación de la masa final del picnómetro.

Tipo B

Para la medición de la masa del picnómetro lleno de aceite del gravimétrico, se usa la balanza descrita en la sección 3.7.2. y su incertidumbre asociada es estimada usando los datos de calibración del fabricante.

- **Resolución.** o escala mínima de división que registra la balanza pequeña es de 1 mg. Esta característica del instrumento adiciona un valor en la estimación de la incertidumbre ($\mu M_{\text{resolución}}$), tomando como distribución rectangular (se divide por $\sqrt{3}$) su efecto.

$$\mu M_{\text{resolución}} = \frac{1 \text{ mg}}{\sqrt{3}} = 5.774 * 10^{-7} \text{ Kg}$$

- **Linealidad.** En el certificado de calibración se establece un valor de $\pm 0.5 \text{ mg}$ para la linealidad. El fabricante recomienda el uso de la distribución rectangular para convertir este efecto en incertidumbre estándar (m_{fpicnlin}).

$$m_{\text{fpicnlin}} = \frac{0.5 \text{ mg}}{\sqrt{3}} = 4.082 * 10^{-7} \text{ Kg}.$$

- **Sensitividad.** La contribución en incertidumbre al determinar la masa inicial, se considera nula debido a que se utiliza el mismo instrumento de medición y el rango de medición es pequeño.

TIPO A

Se realiza una serie de 5 mediciones para determinar la masa inicial del picnómetro, y se obtiene su desviación estándar.

Tabla D.3 Repetibilidad de la medición de la masa final del picnómetro.

Medicion	MASA [gr]	
1	75,582	
2	75,582	
3	75,58	
4	75,579	Desviacion std [gr]
5	75,58	0,001341

La incertidumbre debida ese desviación estándar es :

$$m_{\text{fpicnrepetibilidad}} = \frac{0.001341 \text{ gr}}{\sqrt{5}} = 5.997 * 10^{-7} \text{ Kg}.$$

D.1.4 Estimación de la incertidumbre en la medición del volumen del picnómetro.

El certificado de calibración entregado por Metrocalidad informa una incertidumbre expandida del picnómetro de 0.0063cm^3 con un $K=2,00$, para una confiabilidad del 95%. Por tanto su adición a la incertidumbre (μV_{picn}) es:

$$\mu V_{\text{picn}} = \frac{0.0063\text{cm}^3}{2} = 3.2 * 10^{-9} m^3$$

D.1.5 Estimación de la incertidumbre en la medición de la temperatura del aceite en el reservorio hermético

Tipo B

- **Resolución** o escala mínima de división que registra el sistema de adquisición de datos de 0.01K . Esta característica del instrumento adiciona un valor en la estimación de la incertidumbre ($\mu T_{\text{ambresolución}}$), tomando como distribución rectangular (se divide por $\sqrt{3}$) su efecto.

$$\mu T_{\text{ambresolución}} = \frac{0.01\text{K}}{\sqrt{3}} = 5.774 * 10^{-3} K$$

- **Datos Fabricante** El fabricante entrega un valor de tolerancia para la RTD marca WATLOW de $\pm 0.05\text{C}$.

El valor de la tolerancia está dado sin un nivel de confianza o información de la distribución utilizada, así que se supone una distribución rectangular.

La incertidumbre estándar se calcula:

$$\mu T_{\text{aceite fabricante}} = \frac{0.05\text{K}}{\sqrt{3}} = 2.88 * 10^{-2} K$$

- **Calibración** La RTD para la medición de la temperatura del aceite es calibrada con un patrón de temperatura (termocupla) del Laboratorio del

CDT de gas que nos da una incertidumbre de 0.2K con una distribución rectangular. Por tanto la incertidumbre standard es :

$$\mu_{\text{Taceiteca libracion}} = \frac{0.2K}{\sqrt{3}} = 1.1548 * 10^{-1} K$$

Tipo A

Durante el procedimiento de calibración se obtiene un histórico de la medición de temperatura del aceite, obteniendo así una temperatura promedio y su desviación estándar. Estos valores se muestran en la tabla D.4

Tabla D.4 Repetibilidad en la medición de la temperatura del aceite

Medicion	Temperatura [°C]	
1	21,2	
2	20,9	
3	20,7	
4	20,5	
5	20,950	
6	20,8	
7	20,7	
8	20,6	
9	20,5	Desviación std [°C]
10	20,5	0,241184116

D.1.6 Estimación de la incertidumbre en la medición de la temperatura ambiente

Tipo B

- **Calibración** La RTD para la medición de la temperatura es calibrada en La Superintendencia de Industria y Comercio. El certificado informa los siguientes datos:

Tabla D.5 Datos de certificado de calibración de la RTD para la medicion de la temperatura ambiente.

Temperatura indicada	Corrección a la indicación	Incertidumbre de la medición [°C]
21,7	0,79	0,06
19,3	0,79	0,06

Tipo A

Durante el procedimiento de calibración se obtiene un histórico de la medición de temperatura del aceite, obteniendo así una temperatura promedio y su desviación estándar. Estos valores se muestran en la tabla D.6.

Tabla D.6 Repetibilidad en la medición de la temperatura ambiente.

medicion	Temperatura [°C]	
1	19,07	
2	19,07	
3	20,00	
4	19,29	
5	19,38	
6	19,35	
7	19,48	
8	19,23	
9	18,61	Desviacion std [°C]
10	19,51	0,359725585

D.1.7 Estimación de la incertidumbre en la evaluación de la presión atmosférica

Tipo B

El certificado de calibración del Barómetro marca VAISALA ,realizado por a Superintendencia de Industria y Comercio, informa un incertidumbre expandida del $\pm 0.27\text{mbar}$ y corresponde a un $K=2$ para obtener una confiabilidad del 95%.

Tipo A

Durante el procedimiento de calibración se obtiene un histórico de la medición de La presión atmosférica, obteniendo así una temperatura promedio y su desviación estándar. Estos valores se muestran en la tabla D.7.

Tabla D.7 Repetibilidad de la medición de la presión barométrica

medicion	presión [mbar]	
1	903,09	
2	902,90	
3	902,75	
4	902,70	
5	903,60	
6	903,60	
7	903,20	
8	903,10	
9	901,65	desviacion std [mbar]
10	901,30	0,760693397

D.1.8 Estimación de la incertidumbre en la evaluación de la humedad relativa.

Tipo B

El certificado de calibración del higrómetro marca Durotherm con código T-L-023 hecho por la Superintendencia de Industria y Comercio, informa una incertidumbre

expandida de $\pm 2.9\%$ con un $K=2$, para obtener una confiabilidad del 95%.

Tipo A

Durante el procedimiento de calibración se obtiene un histórico de la medición de humedad relativa, obteniendo así una temperatura promedio y su desviación estándar. Estos valores se muestran en la tabla D.8.

Tabla D.8 Repetibilidad de la medición de la humedad relativa.

medición	Humedad relativa	
1	48,892%	
2	49,904%	
3	48,860%	
4	49,818%	
5	49,280%	
6	48,900%	
7	49,780%	
8	49,230%	
9	48,550%	desviación std
10	49,700%	0,48%

D.9 Estimación de la incertidumbre en la evaluación del tiempo de prueba.

Tipo B

- **Calibración.** La calibración se realizó con un patrón cronometro del Laboratorio del CDT de Gas , que tiene trazabilidad a la superintendencia de industria y Comercio. Y su valor de incertidumbre es de 0.001 seg. y suponiendo una distribución rectangular . Obtenemos entonces que:

$$m\text{Tiemposcalibracion} = \frac{0.0005\text{seg}}{\sqrt{3}} = 0.0002874\text{seg}$$

- **La resolución** o escala mínima de división que registra cronometro en el computador es de 0.001seg. Esta característica del instrumento adiciona un valor en la estimación de la incertidumbre($\mu\text{Tresoluci on}$), tomando como distribución rectangular (se divide por $\sqrt{3}$) su efecto.

$$\mu\text{Tresoluci on} = \frac{0.001\text{seg}}{\sqrt{3}} = 5.774 * 10^{-4} \text{seg}$$

D.10 Estimación de la incertidumbre en la evaluación del tiempo de corrección al inicio de la prueba.

Tipo B

Los valores de incertidumbre aportadas por la resolución y calibración son los mismos que para el tiempo de prueba , por ser el mismo cronometro.

D.11 Estimación de la incertidumbre en la evaluación del tiempo corrección al finalizar la prueba.

Tipo B

Los valores de incertidumbre aportadas por la resolución y calibración son los mismos que para el tiempo de prueba , por ser el mismo cronometro.

Para obtener la mejor estimación de incertidumbre del patrón gravimétrico, se hallan todas las contribuciones de las incertidumbres tipo B y se obtiene la incertidumbre estándar utilizando la ecuación C.3.7

Los cálculos de estimación de la incertidumbre del banco fueron realizados utilizando el software Math Cad® (ver anexo 1). Las tablas 35, 36 y 37 muestran los resultados de los cálculos para la situación más crítica en cada diverter.

Los datos de las contribuciones se muestran en la tabla D.9 y D.10, para bajo y alto caudal respectivamente, de tal forma que se obtiene los valores de incertidumbre para bajo y altos caudal .

Para bajo caudal la incertidumbre combinada que se obtiene tomando los valores de la tabla D.9 es:

$$\mu_c = 0.0103 \text{ dm}^3$$

Por tanto la incertidumbre relativa para el caudal bajo ($0.266 \text{ dm}^3/\text{min}$) con un volumen de 10 litros es de

$$\mu_s = 0.103\%$$

Utilizando la ecuación C.3.8 obtenemos la incertidumbre expandida (U) con una confiabilidad del 95% ($k= 2,00$)

$$U = 0.103\% * 2,00$$

$$U = 0,206\%$$

Para alto caudal la incertidumbre combinada que se obtiene tomando los valores de la tabla() es:

$$\mu_c = 0.057 \text{ dm}^3$$

Por tanto la incertidumbre relativa para el alto ($50\text{dm}^3/\text{min}$) con un volumen de 50 dm^3 es de

$$\mu_s = 0.150\%$$

Utilizando la ecuación C.3.8 obtenemos la incertidumbre expandida (U) con una confiabilidad del 95% ($k = 2,00$)

$$U = 0.150\% * 2,00$$

$$U = 0,3\%$$

Figura 65. Esquema de contribución de las variables en la incertidumbre de la medición del volumen de gas.

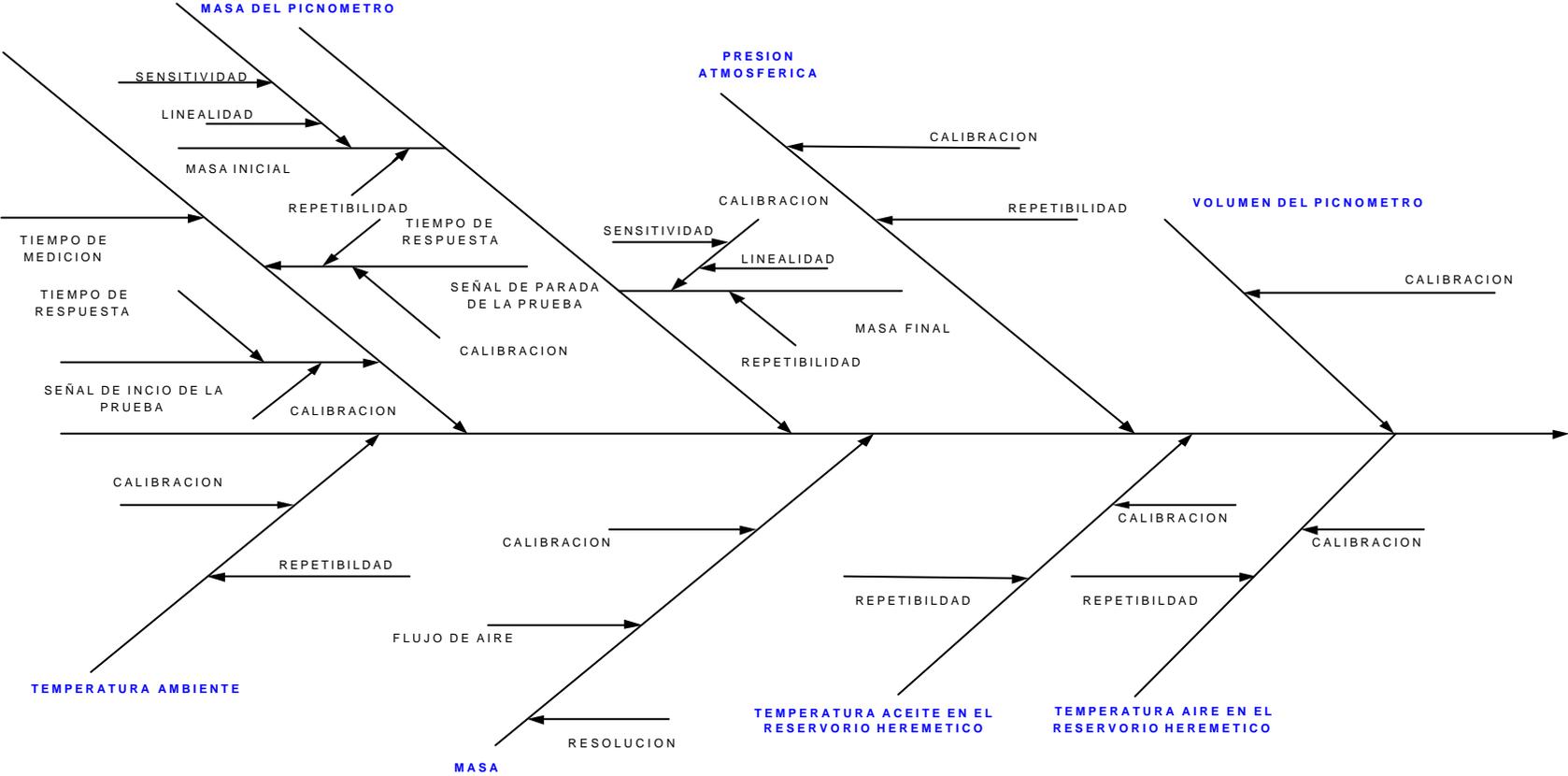


DIAGRAMA CAUSA Y EFECTO DEL PATRON PRIMARIO GRAVIMETRICO PARA CALIBRAR MEDIDORES DE FLUJO DE GAS POR EL METODO DE ASPIRACION

TablaD.9 Estimación de la incertidumbre del patrón gravimétrico para el menor caudal

No	Magnitud de entrada Fuente de incertidumbre	Valor estimado	Fuente de información	incertidumbre original	Tipo de distribución	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución	Grados de libertad
1	Masa	42,132 kg					1.2E-3Kg		∞
1 ^a	Resolución Balanza	-----	Escala	1 g	Rectangular	2,88*E-4 Kg		3.4561E-7m ³	50
1b	Calibración balanza	-----	Certificado de calibración	1,15g	normal K=2	5,774* E-4 Kg		6.93E-7m ³	∞
1c	Flujo de aire	-----	prueba	5g	Rectangular	2,78* E-3 Kg		3.464E-6m ³	∞
2	Volumen picnómetro	51,613 cm ³					195.947		
2 ^a	Calibración picnómetro	-----	Certificado de calibración	0,0064cm ³	normal K=2	0,0032cm ³		6.27E-7 m ³	∞
3	Masa inicial picnómetro	32,259 g					0.235m ³ /Kg		∞
3 ^a	Resolución balanza pequeña	-----	Escala	1 mg	Rectangular	2,88*E-7 Kg		0.676E-7m ³	50
3c	Calibración	-----	Certificado de calibración	0,5 g	Rectangular	4,082* E-7 Kg		0.929E-7m ³	∞
4	Masa final picnómetro	75,582 g					-0.235m ³ /Kg		
4 ^a	Resolución balanza pequeña	-----	Escala	1 mg	Rectangular	2,88 * E-7 Kg		-0.676E-7m ³	50
4c	Calibración	-----	Certificado de calibración	0,5 g	normal K=1	4,082* E-7 Kg		-0.929E-7m ³	∞
5	Temperatura ambiente	293 K					4.812E-6m ³ /K		
5 ^a	Resolución RTD	-----	Escala	0,01 K	Rectangular	2,88* E-3 K		1.385E-8m ³	50
5b	Calibración RTD	-----	Certificado de calibración	0,1 K	normal K=2	0,05 K		2.406E-7m ³	∞
6	Temperatura aceite	294 K					1.667E-6 m ³ /K		
6 ^a	Resolución RTD	-----	Escala	0,01 K	Rectangular	2,88 E-3 K		1.385E-8m ³	50
6b	Calibración RTD	-----	Certificado de calibración	0,2 K	Normal K=2	1E-1 K		2.406E-7m ³	∞
7	Presión atmosférica	903,5 mBar					1.434E-10m ⁴ seg ² /Kg		
7 ^a	Resolución Barómetro	-----	Escala	0,01mBar	Rectangular	2,88* E-3mBar		4.13E-13m ³	50
7b	Calibración Barómetro	-----	Certificado de calibración	0,27 mBar	Normal K=2	0,135mBar		1.935E-11m ³	∞
8	Humedad relativa	50%					-1.427E-7 m ³		∞
8 ^a	Resolución Higrómetro	-----	Escala	0,01%	Rectangular	0,00289%		4.124E-12m ³	∞
8b	Calibración Higrómetro	-----	Certificado de calibración	2,90%	Normal K=2	1,45%		6.35E-9m ³	∞
9	Tiempo de prueba	60 seg					2.332E-10m ³ /seg		
9 ^a	resolución del cronometro	-----	Escala	0,001seg	Rectangular	0,0005774seg		1.165E-14m ³	50
9b	calibración cronometro	-----	Certificado de calibración	0,001 seg	Rectangular	0,0005774 seg		1.165E-14m ³	∞
10	Tiempo de corrección al inicio	0,28 seg					4.43E-6m ³ /seg		
10a	resolución del cronometro	-----	Escala	0,001seg	Rectangular	0,0005774seg		2.56E-10m ³	50
10b	calibración cronometro	-----	Certificado de calibración	0,1 seg	Rectangular	0,0005774 seg		2.56E-10m ³	∞
11	Tiempo de corrección al final	0,4 seg					4.43E-6m ³ /seg		
11a	resolución del cronometro	-----	Escala	0,001seg	Rectangular	0,0005774seg		-2.56E-10m ³	50
f11b	calibración cronometro	-----	Certificado de calibración	0,1 seg	Rectangular	0,0005774 seg		-2.56E-10m ³	∞
12	Factor de correcion del diverter	0.0000526	Prueba	0.0000526	Rectangular	0.0000154	0.01m ³	1.51E-7m ³	∞
	Volumen de calibración	0.01 m³	Incertidumbre combinada = 0.000052 m³				Incertidumbre relativa = 0.103%		

Tabla D.10 Estimación de la incertidumbre del patrón gravimétrico para el mayor caudal.

No	Magnitud de entrada Fuente de incertidumbre	Valor estimado	Fuente de información	incertidumbre original	Tipo de distribución	Incetidumbre estándar	Coficiente de sensibilidad	Contribución	Grados de libertad
1	Masa	42,132 kg					1.2*E-3		∞
1a	Resolución Balanza	-----	Escala	1 g	rectangular	2,88*E-4 Kg		3.4561E-7m ³	50
1b	Calibración balanza	-----	Certificado de calibración	1,15g	normal K=2	5,774* E-4 Kg		6.93E-7m ³	∞
1c	Flujo de aire	-----	prueba	5g	rectangular	2,78* E-3 Kg		3.464E-6m ³	∞
2	Volumen picnómetro	51,613 cm ³					980.9		
2a	Calibración picnómetro	-----	Certificado de calibración	0,0064cm ³	normal K=2	0,0032cm ³	-----	3.194E-6m ³	∞
3	Masa inicial picnómetro	32,259 g					-1.78 m ³ /Kg		∞
3a	Resolución balanza pequeña	-----	Escala	1 mg	rectangular	2,88* E-7 Kg	-----	-4.894E-7m ³	50
3b	Calibración balanza	-----	Certificado de calibración	0,5 g	rectangular	4,082E-7 Kg	-----	8.5796E-7m ³	∞
4	Masa final picnómetro	75,582 g					-1.78 m ³ /Kg		
4a	Resolución balanza pequeña	-----	Escala	1 mg	rectangular	2.88 E-7 Kg	-----	-4.894E-7m ³	50
4b	Linealidad balanza	-----	Certificado de calibración	0,5 g	normal K=1	4,082 E-7 Kg	-----	8.5796E-7m ³	∞
5	Temperatura ambiente	293 K					-2.409*10 ⁻⁷ m ³ /K		
5a	Resolución RTD	-----	Escala	0,01 K	rectangular	2.88 E-2 K	-----	-1.415E-10m ³	50
5b	Calibración RTD	-----	Certificado de calibración	0,1 K	normal K=2	0.05 K	-----	-1.2045E-8m ³	∞
6	Temperatura aceite	294 K					-8.359*10 ⁻⁶ m ³ /K		
6a	Resolución RTD	-----	Escala	0,01 K	rectangular	2.88 E-3K	-----	-2.456E-9m ³	50
6b	Calibración RTD	-----	Certificado de calibración	0,2 K	Normal K=2	1* E-1 K	-----	-8.359E-7m ³	∞
7	Presión atmosférica	903,5 mBar					7.18*10 ⁻¹⁰ m ⁴ /kg.seg ²		
7a	Resolución Barómetro	-----	Escala	0,01mBar	rectangular	2.88* E-3 mBar	-----	2.109E-9m ³	50
7b	Calibración Barómetro	-----	Certificado de calibración	0,27 mBar	Normal K=2	0,135mBar	-----	9.864E-9m ³	∞
8	Humedad relativa	50%					7.143*10 ⁻⁷ m ³		∞
8a	Resolución Higrómetro	-----	Escala	0,01%	rectangular	0,00289%	-----	2.064E-11m ³	∞
8b	Calibración Higrómetro	-----	Certificado de calibración	2,90%	Normal K=2	1,45%	-----	1.035E-8m ³	∞
9	Tiempo de prueba	60 seg					1.718*10 ⁻⁶ m ³ /seg		
9a	resolución del cronometro	-----	Escala	0,001seg	rectangular	0,0005774seg	-----	1E-9m ³	50
9b	calibración cronometro	-----	Certificado de calibración	0,001 seg	rectangular	0,0005774 seg	-----	1E-9m ³	∞
10	Tiempo de corrección al inicio	0,28 seg					8.444*10 ⁻⁴ m ³ /seg		
10a	resolución del cronometro	-----	Escala	0,001seg	rectangular	0,0005774seg	-----	4.873E-7m ³	50
10b	calibración cronometro	-----	Certificado de calibración	0,1 seg	rectangular	0,0005774 seg	-----	4.873E-7m ³	∞
11	Tiempo de corrección al final	0,4 seg					8.444*10 ⁻⁴ m ³ /seg		
11a	resolución del cronometro	-----	Escala	0,001seg	rectangular	0,0005774seg	-----	4.873E-7m ³	50
f11b	calibración cronometro	-----	Certificado de calibración	0,1 seg	rectangular	0,0005774 seg	-----	4.873E-7m ³	∞
12	Factor de correccion del diverter	0.00246	Prueba	0.00246	rectangular	0.00154	0.057m ³	7.854E-5m ³	∞
	Volumen de calibración	0,051 m³	Incetidumbre combinada = 0,000074 m³			Incetidumbre relativa = 0,15%			

APENDICE E. PROCEDIMIENTO PARA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE DIAFRAGMA CON EL PATRON GRAVIMÉTRICO

El siguiente procedimiento de calibración para medidores de volumen de gas se aplica para los medidores volumétricos tipo diafragma G1.6.

Objetivo y alcance. Describir el procedimiento técnico utilizado en el laboratorio de calibración y ensayos del CDT de gas para calibrar medidores de volumen de gas por el método de aspiración para rangos entre 0 – 3 m³/h.

Referencias.

Norma técnica Colombiana **NTC-2728**, Máquinas y equipos. Medidores de gas tipo diafragma.

PTB Testing instructions. Medidores de volumen de gas.

ANSI B 109-1 / 109-2

E.1 INFORMACIÓN TÉCNICA DEL PROCEDIMIENTO.

Dentro de la estrategia de control y adquisición de datos se utiliza el software OPTO 22, el cual registra los datos adquiridos durante la realización del ensayo y una vez finalizado, Excel efectúa los cálculos necesarios para la presentación de los resultados.

E.1.1 Instrumentos de medición

Datos del patrón utilizado. El procedimiento de calibración de medidores de volumen de gas se realiza utilizando un patrón primario desarrollado a partir del método de aspiración de aire; que permite calibrar medidores de volumen de gas en un rango de 0.016 – 3 m³/h.

Datos de los instrumentos auxiliares utilizados.

Para el procedimiento de calibración se utilizan los siguientes instrumentos:

- Medidor de presión absoluta (1), marca Vaisala, rango de 800 a 1060 mbar, identificación interna P-L-011. Indica la presión atmosférica.
- Medidores de presión diferencial (2), marca Aschcroft, rango de medición de 0 a 3 inH₂O, identificación interna P-L-050 y P-L-051. Permiten medir la presión diferencial entre la entrada del medidor en prueba y el reservorio hermético.
- Medidores de Temperatura tipo RTD (5), rango de medición de 15 a 40 °C, identificación interna T-L-019 hasta T-L- 022. Permiten sensar la temperatura: del aceite y el aire en el reservorio hermético, del aire a la entrada y a la salida del medidor y del ambiente en el cuarto de calibración.
- Balanza electrónica Mettler-Toledo, con las siguientes características de operación: Capacidad 120.000 g, resolución 1g, repetibilidad ±0.5 g, linealidad ±0.5 g, sensibilidad ±0.5 g, protocolo de comunicación RS-232. Permite medir la masa almacenada durante la ejecución de la prueba.
- Balanza electrónica Mettler Toledo, con las siguientes características de operación: Capacidad 310 g, resolución 0.001g,
- Picnómetro marca Brand de capacidad efectiva de 51,613 dm³ utilizada para obtener la densidad del aceite junto con la balanza antes descrita.

E.1.2 Ensayo de hermeticidad.

Antes de comenzar el ensayo se debe determinar la hermeticidad del tramo de prueba (toda la tubería entre el patrón y el elemento bajo ensayo, incluyendo a este último, al patrón y a los elementos conectados para medir presión y temperatura). La presión de ensayo necesaria, tanto en cuanto a su tipo (presión positiva o negativa con respecto a la presión atmosférica), como a su valor, depende de la presión de operación del banco de prueba.

La presión de ensayo de hermeticidad establecida para el patrón por aspiración, es una presión de vacío de 3.96 mbar.

Una vez establecida la presión de ensayo, se debe aguardar un lapso de tiempo de aproximadamente 5 minutos, antes de comenzar con el ensayo de hermeticidad, a fin de permitir una adaptación térmica.

El ensayo de hermeticidad debe ser realizado de tal manera que la tasa de fuga Q_L origine una variación de presión en el tramo de prueba de por lo menos Δp , según los valores indicados en la Tabla 40.

Tabla E.1 Ensayo de hermeticidad

Medidor bajo prueba	Tasa de fuga permitida por sección	Tasa de fuga permitida	Dp en tramo de prueba	Intervalos de ensayo
Diafragma	0.001 Q_{min}	0.003 Q_{min}	0.2 mbar.	3 a 12 minutos

E.1.3 Estabilización del medidor en prueba.

Antes de iniciar el ensayo, el medidor de flujo de gas debe ser estabilizado a la temperatura de la sala de ensayo (por lo menos 8 horas antes de ejecutar la prueba), y deberá funcionar en su caudal máximo. El volumen total medido por el medidor debe ser por lo menos 50 veces el volumen cíclico del contador.

E.1.4 Errores máximos permisibles.

Los errores máximos permisibles al realizar el procedimiento técnico de calibración en los medidores de volumen de gas tipo diafragma se presentan en la tabla E.2.

Tabla E.2 Errores máximos permisibles en los medidores tipo diafragma

SALIDAS	ERRORES MAXIMOS PERMISIBLES	
	En verificación inicial	En servicio
$Q_{\min} < Q < 0.1Q_{\max}$	$\pm 3\%$	$\pm 6\%$
$0.1Q_{\max} < Q < Q_{\max}$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2\%$

E.1.4 Desviación estándar de los errores.

La desviación estándar de los errores obtenidas al realizar por lo menos tres pruebas para cada caudal de prueba debe estar acorde con las especificaciones listadas en la Tabla E.3.

Tabla E.3 Desviación estándar de los errores en medidores tipo diafragma

SALIDAS	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS ERRORES
$Q_{\min} < Q < 0.1Q_{\max}$	$< 0.2\%$
$0.1Q_{\max} < Q < Q_{\max}$	$< 0.1\%$

Norma técnica Colombiana NTC 2728. Medidores de volumen de gas tipo diafragma

E.1.5 Caída de presión en el medidor.

La absorción de presión de un medidor de volumen tipo diafragma varía periódicamente con el llenado y vaciado de las cámaras de medición. Esta es medida cuando se realiza la verificación primitiva. Aquí se distingue entre

absorción de presión mecánica y absorción de presión total. La absorción de presión mecánica, esto es, la pérdida de presión cuando fluye aire a través del medidor para un caudal entre Q_{min} y $2 Q_{min}$, no debe sobrepasar los valores máximos indicados en la Tabla 41. La absorción de presión total es medida cuando fluye aire a través del medidor para un caudal $Q_{,ax}$ y no debe sobrepasar los máximos valores medios admitidos, los cuales están indicados en la Tabla E.4.

Tabla E.4 Caída de presión en medidores tipo diafragma

Designación del medidor de gas	Valores permisibles para la absorción de presión mecánica		Valores permisibles para la absorción de presión total	
	Pa	mbar	Pa	mbar
G 1.6 a G 10	60	0.6	200	2
G 16 a G 40	60	0.6	300	3
G 65 a G 650	100	1.0	400	4

E.2 PROCEDIMIENTO TÉCNICO DE CALIBRACIÓN

A continuación se describe el procedimiento técnico de calibración:

1. Conectar la línea de suministro de aire auxiliar a la entrada de un medidor. Si se van a calibrar varios medidores se deben conectar en serie.
2. Pasar 10000 dm³ de aire a través de o los medidores con el cuidado de no exceder el caudal máximo del medidor.
3. Almacenar el medidor que va a ser calibrado y su respectivo líquido sellante en el cuarto de calibración, al menos veinticuatro (24) horas antes de iniciar la calibración para asegurar una estabilidad térmica.
4. Registrar en la bitácora del patrón gravimétrico los siguientes datos: Fecha, cliente, consecutivo, serial, identificación de la muestra, marca, estado, designación, caudal Máx y Mín.

5. Cerrar la válvula y retirar la línea de suministro de aire, dejando los puertos de entrada y salida abiertos a la atmósfera.
6. Acoplar el patrón gravimétrico a la salida del medidor
7. Revisar que las tuberías de las conexiones no presenten quiebre. Si se presentan se deben ajustar las conexiones de tal forma que se corrija el problema.
8. Cargar y ejecutar la estrategia de OptoControl “CALIBRACION DE EQUIPOS.cdb”, poner en marcha el OptoServer y abrir el proyecto de OptoDisplay “CALIBRACION DE EQUIPOS.MMI”, ubicados en el directorio *C:\GRAVIMETRICO\ESTRATEGIAS ACTUALIZADAS\CALIBRACIÓN DE EQUIPOS.*
9. Verificar que las condiciones de temperatura ambiente y humedad se encuentran dentro de rango. Los rangos admisibles para la temperatura y la humedad relativa del cuarto de calibración son $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 10\%$ respectivamente. Si estas condiciones no se encuentran dentro del rango admisible se debe resetear el control de condiciones ambientales, y esperar un tiempo aproximado de 20 minutos para la obtención de las condiciones adecuadas.
10. Verificar que las diferencias de temperatura de los elementos que intervienen en la calibración: 1) aceite deL gravimétrico, 2) líquido sellante de la cámara húmeda, 3) ambiente del cuarto de calibración, 4) entrada de la cámara húmeda y 5) salida de la cámara húmeda, no difieran en más de 1°C . De lo contrario, esperar a que se estabilicen.
11. El volumen de calibración es el equivalente a 3 rotaciones del volumen nominal del tambor, sin embargo, a bajos caudales, el volumen puede reducirse a 2 o 1 rotaciones, teniendo como referencia que el tiempo de calibración no exceda una (1) hora por cada caudal.
12. La primera prueba, se corre sin repeticiones con el fin de inspeccionar el estado original del medidor (as found).

13. Registrar en la bitácora los datos anteriores.
14. Inicia el proceso de calibración, verificando fugas, si el sistema no es hermético la calibración se aborta automáticamente, si existen fugas revisar las conexiones del sistema.
15. Ubicar el sensor óptico enfocando con el haz de luz la zona que atraviesa el reflectivo, mientras no pase la aguja el LED verde del amplificador de fibra óptica permanece activo, en el instante en que la aguja corta el haz de luz, el LED rojo parpadea una vez. Una vez posicionado, se verifica que por lo menos opere dos veces consecutivas correctamente.
16. Cerrar válvula de bola (a) y abrir válvula de bola de (b), para que haya flujo de gas del medidor hacia el gravimétrico
17. Abrir válvula de bola (c)
18. Manipular válvulas de regulación (d), (e), (f), hasta obtener el caudal requerido. La tolerancia máxima del rango de caudal es de $\pm 5\%$.
19. abrir válvula de bola (a)
20. Ubicar el odómetro en una referencia, la cual se va tener en cuenta para el inicio de todas las pruebas de un mismo caudal (para los distintos caudales, la referencia puede ser diferente). Esto se obtiene haciendo pasar aire por el medidor hasta ubicarlo en la referencia preestablecida
21. Cerrar válvula de bola (b) para interrumpir la comunicación del patrón con el medidor , quedando el patrón comunicado hacia el ambiente solamente
22. Prender la bomba de engranajes, para hacer recircular el aceite hidráulico desde el tanque de recolección, hacia el reservorio hermético (g).
23. Apagar la bomba, cuando el nivel en el tanque de recolección coincida con la línea verde del tanque.
24. Colocar el nivel del aceite en el reservorio hermético(f), coincidente con la línea roja ubicada en el medidor de nivel (e).Esto se hace abriendo solamente la válvula de bola (c)

25. Abrir válvula de bola (b) y esperar un minuto para estabilizar totalmente el sistema. Cerrar válvula de bola (a).
26. Pulsar "START" para dar inicio al proceso de calibración.
27. Resetear el cronometro
28. Poner en cero la balanza
29. Abrir válvula de bola (c) para que comience el escurrimiento del aceite.
30. Verificar el buen funcionamiento de la calibración. En caso de anomalía abortar la prueba.
31. Después de una vuelta del medidor (10 lit.), se activa la señal del óptico (al registrar la señal del óptico en el computador se da la señal de inicio y se activa el cronometro) con el reflector y envía una señal a para activar la válvula neumática, dejando pasar aire comprimido hacia el cilindro neumático y este actuando sobre el diverter.
32. El cilindro neumático tiene un interruptor magnético en la mitad de la carrera, en el momento que se activa se registra el tiempo de activación de la prueba. Este tiempo se registra tanto de ida (t_1) como de venida (t_2) del cilindro neumático.
33. Se activa la señal de final de la prueba con el sensor optico con la cual se activa la señal de parada.
34. Se deja pasar un tiempo de 30seg. Para garantizar total escurrimiento del aceite y que se eliminen las burbujas producidas en el aceite.
35. Se toma el valor final de la masa indicado por la balanza.
36. Se registra el valor de la masa en la plantilla de Excel.
37. Cerrar válvula de bola (b) y abrir válvula de bola (a).
38. Prender la bomba de engranajes, para hacer recircular el aceite hidráulico desde el tanque de recolección (j) hacia el reservorio hermético (g).
39. Apagar la bomba, cuando el nivel en el tanque de recolección coincida con la línea roja del tanque y cerrar válvula.
40. Se repiten todos los ítems para todas las pruebas.
41. Después de terminada la prueba se emite el informe de calibración.

E.3. CAUDALES DE PRUEBA, VOLUMEN DE CALIBRACIÓN Y NUMERO DE MEDICIONES

Los caudales de pruebas estipulados en el laboratorio son :

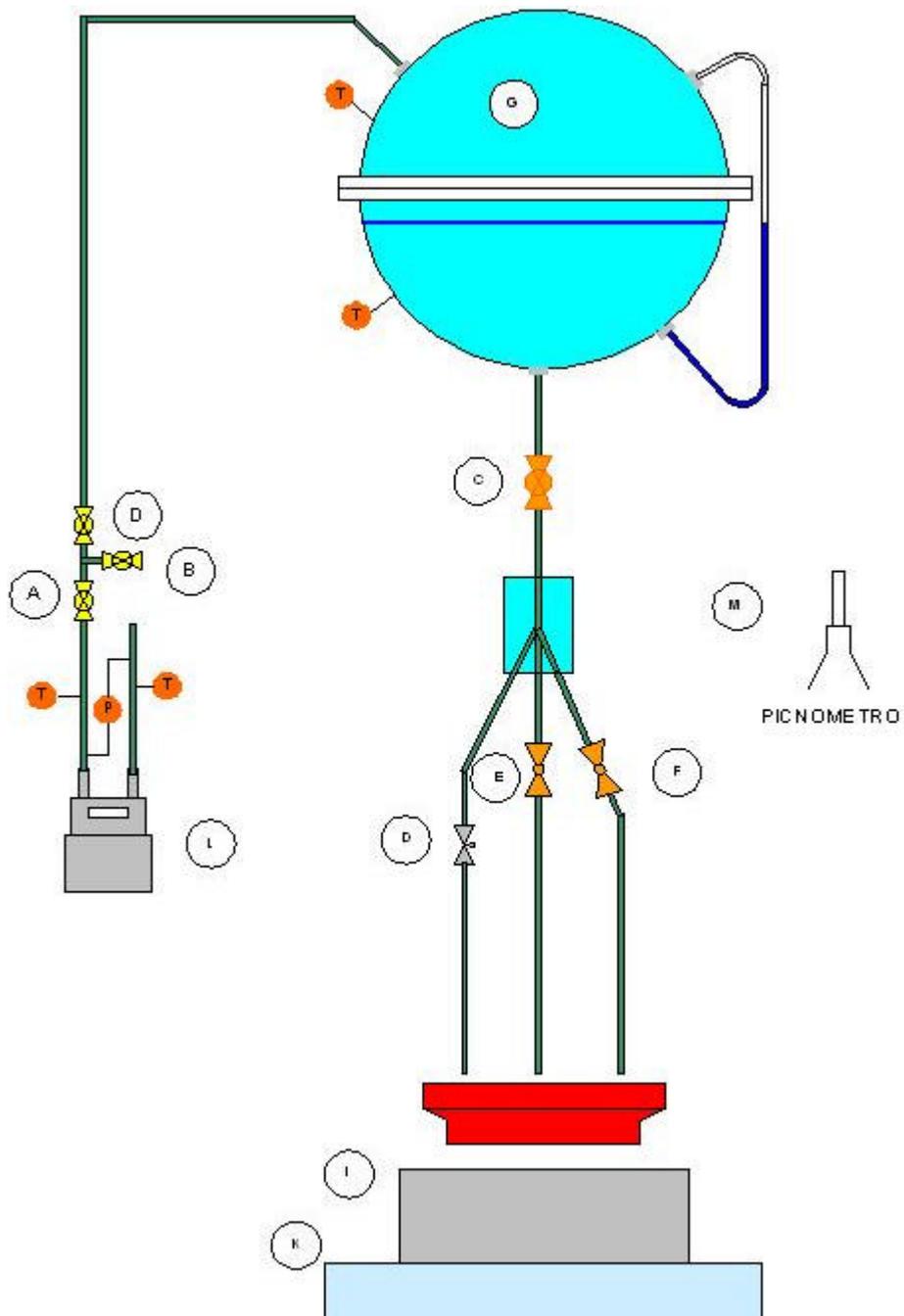
Q_{max} , $0.7 Q_{max}$, $0.4 Q_{max}$, $0.2 Q_{max}$, $0.1 Q_{max}$, $3 Q_{min}$, Q_{min} .

El volumen de calibración de cada prueba depende del volumen por revolución del medidor, de tal forma que se garantice un tiempo mínimo de prueba de 1min.

Y un tiempo máximo de 1 hora. Teniendo en cuenta también, que el volumen máximo de calibración del patrón gravimétrico es de 50 dm^3 .

El número de repeticiones para cada caudal debe ser mínimo de tres repeticiones, y se recomienda para la calibración con el patrón gravimétrico, realizar cuatro repeticiones para cada caudal.

Figura E.1 Esquema del montaje para calibración de un medidor tipo diafragma



Fuente: El autor

ANEXOS

PLANOS

