

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE VERIFICACIÓN
METROLÓGICA DE SURTIDORES DE GAS NATURAL VEHICULAR EN
EL CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS**

**CARLOS JAVIER CELEDÓN BARRIOS
ANGÉLICA MARÍA HERRERA GÓMEZ**

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

2006

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE VERIFICACIÓN
METROLÓGICA DE SURTIDORES DE GAS NATURAL VEHICULAR EN
EL CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS**

**CARLOS JAVIER CELEDÓN BARRIOS
ANGÉLICA MARÍA HERRERA GÓMEZ**

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

**Director
JABID EDUARDO QUIROGA
Ingeniero Mecánico**

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

2.006

DEDICATORIA

A Dios, porque fue, ha sido y será la
luz que ilumine el camino de mi vida.
A mis papitos por su apoyo incondicional.
A Juan Manuel, Hugo y Lilia por su ejemplo.
A Carlos Javier por su paciencia.

Angélica María

DEDICATORIA

A mis padres
A Yele y Yese

Carlos Javier

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto agradecen a:

A la Corporación CDT de gas, por brindarnos esta oportunidad.

A la universidad Industrial de Santander por ofrecernos sus conocimientos.

Al Ingeniero John Freddy Velosa Chacón, por sus enseñanzas y su confianza.

A todos nuestros amigos, porque de todos hemos aprendido a ser mejores personas.

Gracias.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO | 3 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 3 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 2. ESTACIONES DE SERVICIO DE GAS NATURAL VEHICULAR | 5 |
| 2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE SERVICIO | 5 |
| 2.1.1 Clasificación de las estaciones de servicio según el tipo de servicio que prestan | 5 |
| 2.1.2 Clasificación de estaciones de servicio según el funcionamiento | 5 |
| 2.2 COMPONENTES DE UNA EDS-GNV | 6 |
| 2.2.1 Estación de Regulación y Medición | 6 |
| 2.2.2 Sistema de Compresión, almacenamiento y líneas de transporte | 7 |
| 2.2.3 Surtidor | 9 |
| 2.3 FUNCIONAMIENTO DE UNA EDS - GNV | 12 |
| 2.3.1 Sistema compresión usando un nivel de presión | 13 |
| 2.3.2 Sistema de compresión en cascada | 14 |
| 2.4 MEDIDORES DE FLUJO MÁSIICO TIPO CORIOLIS | 16 |
| 2.4.1 Principio de Operación | 17 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.2 Elementos constitutivos | 18 |
| 2.4.3 Desempeño metrológico | 25 |
| 3. NORMATIVIDAD Y REGULACIÓN LEGAL APLICABLE A LOS PROCESOS DE METROLOGÍA LEGAL EN LAS EDS-GNV | 28 |
| 3.1 RECOMENDACIÓN INTERNACIONAL | 28 |
| 3.1.1 Requisitos generales recomendados | 29 |
| 3.1.2 Requisitos metrológicos recomendados | 30 |
| 3.1.3 Método y Procedimiento recomendado | 31 |
| 3.2 NORMATIVA INTERNACIONAL | 32 |
| 3.2.1 Estados Unidos | 32 |
| 3.2.2 Canadá | 36 |
| 3.3 REGULACIÓN Y NORMATIVA NACIONAL | 38 |
| 3.3.1 Ministerio de Minas y Energía | 39 |
| 3.3.2 ICONTEC | 39 |
| 3.3.3 Comparación entre las diferentes fuentes nacionales e internacionales. | 40 |
| 4. DISEÑO DEL SERVICIO | 42 |
| 4.1 MÉTODOS DE VERIFICACIÓN | 42 |
| 4.1.1 Método gravimétrico | 43 |
| 4.1.2 Método de comparación contra patrón másico de referencia (master meter) | 43 |
| 4.2 PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3 REQUISITOS METROLÓGICOS | 46 |
| 4.3.1 Error | 47 |
| 4.3.2 Error de Repetibilidad | 48 |
| 4.3.3 Incertidumbre | 49 |
| 4.4 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS ADICIONALES | 49 |
| 4.4.1 Cantidad mínima medida | 49 |
| 4.4.2 Caudal máximo de prueba | 50 |
| 4.5 EQUIPOS | 50 |
| 4.5.1 Cilindros receptores | 50 |
| 4.5.2 Balanza | 51 |
| 4.5.3 Conjunto de masas patrón calibradas | 53 |
| 4.5.4 Patrón másico de referencia | 53 |
| 4.5.5 Válvulas, mangueras, acoples y accesorios | 54 |
| 4.5.6 Sensor de presión manométrica | 54 |
| 4.5.7 Infraestructura física adquirida. | 54 |
| 4.6 DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS, PLANTILLAS DE CÁLCULO Y ADQUISICIÓN DE DATOS | 77 |
| 4.6.1 Procedimientos | 77 |
| 4.6.2 Registro de información y Adquisición de datos | 83 |
| 4.6.3 Plantillas de cálculo | 88 |
| 5. ASEGURAMIENTO METROLÓGICO DE LOS PATRONES | 90 |

| | |
|--|-----|
| 5.1 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN METROLÓGICA DE INSTRUMENTOS DE PESAJE | 92 |
| 5.1.1 Normas | 92 |
| 5.1.2 Equipos | 96 |
| 5.1.3 Procedimientos y plantillas | 98 |
| 5.2 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE MEDIDORES MÁSCOS | 100 |
| 5.2.1 Sistemas de calibración de medidores máscos | 100 |
| 5.2.2 Normas | 103 |
| 5.2.3 Infraestructura y equipos del banco de calibración gravimétrico | 104 |
| 5.2.4 Procedimientos, plantillas y sistema de adquisición de datos y control | 120 |
| 5.3 RESULTADOS | 124 |
| 5.3.1 Verificación del instrumento de pesaje | 124 |
| 5.3.2 Evaluación del desempeño del banco de calibración de medidores máscos | 124 |
| 5.2.3 Verificación del medidor | 127 |
| 6. PRUEBAS PILOTO | 129 |
| 6.1 ESTRUCTURA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA | 129 |
| 6.1.1 Selección de las ciudades para ejecución de las pruebas piloto | 129 |
| 6.1.2 Diseño de estrategia de ejecución de las pruebas piloto | 130 |
| 6.1.3 Determinación de la variación de la composición del gas | 132 |
| 6.1.4 Ejecución de las pruebas piloto | 133 |

| | |
|---|-----|
| 6.2 ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA PRUEBA PILOTO | 135 |
| 6.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO | 141 |
| 6.3.1 Presentación de resultados | 141 |
| 6.3.2 Análisis de resultados | 148 |
| CONCLUSIONES | 155 |
| RECOMENDACIONES | 158 |
| BIBLIOGRAFÍA | 159 |
| ANEXOS | 162 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Cantidad mínima medida - OIML | 30 |
| Tabla 2. Requisitos metrológicos - OIML | 30 |
| Tabla 3. Llenados parciales en base al procedimiento OIML | 31 |
| Tabla 4. Llenados parciales en base al EPO No 28 | 34 |
| Tabla 5. Llenados parciales en base al procedimiento de Canadá | 36 |
| Tabla 6. Comparación entre las fuentes nacionales e internacionales | 41 |
| Tabla 7. Procedimientos de llenado implementados en el proyecto | 45 |
| Tabla 8. Requisitos metrológicos | 47 |
| Tabla 9. Cantidad mínima medida | 49 |
| Tabla 10. Características de los cilindros MAT 40.273 | 57 |
| Tabla 11. Identificación cilindro, tara y peso verdadero. | 57 |
| Tabla 12. Características del transductor de presión OMEGA PX | 61 |
| Tabla 13. Patrón gravimétrico | 63 |
| Tabla 14. Especificaciones técnicas del medidor incluyendo sensor y transmisor | 65 |
| Tabla 15. Conexiones eléctricas | 67 |
| Tabla 16. Patrón másico de referencia | 73 |
| Tabla 17. Elementos Componentes del sistema de adquisición de datos y control | 74 |
| Tabla 18. Conexiones Sistema de adquisición de datos | 76 |
| Tabla 19. Ubicación de instalaciones eléctricas | 79 |
| Tabla 20. Clasificación de instrumentos de pesaje no automáticos | 94 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 21. Máximos errores para masas según su clase ($\pm\delta m$ en mg) | 95 |
| Tabla 22. Masas patrón | 97 |
| Tabla 23. Instrumentación secundaria | 110 |
| Tabla 24. Válvulas de regulación de caudal | 118 |
| Tabla 25. Señales del sistema de adquisición de datos | 119 |
| Tabla 26. Verificación metrológica de la balanza antes de la prestación del servicio | 125 |
| Tabla 27. Verificación metrológica de la balanza después de la prestación del servicio | 125 |
| Tabla 28. Valores de caudal logrados con la válvula solenoide | 127 |
| Tabla 29. Resultados de la verificación metrológica del medidor patrón | 128 |
| Tabla 30. Estructura para la ejecución de la prueba piloto. | 133 |
| Tabla 31. Número de pruebas realizadas en EDS. | 134 |
| Tabla 32. Procedimientos realizados y métodos de verificación usados | 135 |
| Tabla 33. Parámetros obtenidos del medidor másico del surtidor. | 139 |
| Tabla 34. Información general de la prueba piloto | 141 |
| Tabla 35. Información general del surtidor de GNV | 142 |
| Tabla 36. Resultados del análisis cromatográfico de las muestras de gas natural | 147 |
| Tabla 37. Presiones máximas de llenado | 148 |
| Tabla 38. Caudales máximos | 149 |
| Tabla 39. Caudales promedios | 150 |
| Tabla 40. Error e incertidumbre de medición | 151 |
| Tabla 41. Error de Repetibilidad | 152 |
| Tabla 42. Diferencias entre la densidad configurada en el surtidor y la real | 153 |
| Tabla 43. Errores con base en el volumen entregado | 154 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Estación Compresora | 7 |
| Figura 2. Módulos de almacenamiento y sus elementos constitutivos. | 8 |
| Figura 3. Surtidor de GNV | 10 |
| Figura 4. Diagrama Caudal vs. Presión en el cilindro del vehiculo durante el proceso de llenado con un sistema de compresión con un nivel de presión | 13 |
| Figura 5. Esquema típico de una EDS- GNV de llenado rápido con sistema de compresión en cascada. | 14 |
| Figura 6. Diagrama Caudal vs. Presión en el cilindro del vehiculo durante el proceso de llenado con un sistema de compresión por cascada. | 16 |
| Figura 7. Principio de operación de un medidores tipo Coriolis | 18 |
| Figura 8. Tubos de flujo de un sensor tipo Coriolis | 19 |
| Figura 9. Excitador de un sensor tipo Coriolis | 20 |
| Figura 10. Sensor de movimiento de un sensor tipo Coriolis | 21 |
| Figura 11. Divisor de flujo de un sensor tipo Coriolis | 22 |
| Figura 12. Primera función que cumple el transmisor. | 23 |
| Figura 13. Segunda función que cumple el transmisor | 24 |
| Figura 14. Tercera función que cumple el transmisor. | 25 |
| Figura 15. Especificaciones de desempeño del medidor de Coriolis | 26 |
| Figura 16. Patrón gravimétrico | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Cilindros MAT 40.273 | 56 |
| Figura 18. Válvula Hoffman | 56 |
| Figura 19. Sistema de pesaje | 58 |
| Figura 20. Cubierta protectora de la plataforma de pesaje | 60 |
| Figura 21. Juego de masas M1 | 60 |
| Figura 22. Receptáculo de carga Weh modelo TN1. | 61 |
| Figura 23. Transductor de presión OMEGA PX | 62 |
| Figura 24. Válvula con sensor de presión y accesorios OD | 62 |
| Figura 25. Maleta para la protección del sistema de pesaje. | 63 |
| Figura 26. Patrón másico de referencia | 64 |
| Figura 27. Medidor másico Micromotion | 64 |
| Figura 28. Esquema de las conexiones en el transmisor | 66 |
| Figura 29. Ensayo a la manguera y sus conectores. | 67 |
| Figura 30. Receptáculo de carga | 68 |
| Figura 31. Pico de carga WEH modelo TK4 | 68 |
| Figura 32. Válvula Tres vías Hoke 7644 | 69 |
| Figura 33. Sistema de transporte del medidor | 70 |
| Figura 34. Conexiones del medidor | 71 |
| Figura 35. Placa de aluminio para el medidor másico patrón | 71 |
| Figura 36. Maleta para el medidor másico patrón | 72 |
| Figura 37. Prueba hidrostática de accesorios y conexiones | 73 |
| Figura 38. Montaje del sistema de adquisición y control de datos | 75 |
| Figura 39. Sistema portátil de Adquisición de datos y control OPTO 22 | 76 |
| Figura 40. Hoja de trabajo - Información General | 87 |
| Figura 41. Hoja de trabajo - Datos de prueba | 85 |
| Figura 42. Plantilla Ingreso de Datos | 86 |
| Figura 43. Ventana de monitoreo para patrón gravimétrico | 87 |
| Figura 44. Ventana de monitoreo para patrón másico de referencia | 88 |

| | |
|---|-----|
| Figura 45. Ventana de monitoreo para el empleo de dos patrones en serie | 88 |
| Figura 46. Detalle de la plantilla de error | 89 |
| Figura 47. Detalle de la plantilla de incertidumbre | 89 |
| Figura 48. Masas clase F1 | 97 |
| Figura 49. Masas clase M1 | 97 |
| Figura 50. Plantillas de recolección de datos y cálculo | 99 |
| Figura 51. Sistema con patrón de referencia | 101 |
| Figura 52. Sistema volumétrico | 101 |
| Figura 53. Sistema gravimétrico | 102 |
| Figura 54. Diagrama general del banco de calibración gravimétrico | 105 |
| Figura 55. Balanza electrónica | 106 |
| Figura 56. Tanque de pesaje | 106 |
| Figura 57. Dispositivo de control de flujo | 107 |
| Figura 58. RTD para la temperatura del fluido | 108 |
| Figura 59. Manómetro | 109 |
| Figura 60. Barómetro | 110 |
| Figura 61. Higrómetro | 110 |
| Figura 62. RTD para la temperatura ambiente | 111 |
| Figura 63. Tanques de almacenamiento | 112 |
| Figura 64. Circuito hidráulico de la tubería de PVC | 113 |
| Figura 65. Esquema de la red hidráulica en EPANET 2.0 | 114 |
| Figura 66. Montaje del medidor | 115 |
| Figura 67. Tubería flexible | 115 |
| Figura 68. Bomba hidráulica | 116 |
| Figura 69. Soporte para el medidor | 117 |
| Figura 70. Soporte para el instrumento de pesaje | 117 |
| Figura 71. Válvulas de regulación de caudal | 118 |

| | |
|--|-----|
| Figura 72. Banco de calibración de medidores másicos | 120 |
| Figura 73. Plantilla “Toma de datos” | 121 |
| Figura 74. Ventana inicial “Calibración de medidores másicos” | 122 |
| Figura 75. Ventana de monitoreo de variables | 123 |
| Figura 76. Graficet del proceso de calibración de medidores másicos | 124 |
| Figura 77. Gráfica Caudal Vs Tiempo | 126 |
| Figura 78. Gráfica Caudal vs. Error de la verificación metrológica del medidor patrón | 128 |
| Figura 79. Patrones conectados en serie. | 131 |
| Figura 80. Participación de las ciudades en las pruebas pilotos | 134 |
| Figura 81. Procedimientos y métodos realizados | 135 |
| Figura 82. Ajuste del cero del sistema de pesaje | 136 |
| Figura 83. Ajuste del cero del medidor másico de Coriolis | 136 |
| Figura 84. Verificación del sistema de pesaje. | 137 |
| Figura 85. Operación de tara de la balanza | 137 |
| Figura 86. Medición usando los 2 patrones | 138 |
| Figura 87. Obtención de la configuración del surtidor | 139 |
| Figura 88. Llenado de la muestra de gas para análisis cromatográfico | 140 |
| Figura 89. Gráfica llenado Normal - Cilindro 1 | 143 |
| Figura 90. Gráfica llenado Normal - Cilindro 2 | 143 |
| Figura 91. Gráfica llenado Normal - Cilindro 3 | 144 |
| Figura 92. Gráfica llenado Parcial Masa - Cilindro 1 | 144 |
| Figura 93. Gráfica llenado Parcial Masa - Cilindro 2 | 145 |
| Figura 94. Gráfica llenado Parcial Masa - Cilindro 3 | 145 |
| Figura 95. Gráfica llenado Parcial Presión - Cilindro 1 | 146 |
| Figura 96. Gráfica llenado Parcial Presión - Cilindro 2 | 146 |
| Figura 97. Gráfica llenado Parcial Presión - Cilindro 3 | 147 |
| Figura 98. Variación de la densidad durante el día | 148 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|------|
| Anexo A. Panorama del Gas Natural | 163 |
| Anexo B. Esquema de montaje del sistema de adquisición de datos y control OPTO 22 | 187 |
| Anexo C. Especificaciones de la plataforma OPTO 22 | 190 |
| Anexo D. Criterio para la clasificación de áreas peligrosas según Canadian Approvals Agency | 196 |

NOMENCLATURA

NOTACIÓN

EDS Estación de Servicio

EDS - GNV Estación de Servicio de Gas Natural Vehicular

EPO Examination Procedure Outline

GNV Gas Natural Vehicular

GUM Guide Uncertainty Measurement

ISO Internacional Standart Organisation

NIST National Institute Standard

OIML Organización Internacional de Metrología Legal

VIM Vocabulario Internacional de Metrología

GLOSARIO

REPETIBILIDAD: grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de un mismo mensurando, llevadas a cabo totalmente bajo las mismas condiciones de medición.

REPRODUCIBILIDAD: grado de concordancia entre los resultados de las mediciones de un mismo mensurando, llevadas a cabo haciendo variar las condiciones de medición.

INCERTIDUMBRE: parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que, con fundamento, pueden ser atribuidos al mensurando.

PATRÓN: medida materializada, aparato de medición, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores de una magnitud para servir de referencia.

PATRÓN DE REFERENCIA: patrón, generalmente de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar u organización dados, del cual se derivan las mediciones que se hacen en dicho lugar u organización.

TRAZABILIDAD: propiedad del resultado 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.

NORMATIVIDAD: describe las características técnicas y metrológicas asociadas a un sistema de medición o medida materializada e indican las condiciones y metodologías de conservación, mantenimiento y uso.

REGULACIÓN: define las unidades legales de medición y la estructura de los programas y actividades de la metrología legal.

APROBACIÓN DE MODELO: dictaminar si un determinado tipo o modelo de instrumento de medición es adecuado para cumplir con las acciones para las cuales ha sido diseñado y construido.

VERIFICACIÓN: acción de confirmación mediante la aportación de evidencia objetiva que se han cumplido los requerimientos especificados.

CALIBRACIÓN: grupo de operaciones que establecen bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un sistema de medición, o valores representados por una medida materializada y los correspondientes valores conocidos de una magnitud medida.

RESUMEN

TÍTULO:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE VERIFICACION METROLÓGICA DE SURTIDORES DE GAS NATURAL VEHICULAR EN EL CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS *

AUTORES:

Carlos Javier Celedón Barrios.

Angélica María Herrera Gómez. **

PALABRAS CLAVES:

Estación de Servicio, Gas Natural Vehicular, Gravimétrico, Medidor tipo Coriolis, Metrología, Verificación, Surtidor de GNV, Patrón de referencia.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es apoyar las estrategias del gobierno nacional relacionadas con la masificación del uso del gas natural como combustible vehicular, desarrollando e implementando un servicio de verificación metrológica para surtidores de gas natural vehicular en el Centro de Desarrollo Tecnológico del gas, que permita evaluar la exactitud con la cual se realizan las mediciones durante el abastecimiento de los vehículos y como resultado de tal evaluación se ejecute un control con el que se garantice la correcta medición del gas suministrado y de esta manera proporcionar un aseguramiento metrológico que genere un alto grado de confiabilidad en el proceso de compra - venta de gas y la prestación de un servicio destinado a la protección del consumidor.

El servicio cuenta con un patrón gravimétrico, un patrón másico de referencia, un sistema de adquisición de datos y la tecnología necesaria para brindar el aseguramiento metrológico a los patrones anteriormente mencionados. Adicionalmente se desarrollaron los procedimientos para la realización de la verificación metrológica de los surtidores y para la calibración y verificación metrológica de cada uno de los patrones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Jabid Quiroga y Corporación CDT de gas, Ing. John Velosa.

SUMMARY

TITLE:

IMPLEMENTATION OF METROLOGY VERIFICATION SERVICE FOR NATURAL GAS VEHICLE DISPENSER WITHIN THE CORPORACIÓN CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS*

AUTHORS:

Carlos Javier Celedón Barrios.

Angélica María Herrera Gómez.**

KEY WORDS:

Coriolis Meter, dispenser, Gravimetric, Master Meter, Metrology, Natural Gas Vehicles, Station Filling, Verification.

DESCRIPTION:

The goal of this project is to support the National Government's strategies related to the spirit of the natural gas used as an automobile fuel; developing and implementing a metrology verification service for natural gas vehicle dispenser within the Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del gas, allowing evaluating the accuracy with which the measurements are being made during the vehicle fueling. As a result of that evaluation, a control process is able to be made by the gas station to guarantee the correct amount of natural gas given; providing a high reliability grade in the buying - selling process and the presentation of a service destined for the protection of the consumer.

The service relies on a gravimetric patron, a reference mass patron, an information acquisition system and the necessary infrastructure to offer the metrology insurance to the patron previously mentioned. Additionally, it has been developed the procedures to the metrology verification of the dispenser and the metrology calibration and verification of each one of the patron used.

* Degree work

** Físic - Mechanic Science Faculty. Mechanical Engineering School, Ing. Jabid Quiroga and CDT Gas Corporation, Ing. John Velosa.

INTRODUCCIÓN

El creciente interés en la conservación del medio ambiente y la optimización del uso de los recursos energéticos, ha contribuido a un aumento en la demanda del gas natural respecto a los combustibles tradicionales. Es por esto, que el gas natural es reconocido actualmente como una fuente de energía limpia y de gran aplicabilidad.

Debido al descubrimiento de grandes reservas nivel mundial, el interés por el gas natural ha crecido, reduciendo notablemente la dependencia al petróleo. Los países productores han venido trabajando en el desarrollo de una infraestructura tecnológica que permita la masificación y el posicionamiento de esta fuente energética, logrando de esta manera la apertura de nuevos mercados.

Conociendo la realidad energética mundial, el gobierno nacional con el ánimo de diversificar la canasta energética y disminuir el impacto ambiental producido por los combustibles líquidos, ha desarrollado programas para masificar el uso del Gas Natural como combustible vehicular, generando un continuo crecimiento en el número de usuarios. Para asegurar un adecuado suministro del combustible a todos los usuarios, se vienen construyendo Estaciones de servicio de Gas Natural Vehicular (EDS-GNV) en lugares estratégicos de las principales ciudades del país en donde el uso del gas natural cada vez es más popular.

Motivado por liderar el proceso de desarrollo de la metrología en nuestro país, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del gas, presenta

constantemente proyectos ante entidades como COLCIENCIAS, que permitan el fortalecimiento de una infraestructura metrológica que respalde el desarrollo tecnológico de la industria colombiana. Es por esto que la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, apoya de manera continua estos proyectos que permiten la adquisición de nuevos conocimientos y promueven la consolidación de una base tecnológica aplicable a la realidad colombiana.

Por las razones anteriormente expuestas, la Corporación CDT de Gas y la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, han decidido apoyar al gobierno nacional en sus intenciones de masificar el uso del gas natural vehicular, desarrollando e implementando un servicio de verificación metrológica para los surtidores de gas natural vehicular, que permita evaluar la exactitud con que se mide el gas entregado a los vehículos y de esta manera apoyar el desarrollo de la reglamentación relacionada con los aspectos metrológicos involucrados en la comercialización del GNV.

Como resultado de este proyecto, se desarrollaron dos métodos que permiten realizar de una forma confiable y eficaz la verificación metrológica de los surtidores de GNV, logrando de esta manera apoyar a la consolidación del gas natural como combustible vehicular.

1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Apoyar las estrategias del gobierno nacional relacionadas con la masificación del uso del gas natural como combustible vehicular con el desarrollo e implementación de un servicio de verificación metrológica para surtidores de gas natural vehicular, que permita evaluar la exactitud con la cual se realizan las mediciones durante el abastecimiento de los vehículos, y de esta manera participar activamente en la misión de la universidad y en el fortalecimiento de sus relaciones con las empresas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el marco legal, normativo y técnico para la prestación de un servicio de verificación metrológica fundamentado en la normatividad aplicable y vigente a procesos de transferencia de custodia y metrología legal a las mediciones de gas en las estaciones de servicio de gas natural vehicular.
- Definir los requerimientos técnicos para la prestación de un servicio de verificación metrológica en surtidores de gas natural vehicular teniendo en cuenta las características del proceso de llenado de vehículos utilizado en las estaciones de servicio.

- Desarrollar un sistema patrón para la verificación metrológica de surtidores de gas natural vehicular, basado en el método gravimétrico que posea las siguientes especificaciones:

- Capacidad mínima de pesaje: 50 kg.
- Resolución: 10 g o mejor.
- Incertidumbre de medición: 1%.
- Seguridad eléctrica: Todos los elementos electrónicos deben ser intrínsecamente seguros y estar clasificados para áreas peligrosas.

- Desarrollar un sistema patrón para la verificación metrológica de surtidores de gas natural vehicular, basado en el método de comparación contra patrón de referencia que posea las siguientes especificaciones:

- Flujo máximo de gas: 50 kg/min.
- Incertidumbre de medición: 0.5%.

- Desarrollar manuales y procedimientos técnicos necesarios para la prestación del servicio de verificación metrológica de surtidores de gas natural vehicular para cada uno de los sistemas desarrollados.

- Realizar una prueba piloto de verificación metrológica en una estación de servicio del área metropolitana de Bucaramanga, siguiendo los procedimientos y manuales desarrollados, que permita la elaboración de informes y la evaluación de los surtidores de gas natural vehicular

2. ESTACIONES DE SERVICIO DE GAS NATURAL VEHICULAR

Una Estación de Servicio de Gas Natural Vehicular (EDS - GNV) es un establecimiento que dispone de instalaciones y equipos para el almacenamiento y distribución de combustibles gaseosos para vehículos, a través de equipos fijos (surtidores) que llenan directamente los tanques de combustible.

2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE SERVICIO

Las estaciones de servicio se pueden clasificar dependiendo del tipo de servicio que presten o de su funcionamiento. A continuación se muestra la definición de cada una de ellas.

2.1.1 Clasificación de las estaciones de servicio según el tipo de servicio que prestan

a. Estaciones de servicio mixta: Es la estación de servicio destinada al suministro tanto de combustibles líquidos derivados del petróleo, excepto Gas Licuado del Petróleo, como de GNV.

b. Estaciones de servicio dedicadas: Es la estación de servicio destinada exclusivamente al suministro de GNV.

2.1.2 Clasificación de estaciones de servicio según el funcionamiento. Las estaciones de servicio de Gas Natural Vehicular pueden operar de 2 formas; con un Sistema de llenado lento o un sistema de llenado rápido:

a. Llenado lento: El gas se comprime a medida que el cilindro está siendo llenado, utilizando un compresor pequeño; este tipo de recarga de combustible tomará entre 3 y 5 horas. Son utilizados normalmente en el suministro de gas a vehículos individuales o flotas pequeñas. En estos sistemas se instala un medidor de baja presión a la entrada del sistema similar al utilizado en el suministro de gas doméstico.

b. Llenado rápido: El gas se comprime y se almacena en una batería de cilindros para posteriormente ser transferido al tanque del vehículo. Este llenado toma aproximadamente el mismo tiempo que el llenado de combustibles líquidos (4 a 6 minutos). Debido a la popularidad de las estaciones de servicio de llenado rápido y a su total posicionamiento en los procesos de venta de GNV a los usuarios finales, solo estos sistemas serán presentados durante el desarrollo del presente informe.

2.2 COMPONENTES DE UNA EDS-GNV

A continuación se definen cada uno de los componentes de la EDS-GNV que hacen posible el suministro de combustible a los vehículos.

2.2.1 Estación de Regulación y Medición. La estación de regulación y medición, está ubicada a la entrada de la estación de servicio para medir la cantidad de gas entregada por la empresa distribuidora. Esta medición es utilizada para ser comparada con el volumen de gas total vendido, efectuando un balance. El elemento empleado para la medición del gas es generalmente un medidor volumétrico de desplazamiento positivo (rotativo).

Un regulador de presión controla la presión de la línea de distribución a la entrada de la estación de servicio, evitando que la conexión afecte la red de distribución generando fenómenos de contra presión o vacío.

2.2.2 Sistema de Compresión, almacenamiento y líneas de transporte. Las estaciones de llenado rápido utilizan compresores multietapa de gran tamaño, normalmente de accionamiento eléctrico (aunque pueden ser impulsados por motores a gas) y controlados automáticamente por medio de un interruptor de presión que controla las paradas y arrancadas de acuerdo con la demanda de la estación, la función del compresor es llevar el gas que entra a la estación a baja presión (1 a 7 bar) hasta una presión de 250 bar.

Figura 1. Estación Compresora

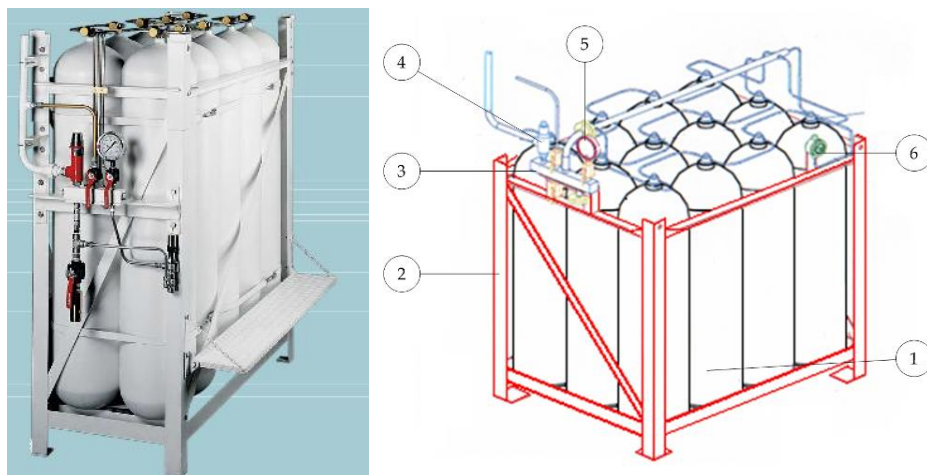


La potencia requerida por el compresor disminuye en la medida en que aumenta la presión de entrada (del cabezal). Algunos estimados son: para una presión de entrada de 2 bar, la potencia específica en KW horas por metro cúbico será de 0,32 para un compresor pequeño, 0,28 para un compresor grande. Para una presión de entrada de 5 bar: la potencia

específica será de 0,26 y 0,22 (pequeño y grande); para una presión de entrada de 10 bar, la potencia específica será de 0,22 y 0,18 y para 15 bar: 0,18 y 0,14. El sistema es más eficiente en la medida en que el gas se tome a una mayor presión, dado que el consumo de energía en la estación compresora, además de depender del volumen a comprimir, es proporcional al diferencial de presión entre la entrada y la salida del compresor.

Las baterías de cilindros son las encargadas de almacenar el gas que sale del compresor, a una presión de 250 bar (3675 psi); el gas es conducido por tubería de acero para alta presión fabricada y probada de acuerdo con la ANSI/ ASME B31.3 (Chemical Plant and Petroleum Refinery piping). La unidad de almacenamiento tiene a cargo el suministro del gas a los surtidores en las islas por medio de tuberías que están conectadas a las baterías de cilindros.

Figura 2. Módulos de almacenamiento y sus elementos constitutivos.



| | | | |
|----|--------------------------------------|----|-----------------------|
| 1. | Marco de Contención de los Cilindros | 4. | Válvula de Seguridad |
| 2. | Cilindros de Almacenaje | 5. | Manómetro 0- 400 bar. |
| 3. | Barral de Almacenaje | 6. | Presóstato |

Las baterías de almacenamiento están compuesta por cilindros de acero de 50 L de capacidad hidráulica o superior, montados sobre un bastidor de acero, con sus válvulas individuales, válvula manual que permita el venteo total del almacenamiento en caso de emergencia, válvula de exceso de caudal, válvula de seguridad por sobre presión y tuberías de interconexión en acero inoxidable, según se describe en la NTC 4820 (Estaciones de servicio para vehículos que utilizan gas natural comprimido como combustible).

Eventualmente, se pueden utilizar soportes metálicos en las baterías de almacenamiento, cuando estos están protegidos contra el fuego a fin de que resistan la acción directa de las llamas durante un lapso no menor de tres horas sin que se produzca el derrumbe de la batería.

2.2.3 Surtidor. El surtidor es la interfaz entre la EDS-GNV y el consumidor. Estos son usualmente diseñados con una apariencia similar a los surtidores tradicionales de combustibles líquidos. Puede incluir un sistema de seguridad electrónico, el cual desbloquea el sistema de suministro de GNV (previniendo un acceso desautorizado) y controla la facturación al cliente.

El surtidor utiliza una manguera de alta presión con una boquilla de llenado, que se ajusta al conector instalado en los vehículos. El diseño de la boquilla y del conector del vehículo está normalizado para facilitar la movilidad de los vehículos a lo largo y ancho del país donde existan EDS-GNV. En nuestro país, las boquillas y los conectores son diferentes en la región de la costa atlántica y en el interior del país (en la costa los conectores son tipo bayoneta y en el interior son tipo NGV1), desafortunadamente solo algunas estaciones de servicio cuentan con el adaptador para permitir suministro de gas a cualquier vehículo.

Figura 3. Surtidor de GNV



Como medida de seguridad el gas no es entregado por el surtidor a menos que se haya conectado el chip de identificación del vehículo y la boquilla del surtidor no puede ser retirada hasta que se halla venteado de manera segura, el gas a alta presión contenido en ella.

De manera general se podría asimilar el surtidor de GNV como un sistema de medición, en cuyo caso se deben reconocer componentes específicos (según regulaciones en estudio tales como la OIML - TC8/SC7 3° CD) que garanticen la estructura mínima para el correcto desarrollo del proceso de medición de GNV. Bajo esta perspectiva se describen a continuación los componentes típicos de los surtidores de GNV.

El surtidor usualmente contiene tanto el sistema de medición como el sistema de control del ciclo de llenado. A continuación se realiza una descripción de cada uno de ellos.

- Sistema de control de ciclo de llenado: es un conjunto de dispositivos (circuitos electrónicos y válvulas solenoides), que controlan el flujo de gas hacia el cilindro instalado en el vehículo.

- Sistema de Medición de los surtidores de GNV: un medidor por si solo no es un sistema de medición. Un sistema de medición incluye por lo menos:

- a. ***Un medidor:*** instrumento hecho para medir continuamente y evidenciar la cantidad de fluido, (en este caso gas), que pasa a través de un transductor de medida a las condiciones de medición.

- b. ***Un punto de transferencia:*** punto en el cual se define que el gas está siendo suministrado.

- c. ***Un circuito para el gas***

Es válido aclarar que un sistema de medición posee únicamente un medidor. Adicionalmente, un sistema de medición, puede estar provisto de otros dispositivos auxiliares y adicionales.

- d. ***Dispositivos adicionales:*** son todos los dispositivos requeridos para asegurar una medición correcta, para facilitar operaciones de medición o que puede de alguna forma afectar la medición. Los principales dispositivos

adicionales son: filtros, dispositivos utilizados en el punto de transferencia, dispositivos anti-turbulencia, derivaciones, válvulas y mangueras.

e. Dispositivos Auxiliares: Son todos los dispositivos previstos para estar involucrados directamente en la elaboración, transmisión y publicación de los resultados de la medición. Entre estos se encuentran los dispositivos de preselección, de retorno a cero (reset) de los surtidores, teclados, displays de interfaz (los cuales deben indicar por lo menos el precio por unidad de venta del gas en metro cúbicos a condiciones base, la cantidad de gas suministrado al vehículo y el costo total de la venta), impresoras, módulos de memoria para almacenamiento de datos, totalizadores, entre otros.

Buena parte de estos dispositivos se hallan contenidos en un único módulo electrónico que realiza diversas tareas suministrando finalmente la cantidad de gas despachado y el precio total de la venta.

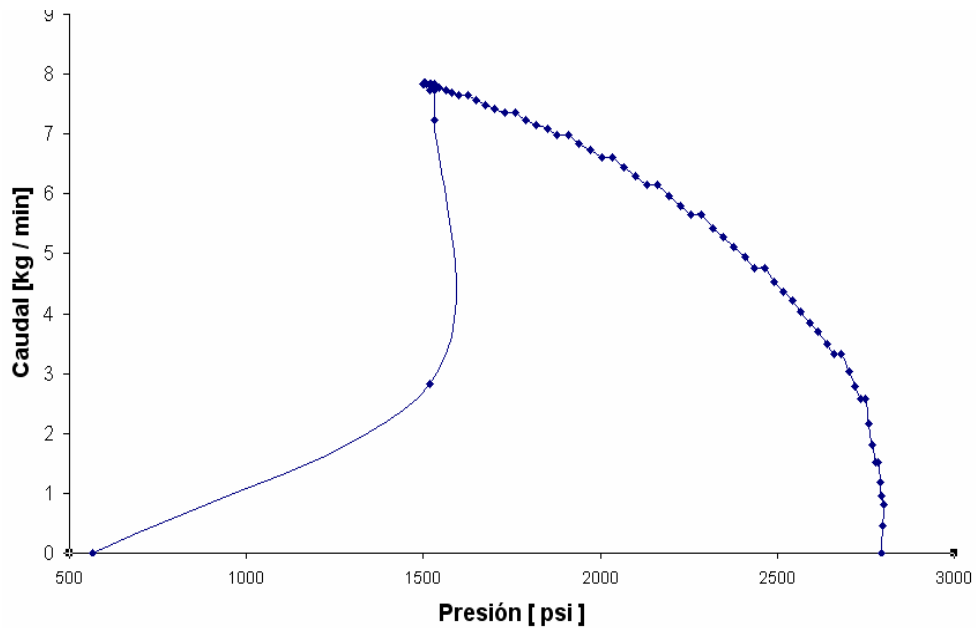
Entre los dispositivos auxiliares puede incluirse también un dispositivo electrónico de seguridad para bloquear el sistema de llenado y evitar el acceso no autorizado a las constantes del surtidor (factor K del medidor, densidad, precio de venta, etc.).

2.3 FUNCIONAMIENTO DE UNA EDS - GNV

En las estaciones de servicio de gas natural vehicular, el sistema de compresión puede funcionar de dos formas: utilizando 3 niveles de presión (comúnmente conocido sistema de compresión de cascada) ó un nivel de presión. A continuación se hace una descripción del funcionamiento de los dos tipos de estaciones de servicio.

2.3.1 Sistema compresión usando un nivel de presión

Figura 4. Diagrama Caudal vs. Presión en el cilindro del vehiculo durante el proceso de llenado con un sistema de compresión con un nivel de presión.

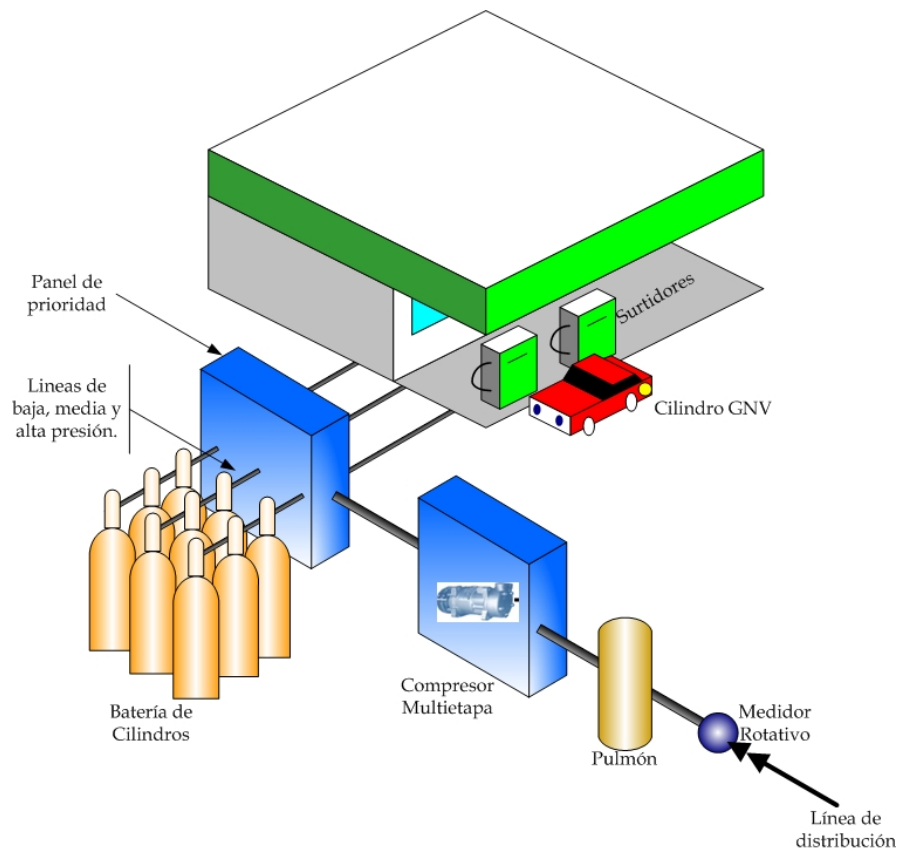


El gas proveniente de la línea de distribución, usualmente a “baja” presión (inferior a 1 bar) o media presión (1 a 7 bar.), es comprimido usando un compresor multietapas, y almacenado dentro de la batería de cilindros a 250 bar. La presión de la batería de cilindros es mantenida de tal forma que el gas fluye por la diferencia de presiones entre el sistema de almacenamiento y cilindro instalado en el vehículo a llenar. El llenado del vehículo se realiza a la presión de la batería de cilindros hasta alcanzar su presión de almacenamiento máxima que es de 3000 psi¹.

¹ Resolución No. 180928 DE Julio 26 DE 2006 de Ministerio de minas y energía.

2.3.2 Sistema de compresión en cascada

Figura 5. Esquema típico de una EDS- GNV de llenado rápido con sistema de compresión en cascada.²



Al igual que el sistema anterior, el gas que proviene de la línea de distribución es comprimido en un compresor multietapas dentro de la batería de almacenamiento. Este sistema es mantenido a una presión mayor que la existente en el vehículo a llenar, de tal forma que el gas fluye debido a la diferencia de presiones. El sistema de cilindros en cascada opera

² Fuente NMSPU Project KT11 "Measurement, Approval And Verification Of CNG Dispensers" by Advantica and national Weights and Measures Laboratory (NWML)

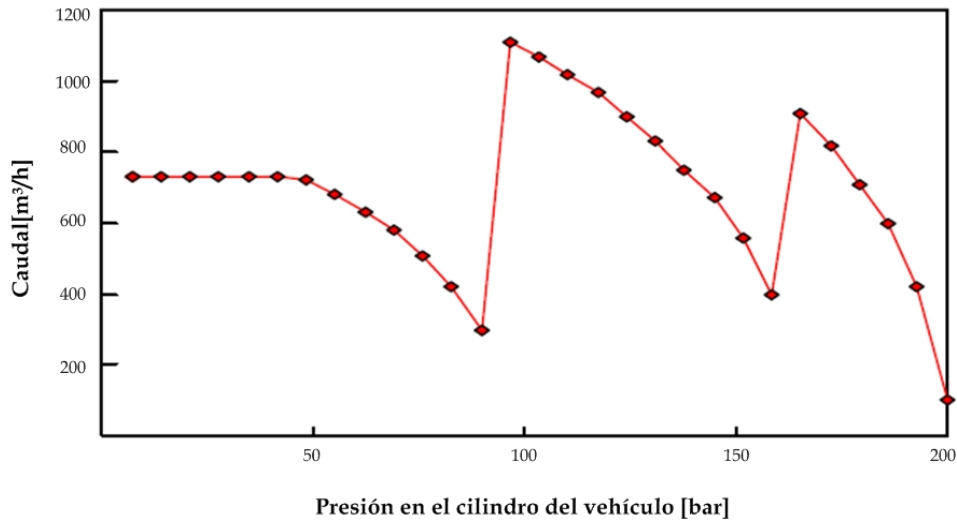
generalmente a 250 bar y la máxima presión de almacenamiento en el vehículo es de 200 bar.

En vías de hacer más eficiente la operación de compresión y llenado, el sistema de almacenamiento opera usando 3 niveles de presión, usualmente identificadas con los términos de baja, media y alta presión, Cuando el compresor se enciende para llenar la batería de cilindros, este llena primero la etapa de alta presión hasta 250 bar, después las válvulas y el panel de prioridad completan el llenado de las etapas de media y baja presión. De esta forma se asegura que la etapa de alta presión es mantenida siempre a presión máxima, asegurando el llenado de los vehículos con la cantidad máxima de gas permitida.

Durante el llenado, el vehículo se conecta primero a la etapa de baja presión. Cuando la presión de la etapa de baja, se iguala con la presión del cilindro instalado en el vehículo, el caudal de gas decrece. Cuando el caudal ha caído a un nivel pre-configurado, el sistema acciona la etapa de media presión y de igual forma se realiza con la etapa de alta, hasta completar el llenado del cilindro en el vehículo a una presión máxima de 200 bar.

El sistema de cascada descrito anteriormente, produce un caudal de gas muy variable durante el llenado del vehículo. Esto representa una gran exigencia para el sistema de medición, el cual debe ser capaz de medir y totalizar la cantidad de gas entregada, teniendo en cuenta las condiciones inestables de presión y caudal sobre un intervalo de tiempo relativamente corto de 4 a 6 minutos.

Figura 6. Diagrama Caudal vs. Presión en el cilindro del vehículo durante el proceso de llenado con un sistema de compresión por cascada.³



2.4 MEDIDORES DE FLUJO MÁSIKO TIPO CORIOLIS

Una vez definidos los componentes de un sistema de medición e identificadas las exigencias operativas del proceso de llenado, se describe, el medidor. Factores como la rapidez en la variación de la presión, la temperatura, la densidad del gas y, el caudal de gas durante el llenado y la posibilidad de variaciones en la composición del gas con respecto al tiempo, imposibilitan el uso de tecnologías de medición como los medidores de caudal por presión diferencial, las boquillas sónicas, los medidores ultrasónicos, medidores tipo turbina, cálculos PVT y medidores de caudal másico tipo térmico, dejando prácticamente como única opción los medidores másicos tipo Coriolis, los cuales se usan ampliamente en la industria del GNV.

³Fuente NMSPU Project KT11 "Measurement, Approval And Verification Of CNG Dispensers" by Advantica and national Weights and Measures Laboratory (NWML)

El medidor de caudal basado en el principio de Coriolis es un medidor de caudal másico porque como su nombre lo indica, mide de forma directa la masa, fundamentado en las ecuaciones de continuidad y momentum de la mecánica de los fluidos y de las propiedades del fluido objeto de medición. Al no poseer partes móviles inmersas en el fluido, posee bajos requerimientos de mantenimiento. Las partes que están en contacto con el fluido pueden ser construidas de una variedad de materiales haciéndolo apto para la medición de fluidos corrosivos y que contienen partículas sólidas o fibrosas. En las aplicaciones de los medidores de caudal tipo Coriolis que operan con líquidos se puede también medir la densidad del fluido de proceso (esto no es posible en las aplicaciones para medición de gas), haciendo posible obtener mediciones aceptables de volumen y/o caudal volumétrico inclusive en casos donde hay flujo multifásico, es por esta razón que se les suele llamar también medidores “multivariable”.

El medidor de caudal tipo Coriolis puede diseñarse para operación intrínsecamente segura en ambientes peligrosos.

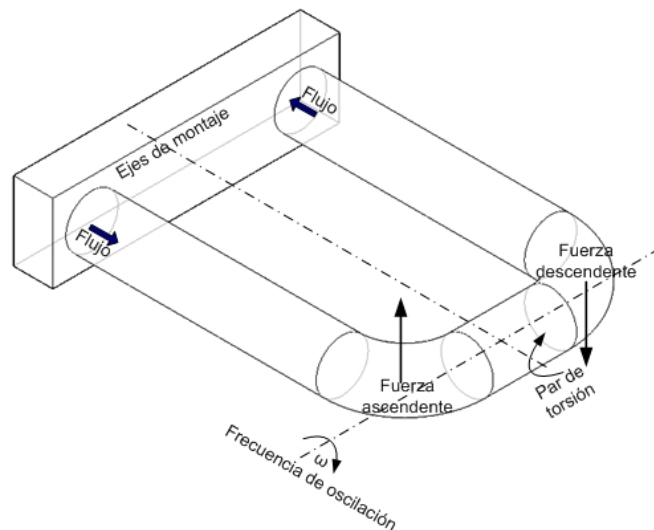
2.4.1 Principio de Operación. El medidor de Coriolis se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795 -1843) que observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal V a través de una superficie que gira con velocidad angular constante ω , experimenta una velocidad tangencial (producto entre la velocidad angular y el radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro.

Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que está

experimentando una aceleración y , por lo tanto, una fuerza sobre la masa del objeto. Estas son, respectivamente, la aceleración y la fuerza de Coriolis.

La reproducción del fenómeno asociado a la fuerza de Coriolis para el caso de los medidores de gas se basa en la inversión de las velocidades lineales del fluido, a través de un tubo en forma de U en estado de vibración controlada (a la frecuencia de resonancia para reducir la energía requerida). La vibración del tubo, perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, crea una fuerza de aceleración en la tubería de entrada del fluido y una fuerza de desaceleración en la salida, con lo que se genera un par cuyo sentido varía de acuerdo con la vibración y con el ángulo de torsión del tubo, que es directamente proporcional a la masa instantánea de fluido circulante.

Figura 7. Principio de operación de un medidores tipo Coriolis



2.4.2 Elementos constitutivos. Un medidor tipo Coriolis está compuesto por un sensor, un transmisor y, en muchos casos, dispositivos periféricos para monitoreo, alarma, y/o funciones de control. Los elementos

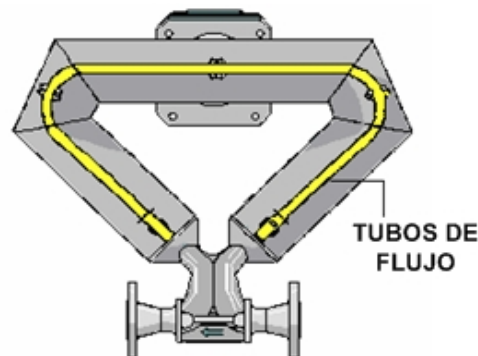
correspondientes al sensor detectan caudal, densidad y temperatura. El transmisor procesa las señales provenientes del sensor y suministra esta información como señal de salida.

A continuación se señalan los elementos principales que componen el sensor y el transmisor de un medidor tipo Coriolis, describiendo la función y los requerimientos generales de estos.

a. Sensor: El tamaño y la forma pueden variar, pero ciertos componentes son comunes para todos los modelos de sensores. Los componentes del sensor son:

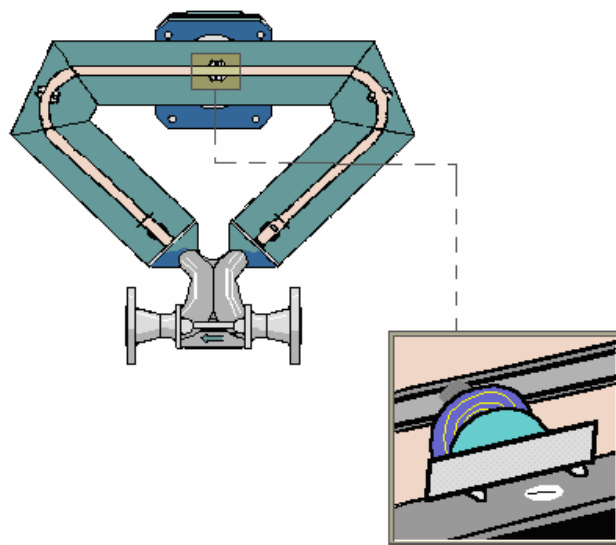
- **Tubos de flujo:** Son los elementos que están en contacto directo con el fluido. La sección de medición primaria es hecha de tubería metálica altamente resistente a la corrosión. El material mas usado es el acero inoxidable 316L sin costura. Los medidores de Coriolis también están disponibles con tuberías hechas de titanio, Hastelloy (*aleación especial*), y algunas bases metálicas químicas para compatibilidad con procesos en los cuales el fluido es altamente corrosivo.

Figura 8. Tubos de flujo de un sensor tipo Coriolis



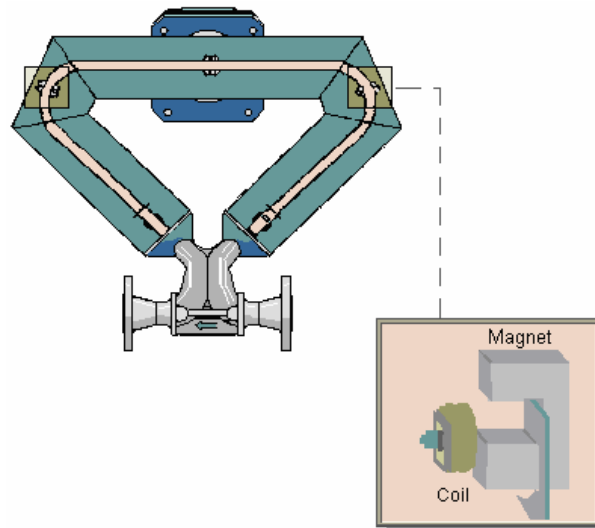
- **Excitador (Drive-coil):** Lo componen una bobina excitadora y un imán, la bobina está montada en la parte central de un tubo y en la parte opuesta, sobre el otro tubo, esta el imán. La bobina es energizada para mantener los tubos vibrando a su frecuencia natural.

Figura 9. Excitador de un sensor tipo Coriolis



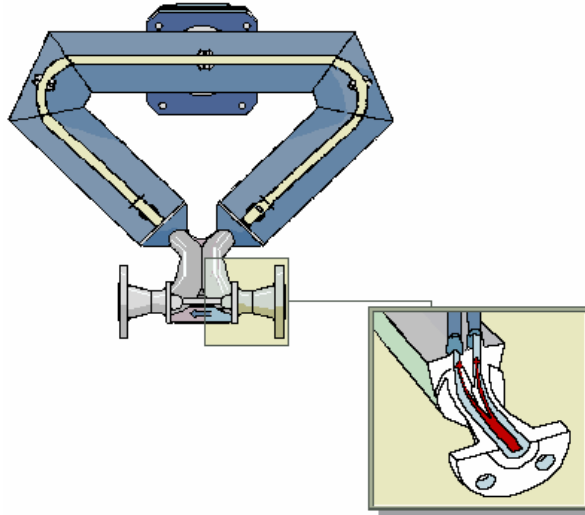
- **Sensor de movimiento (Pick-off):** Los sensores de movimiento están instalados a la entrada y la salida de cada tramo del tubo para medir el movimiento de cada uno de los extremos. El tipo más común de sensor de movimiento es el electromagnético, aunque algunos fabricantes han aplicado satisfactoriamente sensores ópticos. Estos elementos generan una señal que representa la velocidad y posición del tubo de vibración en ese punto. Sus señales son comparadas en los dispositivos electrónicos para determinar la cantidad de giro de Coriolis.

Figura 10. Sensor de movimiento de un sensor tipo Coriolis



- **Sensor de temperatura:** Se fija en la superficie exterior de uno de los tubos para compensar la constante de elasticidad debido a los cambios de temperatura. El sensor utilizado comúnmente es termoresistivo (RTD).
- **Conexión al proceso:** Cada medidor cuenta con dos conexiones a proceso que se deben empalmar cuidadosamente y sin ocasionar esfuerzos mecánicos.
- **Divisor de flujo:** En sensores que presentan una configuración de tubos en paralelo, las extremidades de la tubería son rígidamente conectadas por el divisor de flujo. Este divisor de flujo constituye la transmisión entre las conexiones de proceso y la sección correspondiente a los tubos de vibración. El divisor permite que aproximadamente la mitad del flujo pase a través de cada tubo.

Figura 11. Divisor de flujo de un sensor tipo Coriolis



- **Caja de conexiones:** los cables del excitador, el sensor de movimiento, y el sensor de temperatura pasan a través de un conducto de alimentación sellado hasta una caja de enlace para realizar el cableado desde el sensor hasta el transmisor electrónico.

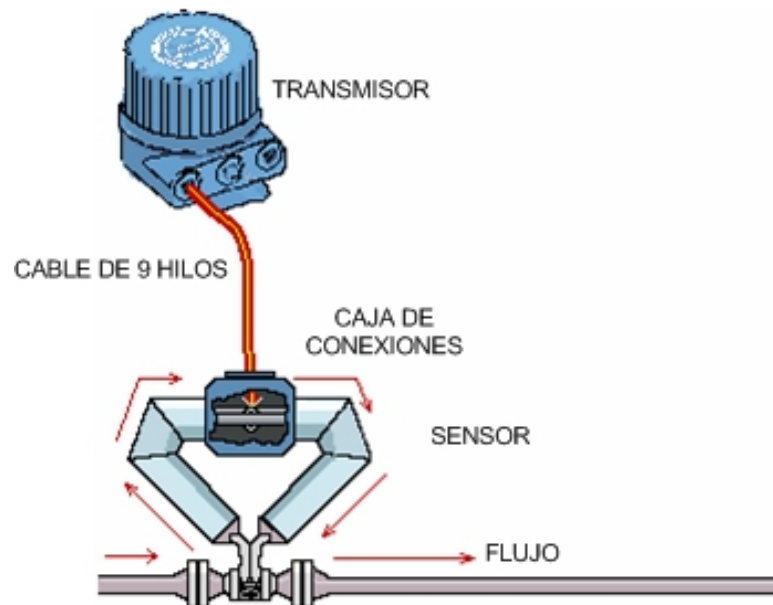
- **Caja:** el ensamble de tubos se aloja comúnmente dentro de un cuerpo de acero inoxidable soldado y sellado para proteger los tubos y el sensor de su ambiente de operación.

b. Transmisor: el transmisor es el “cerebro” del sistema y cumple tres funciones que se enuncian a continuación:

- **Primera:** el transmisor envía pulsos de corriente al excitador generando la vibración de los tubos (Figura 12). Debido a la potencia requerida para hacer vibrar los tubos, algunos transmisores de Coriolis requieren cableado separado para la potencia del dispositivo, ya que la potencia demandada es

de aproximadamente 10 W. El sistema de suministro de potencia depende del fabricante y del modelo, estos elementos pueden emplear tanto corriente alterna como corriente directa.

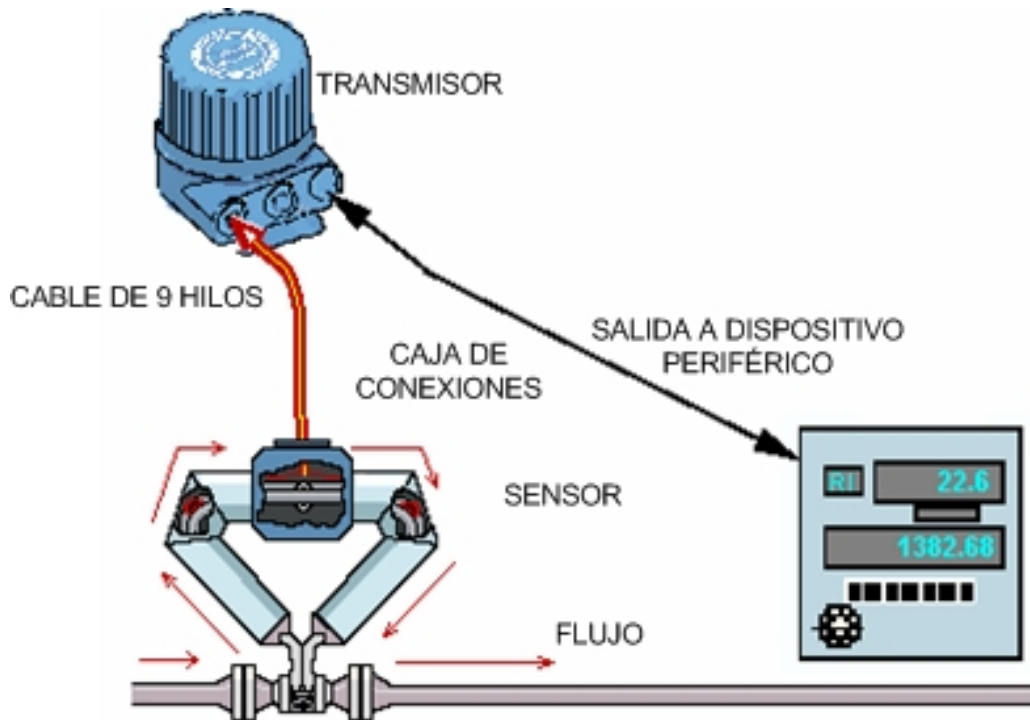
Figura 12. Primera función que cumple el transmisor.



• **Segunda:** el transmisor procesa las señales de entrada del sensor, realiza cálculos, y produce varias señales de salida para los dispositivos periféricos (Figura 13). Las señales de salida pueden ser entre otras:

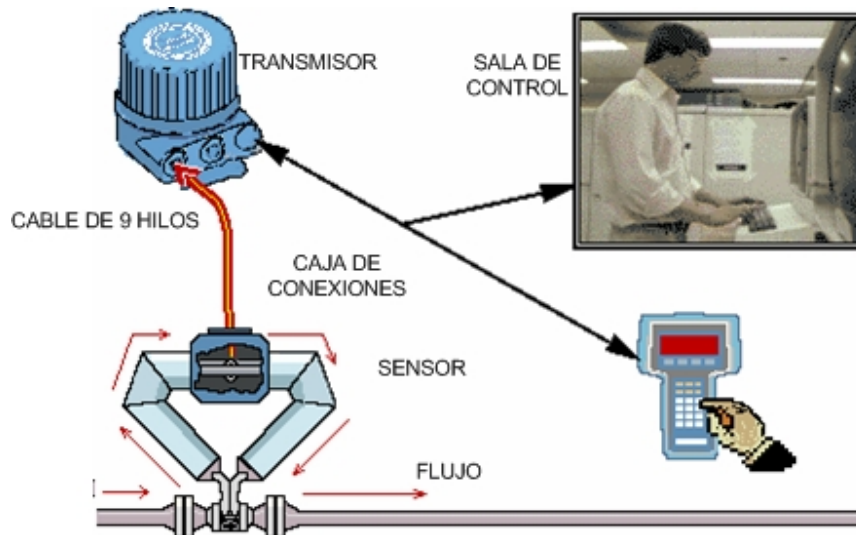
- Salidas analógicas (4-20 mA): Esta señal es utilizada para aplicaciones de control de procesos.
- Información digital (RS-232, RS-485, etc.): Esta señal es utilizada para aplicaciones de comunicación.
- Salida en pulsos/frecuencia.

Figura 13. Segunda función que cumple el transmisor



- **Tercera:** el transmisor permite la comunicación con un operador o con un sistema de control (Figura 14). Son comunes en los transmisores de Coriolis los dispositivos electrónicos basados en microprocesadores y muchos tienen la capacidad de realizar comunicación digital directa con sistemas de control de un ordenador usando buses de campo industriales estándar. El transmisor electrónico puede ser montado cerca del sensor pero también es capaz de operar a una distancia considerable (*cientos de metros*). Los transmisores están disponibles para montaje en campo también como para montaje en soportes de diferentes fabricantes.

Figura 14. Tercera función que cumple el transmisor.



Para el uso de los medidores en ambientes peligrosos, los fabricantes han integrado en el diseño de sus circuitos electrónicos, protección intrínsecamente segura, para que una chispa producida en condiciones de trabajo normal o en condiciones de falla, no puede causar la ignición de una atmósfera explosiva determinada (*P. Ej. Clase 1, División 2, Grupo D Hazardous Area - National Electric Code*). Algunos fabricantes ofrecen transmisores a prueba de explosiones para que tanto el sensor como los dispositivos electrónicos puedan instalarse en áreas peligrosas. Se debe consultar la información proporcionada por los fabricantes y las técnicas de cableado para requisitos específicos en ambientes peligrosos.

2.4.3 Desempeño metrológico. En los medidores másicos de Coriolis, los errores de medición con respecto al caudal másico varían con la magnitud del caudal y la presión; y no con la temperatura, ni con la composición del fluido. Normalmente a caudales bajos los errores son altos, pudiendo

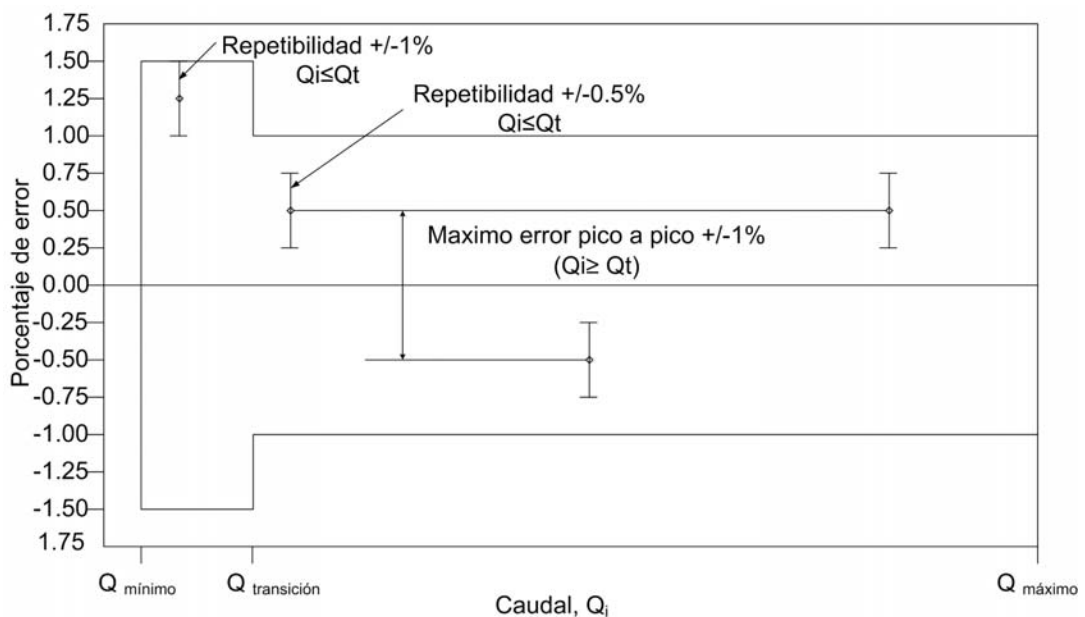
determinarse el cumplimiento del error máximo permitido al caudal mínimo del medidor. En el dimensionamiento y la selección de los medidores Coriolis para aplicaciones de gas natural, aplican los requerimientos de desempeño mínimos presentados por el Reporte AGA No. 11 (Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter - 2003), los cuales se resumen a continuación:

Repetibilidad: $\pm 0.5\%$ de la indicación

Error máximo: $\pm 1.0\%$

Máximo error pico a pico: 1.0%

Figura 15. Especificaciones de desempeño del medidor de Coriolis⁴



Para obtener el mejor desempeño posible en los caudales mínimos, los medidores de Coriolis ofrecen la posibilidad de ajustar el cero para las

⁴ AGA Report No 11 – Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter

condiciones de operaciones existentes en la línea. Este ajuste se realiza con el medidor lleno de fluido y restringiendo totalmente el paso de caudal.

El sistema de medición de los surtidores de GNV debe calibrarse con procedimientos y métodos adecuados y poseer trazabilidad a patrones reconocidos. Esto es motivo de estudio de organizaciones internacionales y los gobiernos de los países donde el GNV es de uso masivo, los cuales en la mayoría de los casos se han pronunciado con la publicación de normas, resoluciones o recomendaciones que establecen los requerimientos para calibración de los sistemas de medición.

3. NORMATIVIDAD Y REGULACIÓN LEGAL APLICABLE A LOS PROCESOS DE METROLOGÍA LEGAL EN LAS EDS-GNV

El proceso de compra - venta de GNV es una operación enmarcada dentro de la metrología legal, por lo tanto es objeto de regulación por parte de organismos gubernamentales en cada país. En los aspectos relacionados con el proceso de medición, la regulación de cada país establece requerimientos metrológicos y procedimientos bajo los cuales se debe realizar la verificación de los surtidores para GNV.

A nivel internacional son muchas las referencias que definen los parámetros bajo los cuales se deben realizar las verificaciones metrológicas en las EDS-GNV.

En el presente capítulo se brinda una descripción de las diferentes normativas y regulaciones aplicables a los procesos de metrología legal involucrados en las EDS-GNV, resaltando los aspectos relacionados con: patrones de calibración, procedimientos de llenado y requisitos metrológicos.

3.1 RECOMENDACIÓN INTERNACIONAL

La OIML es un organismo internacional que promueve la armonización de los procedimientos de metrología legal, a través de la publicación de diferentes recomendaciones, las cuales pueden ser adoptadas completa o parcialmente por los organismos relacionados con metrología legal en cada país.

En el caso particular de la medición de GNV no se ha publicado una recomendación final por parte de la OIML, hasta el momento se han emitido tres borradores, el último de los cuales fue publicado en Diciembre de 2002 y esta identificado como OIML TC8/SC7 - 3rd CD. Este documento incluye las exigencias metrológicas y técnicas aplicables a los sistemas de medición de combustible gaseoso comprimido para vehículos, no solo para aquellos que se encuentren instalados, sino también para la aprobación de nuevos modelos de sistemas de medición.

3.1.1 Requisitos generales recomendados. La OIML define algunos parámetros generales que deben ser evaluados para determinar la conformidad del sistema, entre estos se incluyen: el sistema de medición, el campo de operación y los dispositivos auxiliares y adicionales.

Para definir el campo de operación de un sistema de medición se debe definir lo siguiente:

- Cantidad mínima medida
- Alcance de medición, definido por el Caudal mínimo (Q_{min}) y el caudal máximo (Q_{max}).
- Presión máxima de almacenamiento de gas en la estación, P_s .
- Presión de llenado máxima en el vehículo, P_v .
- Naturaleza y características del gas que está siendo medido
- Temperatura máxima del gas, T_{max} .
- Temperatura mínima del gas, T_{min} .
- Clase medioambiental.

Entre los parámetros mencionados la cantidad mínima medida es la única que es establecida por la OIML, su valor depende del caudal másico que maneja el sistema (ver Tabla 1). Para los demás parámetros no se establecen límites en la recomendación.

Tabla 1. Cantidad mínima medida - OIML

| CAUDAL MÁXIMO [Q _{MAX}] | CANTIDAD MÍNIMA MEDIDA |
|-----------------------------------|------------------------|
| kg/min | kg |
| $Q_{max} < 30$ | 2 |
| $30 \leq Q_{max} < 70$ | 5 |
| $Q_{max} \geq 70$ | 10 |

3.1.2 Requisitos metrológicos recomendados. La OIML contempla tanto la aprobación de modelo como la verificación inicial y las verificaciones posteriores estableciendo diferentes valores para cada uno como lo muestra la tabla 2:

Tabla 2. Requisitos metrológicos - OIML

| PARÁMETRO | % DE LA INDICACIÓN DE MASA |
|---|--------------------------------|
| Aprobación de modelo | |
| Error máximo permisible para el medidor | ±1 |
| Error máximo permisible para el sistema de medición | ±1.5 |
| Verificaciones posteriores | |
| Error máximo permisible para el sistema de medición | ±2 |
| Error permisible máximo aplicable a la cantidad mínima medida | $\pm(3 \cdot M_{min}^5 / 100)$ |
| Repetibilidad - bajo condiciones dinámicas de flujo | ±1 |

⁵ M_{min}: Cantidad mínima medida

La incertidumbre expandida (con $k=2$) en la determinación del error en la indicación de masa debe ser menor que un quinto ($1/5$) del error permisible máximo o tolerancia aplicable para las pruebas de aprobación de modelo y un tercio ($1/3$) del error máximo permisible para pruebas de verificación posterior.

Para el propósito de la recomendación, la repetibilidad se define como la diferencia entre el resultado mas alto y mas bajo de mediciones sucesivas de la misma cantidad, llevadas a cabo bajo las mismas condiciones.

3.1.3 Método y Procedimiento recomendado. La OIML recomienda el empleo del método gravimétrico como patrón para la verificación del sistema de medición de GNV. Mediante cilindros que representan el sistema de almacenamiento de combustible en el vehículo, se realizan llenados parciales, teniendo en cuenta como referencia la presión de almacenamiento, P_v . En la Tabla 3 se especifica cada uno de los llenados parciales.

Tabla 3. Llenados parciales en base al procedimiento OIML

| PRUEBA | ESTADO INICIAL | ESTADO FINAL |
|--|----------------|-----------------------------------|
| 1 | Cilindro vacío | $0.5 P_{max}^*$ |
| 2 | $0.5 P_{max}$ | $0.75 P_{max}$ |
| 3 | $0.75 P_{max}$ | Presión máxima |
| 4 - Evaluación de la cantidad mínima de medición | $0.75 P_{max}$ | Un valor cercano a P_{max}^{**} |

* P_{max} : Presión máxima permisible en el cilindro de prueba

** Puede ser cualquier presión tal que la cantidad de gas transferida sea al menos la cantidad mínima de medición.

La tolerancia admisible en las mediciones de presión de gas en todas las pruebas es de ± 10 bar (aproximadamente 145 psi).

3.2 NORMATIVA INTERNACIONAL

Como resultado del barrido bibliográfico realizado durante el desarrollo del proyecto se identificaron dos fuentes principales, diferentes a la referencia OIML, cuya importancia radica en la forma como se desarrollan los procesos de verificación metrológica. A continuación se presentará una breve descripción de las referencias utilizadas en Estados Unidos y en Canadá, haciendo énfasis en los parámetros relacionados con la verificación metrológica, ya que el alcance total va más allá del sistema de medición.

3.2.1 Estados Unidos. Los Estados Unidos cuentan con dos referencias normativas que se encargan de establecer las características metrológicas y los procedimientos bajo las cuales se debe realizar la verificación de los surtidores para GNV:

- Handbook 44 publicado por NIST (National Institute of Standards and Technology).
- EPO (Examination Procedure Outline) No. 28 - Compressed Natural Gas (CNG) Retail Motor-Fuel Dispensers.

Los aspectos metrológicos contemplados en el Handbook 44 incluyen la especificación de las tolerancias admisibles en los procesos de verificación, tanto para exactitud como para repetibilidad. Esta norma no se limita

únicamente a los medidores máscos para GNV, en el se encuentran especificaciones generales para todos los medidores de caudal máscico.

Por otro lado, en el EPO No. 28 se presentan los lineamientos generales que deben seguirse durante la ejecución de las inspecciones a EDS-GNV, la inspección incluye, entre otros: instalación y ubicación de los equipos, marcas, desempeño de los elementos de indicación y registro, disposición de los elementos de conexión y desempeño del sistema de medición.

La inspección realizada al sistema de medición comprende la revisión del estado y funcionamiento de los elementos así como la verificación metrológica del mismo. Con respecto a la verificación en el EPO No. 28 se definen parámetros tales como: el método de medición, las características de los patrones y los procedimientos de prueba.

a. Requisitos petrológicos: las tolerancias especificadas en el H44 aplican para cualquier temperatura y todos los caudales dentro del alcance de medición del medidor.

El caso particular del GNV cuenta con una tolerancia para el error de medición de $\pm 1.5\%$ para las labores de aceptación (aprobación de modelo) y $\pm 2\%$ como tolerancias para las labores de mantenimiento (verificaciones posteriores).

Las tolerancias relacionadas con repetibilidad están limitadas en el H44 a condiciones controladas de temperatura, presión y caudal. Como no es posible obtener estas condiciones de estabilidad durante el llenado de los cilindros (flujo dinámico), en el EPO No. 28 se hace la salvedad de que se

permite la aplicación de las mismas tolerancias aplicables bajo condiciones estables.

El valor establecido como valor máximo para la *repetibilidad* es del 40% del valor correspondiente a la tolerancia de mantenimiento, es decir 0.8%. Para la evaluación de la repetibilidad es necesario realizar un mínimo de tres pruebas.

Cantidad mínima medida: El dispositivo debe ser probado para entregas iguales a la cantidad de medición mínima declarada cuando el dispositivo probablemente sea usado para hacer entregas del orden de la cantidad de medición mínima.

Si la cantidad de medición mínima del medidor es menor que la masa obtenida en un llenado parcial, se debe realizar una prueba al valor correspondiente a la cantidad mínima medida.

b. Método: el método empleado en EPO No. 28 para la verificación metrológica de los surtidores en EDS- GNV corresponde al método gravimétrico.

El procedimiento descrito se basa en la realización de llenados parciales de los cilindros de prueba en función de la cantidad de masa que se puede almacenar en ellos. La cantidad de gas almacenada en los cilindros correspondientes para cada uno de los llenados se encuentra en la Tabla 4.

Tabla 4. Llenados parciales en base al EPO No 28

| PRUEBA | ESTADO INICIAL | ESTADO FINAL |
|--------|-------------------|-------------------------------|
| 1 | Cilindro Vacío | 1/3 de C_{\max} * |
| 2 | 1/3 de C_{\max} | 2/3 de C_{\max} |
| 3 | 2/3 de C_{\max} | Capacidad máxima del cilindro |
| 4 | Cilindro Vacío | Capacidad máxima del cilindro |

c. Requisitos de los patrones

Sistema de pesaje: la balanza debe ser Intrínsecamente segura y pertenecer al área de clasificación: clase 1 División 2 Grupo D. El equipo debe localizarse fuera del área clasificada la cual equivale a aproximadamente a 5 pies (1,524 m) de la manguera de conexión en el dispensador.

Capacidad del sistema de pesaje: la capacidad debe ser suficiente para pesar los cilindros de prueba, los elementos adicionales de montaje y la cantidad de gas a suministrar.

División de escala: la balanza debe tener una sensibilidad igual o inferior a 0.03% de la cantidad total de masa en el cilindro de prueba. El Valor de la división de escala no debe exceder un décimo (1/10) de la tolerancia aplicada para el dispositivo.

Masas patrón: la norma sugiere la utilización de masas clase F (Clase F según NIST corresponde a la clase de exactitud media de OIML, clases M1, M2 y

* C_{\max} : Capacidad máxima del cilindro en masa

M3) para la verificación del patrón en campo, teniendo en cuenta que al cantidad de masas empleadas debe ser suficiente para verificar la masa total que será aplicada durante las pruebas.

3.2.2 Canadá. La referencia Canadiense para la realización de las pruebas de verificación metrológica en EDS para GNV está contenida en el procedimiento de inspección sección 3 (correspondiente a gas) publicado por *MEASUREMENT CANADA*, el documento está referenciado como CLASE 5 - NGV DISPENSERS.

Al igual que la referencia estadounidense este procedimiento permite realizar la inspección de los surtidores en las estaciones de servicio en aspectos diferentes a los metrológicos: marcas de los elementos, construcción y condición del medidor y la inspección documental. Esta etapa es denominada inspección estática.

Por otro lado, la verificación metrológica (inspección dinámica) establece, entre otros: el procedimiento de verificación, el método empleado y los requisitos metrológicos que debe cumplir el surtidor bajo prueba.

a. Método: las verificaciones se ejecutan mediante un patrón gravimétrico realizando llenado parcial de los cilindros. Los llenados parciales se realizan en función de la presión máxima de llenado para el cilindro. La distribución de las pruebas se encuentra en la Tabla 5.

Tabla 5. Llenados parciales en base al procedimiento de Canadá

| PRUEBA | ESTADO INICIAL | ESTADO FINAL |
|--------|----------------|--------------|
| 1 | Cilindro vacío | 0.7 Pmax* |
| 2 | 0.7 Pmax | Pmax** |

b. Requisitos metrológicos: tolerancias: Para cualquier prueba desarrollada durante la verificación el error en masa debe ser inferior a 1.5%. No se establece un valor límite como tolerancia para las pruebas de repetibilidad, aunque se define un número de pruebas igual a 4 durante la verificación.

La cantidad mínima de gas recolectada depende del tipo de llenado que se esté realizando, así:

- Para llenado rápido la cantidad mínima debe ser de 4 kg.
- Para llenado lento la cantidad mínima recolectada debe ser de 1 kg.

c. Requisitos de los patrones: con respecto a las masas empleadas en la verificación en campo del sistema de pesaje, se establece únicamente que deben ser masas certificadas, no se especifica la clase de exactitud.

El sistema de pesaje debe ser intrínsecamente seguro y capaz de proporcionar lecturas con una resolución de 1 g o mejor.

Los cilindros deben tener una prueba hidrostática válida.

* La tolerancia admisible en la medición de las presiones durante las pruebas es de $\pm 10\%$ de la presión del sistema. Para sistemas de llenado con presión máxima de 200 bar, la presión admisible es de 20 bar (aproximadamente 290 psi).

** Pmax: Presión máxima de llenado permisible en el cilindro de prueba.

d. Ajuste del medidor: cuando el medidor bajo prueba es rechazado por el incumplimiento de los requisitos de exactitud, se permite la realización del ajuste necesario.

Cuando el dispensador ha sido ajustado, la exactitud del medidor debería ser determinada mediante la repetición de las mismas pruebas ejecutadas inicialmente.

3.3 REGULACIÓN Y NORMATIVA NACIONAL

En Colombia la regulación de las actividades relacionadas con la comercialización de GNV están a cargo del Ministerio de Minas y Energía, quien recientemente publicó la resolución 180928 mediante la cual se derogó la resolución 80582 de 1996 con la cual se había realizado hasta el momento el establecimiento de los parámetros de control en la comercialización del GNV.

Por otro lado, el ICONTEC, como Organismo Nacional de Normalización, es el encargado de la publicación de normas relacionadas con la evaluación de la calidad de los elementos empleados en la industria del GNV incluyendo las relacionadas con la evaluación metrológica de los sistemas de medición empleados en la venta de este combustible.

La publicación de normas técnicas por parte de ICONTEC no implica necesariamente la adopción de estas en la industria, como es el caso de la calibración de surtidores para GNV, que aunque existe la norma correspondiente esta no ha sido adoptada por el Ministerio de Minas y Energía en la resolución, ni por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC), quien es ahora el encargado de definir dichos parámetros.

A continuación se establecen los diferentes procedimientos y métodos adoptados a nivel nacional para la verificación metrológica de surtidores de GNV, teniendo en cuenta para ello las referencias emitidas tanto por parte del Ministerio de Minas y Energía (como representante del gobierno) como el ICONTEC. De esta forma se logra establecer un panorama general respecto al desarrollo de las actividades de verificación metrológica en nuestro país, presentándose al final un paralelo con aquellas realizadas a nivel internacional.

3.3.1 Ministerio de Minas y Energía. Anteriormente la resolución 80582 establecía como método para la verificación metrológica de los surtidores el empleo de una balanza y el llenado de cilindros. Con la nueva resolución, la definición de los procedimientos y las exigencias metrológicas son responsabilidad de la SIC. Dichas actividades aun no han sido definidas.

3.3.2 ICONTEC. En el año 2004, ICONTEC publicó la NTC 5335 - Calibración de surtidores para gas natural comprimido para uso vehicular (GNCV). Esta norma establece, entre otros: métodos de calibración, requisitos metrológicos y técnicos de los patrones, procedimiento de verificación y requisitos metrológicos a evaluar una vez finalizadas las pruebas.

a. Método: a diferencia de las normas mencionadas anteriormente, la NTC 5335, es la única que contempla la utilización de dos métodos diferentes para la realización de las pruebas: uno basado en el uso de un patrón gravimétrico y otro basado en el empleo de un medidor patrón másico de referencia.

El procedimiento de llenado de los cilindros descrito en la norma NTC, es el método denominado "Llenado Normal", en el cual cada cilindro es llenado

desde un estado inicial vacío hasta su máxima capacidad, sin interrupciones en el suministro de gas desde el surtidor al cilindro.

Independientemente del método utilizado (gravimétrico o patrón en serie), se debe realizar el llenado de dos cilindros de características similares, con el fin de evaluar la repetibilidad del sistema de medición.

b. Requisitos petrológicos: el error máximo o desviación permisible para la calibración debe ser de $\pm 1.5\%$ de la cantidad real entregada, este criterio aplica para todos los errores obtenidos.

Para la evaluación de la repetibilidad se considera la diferencia entre las dos pruebas realizadas, y su valor no debe ser superior al 0.2%.

c. Requisitos de los patrones: para el método gravimétrico se debe contar con un sistema de pesaje que permita realizar la medición del peso del cilindro junto con el gas suministrado a este, con una resolución mínima de 20g, el equipo debe contar con certificado de calibración vigente.

Para el método con patrón másico de referencia, se requiere que este cuente con certificado de calibración vigente.

3.3.3 Comparación entre las diferentes fuentes nacionales e internacionales.

El panorama nacional e internacional relacionado con la verificación metrológica a surtidores para GNV, desde el punto de vista técnico y metrológico se encuentra en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación entre las fuentes nacionales e internacionales

| ENTIDAD | ICONTEC | NIST | MEASUREMENT CANADA | OIML |
|--|---------------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------|
| País | Colombia | Estados Unidos | Canadá | -- |
| <i>Descripción general</i> | | | | |
| Identificación | NTC 5335 | 1. H44 Cap 3.37 2. EPO No.28 | Parte-3 Sección-3 Clase 5 - NGV Dispensers | TC8/SC7 3rd CD |
| Método descrito | 1. Gravimétrico. 2. Medidor patrón | Gravimétrico | Gravimétrico | Gravimétrico |
| Procedimiento | Llenado normal | Llenado parcial - masa | Llenado parcial - presión | Llenado parcial - presión |
| <i>Exigencias metrológicas</i> | | | | |
| Exactitud ⁶ | ± 1.5% | ± 2% | ± 1.5% | ± 2% |
| Error de Repetibilidad ⁷ | 0.2% | 0.8% | -- | 1% |
| Cantidad mínima medida | -- | -- | 1kg | 2kg |

⁶ Los valores de exactitud son validos para las pruebas de verificación diferentes a la verificación inicial

⁷ El error de repetibilidad es evaluado como la mayor diferencia entre dos valores obtenidos durante la verificación, bajo condiciones similares.

4. DISEÑO DEL SERVICIO

Luego de analizar las diferentes normativas y regulaciones aplicables al proceso de verificación de surtidores de GNV se procede a definir los parámetros necesarios para la ejecución correcta de las pruebas de verificación metrológica.

El establecimiento de estos parámetros permite realizar una selección adecuada de los equipos e identificar las variables que se deben evaluar en una verificación. Estos parámetros están comprendidos por:

- Métodos de verificación
- Procedimientos de verificación
- Requisitos metrológicos
- Evaluación de parámetros adicionales
- Equipos

A continuación se dará una descripción de cada uno de estos aspectos.

4.1 MÉTODOS DE VERIFICACIÓN

Para verificar los medidores de Coriolis instalados en las EDS se usan fundamentalmente dos métodos: el gravimétrico y el de comparación directa contra un medidor másico de referencia. En el desarrollo del proyecto se implementará cada uno de estos métodos con la finalidad de obtener para

cada uno, los parámetros adecuados que permitan la ejecución correcta de las pruebas. Así como la comparación entre los resultados de cada método.

4.1.1 Método gravimétrico. La verificación de surtidores de gas natural por el método gravimétrico es ampliamente usada para pruebas en fábrica y para pruebas en campo tanto para verificar la instalación como para subsecuentes verificaciones. A pesar de que el método es relativamente sencillo y ofrece una incertidumbre apropiada, tiene algunos aspectos que deben ser considerados al momento de su implementación.

En términos generales, el método gravimétrico consiste en llevar a cabo el llenado (completo o parcial) de cilindros receptores para determinar el error de medición en el surtidor, a partir de la comparación entre la masa de gas entregada por el surtidor (la cual es obtenida por medio de la indicación de volumen y la densidad de gas configurada en el sistema) y la masa de gas suministrada al cilindro, obtenida mediante el pesaje del cilindro antes y después del proceso de llenado.

4.1.2 Método de comparación contra patrón másico de referencia (master meter). De acuerdo con el VIM⁸, un patrón de referencia es aquel que ofrece la calidad metrológica más alta, disponible en un determinado lugar y para un propósito específico, a partir de este patrón se brinda una base a las mediciones.

En el ámbito de la realización de verificaciones a surtidores de GNV, se requerirá de un patrón de referencia de alta calidad, excelentes cualidades

⁸ VIM: Vocabulario Internacional de Metrología

metrológicas y con trazabilidad a patrones reconocidos. La trazabilidad en las mediciones deberá asegurarse no solo con el certificado de calibración del medidor patrón de referencia sino con la implementación de procedimientos de operación, instalación y aseguramiento metrológico adecuados.

Las características del medidor y su desempeño se determinan conforme las exigencias de la regulación o la normativa aplicable a nivel nacional. Resulta evidente que lo más apropiado es emplear otro medidor de Coriolis, de características superiores o en su defecto igual, al cual se le ha implementado un plan de calibraciones periódicas para asegurar la confiabilidad en las mediciones.

En este método se emplea el medidor másico tipo Coriolis para determinar la masa verdadera de gas suministrado, comparando esta lectura con la masa obtenida a partir de la indicación de volumen en el surtidor y la densidad de gas configurada en el sistema. Una de las ventajas de este método es que, a diferencia del gravimétrico, no se requieren cilindros de prueba para su aplicación, de forma que la verificación del medidor se realiza aprovechando el llenado de vehículos que concurren a la EDS.

El medidor patrón de referencia se instala en serie con el medidor del surtidor, acoplándose la entrada del patrón con la boquilla de la manguera surtidora, de tal forma que a la salida del patrón se surte gas a un vehículo mediante una manguera de las mismas características de la que posee la estación. El gas pasa a través de los dos medidores, obteniéndose al final las indicaciones de cada uno de ellos.

4.2 PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN

Cuando se ejecuta una verificación (independiente del método empleado) lo ideal es realizarla a diferentes condiciones de caudal-presión, es decir, realizando el llenado de los cilindros de forma continua y de forma interrumpida o parcial. Durante el llenado continuo se permite que el surtidor lleve a cabo el llenado completo del cilindro receptor (con el cilindro vacío en su estado inicial); en el llenado interrumpido, se ejecutan entregas parciales de gas, las cuales son controladas por la presión en el cilindro o por la cantidad de gas suministrado, bien sea realizando el control sobre el volumen o sobre la masa suministrada.

Para la ejecución de pruebas con llenados parciales, la normativa Estadounidense y Canadiense presentan dos procedimientos similares en cuanto a que ambos realizan el llenado de los cilindros de forma parcial y diferentes en cuanto a la forma de determinar las entregas parciales (uno lo hace en base a la masa suministrada mientras el otro lo realiza en base a la presión en el cilindro). En los dos casos se busca obtener una mejor valoración del estado metrológico del surtidor bajo prueba, realizando una evaluación en diferentes aspectos, tales como, presiones de llenado, diferentes caudales promedio de prueba y adicionalmente evaluando la cantidad mínima que puede suministrar el surtidor.

Con el fin de obtener una máxima confiabilidad en los resultados en el presente proyecto, se emplearán 3 procedimientos de llenado para los cilindros: llenado normal, llenado parcial en masa, llenado parcial por presión. En la Tabla 7 se indica el número de etapas correspondiente a cada

uno de los procedimientos y las acciones a realizar en cada una de ellas, estas acciones son independientes del patrón de verificación empleado.

Tabla 7. Procedimientos de llenado implementados en el proyecto

| ETAPAS | LLENADO PARCIAL 1 (MASA) | LLENADO PARCIAL 2 (PRESIÓN) | LLENADO NORMAL |
|--------|---|---|--|
| 1 | Llenar el cilindro de prueba (vacío) hasta un tercio (1/3) de su máxima capacidad. | Llenar el cilindro de prueba (vacío) hasta alcanzar el 70 % de la presión máxima del sistema (2100 psi) | Iniciar el llenado del cilindro de prueba (vacío) hasta alcanzar su máxima capacidad |
| 2 | Continuar el llenado del cilindro desde un tercio (1/3) hasta dos tercios (2/3) de su capacidad máxima. | Finalizar el llenado del cilindro, desde el 70% hasta el 100 % de la presión máxima del sistema. | |
| 3 | Finalizar el llenado del cilindro, desde dos tercios (2/3) hasta su capacidad máxima. | | |

4.3 REQUISITOS METROLÓGICOS

Cada una de las fuentes bibliográficas descritas en el Capítulo 3 presenta diferentes criterios para la aceptación de los resultados en las pruebas de verificación metrológica. Entre las referencias descritas la OIML es la más completa, ya que define tolerancias para error, repetibilidad e incertidumbre. Por tal motivo, esta recomendación ha sido adoptada como referencia para la

evaluación de los sistemas analizados en el desarrollo de las pruebas piloto del presente proyecto. En la Tabla 8 se presenta un resumen de estos parámetros con su respectivo valor.

Tabla 8. Requisitos metrológicos

| PARÁMETRO | VALOR |
|---------------|----------------------------|
| Error | ± 2 % |
| Repetibilidad | 1 % |
| Incertidumbre | (1/3)*Error (± 0,667 %) |

Los resultados obtenidos (error, repetibilidad e incertidumbre) para cada una de las pruebas a realizar deben ser confrontados estos valores de referencia, de tal manera que sea posible establecer la conformidad en términos metrológicos del sistema de medición evaluado.

4.3.1 Error. El error relativo se calcula tomando como referencia el patrón, para lo cual se requiere conocer el valor de densidad configurada en el surtidor, de esta manera se obtiene la masa medida por el surtidor mediante el producto del volumen indicado y la densidad configurada.

Para la obtención del error relativo en masa se utiliza la Ecuación 1.

$$\varepsilon_m [\%] = \frac{V_s * \rho_c - m_p}{m_p} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

ε_m : Error de medición relativo en masa

V_s : Volumen indicado por el surtidor

ρ_c : Densidad configurada en el surtidor a condiciones estándar

m_p : Masa indicada por el patrón

De igual forma se puede calcular el error relativo en volumen, para lo cual se debe contar con las facilidades para realizar un análisis de la composición del gas utilizado en la prueba con el fin de obtener la densidad real en el momento de las pruebas. La densidad junto con la masa medida directamente en el patrón define el volumen verdadero almacenado en el cilindro. La Ecuación 2 permite evaluar el error relativo en volumen.

$$\varepsilon_V [\%] = \frac{V_s - \frac{m_p}{\rho_m}}{\frac{m_p}{\rho_m}} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

ε_V : Error de medición relativo en volumen

V_s : Volumen indicado por el surtidor

ρ_m : Densidad medida mediante análisis del gas de prueba a condiciones estándar

m_p : Masa indicada por el patrón

4.3.2 Error de Repetibilidad. La evaluación de la repetibilidad incluye un mínimo de tres pruebas consecutivas de aproximadamente el mismo tamaño, las cuales deben ser conducidas bajo condiciones de presión y caudal similares.

Siguiendo los lineamientos dado por OIML para la determinación del error de repetibilidad, se debe calcular mediante la diferencia entre el resultado

más alto y más bajo de mediciones sucesivas de la misma cantidad, llevadas a cabo bajo las mismas condiciones.

4.3.3 Incertidumbre. La evaluación de la incertidumbre debe realizarse en condiciones similares a la evaluación de la repetibilidad.

El cálculo de la incertidumbre se realiza siguiendo los lineamientos de la norma ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 1995 (Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición - 1995).

4.4 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS ADICIONALES

Durante la ejecución de las pruebas de verificación, independientemente del patrón de medición y del procedimiento de llenado utilizado, se debe realizar la evaluación de otros parámetros, tales como: Cantidad mínima medida y caudal máximo de prueba.

4.4.1 Cantidad mínima medida. En la ejecución de los procedimientos de llenado 1 y 2, se debe garantizar una cantidad mínima de gas en las diferentes etapas. La Tabla 9 presenta los valores para la cantidad mínima medida en los diferentes procedimientos.

Tabla 9. Cantidad mínima medida

| ETAPA | LLENADO PARCIAL 1 - MASA | LLENADO PARCIAL 2 - PRESIÓN |
|-------|--------------------------|-----------------------------|
| | [kg] | [kg] |
| 1 | Mmin > 2 | Mmin > 4 |
| 2 | Mmin > 2 | Mmin > 1 |
| 3 | Mmin > 2 | |

4.4.2 Caudal máximo de prueba. El caudal máximo durante el proceso de carga de un cilindro se da al inicio, cuando la diferencia entre la presión del cilindro y la presión de suministro de la estación es mayor. Este caudal máximo debe compararse con el caudal máximo establecido por el fabricante para el medidor en el surtidor, ya que mediciones por fuera de su alcance de medición de este no son válidas.

La determinación del caudal máximo durante la carga de un cilindro se realiza contabilizando el tiempo empleado en incrementar en 1 kg la masa de gas en el cilindro, teniendo como punto de partida el momento en que este valor alcanza 0,5 kg. El periodo de tiempo que transcurre desde el inicio de la carga del cilindro hasta que este alcanza los 0,5 kg es suficiente para permitir que se establezca completamente el flujo desde el surtidor hacia el cilindro, permitiendo realizar una medición del caudal máximo mucho más exacta.

4.5 EQUIPOS

Para llevar a cabo la verificación empleando los dos métodos contemplados se requiere por lo menos de los equipos listados a continuación.

4.5.1 Cilindros receptores. Pueden ser uno o varios, dependiendo de la posibilidad que se tenga de vaciar el gas una vez realizada una verificación. En caso de que el gas no pueda ventearse o quemarse en el momento de la verificación del surtidor, deberá contarse con más de un cilindro de forma que se puedan ejecutar varias calibraciones, permitiendo determinar la repetibilidad del surtidor.

La calidad de los cilindros debe evaluarse de forma continua y estricta, aunque los cilindros receptores van a estar sometidos a las mismas presiones, estos van a estar afectados por las operaciones de transporte continuo y manipulación, las cuales pueden llegar a deteriorarlos con el transcurrir del tiempo. Un plan de pruebas hidrostáticas que incluyan verificación de expansión volumétrica, verificación de espesores e inspección visual debe establecerse, indicando su periodicidad.

La capacidad de los cilindros debe permitir la ejecución de cualquiera de los procedimientos de llenado, cumpliendo con las cantidades mínimas medidas establecidas en la Tabla 9.

4.5.2 Balanza. La denominación gravimétrica trae inherente la ejecución de pesajes. Estos se realizan mediante una balanza electrónica calibrada, de capacidad y características metrológicas apropiadas para poder ser utilizada como patrón. Es claro que en este caso la balanza resulta siendo el elemento más importante en el sistema de verificación.

Los aspectos que se deben tener en cuenta al seleccionar la balanza son:

- Capacidad: La balanza debe tener una capacidad suficiente para soportar el peso del cilindro y el del gas abastecido.
- Seguridad eléctrica: Las balanzas electrónicas poseen diferentes grados o clases de seguridad intrínseca, los cuales son clasificados por UL (Underwriters Laboratory - ver anexo D). La clase se selecciona teniendo en cuenta el ambiente en el cual va a operar la balanza, considerando su cercanía a un surtidor de combustible gaseoso. Además de lo anterior, se debe tener

en cuenta el tipo de alimentación eléctrica, de forma que haya disponibilidad y seguridad en su provisión.

- Resolución: Esta característica tiene un efecto significativo sobre la incertidumbre con la cual el medidor puede calibrarse. Por esta razón, la resolución de la balanza se selecciona con base en la tolerancia que las regulaciones admiten para la aprobación del estado metrológico del surtidor. Las regulaciones en los diferentes países especifican el grado de resolución requerido como una fracción de la tolerancia admisible o como una fracción de la masa mínima de gas a ser pesada, de forma que en la determinación de la incertidumbre global de la calibración, su valor sea lo suficientemente bajo como para que los resultados sean válidos y representativos (P. Ej, 10, 5 o 3 veces menor).

Siguiendo las recomendaciones dadas por NIST con respecto a la resolución de la balanza (Capítulo 3.2.1.c - *“la resolución no debería exceder (1/10) de la tolerancia aplicada”*), la ejecución de llenados parciales en los cuales las cantidades mínimas son de 1 y 2 kg, requiere una balanza con resolución inferior a 1 y 2 g respectivamente. Por su parte la normativa canadiense sugiere una resolución del sistema de pesaje de 1 g o mejor.

Las balanzas pueden resultar afectadas durante su transporte, por lo tanto siempre debe realizarse una verificación metrológica in-situ, empleando un juego de masas patrón. Deben implementarse procedimientos claros que tengan en cuenta la verificación metrológica en campo, el tiempo de calentamiento necesario para obtener resultados confiables, la forma de transporte (carga, descarga, etc.), los aspectos relacionados con la instalación (calidad de la superficie, nivelación, suministro eléctrico, fuentes de

radiación, corrientes de aire que inciden sobre la balanza indicando lecturas falsas, vibración, etc.).

4.5.3 Conjunto de masas patrón calibradas. Para verificar el estado metrológico de la balanza antes de ejecutar la verificación del surtidor se emplea un juego de masas de referencia con un peso del mismo orden del peso del gas que va a llenar el cilindro receptor (máximo 10 kg).

La clase de las masas debe estar de acuerdo con la balanza seleccionada, para el caso específico de una balanza con resolución de 1g y teniendo en cuenta una cantidad máxima de gas de 10 kg, las masas deben ser OIML clase M1, ya que estas presentan errores permisibles acordes con estas dos condiciones.

La verificación se hace en forma progresiva, una vez que la balanza ha sido instalada en forma apropiada y que el tiempo de calentamiento ha transcurrido, en este caso también se debe establecer un procedimiento.

4.5.4 Patrón másico de referencia. Medidor másico tipo Coriolis con parámetros de funcionamiento que le permitan ser empleado en la verificación de Surtidores de GNV, teniendo en cuenta aspectos como presión de operación, caudal de trabajo y calidad metrológica. Además, la electrónica asociada al equipo seleccionado debe ser intrínsecamente segura y apta para operación en atmósferas con alto contenido de gases combustibles.

Las estaciones de servicio instaladas en Colombia realizan el llenado de vehículos bajo condiciones de caudal que no superan los 20 kg/min, el medidor seleccionado como patrón másico de referencia debe cubrir este alcance manteniendo adecuadas características metrológicas.

4.5.5 Válvulas, mangueras, acoples y accesorios. Los cilindros deben poseer un acople compatible con el surtidor de la estación, adicionalmente deben contar con una válvula que permita el vaciado posterior.

Mangueras y accesorios adicionales se requerirán para permitir el vaciado del gas.

Accesorios: los diferentes elementos deben ser conectados entre ellos y con el surtidor con elementos que garanticen la operación segura bajo las condiciones de presión manejadas en una EDS.

4.5.6 Sensor de presión manométrica. Para el procedimiento de llenado parcial 2 (presión) se requiere el monitoreo de la presión dentro del cilindro, para lo cual se hace indispensable la utilización de un manómetro con capacidad adecuada (250 bar) y que pueda ser conectado directamente a los cilindros de manera segura.

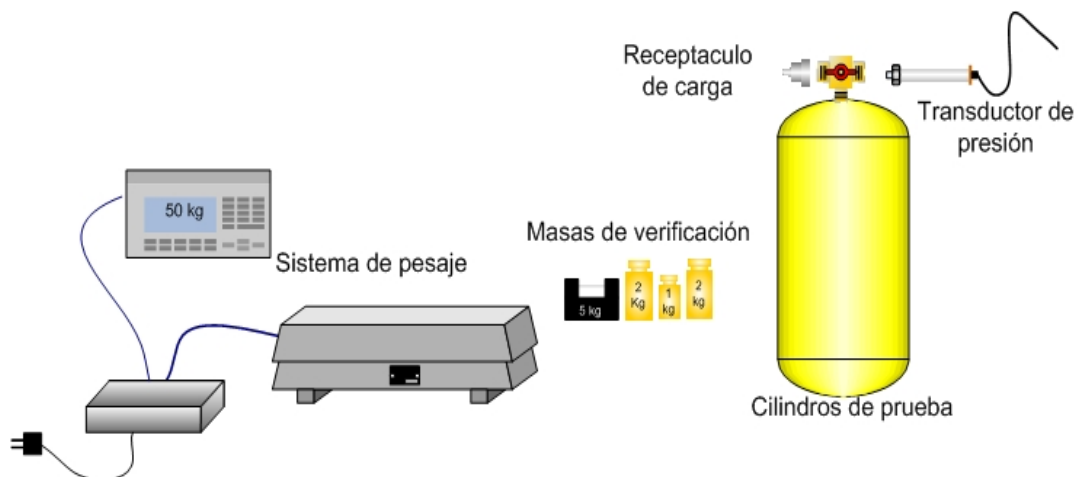
La resolución del instrumento seleccionado debe ser tal que permita realizar lecturas con mayor exactitud que las permitidas por los manómetros instalados en los surtidores (5 bar).

4.5.7 Infraestructura física adquirida. Como se describió anteriormente, el servicio de verificación metrológica está basado en el uso de dos métodos: el método gravimétrico y el método de comparación directa contra un patrón másico de referencia. Para ejecutar cada método se adquirieron patrones de referencia de las cualidades técnicas y metrológicas adecuadas para garantizar sus resultados.

a. *Patrón gravimétrico*: el patrón gravimétrico esta compuesto por los siguientes elementos:

- Cilindros de prueba
- Sistema de pesaje
- Masas para verificación
- Conexiones a la EDS
- Transductor de presión

Figura 16. Patrón gravimétrico



A continuación se describe cada uno de los elementos.

Cilindros de prueba: Los cilindros seleccionados para la ejecución de las pruebas cumplen con los requisitos establecidos anteriormente en cuanto a capacidad de almacenamiento de gas y peso. Son tres cilindros marca MAT, de la misma referencia - 40.273, con sus respectivas válvulas marca Hoffman. Las características físicas de los cilindros se listan a continuación:

Figura 17. Cilindros MAT 40.273



Figura 18. Válvula Hoffman



Tabla 10. Características de los cilindros MAT 40.273

| CILINDROS MAT 40.273 | |
|----------------------|-----------------|
| Capacidad Hidráulica | 40 L |
| Diámetro | 273 mm |
| Longitud | 860 mm |
| Peso | 47 Kg |
| Presión de Trabajo | 200 bar |
| Conexión | 3/4" NGT 14 HPP |

Teniendo en cuenta que los cilindros y sus válvulas van a estar sometidos a las mismas presiones que los cilindros que se instalan en los vehículos y adicionalmente van a estar afectados por las operaciones de transporte continuo y manipulación, se le realizaron pruebas hidrostáticas, expansión volumétrica, medición de espesores e inspección visual para cada cilindro e inspección para cada válvulas basado en la norma NTC 4828 (Métodos para inspección de cilindros y sus sistemas de montaje empleado en vehículos que operan con gas natural comprimido), estos trabajos son realizados en el laboratorio de pruebas hidrostáticas de la corporación CDT de GAS, el cual cuenta con acreditación por parte de la Superintendencia de Industria y comercio.

Tabla 11. Identificación cilindro, tara y peso verdadero

| IDENTIFICACIÓN | TARA DE FÁBRICA | PESO VERDADERO |
|----------------|-----------------|----------------|
| AAR9180 | 50 kg | 49.8 kg |
| AAS1026 | 48.2 kg | 47.9 kg |
| AAR9153 | 49.2 kg | 49.1 kg |

Los cilindros de gas natural presentan una variación entre el peso que indica el fabricante en el catálogo, la tara de fábrica y el peso verdadero como se puede observar en la Tabla 11. El peso del cilindro es un factor importante para la selección de la capacidad de la balanza. Con cilindros más pesados que los seleccionados, se tienen dos alternativas: seleccionar cilindros más pequeños o seleccionar una balanza con mayor capacidad. Estas alternativas de solución ocasionan problemas, ya que con un cilindro con menor capacidad, los llenados parciales se ejecutarían con una cantidad de gas muy pequeña, la cual no cumpliría con la cantidad mínima medida, por otra parte, una balanza de mayor capacidad es de fabricación especial y por lo tanto más costosa si se busca cumplir con la resolución de la balanza recomendada por las referencias internacionales. Con la colaboración del distribuidor de los cilindros se consiguieron cilindros livianos, cuya capacidad hidráulica cumpliera con los 40 L.

Sistema de pesaje:

Figura 19. Sistema de pesaje



Está constituido por tres elementos:

- Terminal de pesaje modelo ID7sx/BasePac.
- Plataforma de pesaje modelo KB60x2.T4, con capacidad de 60 kg (lo suficiente para soportar el peso del cilindro y del gas abastecido) y resolución de 1g.
- Fuente de alimentación modelo PSU, para 110 V, con interfaz RS232 para transmisión de datos a PC

En la ejecución de las pruebas cada uno de los elementos debe ser ubicado en un área específica alrededor del surtidor, esta área depende del riesgo de explosión y se determina a partir del pico de carga del surtidor. El indicador y la plataforma pueden ser ubicados en una zona de alto riesgo cercana al surtidor, mientras que la fuente de alimentación debe permanecer en un área segura.

Según la clasificación del sistema de pesaje los elementos están diseñados para operar en áreas clase I, II, III, División 1, grupo A, B, C, D, E, F, G, lo cual satisface totalmente las características de lugares donde operará el sistema de pesaje (EDS-GNV y los laboratorios de la Corporación CDT de gas)

Por otro lado, el sistema de pesaje cuenta con certificado de calibración emitido por laboratorio acreditado por la SIC en el área de masas y balanzas.

Debido a la sensibilidad de la plataforma de pesaje, las mediciones se ven afectadas por las corrientes de aire (muy frecuentes en los espacios abiertos como el de una estación de servicio), para disminuir este efecto se construyó una cubierta plegable en acrílico transparente (Figura 20), la cual se arma en

campo ubicándose sobre la plataforma y el cilindro al momento de realizar las mediciones.

Figura 20. Cubierta protectora de la plataforma de pesaje



Masas de verificación: el juego de masas de verificación es de fabricación nacional y cuentan con certificado de calibración emitido por laboratorio acreditado. Las masas patrón son de clase M1 y suman un total de 10kg, compuesto por 3 masas cilíndricas (1kg, 2kg y 2kg) y una masa tipo bloque de 5kg.

Figura 21. Juego de masas M1



Conexiones a la estación de servicio: para conectar los cilindros al pico de carga del surtidor de la EDS de GNV es necesario adaptar a las válvulas de cada cilindros un receptáculo de carga tipo NGV1 marca Weh modelo TN1 (Figura 22).

Figura 22. Receptáculo de carga Weh modelo TN1.



Transductor de presión: el monitoreo de la presión durante el llenado de los cilindros se realiza mediante un transductor de presión manométrica marca OMEGA modelo PX, este instrumento cuenta con certificado de calibración emitido por el laboratorio del CDT de GAS. El sensor cuenta con el alcance de medición adecuado para cubrir el valor de presión máximo alcanzado durante el llenado de los cilindros en las EDS-GNV.

Tabla 12. Características del transductor de presión OMEGA PX

| TRANSDUCTOR DE PRESIÓN OMEGA PX | |
|---------------------------------|----------------|
| Rango de medición | 0-10000 psi |
| Salida | 4-20 mA |
| Resolución | 0.5 psi |
| Incertidumbre | ± 17 psi |
| Conexión al proceso | 1/4" NPT macho |

Figura 23. Transductor de presión OMEGA PX



Durante la ejecución de las pruebas, el sensor debe ser conectado a cada cilindro que va a ser llenado, el montaje y desmontaje de este instrumento y someterlo en repetidas ocasiones a esfuerzos de apriete, puede afectar la integridad del cilindro y el sensor. Para garantizar la integridad de estos elementos y facilitar la operación de montaje, se adaptaron accesorios OD de $\frac{1}{4}$ " , tanto a la válvula del cilindro como al sensor, estos accesorios son diseñados para ser utilizados a presiones de 5000 psi.

Figura 24. Válvula con sensor de presión y accesorios OD



Facilidad de transporte del patrón gravimétrico: el sistema de pesaje y el juego de masas de verificación deben transportarse de forma segura, para evitar que sus cualidades metrológicas sean afectadas debido a golpes, vibraciones, humedad, etc., razón por la cual se trasladan protegidas en una maleta que cuenta con los compartimientos necesarios para cada uno de los componentes del sistema de pesaje y el juego de masas.

Figura 25. Maleta para la protección del sistema de pesaje.



En la Tabla 13 se muestran los elementos que conforman el patrón gravimétrico con su respectiva función.

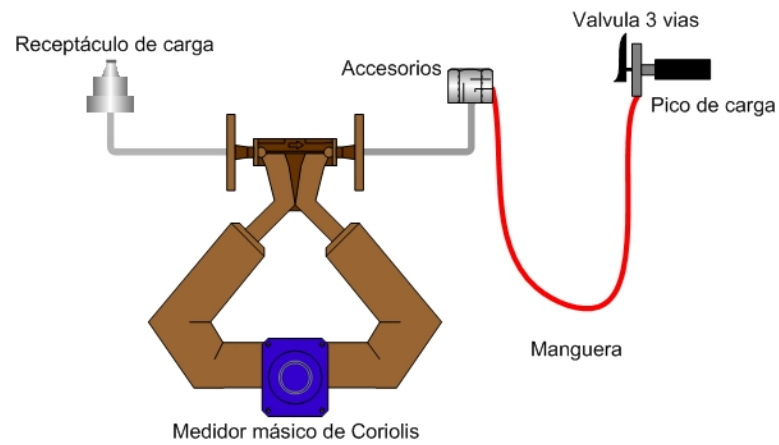
Tabla 13. Patrón gravimétrico

| ELEMENTO | FUNCIÓN |
|-------------------------|---|
| Cilindros de prueba | Almacenamiento del gas |
| Sistema de pesaje | Determinación de la cantidad de gas entregada |
| Masas para verificación | Verificación en campo del sistema de pesaje |
| Conexiones a la EDS | Conexión entre el patrón y el surtidor |
| Transductor de presión | Monitoreo de la presión durante el llenado |

b. Patrón másico de referencia: Está compuesto por:

- Medidor másico tipo coriolis
- Mangueras para alta presión
- Receptáculo de carga
- Pico de carga
- Válvula tres vías

Figura 26. Patrón másico de referencia



Medidor másico tipo coriolis :

Figura 27. Medidor másico Micromotion



El medidor adquirido como patrón de referencia para realizar la calibración de EDS-GNV, es un medidor de caudal másico marca Micromotion, compuesto por un sensor de caudal y un transmisor (Figura 27). El medidor seleccionado posee las características necesarias para ser utilizado en la medición de gas natural a alta presión, posee certificado de calibración y cuenta con trazabilidad a NIST.

Especificaciones generales. El sensor pertenece a la gama de medidores para gas a alta presión, modelo CNG-050, Cuenta con seguridad intrínseca para ser utilizado en aplicaciones de transferencia de custodia de GNV y proporciona la incertidumbre necesaria para intercambios comerciales sin la necesidad de tramos rectos aguas arriba y aguas abajo del medidor.

El Transmisor pertenece a la serie 2700, utiliza tecnología MVD (Multivariable Digital), diseñada para medir variables múltiples simultáneamente. El procesamiento digital de las entradas disminuye significativamente el ruido de la señal y reduce el tiempo de respuesta frente a los dispositivos analógicos. Las especificaciones técnicas del medidor (sensor transmisor), se resumen en la tabla 14.

Tabla 14. Especificaciones técnicas del medidor incluyendo sensor y transmisor

| CONDICIONES AMBIENTALES | |
|---|------------------------------------|
| Limite de temperatura del fluido de trabajo | [-40 a 125] °C |
| Limites de temperatura ambiente | [-40 a 60] °C |
| Limites de humedad | [5 a 95]% sin condensación a 60 °C |
| Limites de presión | 345 bar |

| CONSTRUCCIÓN | |
|---|---|
| Partes en contacto con el fluido de trabajo | Acero inoxidable 316 L |
| Carcaza del sensor | Acero inoxidable 304 L |
| Conexiones | 3/4" NPT hembra con O-ring para sellado con un limite de presión de 317 bar |
| Peso | 16 lbs (sin transmisor) |
| CARACTERÍSTICAS DE MEDICIÓN | |
| Rango de medición | [108-2400] kg/h |
| Incertidumbre estándar | +/- 0.03% |
| Resolución | 6.6*10 ⁻⁵ kg (ver nota) |

Nota: La resolución del medidor es configurable a través de la salida de frecuencia que llega al sistema de adquisición de datos, aunque el display del medidor tenga una resolución de 0.0001g, es posible tener una resolución de 6.6*10⁻⁵ kg en las mediciones a través del PC.

Conexiones eléctricas: el transmisor modelo 2700 cuenta con conexiones para alimentación, señales de salida y puertos de comunicación (Figura 28). Las características generales de conexión para el transmisor están descritas en la Tabla 15.

Figura 28. Esquema de las conexiones en el transmisor

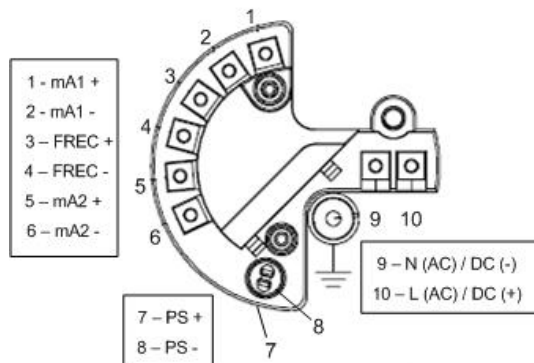


Tabla 15. Conexiones eléctricas

| CONEXIÓN | DESCRIPCIÓN |
|-------------------|--|
| Alimentación | es autoconmutada (reconoce automáticamente la fuente de alimentación), permite alimentación en CA de 85 a 265 V y en CD de 18 a 100 V. |
| Señales de salida | Dos pares de terminales para Miliamperios (4-20 mA) Un par de terminales para Frecuencia (configurable hasta 10000 Hz) |
| Comunicación | Puerto de servicio con protocolo Modbus |

Mangueras: La manguera seleccionada es marca Parker modelo Parflex de 3/8" de diámetro interior, 2m de longitud y 5000 psi de presión de operación con accesorios de 1/4" NPT macho.

A la manguera y sus respectivos accesorios se les practicaron los ensayos de hermeticidad y resistencia hidrostática según NTC 4825 (mangueras para sistema de llenado de Gas Natural Comprimido Vehicular) en el área de pruebas hidrostáticas de la Corporación CDT de gas, con el fin comprobar la hermeticidad de las conexiones y la integridad de la manguera.

Figura 29. Ensayo a la manguera y sus conectores.



Receptáculo de carga: para conectar el pico de carga de la estación de servicio con el medidor másico se emplea un receptáculo de carga de las mismas características de los receptáculos adaptados en los cilindros.

Figura 30. Receptáculo de carga



Pico de carga: el pico de carga adquirido es marca Weh modelo TK4 compatible con receptáculos NGV1, especialmente diseñado para EDS - GNV. Posee válvula de cierre incorporada y sistema de mordazas para máximo sellado con el receptáculo de carga.

Figura 31. Pico de carga WEH modelo TK4



Válvula tres vías:

Figura 32. Válvula Tres vías Hoke 7644



La válvula seleccionada es marca Hoke serie 7644 para presiones de operación 6000 psi, totalmente fabricada en acero inoxidable 316. Esta válvula tiene 3 posiciones que permiten: bloquear el flujo de gas, permitir el paso de gas de la manguera al cilindro y permitir el venteo del gas que se encuentre en el pico de carga WEH TK4.

Transporte y protección del patrón másico de referencia: todos los elementos que componen el patrón másico de referencia (medidor, manguera, válvulas y demás accesorios), son agrupados en forma adecuada dentro de un sistema que permite ser transportado a campo para realizar las calibraciones en las EDS-GNV.

Este sistema ha sido diseñado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- El medidor másico se debe transportar garantizando un alto grado de protección.

- El montaje del medidor debe ser rígido, libre de fugas y estar completamente alineado.
- Las conexiones (electrónicas, eléctricas y mecánicas) realizadas en campo, deben realizarse de forma rápida y segura.

Montaje del medidor másico. El medidor de Coriolis CNG 050 es transportado fijo a una estructura de acero que a su vez está sujeta a la estructura de la maleta (Figura 33). La entrada y la salida del medidor están conectadas a un conjunto de accesorios que forman un circuito y permiten el flujo de gas; todos estos accesorios están fabricados en acero inoxidable y son aptos para resistir presiones de trabajo de 5000 psi.

Figura 33. Sistema de transporte del medidor



Para la entrada y la salida del medidor se adaptaron accesorios que permiten la conexión en campo del pico de carga del surtidor y de la manguera que hace parte del patrón de referencia. Conector TN1 para la entrada y accesorio NPT 1/4" para la salida.

Figura 34. Conexiones del medidor



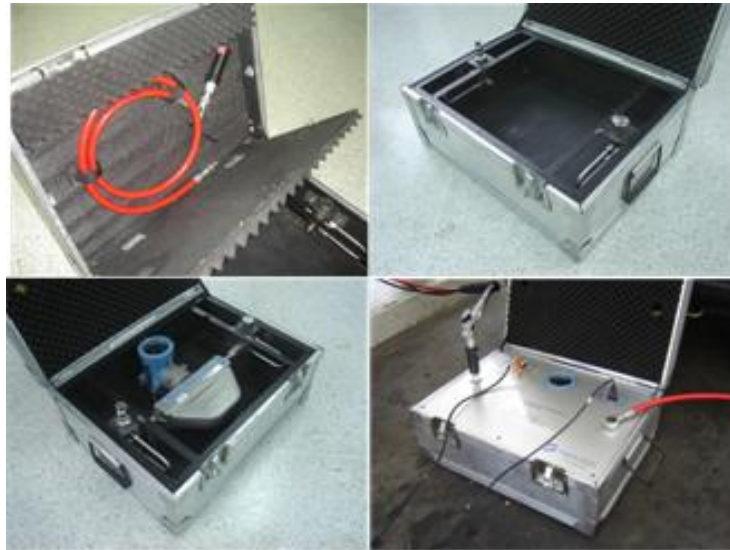
Conexiones eléctricas. En la parte superior de la maleta se adaptó una placa en aluminio sobre la cual se realizó el cableado de las diferentes conexiones eléctricas, señales de salida del medidor y alimentación (Figura 35). A través de esta lámina es posible visualizar el indicador que posee el transmisor, por lo cual es posible monitorear las variables tanto por las señales de salida como directamente en el transmisor

Figura 35. Placa de aluminio para el medidor másico patrón



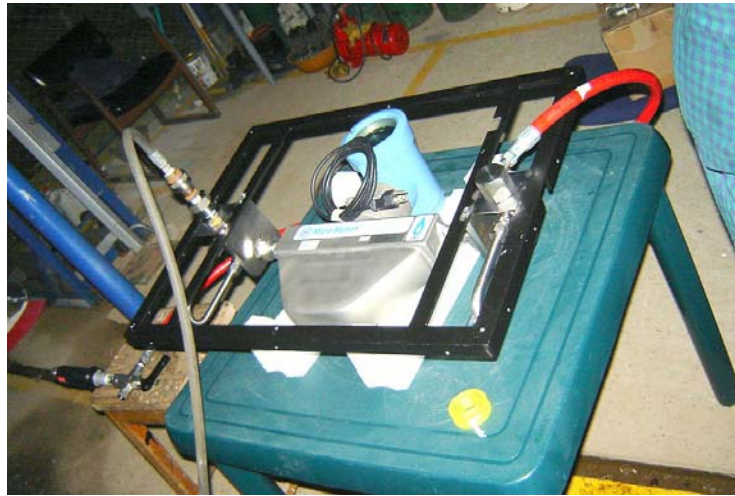
Montaje final y pruebas. En la figura 36 se observa el montaje final de los elementos que constituyen el patrón másico de referencia. En la tapa que conforma la maleta, se encuentra un espacio habilitado para el almacenaje de la manguera de presión junto con los demás accesorios necesarios para conectar el patrón al cilindro de prueba.

Figura 36. Maleta para el medidor másico patrón



Una vez realizado el montaje de todos los elementos (accesorios, conexiones, etc), se verificó la resistencia de los mismos, mediante la ejecución de ensayos a alta presión realizados en el laboratorio de pruebas hidrostáticas del CDT de GAS (Figura 37). La finalidad de las pruebas es comprobar la resistencia de los elementos ante una presión de aproximadamente 1.5 veces la presión máxima de servicio (aproximadamente 4500 psi). De igual forma se simulaban condiciones de presión pulsante, ya que esta condición es la condición mas critica a la cual se enfrentan los elementos durante las pruebas en una EDS-GNV.

Figura 37. Prueba hidrostática de accesorios y conexiones



En la tabla 16 se muestran los elementos que conforman el patrón másico de referencia con su respectiva función:

Tabla 16. Patrón másico de referencia

| ELEMENTO | FUNCIÓN |
|------------------------------|---|
| Medidor másico tipo coriolis | Determinación de la cantidad de gas entregada |
| Mangueras para alta presión | Conexión entre el patrón y el cilindro receptor |
| Receptáculo de carga | Conexión con la manguera del surtidor |
| Pico de carga | Conexión con el cilindro receptor |
| Válvula tres vías | Control sobre el flujo de gas |

c. Sistema de adquisición de datos: un sistema de adquisición de datos tiene como función registrar y monitorear de una manera continua las variables de un proceso. Algunas veces el sistema de adquisición es parte de un sistema de control, y por tanto la información recibida se procesa para obtener una serie de señales de control. Este tipo de sistemas permite mejorar los procesos de registro, ya que no tiene asociado los errores humanos propios de la recolección manual de datos.

El Sistema de adquisición y control se implementó bajo la plataforma OPTO 22, sistema que ha sido utilizado anteriormente en otros proyectos desarrollados en la Corporación CDT de GAS, demostrando poseer las especificaciones adecuadas para ser integrado en sistemas de calibración.

Componentes del sistema de adquisición de datos: los componentes del sistema de adquisición de datos y control junto con sus respectivas funciones se enuncian en la Tabla 17:

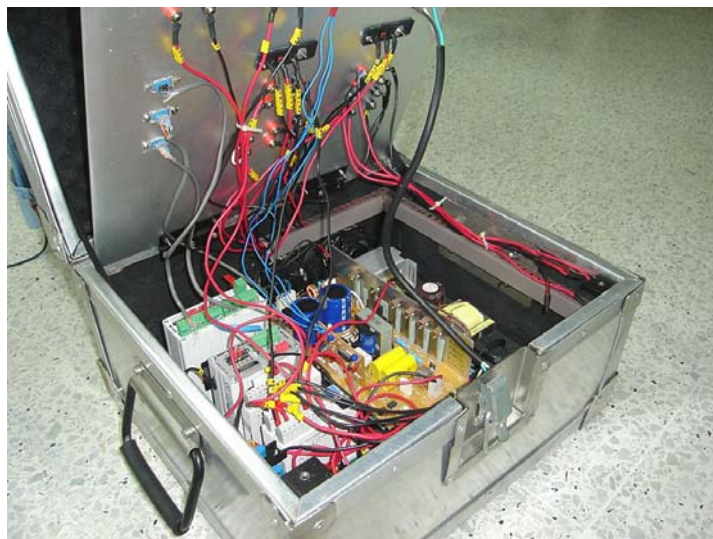
Tabla 17. Elementos Componentes del sistema de adquisición de datos y control

| ÍTEM | CANT. | COMPONENTE | FUNCION |
|---------------------------|-------|---|--|
| 1 | 1 | Fuente de alimentación 5 V DC | Suministrar el voltaje al sistema OPTO 22, a las entradas de los pulsos y a una salida de voltaje auxiliar |
| 2 | 1 | Fuente de alimentación variable 0-40 V DC | Suministrar el voltaje a las entradas analógicas y a una salida de voltaje auxiliar |
| PLATAFORMA OPTO 22 | | | |
| 3 | 1 | Controlador LCSX - PLUS | Proporcionar la inteligencia en un proceso de automatización. Está diseñado para funcionar con módulos de E/S y programación por medio de software |
| 4 | 1 | Brain B3000 | Sirve de interfase entre los módulos E/S y el controlador. Además cuenta con la capacidad de llevar a cabo funciones básicas como controles on-off, contadores, conversiones de temperatura entre otras. |
| 5 | 1 | Rack de 4 posiciones | Soportar y comunicar al brain y a los módulos E/S. La capacidad de un rack es 1 brain y 4 módulos E/S |
| 6 | 1 | Módulo entradas analógicas 4-20 mA (AIMA) | Es una interfaz entre las señales recibidas de los dispositivos de campo y señales lógicas usadas en computadores y controladores. |
| 7 | 1 | Módulo entradas para RDT (AIRTD) | Se encarga de la adquisición de datos de sensores de temperatura tipo RTD. |
| 8 | 1 | Módulo de entradas de pulsos (IDC5-Q) | Se encarga de la adquisición de pulsos para realizar conteo o determinar la frecuencia. |
| 9 | 1 | Módulo de salidas AC (OAC5) | Posee cuatro canales, los cuales funcionan como interruptores de AC |

El montaje de los elementos se realizó teniendo en cuenta que la función principal sería la recolección de datos por parte de los patrones de calibración en las EDS- GNV, por lo cual debería poseer características de movilidad y fácil transporte.

Para dar movilidad al sistema, se realizó el montaje de los elementos dentro de una maleta acondicionada específicamente para esta función, la cual brinda protección a los elementos que la constituyen.

Figura 38. Montaje del sistema de adquisición y control de datos



Conexiones del sistema de adquisición de datos: las conexiones del sistema de adquisición de datos fueron llevadas a un panel de operación, el cual está dividido en tres secciones:

- Entrada y salida
- Comunicación digital
- Alimentación interna y externa

La tabla 18 contiene cada una de las secciones con sus respectivas conexiones y funciones.

Tabla 18. Conexiones Sistema de adquisición de datos

| SECCIÓN | CONEXIONES |
|---------------------------------------|--|
| Entrada / Salida | 2 Entradas de corriente (4-20 mA) |
| | 2 Entradas para RTD |
| | 4 Entradas para frecuencia (hasta 5 kHz - 5 VDC) |
| | 4 Salidas digitales (110 V AC) |
| Comunicación digital | 1 Puerto Para comunicación con PC |
| | 2 Puertos de Comunicación RS-232/RS-485 |
| Alimentación interna y externa | Alimentación interna 110V AC |
| | Alimentación externa 5V DC |

En la figura 39 se muestra el montaje final del sistema de adquisición de datos.

Figura 39. Sistema portátil de Adquisición de datos y control OPTO 22



4.6 DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS, PLANTILLAS DE CÁLCULO Y ADQUISICIÓN DE DATOS

La verificación de surtidores para GNV consiste en la comparación de la indicación dada por el surtidor con respecto a un patrón de referencia (bien sea con un patrón gravimétrico o con un medidor másico actuando como patrón de referencia). A partir de la comparación se determina el error y el factor de corrección correspondiente para el sistema de medición evaluado.

A continuación se realizará una descripción de los aspectos más relevantes del procedimiento de verificación de surtidores de GNV, incluyendo lo relacionado con la seguridad tanto de la infraestructura como del personal.

Todas las actividades involucradas dentro de la verificación de surtidores (acciones preliminares, calibración), son descritas en el procedimiento técnico de calibración, el cual hace parte del Manual de Procedimientos Técnicos en el sistema de calidad del CDT de GAS.

4.6.1 Procedimientos. Las actividades descritas en el procedimiento de verificación de surtidores para GNV, incluyen:

- Especificación de las medidas de seguridad mínimas para la ejecución de las verificaciones.
- Actividades preliminares, las cuales permiten la ejecución correcta de las pruebas.
- Descripción detallada de los procedimientos para la ejecución de pruebas empleando los dos métodos: gravimétrico, comparación con medidor másico.

a. Seguridad: debido al riesgo existente en la manipulación de gases combustibles contenidos a alta presión, es necesario respetar unas estrictas medidas de seguridad que garanticen la integridad tanto de los elementos como del personal que ejecuta las verificaciones a los surtidores. A continuación se presentan algunas de las medidas de seguridad sugeridas, vale la pena resaltar que en cuestión de seguridad es posible considerar cualquier actividad preventiva adicional tendiente a garantizar este aspecto.

- Leer y entender todos los requerimientos de seguridad aplicables a las EDS-GNV.
- Informar al personal de la EDS los requerimientos de la inspección solicitando un permiso de trabajo al responsable.
- Conocer los procedimientos de emergencia
- Ubicar en un lugar accesible un extintor con carga vigente y un kit para primeros auxilios.
- Localizar en el sistema de emergencia de la EDS el interruptor de paro por emergencia.
- Verificar el sitio de verificación cuidadosamente, detectando y asegurando las áreas que representen peligro durante la ejecución de las actividades.
- Usar el equipo de protección personal adecuado (calzado de seguridad, cinturón, guantes).
- Ubicar los elementos en su área correspondiente (distancia al surtidor) de acuerdo con la clasificación a la cual pertenece cada uno.
- Localizar conos de seguridad y señales de advertencia con el fin de establecer un área segura de trabajo, restringiendo el tránsito tanto de vehículos como de peatones.
- Realizar una verificación a las condiciones de los cilindros de prueba, las conexiones y las mangueras.

- Interrumpir la ejecución del procedimiento ante la presencia de cualquier anomalía que aumente el riesgo en la ejecución de las actividades.
- Detener el suministro de gas, si la presión excede los límites de seguridad permisible y/o se presentan fugas.
- Prohibir el uso de radios y celulares.
- Identificar un teléfono cercano para usar en caso de una emergencia. Es importante conocer los números de telefónicos de los bomberos y de la central de atención de emergencias de la empresa distribuidora de gas.

b. Acciones preliminares: antes de la realización de las pruebas al surtidor en verificación se deben ejecutar ciertas actividades, mediante las cuales se realiza la preparación tanto del área de trabajo (establecimiento del área de segura de trabajo) como de los equipos (verificaciones).

- Asegurar que los cuidados y recomendaciones para la seguridad se han cumplido satisfactoriamente.
- Ubicar los equipos en un lugar adecuado (área segura y área no segura), de acuerdo a la clasificación correspondiente de cada uno (Tabla 19).

Tabla 19. Ubicación de instalaciones eléctricas.⁹

| UBICACIÓN | DIVISIÓN | ÁREA CLASIFICADA |
|---------------------------------------|----------|--|
| Contenedores | 2 | Dentro de 10 pies (3 m) del contenedor |
| Area con equipos de compresión | | |
| Exteriores | 2 | A 15 pies (4.6 m) del equipo |
| Interiores | 2 | A 15 pies (4.6 m) del equipo |

⁹ Fuente: Nacional Fire Protection Association - 52-98, 4-12

| UBICACIÓN | DIVISIÓN | ÁREA CLASIFICADA |
|---|----------|--|
| Equipo dispensador | | |
| Exteriores | 1 | Dentro del dispensador |
| Exteriores | 2 | De 0 a 5 pies (1.5 m) del dispensador |
| Interiores | 1 | Dentro del dispensador |
| Interiores | 2 | Cuarto completo con ventilación adecuada |
| Exteriores | | |
| Descarga de las válvulas de alivio y venteo | 1 | 5 pies (1.5 m) del dispensador |
| | 2 | Mas de 5 pies (1.5 m) pero dentro de 15 pies (4.6 m) en cualquier dirección desde el punto de descarga |
| Válvulas, conexiones | Ninguna | Sin clasificar |

- Ubicar las fuentes de alimentación necesarias para los equipos y verificar que se encuentren en perfecto estado.
- Realizar las conexiones eléctricas necesarias para la adquisición de datos.
- Verificar la comunicación de los equipos con el PC.
- Tomar todos los datos pertinentes para diligenciar el formato de información general.
- Solicitar el análisis cromatográfico del gas natural recibido en la estación de servicio, el cual no debe tener mas de treinta (30) días de efectuado, con el fin de disponer del valor de densidad del gas. Cuando sea posible, obtener una muestra de gas para posterior análisis.
- Realizar la verificación del patrón empleado en la verificación, según sea el caso:

Patrón gravimétrico: ejecutar la verificación metrológica en campo para sistemas de pesaje, teniendo en cuenta el calentamiento previo requerido por el sistema.

Medidor másico de referencia: Realizar la verificación de medición en el medidor másico a cero caudal con alta presión (método patrón másico de referencia).

c. Procedimiento de verificación empleando el método gravimétrico. Los pasos descritos a continuación aplican para la ejecución de pruebas con el método gravimétrico, sin importar el procedimiento de llenado de cilindros empleado.

- Ubicar el cilindro de prueba sobre la balanza.
- Tarar la balanza con el peso de cilindro.
- Conectar la manguera de llenado del surtidor al cilindro de prueba.
- Verificar que el registro del surtidor marque cero.
- Abrir la válvula tres vías de la manguera de llenado para permitir el paso de gas hacia el cilindro hasta alcanzar el valor establecido según el procedimiento de llenado seleccionado.
- Cuando se alcanza la cantidad de gas definida, cerrar la válvula tres vías y ventear la manguera de llenado.
- Retirar la manguera del cilindro.
- Determinar y registrar el peso del cilindro y su contenido.
- Registrar el volumen de gas entregado indicado en el surtidor

d. Procedimiento de verificación empleando el método con patrón másico de referencia. Al igual que el procedimiento descrito anteriormente, el

método descrito a continuación aplica para la ejecución de pruebas empleando cualquier procedimiento de llenado de cilindros.

- Establecer el cero del medidor patrón tipo Coriolis.
- Conectar la manguera de llenado del surtidor al medidor patrón tipo Coriolis y este al cilindro receptor.
- Encender el surtidor.
- Verificar que el registro del surtidor marque cero.
- Abrir la válvula tres vías de la manguera de llenado para permitir el paso de gas hacia el cilindro hasta alcanzar el valor establecido según el procedimiento de llenado seleccionado.
- Cuando se alcanza la cantidad de gas definida, cerrar la válvula tres vías y ventear la manguera de llenado
- Retirar la manguera de llenado del cilindro.
- Determinar y registrar la masa de gas totalizada por el medidor tipo Coriolis.
- Registrar el volumen de gas entregado por el surtidor.

e. Ajuste del sistema de medición. Cuando es posible realizar el ajuste del sistema de medición por parte del personal que ejecuta las pruebas, se siguen los pasos descritos a continuación. De lo contrario los resultados de las pruebas se limitan a la realización de una verificación del sistema de medición.

- Determinar el error de medición para cada una de las pruebas ejecutadas.
- A partir de los errores de medición, establecer el factor de corrección al sistema de medición evaluado.
- Modificar en la configuración del sistema el valor correspondiente al factor de medición (MF, Meter Factor).
- Ejecutar nuevamente las pruebas sobre el mismo sistema, para comprobar su desempeño final.

4.6.2 Registro de información y Adquisición de datos. Con el objetivo de optimizar la recolección de información de las distintas pruebas realizadas en la verificación de surtidores de GNV, se elaboraron plantillas para el ingreso de estos datos. A continuación se realiza una breve descripción de cada una de las plantillas utilizadas en el proceso de verificación de surtidores:


a. Hojas de trabajo

Información general: la función de esta plantilla es la recolección de información general de la estación de servicio (Figura 40). Esta hoja está dividida en tres secciones de acuerdo al tipo de información:

- Información de tipo administrativo en la EDS, propietario, ubicación, etc.
- Información técnica: Surtidores, mangueras, sistema de compresión, etc.

- Información estadística: relacionada con la configuración de densidad en el surtidor.


Figura 40. Hoja de trabajo - Información General

| | | | |
|--|---|--|----------------------|
|  Corporación CDT de GAS <small>Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas</small> | CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS CORPORACIÓN Verificación - EDS | MANUAL DE PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS VARIOS | |
| | | Res: 00 | FTM/P-#1 Hoja 1/4 |
| INFORMACIÓN GENERAL | | | |
| Pilot N° _____ | | Fecha _____ | |
| Datos - EDS | | | |
| Nombre EDS _____ | Propietario _____ | | |
| Ciudad _____ | Estado _____ | | |
| Dirección _____ | Teléfono _____ | | |
| Funcionario _____ | Cargo _____ | | |
| e-mail _____ | | | |
| Información técnica | | | |
| Número de surtidores _____ | Mangueras por surtidor _____ | | |
| Tipo de surtidor | Marca _____ | | |
| | Referencia _____ | | |
| Sistema de medición (medidor másico) | Marca _____ | | |
| | Referencia _____ | | |
| Densidad | | | |
| Valor actual | Densidad _____ | Fecha _____ | |
| Últimos valores registrados | Densidad 1 _____ [] | Fecha 1 _____ | |
| | Densidad 2 _____ [] | Fecha 2 _____ | |
| | Densidad 3 _____ [] | Fecha 3 _____ | |
| | Densidad 4 _____ [] | Fecha 4 _____ | |
| Realizó _____ Revisó _____ Aprobó _____ | | | |

Datos de prueba: en esta hoja de trabajo se recolecta la información necesaria para realizar los cálculos del error de medición del sistema con respecto a

patrón seleccionado (Figura 41), la utilización de esta hoja se realiza indistintamente del procedimiento de llenado seleccionado.

Figura 41. Hoja de trabajo - Datos de prueba

| | | | | | | |
|---|---|------------------------------|--|-----------------|--------------------------|---|
|  | CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS CORPORACIÓN Verificación - EDS | | MANUAL DE PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS VARIOS FTMPV-##1 Reu: 00 Hoja 3/4 | | | |
| | WORKSHEET | | | | | |
| EDS | Identificación-Piloto _____ | Identificación-Pruebas _____ | | | | |
| | Fecha (dd/mm/aa) _____ | Hora inicio _____ | | | | |
| | Dispensador: _____ | Modelo: _____ | | N° serie: _____ | | |
| | Medidor másico: _____ | Modelo: _____ | | N° serie: _____ | | |
| | Configuración Surtidor _____ | Densidad _____ [] | | MF: _____ | | |
| Verificación | Método de Verificación | | Procedimiento de Llenado | | | |
| | Patrón Gravimétrico <input type="checkbox"/> | | Llenado Parcial 1 (P1) - 3 Etapas | | <input type="checkbox"/> | |
| | Patrón Másico <input type="checkbox"/> | | Llenado Parcial 2 (P2) - 2 Etapas | | <input type="checkbox"/> | |
| | Llenado Normal (N) - 1 Etapa | | <input type="checkbox"/> | | | |
| Número de prueba | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Descripción [Proced/Etapa] | | | | | | |
| Patrón | Datos Patrón de Verificación 1: | | | | | |
| | Lectura inicial [kg] | | | | | |
| | Lectura final [kg] | | | | | |
| | Datos Patrón de Verificación 2: | | | | | |
| | Lectura inicial [kg] | | | | | |
| | Lectura final [kg] | | | | | |
| Surtidor | Datos Surtidor | | | | | |
| | Lectura de Volumen [m ³] | | | | | |
| | Precio [\$] | | | | | |
| | Tiempo de carga [s] | | | | | |
| | P. Máx sistema de llenado [bar] | | | | | |
| | Tiempo de carga a Qmax (0,5 a 1 kg) [s] | | | | | |
| Observaciones _____ | | | | | | |
| _____ | | | | | | |
| _____ | | | | | | |
| Realizó _____ | | Revisó _____ | | Aprobó _____ | | |

b. Plantillas de adquisición de datos

Sistema de adquisición de datos: adicional al ingreso de datos por medio de las plantillas anteriores, se realiza un monitoreo y registro continuo de las variables implicadas en el proceso como la presión, temperatura del gas, caudal másico entre otras.

El monitoreo de variables se realiza por medio del software OPTO DISPLAY el cual hace parte del sistema de adquisición de datos OPTO 22 descrito anteriormente. Este software proporciona una interfase gráfica en donde el operador puede establecer parámetros para la calibración y monitorear cualquier variable perteneciente al proceso.

La interfaz gráfica está compuesta por una serie de ventanas donde cada una tiene una función específica.

- En la ventana inicial de *Ingreso de Datos* (Figura 42) se establecen los parámetros para la verificación. Entre los cuales están: el método de verificación, el procedimiento de llenado de los cilindros y el nombre del archivo donde se almacenarán los datos de la prueba.

Figura 42. Plantilla Ingreso de Datos

INGRESO DE DATOS

Corporación CDT de GAS
Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS

CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN METROLÓGICA
DE SURTIDORES DE GNV

INGRESO DE DATOS

Selección del método de verificación

- Patrón gravimétrico
- Patrón másico de referencia
- Ambos métodos

Selección del procedimiento de llenado de los cilindros

- Llenado parcial 1
- Llenado parcial 2
- Llenado normal

Nombre del archivo para los datos:
EDS-ABANZOQUE-C2

- *Ventana de monitoreo*, en ella se observan las diferentes variables implicadas en el proceso de verificación. La información mostrada depende del método seleccionado, para lo cual existen tres ventanas diferentes de monitoreo: para patrón gravimétrico (Figura 43), para patrón másico (Figura 44) y para los dos patrones (Figura 45), cuando estos son usados en serie.

De manera general, cada una de estas ventanas muestra información relacionada con: presión, caudal, temperatura e indicación de cada uno de los patrones.

Figura 43. Ventana de monitoreo para patrón gravimétrico

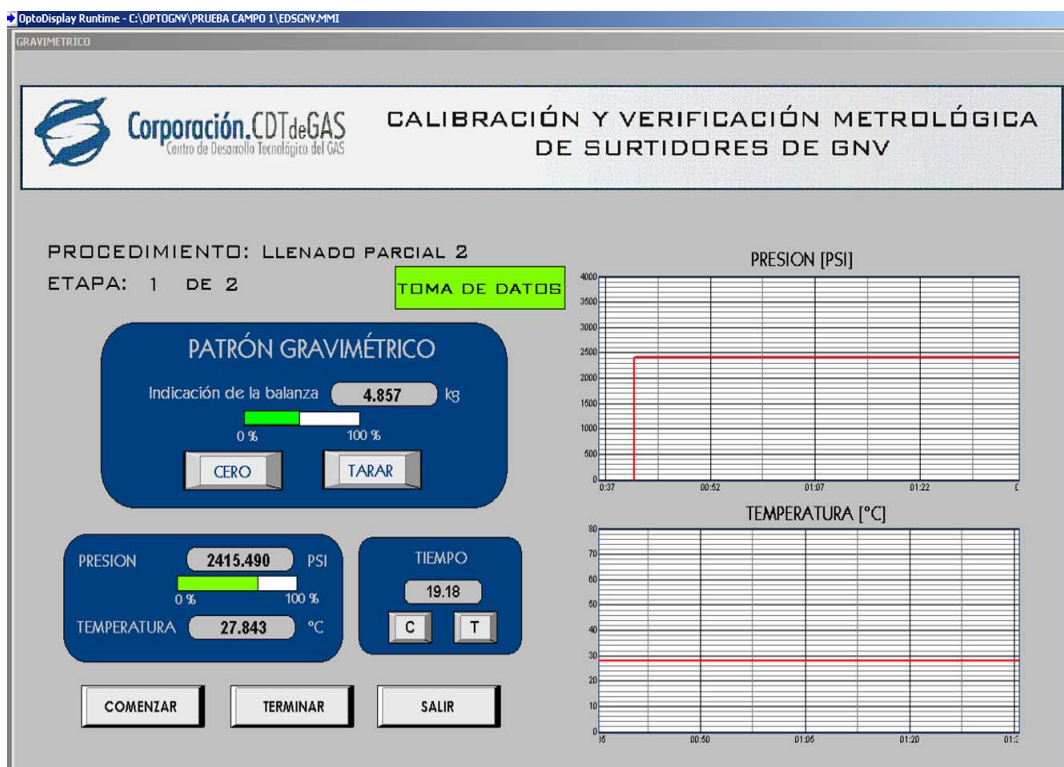
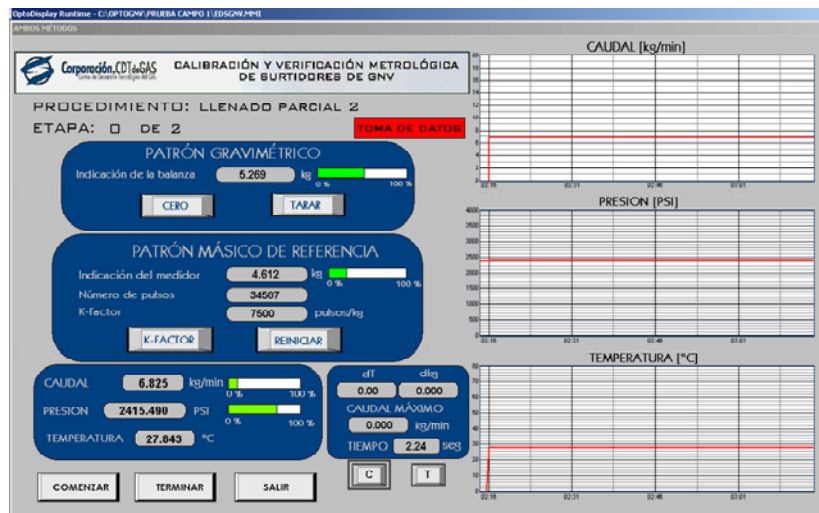


Figura 44. Ventana de monitoreo para patrón másico de referencia



Figura 45. Ventana de monitoreo para el empleo de dos patrones en serie



4.6.3 Plantillas de cálculo. Posterior a la recolección de información es necesario realizar el procesamiento de la misma, de esta manera se obtienen los resultados que serán analizados más adelante. Para lo cual se desarrollo una plantilla que integra el cálculo de error con la estimación de la incertidumbre.

La plantilla desarrollada realiza el procesamiento de la información ingresada a ella de manera automática, permitiendo realizar mediante macros los cálculos necesarios para establecer tanto el error (Figura 46) como el valor de incertidumbre asociado a cada prueba (Figura 47).

Figura 46. Detalle de la plantilla de error

| CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS CORPORACION | | | | | | | | | | MANUAL DE PROCEDIM | |
|--|-----------------|----------|-------------------|-----------------|---------------|------------------------|----------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|--------|
| CALIBRACIÓN - MEDIDORES MÁSCOS | | | | | | | | | | Rev: 00 | |
| PLANTILLA DE CÁLCULO # 1 | | | | | | | | | | | |
| Identificación - Pruebas | | | | | | | | | | Fecha: | |
| Masa corregida | Medidor máscico | | Surtidor | | | | Cálculos | | | Resultados Patrón Gravi | |
| | Masa inicio | Masa fin | Volumen entregado | Tiempo de carga | P máx-sistema | Tiempo de carga a Qmáx | Qmax | Volumen Balanza | Volumen Med máscico | Error Indic. de Volumen-Gravimétrico | U |
| kg | kg | kg | m ³ | s | bar | s | kg/min | m ³ | m ³ | % | |
| 8,550 | 0,000 | 8,300 | 10,01 | 180,0 | 200,0 | 30,0 | 2,0 | 9,78 | 9,50 | 2,32 | 0,741 |
| 8,620 | 0,000 | 8,530 | 10,02 | 178,0 | 200,0 | 32,0 | 1,9 | 9,86 | 9,76 | 1,59 | 0,423 |
| 8,584 | 0,000 | 8,600 | 10,00 | 165,0 | 200,0 | 28,0 | 2,1 | 9,82 | 9,84 | 1,82 | 0,965 |
| 8,584 | | 8,477 | 10,01 | 174,333 | 200,0 | 30,0 | 2,0 | 9,82 | 9,70 | 1,91 | 0,865 |
| 0,035 | | 0,157 | 0,01 | 8,145 | 0,0 | 2,0 | 0,1 | 0,04 | 0,18 | 0,37 | Calcul |
| 0,020 | | 0,091 | 0,01 | 4,702 | 0,0 | 1,2 | 0,1 | 0,02 | 0,10 | 0,22 | Calcul |
| 5,000 | 0,000 | 5,000 | 10,010 | 180,000 | 200,0 | 30,0 | 2,0 | 5,72 | 5,72 | 74,97 | |
| 5,005 | 0,000 | 5,020 | 10,020 | 178,000 | 200,0 | 32,0 | 1,9 | 5,73 | 5,74 | 74,97 | |
| 5,250 | 0,000 | 5,030 | 10,000 | 165,000 | 200,0 | 28,0 | 2,1 | 6,01 | 5,76 | 66,48 | |
| 5,085 | | 5,017 | 10,010 | 174,333 | 200,0 | 30,0 | 2,0 | 5,82 | 5,74 | 72,14 | |
| 0,143 | | 0,015 | 0,010 | 8,145 | 0,0 | 2,0 | 0,1 | 0,16 | 0,02 | 4,91 | |
| 0,083 | | 0,009 | 0,006 | 4,702 | 0,0 | 1,2 | 0,1 | 0,09 | 0,01 | 2,83 | Calcul |

Figura 47. Detalle de la plantilla de incertidumbre

| INCERTIDUMBRE DEL ERROR EN LA INDICACIÓN DE MASA | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------|------|
| Nº | Magnitud de entrada Xi Fuente de Incertidumbre | Abrev | Valor Estimado xi | Fuente de Informacion | Incetidumbre Original - U | Tipo, Distribución | Incetidumbre es | |
| 1 | masa patrón | Mp | kg | | | | | 0,00 |
| | Resolución | XXXXX | XXXXX | Escala | 0,001 kg | B rectangular | | 0,00 |
| | Calibración | XXXXX | XXXXX | Certificado de calibración | 0,00115 kg | B normal K=2 | | 0,00 |
| | Oscilación | XXXXX | XXXXX | Oscilación adm del fluido | 0,002 kg | B rectangular | | 0,00 |
| 2 | Volumen surtidor | Vs | m ³ | | | | | 0,00 |
| | Resolución | XXXXX | XXXXX | Escala | 0,01 m3 | B rectangular | | 0,00 |

5. ASEGURAMIENTO METROLÓGICO DE LOS PATRONES

La verificación metrológica y calibración de surtidores de GNV está basada en el uso de dos métodos: El método gravimétrico que utiliza como patrón de referencia una balanza y el de comparación directa contra un patrón másico de referencia.

Los patrones adquiridos para realizar la verificación metrológica a los surtidores de GNV por su calidad de patrones viajeros, están sometidos a condiciones diferentes respecto a las condiciones de calibración, lo cual puede afectar sus cualidades metrológicas. Por esta razón, requieren verificaciones periódicas con el fin de mantener su desempeño metrológico dentro de las tolerancias establecidas para cada patrón.

El sistema de calidad de la Corporación CDT de Gas, en el manual de equipos, establece la verificación periódica de los instrumentos de medición con el fin de mantener sus características metrológicas dentro de las tolerancias establecidas.

PATRÓN GRAVIMÉTRICO. Los instrumentos de pesaje son equipos que dependiendo de sus características requieren cuidados específicos. El objetivo de estos cuidados es evitar cualquier variación en las características metrológicas del instrumento.

Existen factores externos que pueden afectar el desempeño metrológico del instrumento, los cuales se muestran a continuación:

- Vibraciones
- Movimientos fuertes
- Cambios extremos de temperatura
- Humedad
- Esfuerzos mecánicos sobre el instrumento
- Traslado del instrumento del lugar de calibración

Para garantizar el desempeño metrológico del instrumento se debe implementar un programa periódico de verificaciones.

PATRÓN MÁSCICO DE REFERENCIA. Los medidores de caudal requieren ciertas especificaciones de montaje y utilización con el objeto de preservar sus cualidades metrológicas. El desempeño metrológico de un medidor puede resultar afectado si se somete a alguno de los siguientes factores:

- Vibraciones
- Variaciones extremas de las condiciones ambientales (temperatura y presión).
- Humedad
- Inestabilidad de la alimentación eléctrica
- Esfuerzos mecánicos sobre el medidor
- Variaciones del caudal
- Traslado frecuente del instrumento

Para asegurar las mediciones de los instrumentos se implementaron facilidades para la calibración y verificación metrológica en las instalaciones del laboratorio de calibración y ensayos de la Corporación CDT de GAS.

A continuación se dará una descripción general del desarrollo de cada uno de los patrones de calibración, indicando la normativa aplicable, los equipos utilizados, las facilidades desarrolladas y los procedimientos implementados. Finalmente se presentan los resultados particulares obtenidos para los patrones empleados en la verificación metrológica y calibración de surtidores para GNV.

Las facilidades desarrolladas permiten dentro de su alcance, realizar la calibración de medidores de flujo másico y la calibración de instrumentos de pesaje, sin restringirse únicamente a los elementos adquiridos para el desarrollo de las pruebas de calibración en surtidores para GNV.

5.1 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN METROLÓGICA DE INSTRUMENTOS DE PESAJE

La calibración de instrumentos de pesaje (básculas y balanzas) consiste en la determinación del error de indicación del instrumento cuando se somete a diferentes cargas de prueba. El error es la diferencia entre la indicación del instrumento y el valor correspondiente a la carga de prueba la cual se considera como el valor verdadero.

Las especificaciones de los equipos, la descripción de las pruebas y los modelos matemáticos aplicados para el análisis de resultados, fueron incluidos dentro del manual de procedimientos técnicos de la Corporación CDT de Gas.

5.1.1 Normas. Entre las diferentes fuentes bibliográficas encontradas a nivel internacional con respecto a la calibración de sistemas de pesaje, se han

adoptado como referencia para el desarrollo del procedimiento las recomendaciones publicadas por OIML, por tratarse de recomendaciones enfocadas hacia metrología legal.

Las recomendaciones mencionadas están identificadas como: OIML R76 para instrumentos de pesaje y OIML R111 para masas. A continuación se presenta una descripción de cada una de ellas.

- *OIML R76 (Instrumentos de pesaje no automáticos - Requerimientos técnicos y metrológicos - Pruebas - 1992)*: Esta recomendación especifica los requerimientos técnicos y metrológicos para instrumentos de pesaje no automáticos sujetos a controles metrológicos oficiales. Los requerimientos aplican a los instrumentos independientemente del principio de medición. También especifica las pruebas que deben realizarse para la calibración y verificación metrológica de instrumentos de pesaje.

El equivalente nacional para la OIML R76 es la NTC 2031 (Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático - Requisitos Metrológicos y Técnicos) publicada por ICONTEC.

- *OIML R111 (Pesas de clases E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 y M3 - 2004)*: Esta recomendación contiene los requerimientos técnicos y metrológicos para masas utilizadas en la verificación de instrumentos de pesaje, la verificación o calibración de masas. También especifica las pruebas que deben realizarse para la calibración y verificación metrológica de masas.

El equivalente nacional de la recomendación R111 es la NTC 1848 (Pesas de Precisión E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3) publicada por ICONTEC.

a. Definiciones

- Instrumento de pesaje no automático: Instrumentos que requieren la intervención de un operador durante el proceso de pesaje.
- Escala de verificación (e): Valor, expresado en unidades de masa, usado para la clasificación y verificación de un instrumento. Representa la exactitud absoluta.
- Número de intervalo de escala de verificación: Cociente de la máxima capacidad y el intervalo de escala de verificación, representa la exactitud relativa y se expresa matemáticamente como:

$$n = \text{Max}/e$$

- Capacidad mínima: Valor de la carga debajo del cual los resultados están sujetos a un excesivo error relativo

b. Clasificación:

Instrumentos de pesaje: Los instrumentos de pesaje según OIML R76, son clasificados de acuerdo a la escala de verificación, el número de intervalos de escala de verificación y la mínima capacidad.

Tabla 20. Clasificación de instrumentos de pesaje no automáticos

| CLASE DE EXACTITUD | INTERVALO DE ESCALA DE VERIFICACIÓN, e | NÚMERO DE INTERVALOS DE ESCALA DE VERIFICACIÓN $n = \text{Max}/e$ | | CAPACIDAD MÍNIMA |
|----------------------|--|--|---------|------------------|
| | | Mínimo | Máximo | |
| Especial I | $0.001g \leq e$ | 50 000 | ----- | 100 e |
| Alta II | $0.001 g \leq e \leq 0.05 g$ | 100 | 100 000 | 20 e |
| | $0.1 g \leq e$ | 5 000 | 100 000 | 50 e |

| CLASE DE EXACTITUD | INTERVALO DE ESCALA DE VERIFICACIÓN, e | NÚMERO DE INTERVALOS DE ESCALA DE VERIFICACIÓN | | CAPACIDAD MÍNIMA |
|--------------------|--|--|--------|------------------|
| | | n = Max/e | | |
| Media | 0.1 g ≤ e ≤ 2 g | 100 | 10 000 | 20 e |
| III | 5 g ≤ e | 500 | 10 000 | 20 e |
| Ordinaria | 5 g ≤ e | 100 | 1 000 | 10 e |
| III | | | | |

Masas: La clasificación de las masas según OIML R111, es basada en el máximo error permisible como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 21. Máximos errores para masas según su clase ($\pm\delta m$ en mg)

| VALOR NOMINAL | CLASE | | | | | | | | |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| | E ₁ | E ₂ | F ₁ | F ₂ | M ₁ | M ₁₋₂ | M ₂ | M ₂₋₃ | M ₃ |
| 5000 kg | | | 25 000 | 80 000 | 250 000 | 500 000 | 800 000 | 1 600 000 | 2 500 000 |
| 2000 kg | | | 10 000 | 30 000 | 100 000 | 200 000 | 300 000 | 600 000 | 1 000 000 |
| 1000 kg | | 1 600 | 5 000 | 16 000 | 50 000 | 100 000 | 160 000 | 300 000 | 500 000 |
| 500 kg | | 800 | 2 500 | 8 000 | 25 000 | 50 000 | 80 000 | 160 000 | 250 000 |
| 200 kg | | 300 | 1 000 | 3 000 | 10 000 | 20 000 | 30 000 | 60 000 | 100 000 |
| 100 kg | | 160 | 500 | 1 600 | 5 000 | 10 000 | 16 000 | 30 000 | 50 000 |
| 50 kg | 25 | 80 | 250 | 800 | 2 500 | 5 000 | 8 000 | 16 000 | 25 000 |
| 20 kg | 10 | 30 | 100 | 300 | 1 000 | | 3 000 | | 10 000 |
| 10 kg | 5 | 16 | 50 | 160 | 500 | | 1 600 | | 5 000 |
| 5 kg | 2.5 | 8 | 25 | 80 | 250 | | 800 | | 2 500 |
| 2 kg | 1 | 3 | 10 | 30 | 100 | | 300 | | 1 000 |
| 1 kg | 0.5 | 1.6 | 5 | 16 | 50 | | 160 | | 500 |
| 500 g | 0.25 | 0.8 | 2.5 | 8 | 25 | | 80 | | 250 |
| 200 g | 0.1 | 0.3 | 1 | 3 | 10 | | 30 | | 100 |
| 100 g | 0.05 | 0.16 | 0.5 | 1.6 | 5 | | 16 | | 50 |
| 50 g | 0.03 | 0.1 | 0.3 | 1 | 3 | | 10 | | 30 |
| 20 g | 0.025 | 0.08 | 0.25 | 0.8 | 2.5 | | 8 | | 25 |
| 10 g | 0.02 | 0.06 | 0.2 | 0.6 | 2 | | 6 | | 20 |

| VALOR NOMINAL | CLASE | | | | | | | | |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| | E ₁ | E ₂ | F ₁ | F ₂ | M ₁ | M ₁₋₂ | M ₂ | M ₂₋₃ | M ₃ |
| 5 g | 0.016 | 0.05 | 0.16 | 0.5 | 1.6 | | 5 | | 16 |
| 2 g | 0.012 | 0.04 | 0.12 | 0.4 | 1.2 | | 4 | | 12 |
| 1 g | 0.01 | 0.03 | 0.1 | 0.3 | 1 | | 3 | | 10 |
| 500 mg | 0.008 | 0.025 | 0.08 | 0.25 | 0.8 | | 2.5 | | |
| 200 mg | 0.006 | 0.02 | 0.06 | 0.2 | 0.6 | | 2 | | |
| 100 mg | 0.005 | 0.016 | 0.05 | 0.16 | 0.5 | | 1.6 | | |
| 50 mg | 0.004 | 0.012 | 0.04 | 0.12 | 0.4 | | | | |
| 20 mg | 0.003 | 0.01 | 0.03 | 0.1 | 0.3 | | | | |
| 10 mg | 0.003 | 0.008 | 0.025 | 0.08 | 0.25 | | | | |
| 5 mg | 0.003 | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.2 | | | | |
| 2 mg | 0.003 | 0.006 | 0.02 | 0.06 | 0.2 | | | | |
| 1 mg | 0.003 | 0.006 | 0.02 | 0.06 | 0.2 | | | | |

5.1.2 Equipos. La calibración de instrumentos de pesaje requiere la utilización de masas patrón que cumplan con las especificaciones dadas en la OIML R111, la cantidad de masas debe ser suficiente para cubrir toda la capacidad de pesaje del instrumento.

Teniendo como objetivo la verificación metrológica en el laboratorio de la balanza adquirida para la calibración de surtidores, se adquirieron dos juegos de masas patrón, la clase y la cantidad de masas adquiridas se definió a partir de la resolución de indicación de la balanza y la cantidad máxima de gas pesado durante una prueba.

Adicionalmente el CDT de GAS cuenta con 250 kg de masas clase M1, mediante las cuales se puede ampliar el alcance de las calibraciones que pueden ser realizadas con los procedimientos desarrollados. La Tabla 22

muestra las especificaciones de las masas patrón con que se cuenta para la prestación de servicios de calibración a sistemas de pesaje.

Figura 48. Masas clase F1



Figura 49. Masas clase M1



Tabla 22. Masas patrón

| CLASE | NÚMERO DE MASAS | ALCANCE |
|-------|-------------------|-------------|
| F1 | Juego de 21 masas | 1mg a 1kg |
| F1 | Juego de 4 masas | 1 kg a 5 kg |
| M1 | 13 | 250 kg |

Cada uno de las masas posee certificado de calibración expedido por laboratorio acreditado y cuentan con trazabilidad al patrón nacional de masa.

5.1.3 Procedimientos y plantillas. En la calibración de instrumentos de pesaje, se realizan una serie de pruebas al instrumento con el fin de evaluar diferentes características metrológicas. Las pruebas descritas en el procedimiento desarrollado son:

- *Prueba de exactitud:* El objetivo de la prueba de exactitud es la determinación del error intrínseco de pesaje.
- *Prueba de repetibilidad:* El objetivo de esta prueba es evaluar la variabilidad de la indicación del instrumento.
- *Prueba de excentricidad de carga:* Esta prueba permite determinar el error del instrumento para diferentes posiciones de carga.
- *Prueba de movilidad:* Esta prueba permite determinar la respuesta del instrumento de pesaje a pequeñas variaciones de carga.
- *Prueba de tara:* El objetivo de esta prueba es determinar el error de indicación del instrumento cuando se utiliza un dispositivo de tara.
- *Prueba de variación de la indicación con el tiempo:* Esta prueba permite determinar la estabilidad de la indicación del instrumento cuando es sometido a una carga constante por un determinado tiempo.

- *Prueba de verificación en campo:* Esta prueba se realiza en campo y permite verificar que los errores expresados por el instrumento son menores que los máximos permitidos.

Cada una de las pruebas cuenta con su respectiva hoja de trabajo y plantilla de cálculo, en la figura 50 se muestra un ejemplo de las hojas de trabajo y de las plantillas.

Figura 50. Plantillas de recolección de datos y cálculo

The figure displays three overlapping forms from the 'MANUAL DE PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS VARIOS' (FTM/P #01) for 'CALIBRACIÓN - BALANZAS' (Hoja 00, Hoja 2/8).

The top form is the cover page. The middle form is titled 'PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN - PRUEBA DE REPETIBILIDAD'. The bottom form is titled 'PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN - PRUEBA DE EXACTITUD' and contains the following sections:

- DATOS GENERALES:** N° de Serial, Identificación de la muestra, FECHA.
- I. INFORMACIÓN DEL CLIENTE:** Cliente, Dirección, Contacto, Ciudad.
- II. INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE PESAJE:** Instrumento, Fabricante, Plataforma, Modelo, Serie, Dispositivo Indicador, Clase de exactitud, Carga mínima, Carga máxima.
- III. FACTORES DE LA CALIBRACIÓN:** División de escala, d (g), Escala de verificación, e (g) ($d < e \leq 10d$), Carga baja (A), Carga media (A), Carga alta (A).
- IV. INFORMACIÓN DEL PATRÓN DE CALIBRACIÓN:** Pecas, Clase de exactitud, Rango de peso, Número de certificado, Fecha del certificado.
- Observaciones:** Text area for notes.
- Realizó:** Signature line.
- Revisó:** Signature line.
- Aprobó:** Signature line.

On the right side of the bottom form, there is a table for 'CARGA ALTA, Kg' with columns for 'INDICACIÓN Kg', 'AUMENTO g', and 'INDICACIÓN CORREGIDA g'. Below this is a table for 'ERROR' with columns for 'ERROR g' and 'ERROR PERMISIBLE'. A 'CUMPLE' checkbox is also present.

5.2 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE MEDIDORES MÁSCOS

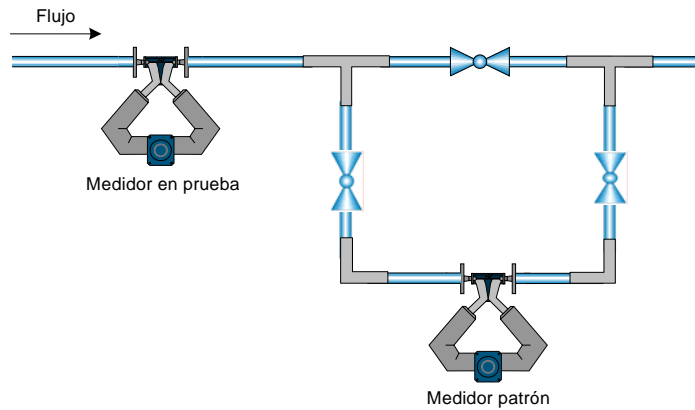
La calibración de medidores máscos consiste en la determinación del error en la indicación del instrumento a diferentes caudales. El error (representado en el Meter Factor - MF) se obtiene a partir de la comparación entre la indicación dada por el medidor con respecto a un patrón de referencia.

Las especificaciones de los equipos utilizados en la calibración, la descripción de las pruebas y los modelos matemáticos aplicados para el análisis de resultados, fueron incluidos dentro del manual de procedimientos técnicos de la Corporación CDT de Gas.

5.2.1 Sistemas de calibración de medidores máscos. Para realizar la calibración existen diferentes sistemas, los cuales emplean diferentes patrones de referencia, entre los sistemas de calibración más empleados están: patrón máscico de referencia, patrón volumétrico y patrón gravimétrico, siendo este último el que presenta mayor exactitud.

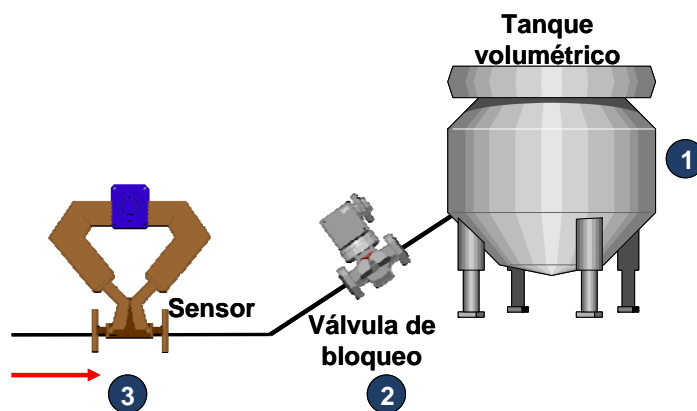
a. Sistema con patrón máscico de referencia: este sistema utiliza como patrón un medidor con tecnología similar al medidor en prueba, el medidor patrón es instalado en serie con el medidor en prueba. El método consiste en la realización de mediciones simultáneas totalizando la cantidad de fluido que pasa a través tanto del medidor patrón como del medidor en prueba. El medidor empleado como patrón debe poseer características metrológicas superiores (exactitud e incertidumbre), también debe contar con una cadena de trazabilidad definida.

Figura 51. Sistema con patrón de referencia



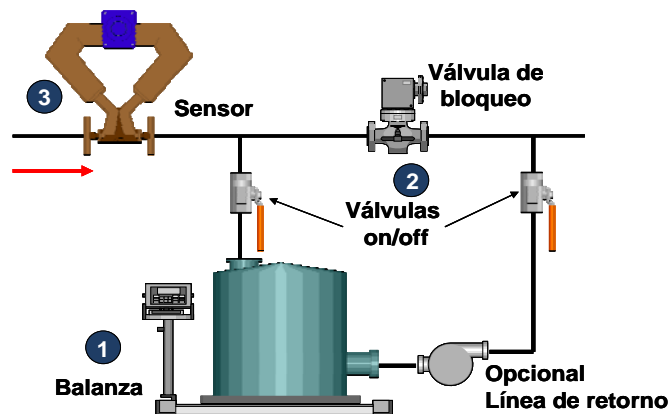
b. Sistema volumétrico: el patrón de referencia empleado en este sistema es un tanque, el cual es instalado en serie con el medidor en prueba permitiendo que el fluido que circula por el medidor llegue al patrón y de esta manera cuantificar el volumen total. Se requiere medir la densidad del fluido para comparar la indicación de masa del medidor con la indicación volumétrica del patrón. La densidad del fluido se determina por medio de tablas a partir de la temperatura o mediante medición directa.

Figura 52. Sistema volumétrico



c. *Sistema gravimétrico*: se emplea un sistema de pesaje (balanza, celdas de carga, etc.) para determinar la cantidad en masa de líquido (generalmente agua) que fluye a través del medidor. La principal ventaja de este sistema es que puede realizarse una calibración de masa directa del sistema de medición. Un sistema de este tipo puede ser utilizado en instalaciones para calibrar medidores tanto másicos como volumétricos.

Figura 53. Sistema gravimétrico



Según el principio de operación, el sistema de calibración gravimétrico se puede clasificar en dos, dependiendo del método de pesaje empleado:

Método de pesaje estático: el método consiste en determinar la cantidad de masa de líquido entregada durante un tiempo determinado donde la masa neta se deduce de la diferencia de la tara al inicio de la prueba y del pesaje después de realizar la colecta. Debido a que la entrega de líquido no es constante, se recomienda el uso de un diverter para garantizar la estabilidad del flujo. Este método es el más utilizado por su alta exactitud.

Método de pesaje dinámico: este método, al igual que el anterior, consiste en determinar la cantidad de masa de líquido entregada durante un tiempo determinado pero con la diferencia que la entrega de fluido es constante, garantizando de esta manera un flujo estable. La masa neta recolectada se deduce de la diferencia de masa entre dos instantes de tiempo previamente determinados. La desventaja de este método radica en los efectos dinámicos que pueden producirse durante el proceso de calibración, los cuales se incrementan si la resolución del instrumento de pesaje es alta.

Para la calibración de medidores máxicos en las instalaciones del laboratorio se seleccionó el sistema gravimétrico fundamentado en las siguientes razones:

- Proporciona una calibración de masa directa.
- Puede ser utilizado para calibrar medidores tanto máxicos como volumétricos.
- En el laboratorio se cuenta con una balanza de gran exactitud y capacidad, lo cual reduce notablemente los costos del banco.
- Debido a las características metrológicas del instrumento de pesaje (alta resolución) se seleccionó el método de pesaje estático para realizar la calibración del medidor patrón y así evitar los efectos dinámicos que pueden generarse con el otro método.

5.2.2 Normas. El método gravimétrico para calibración de medidores máxicos y volumétricos es descrito ampliamente por diferentes normas y recomendaciones internacionales. Para el desarrollo del sistema de

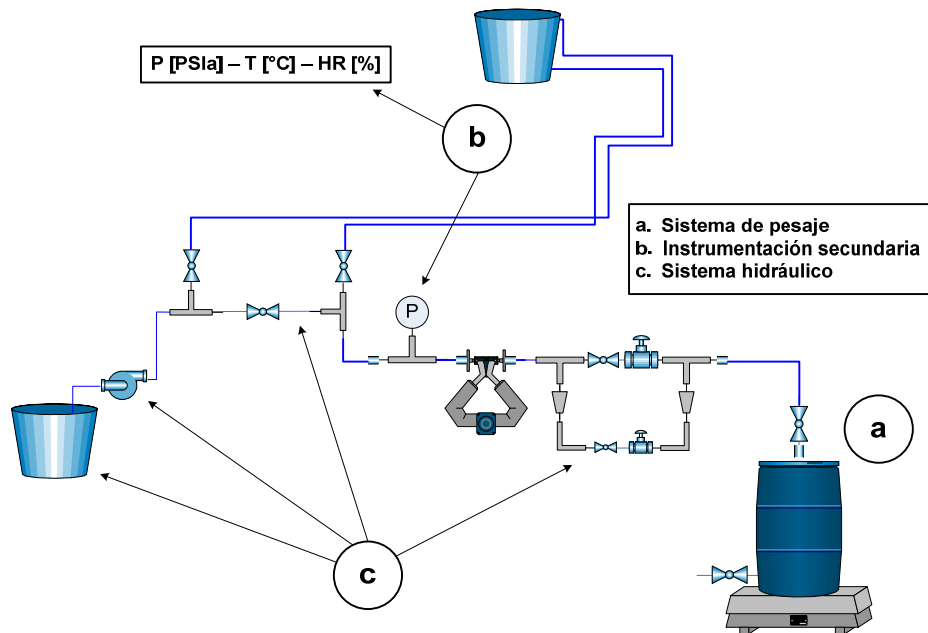
calibración en el CDT de GAS se empleo como referencia las publicaciones hechas por ISO y OIML al respecto. Las referencias son:

- *ISO 4185 (Medición de flujo de líquidos en conductos cerrados – Método de pesaje - 1985):* Esta norma internacional especifica un método de medición de caudal en conductos cerrados por medio de la medición de la cantidad de masa entregada dentro de un tanque en un intervalo de tiempo conocido. Debido a su alto potencial de exactitud, este método es comúnmente utilizado como un método primario para la validación de otros métodos o calibración de dispositivos para la medición de caudal másico o caudal volumétrico.
- *OIML R105 (Sistemas de medición directa de flujo másico para líquidos - 1993):* Esta recomendación especifica los requerimientos técnicos y metrológicos de sistemas diseñados para medición de caudal másico por el método gravimétrico. También especifica las pruebas que se deben ejecutar para una calibración o verificación.

5.2.3 Infraestructura y equipos del banco de calibración gravimétrico. El banco de calibración gravimétrico esta conformado por un patrón (sistema de pesaje), instrumentación secundaria, sistema hidráulico, estructura de montaje y sistema de adquisición de datos, la figura 54 presenta un esquema con la disposición general del banco de calibración.

A continuación se presenta una descripción general de cada uno de los subsistemas que conforman el banco de calibración gravimétrico:

Figura 54. Diagrama general del banco de calibración gravimétrico



a. Instrumentación primaria o sistema de pesaje: el sistema de pesaje puede ser de cualquier tipo, mecánico o celda de carga; lo importante es que el instrumento proporcione la sensibilidad, exactitud y confiabilidad requerida.

El sistema de pesaje consta de una balanza electrónica, un tanque de pesaje y un dispositivo de control de flujo. A continuación se describe de manera general cada uno de los elementos:

Balanza electrónica: tiene resolución de 1 g y capacidad de 150 kg. Además, posee un indicador digital que permite comunicación con PC por medio de una interfase serial RS-232. El instrumento cuenta con certificado de calibración expedido por laboratorio acreditado por la SIC, contando de esta forma con trazabilidad a los patrones nacionales de masa.

Figura 55. Balanza electrónica



Tanque de pesaje: construido en plástico, su capacidad es de 150 litros. En este tanque se descarga el flujo para su pesaje en cada ciclo de medición.

Figura 56. Tanque de pesaje



Dispositivo de control de flujo: válvula que permite o restringe el paso de fluido al tanque de pesaje.

La norma internacional ISO 4185 recomienda la utilización de un diverter con el fin de asegurar una estabilidad en el caudal y de esta manera no afectar el caudal promedio de la prueba. Esto mismo se puede lograr con una válvula de bola o de globo (on-off) con tiempos de llenado más grandes y verificando que el tiempo de estabilización del caudal sea corto.

En base a lo anterior y para garantizar una buena repetibilidad del banco de calibración, se seleccionó una válvula solenoide tipo globo (on-off) (figura 57), la cual es controlada por un sistema de adquisición de datos y control. La válvula es normalmente cerrada, con voltaje de excitación de 110 V AC y diámetro 1”.

Figura 57. Dispositivo de control de flujo



b. Instrumentación secundaria: la instrumentación secundaria esta compuesta por los instrumentos requeridos para la medición de las condiciones ambientales, así como las condiciones del flujo, presión antes del medidor y temperatura.

A continuación se presentan las características generales y la descripción funcional de cada uno de los elementos que componen la instrumentación secundaria:

RTD fluido: debido a la diferencia de la fuerza de flotación entre las masas de calibración y el volumen del agua, la indicación del instrumento de pesaje debe ser corregida. La fuerza de flotación es función de la densidad del objeto pesado y de la densidad del aire. Para aplicar esta corrección, se debe determinar la temperatura del fluido de calibración para poder realizar las correcciones necesarias al valor de la densidad. Para obtener el valor de la temperatura del fluido se utiliza una RTD de platino PT-100 (Resistance Temperatura Detector).

Figura 58. RTD para la temperatura del fluido



Manómetro: para obtener resultados satisfactorios se debe mantener la tubería totalmente llena de fluido durante las pruebas y de esta manera evitar la presencia de burbujas de aire las cuales pueden ocasionar errores de medición considerables. Esto se puede lograr con un manómetro que permita un monitoreo constante de la cabeza de presión antes del medidor.

Figura 59. Manómetro



Condiciones ambientales: para la calibración de medidores máscos y volumétricos se requiere conocer las condiciones ambientales del lugar donde se realiza la calibración. La medición de estas variables las realizan los siguientes instrumentos:

Barómetro: la medición de la presión atmosférica es útil para realizar correcciones y observar su variación a lo largo de la prueba.

Figura 60. Barómetro



Higrómetro: la medición de la humedad relativa del aire ambiente es importante para realizar correcciones y observar su variación durante la prueba.

Figura 61. Higrómetro



RTD ambiente: al igual que los anteriores instrumentos, la medición de la temperatura ambiente es útil para realizar correcciones y observar su variación durante la prueba

Figura 62. RTD para la temperatura ambiente



Las características de los instrumentos empleados se describen en la tabla 23:

Tabla 23. Instrumentación secundaria

| INSTRUMENTO | FUNCIÓN | ALCANCE | RESOLUCIÓN | INCERTIDUMBRE |
|---------------------|------------------------|-----------------|-------------|---------------|
| RTD fluido | Temperatura del fluido | 18 - 40 °C | 0.04 °C | ±0.1 °C |
| Manómetro | Presión del fluido | 0 - 200 psi | 2 psi | ±0.36% |
| RTD Ambiente | Temperatura ambiente | 18 - 40°C | 0.04 °C | ±0.1 °C |
| Higrómetro | Humedad relativa | 0 - 100 % | 0,1% | ±3% |
| Barómetro | Presión atmosférica | 500 - 1200 mbar | 0,0077 mbar | ± 0,4 mbar |

c. **Sistema hidráulico:** para el abastecimiento y transporte del fluido de calibración se cuenta con tanques para almacenamiento de agua, una bomba hidráulica y tuberías. A continuación se presenta una descripción general de cada uno de estos elementos:

Tanque de almacenamiento: Su función es mantener una disponibilidad constante del fluido de calibración durante las pruebas. En el banco de calibración encontramos un tanque que alimenta una bomba hidráulica y un segundo tanque el cual es utilizado para proporcionar bajos caudales (hasta 15 kg/min) y se encuentra ubicado en el techo del laboratorio. Cada tanque tiene una capacidad de 500 litros.

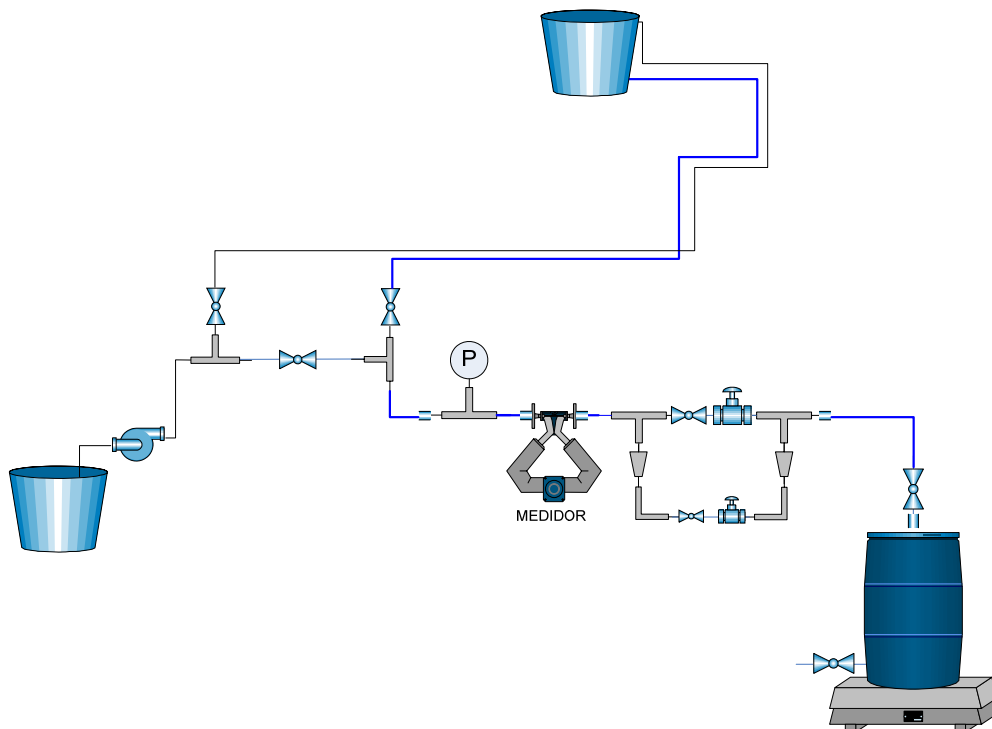
Figura 63. Tanques de almacenamiento



Tuberías: en el sistema encontramos tubería rígida de acero inoxidable y PVC y tubería flexible (mangueras). A continuación se describen las características de cada tubería:

PVC: el fluido de calibración es transportado desde los tanques de alimentación hacia el medidor por medio de la tubería de PVC. El circuito hidráulico de esta tubería se muestra a continuación:

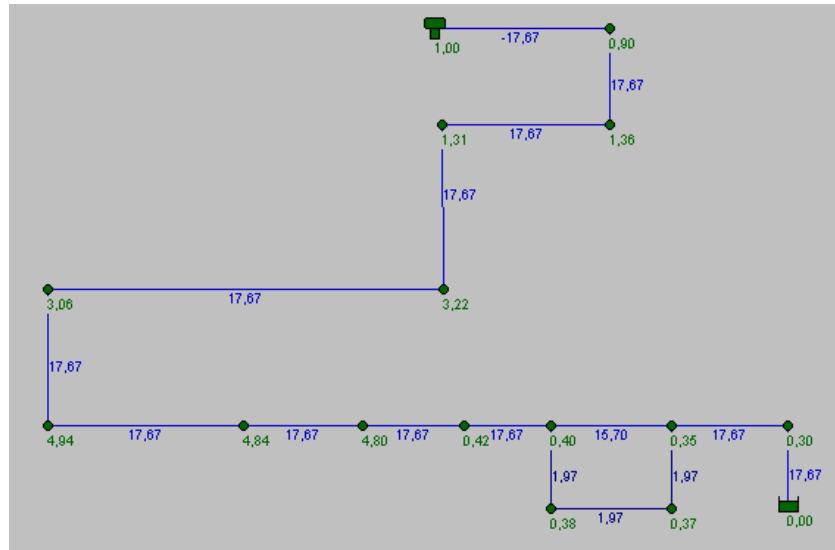
Figura 64. Circuito hidráulico de la tubería de PVC



El dimensionamiento de esta tubería se fundamentó en el tramo de red resaltado en color azul (Figura 64) para un requerimiento de caudal de 15 l/min y se realizó por medio del software de análisis de redes hidráulicas EPANET 2.0 como lo muestra la Figura 65.

A partir de los resultados obtenidos mediante EPANET 2.0, el diámetro de tubería seleccionado es 1".

Figura 65. Esquema de la red hidráulica en EPANET 2.0



Acero Inoxidable: la tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor deben estar adecuadamente ancladas y debe ofrecer la mayor rigidez posible para evitar que eventuales vibraciones del sistema sean transmitidas al medidor en prueba. Para este fin, se seleccionó una tubería de acero inoxidable. El dimensionamiento y montaje de esta tubería está basado en las recomendaciones para medidores de caudal máscicos¹⁰. Con el fin de garantizar que el perfil de velocidad del flujo que entra al medidor sea uniforme, los tramos rectos de los tubos aguas arriba y aguas abajo del medidor deben ser dimensionados siguiendo las especificaciones de norma de cada fabricante. En el caso que no haya información específica al respecto, debe ser adaptado un tramo recto de tubo mínimo de 10D aguas arriba y 5D aguas abajo; donde D es el diámetro interno del tubo de entrada al medidor. Las condiciones generales de montaje del medidor no deben ser alteradas durante el transcurso de una calibración.

¹⁰ Recomendación CMF de IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Brasil)

Figura 66. Montaje del medidor



Tubería Flexible: para conectar la tubería de acero y la tubería de PVC se utiliza tubería flexible o mangueras las cuales tienen un diámetro de 1" y resisten presiones hasta 200 psi. La tubería flexible posee un sistema de acoples rápidos que permiten agilizar la conexión y desconexión de la alimentación del fluido de calibración hacia el medidor.

Figura 67. Tubería flexible



Bomba hidráulica: este dispositivo cumple dos funciones: La primera función de la bomba es alimentar el tanque ubicado en el techo y la segunda función es suministrar altos caudales cuando sea necesario (hasta 40 l/min). La bomba tiene un caudal máximo de 100 l/min y un diámetro de descarga de 1”.

Figura 68. Bomba hidráulica

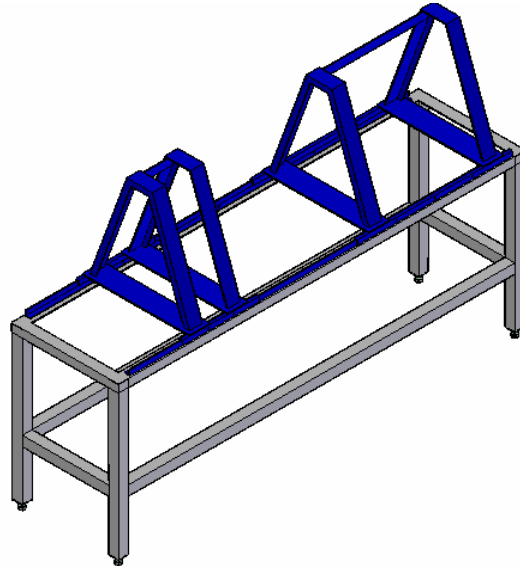


d. Estructura de montaje: con el objetivo de dar soporte a los instrumentos y proporcionar un fácil acceso a los diferentes dispositivos utilizados en las pruebas de calibración se diseñó y construyó una infraestructura física compuesta por una estructura soporte para el medidor, soporte para el sistema de pesaje y un sistema para el ajuste de caudal.

Soporte para el medidor: cualquier vibración o inestabilidad producida por el sistema no debe transmitirse al medidor. Por esta razón, el soporte del medidor en prueba debe contar con una estabilidad y rigidez adecuadas. Con el ánimo de lograr lo anterior se diseñó y construyó una estructura soporte (Figura 69) que permite el montaje de medidores de distintos tamaños

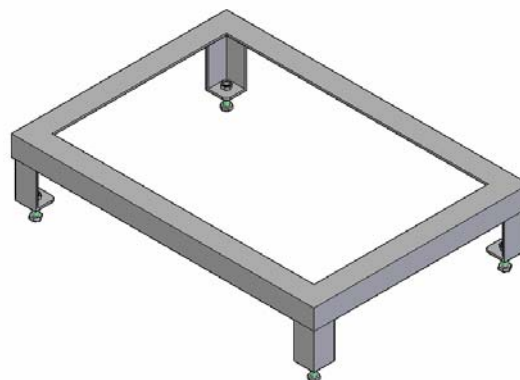
proporcionando flexibilidad al banco y de esta manera garantizar un correcto desempeño del medidor en prueba.

Figura 69. Soporte para el medidor



Soporte para el instrumento de pesaje: como su nombre lo indica, su función es la de soportar el dispositivo receptor de carga del instrumento de pesaje con el fin de proporcionar la estabilidad y altura adecuada al sistema de pesaje.

Figura 70. Soporte para el instrumento de pesaje



Sistema de ajuste de caudal:

Figura 71. Válvulas de regulación de caudal



La regulación de caudal se realiza por medio de un arreglo de válvulas ubicado aguas abajo del medidor. Cada válvula reguladora debe estar conectada con su respectiva válvula de bola con el fin de facilitar los procesos de ajuste. Las características principales de las válvulas se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Válvulas de regulación de caudal

| VÁLVULA | DIÁMETRO [pulg] | TIPO | MATERIAL |
|-----------|--------------------|------------|------------------|
| Bola | 1 | On-Off | Acero Inoxidable |
| Compuerta | 1 | Regulación | Acero Inoxidable |
| Bola | ½ | On-Off | Acero Inoxidable |
| Compuerta | ½ | Regulación | Acero Inoxidable |

e. Sistema de adquisición de datos: la variación constante de las variables implicadas en el proceso de calibración de medidores másicos como la presión atmosférica, la temperatura del fluido de calibración y ambiente, la humedad relativa entre otras, generan la necesidad de un monitoreo constante que permita mejorar el proceso de registro de información debido a que la recolección manual de datos lleva inherente errores atribuibles a factores humanos. Con el objetivo de disminuir estos errores, se utilizó un sistema de adquisición de datos el cual tiene como función el monitoreo y registro constante de las variables implicadas en el proceso de calibración. Las señales que maneja el sistema de adquisición de datos son:

Tabla 25. Señales del sistema de adquisición de datos

| TIPO DE SEÑAL | DESCRIPCIÓN |
|---------------|----------------------------------|
| DIGITAL | Entrada de pulsos (5 V DC) |
| | Salida digital (110 V AC) |
| | Comunicación serial RS-232 |
| ANALÓGICA | Entrada de corriente (4 - 20 mA) |
| | Entrada de sensores RTD |

Para la calibración de medidores másicos, el sistema de adquisición de datos cumple las siguientes funciones:

- **Medición de tiempo:** El sistema contiene un temporizador que se encarga de medir el tiempo de descarga dentro del tanque de pesaje.
- **Contador de pulsos:** Permite registrar los pulsos generados por el medidor en prueba, para posteriormente convertirlos a unidades de masa y así compararlos con la indicación del sistema de pesaje. La conversión de pulsos a masa se realiza por medio de un factor configurable en el medidor.

- Adquisición de señales analógicas: Permite la adquisición y análisis de variables como caudal, temperatura del fluido de calibración y temperatura ambiente.
- Adquisición de señales digitales: permite la comunicación con dispositivos como el barómetro y la balanza por medio de una interfase RS-232 y de esta manera mantener un monitoreo en tiempo real de las variables asociadas a estos equipos.
- Control sobre el flujo de calibración: este sistema me permite controlar por medio de una válvula solenoide (on-off), la cantidad de fluido descargado en el tanque de pesaje.

f. Montaje final del banco: el banco de calibración de medidores por el método gravimétrico implementado en las instalaciones de la Corporación CDT de Gas se muestra a continuación:


Figura 72. Banco de calibración de medidores máxicos



5.2.4 Procedimientos, plantillas y sistema de adquisición de datos y control.
Para la calibración de medidores máxicos en las instalaciones del laboratorio de metrología de fluidos de la Corporación CDT de Gas, se elaboró un

procedimiento técnico de calibración, el cual hace parte del manual de procedimientos técnicos del sistema de calidad de la Corporación CDT de Gas. Este procedimiento describe la metodología de calibración, los equipos utilizados y los parámetros que se deben evaluar en la calibración de medidores másicos por el método gravimétrico. El procedimiento cuenta además con las hojas de trabajo (Figura 73) desarrolladas para recopilar los datos de calibración.

Figura 73. Plantilla “Toma de datos”

| | | | | | | | | | |
|--|--|---|---|------------------------|---|---|---|---|---|
|  Corporación CDT de GAS <small>Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas</small> | CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS CORPORACIÓN | | MANUAL DE PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS VARIOS | | | | | | |
| | CALIBRACION - MEDIDORES MÁSICOS | | Reu: 00 | FT MVP-#01 Hoja 2/3 | | | | | |
| TOMA DE DATOS | | | | | | | | | |
| N° de producto | Identificación muestra | | | Fecha | | | | | |
| Número de prueba | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Q referencia [] | | | | | | | | | |
| Medidor en prueba | | | | | | | | | |
| masa inicial [] | | | | | | | | | |
| Masa final [] | | | | | | | | | |
| Corriente [] | | | | | | | | | |
| Presión [] | | | | | | | | | |
| Sistema de pesaje | | | | | | | | | |
| Masa Inicial [] | | | | | | | | | |
| Masa Final [] | | | | | | | | | |
| Temperatura de agua [] | | | | | | | | | |
| Tiempo [] | | | | | | | | | |
| Condiciones ambientales | | | | | | | | | |
| Presión atmosférica [] | | | | | | | | | |
| Humedad relativa [] | | | | | | | | | |
| Temperatura ambiente [] | | | | | | | | | |
| Observaciones _____ | | | | | | | | | |
| _____ | | | | | | | | | |
| Realizó _____ | Revisó _____ | | | Aprobó _____ | | | | | |

Sistema de adquisición de datos y control: el monitoreo de las variables que intervienen en la calibración de medidores másicos se realiza por intermedio de una interfase desarrollada en OPTO DISPLAY (entorno gráfico de OPTO 22). Esta interfase permite configurar los parámetros iniciales de calibración, observar el avance de la misma, verificar en tiempo real el comportamiento de las variables y controlar el funcionamiento de los actuadores (bomba y válvula solenoide) utilizados en la calibración.

La interfase gráfica está compuesta por una serie de ventanas con funciones específicas.

Ventana inicial “Calibración de medidores másicos” (Figura 74), en ella se establecen los datos del medidor a calibrar y los parámetros de la calibración como: número de caudales, repeticiones, cantidad de líquido de prueba.

Figura 74. Ventana inicial “Calibración de medidores másicos”

Corporación CDT de GAS
Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS

CALIBRACION DE MEDIDORES MÁSICOS

DATOS DEL MEDIDOR MÁSICO

| | | | |
|-----------------|----------|---------------|----------------|
| TIPO DE MEDIDOR | CORIOLIS | CAUDAL MÍNIMO | 1.800 kg/min |
| REFERENCIA | CNG 50 | CAUDAL MÁXIMO | 40.000 kg/min |
| IDENTIFICACIÓN | QL-002 | K - FACTOR | 7500 pulsos/kg |

PARÁMETROS DE LA CALIBRACIÓN

| | |
|--------------|---|
| CAUDALES | 6 |
| REPETICIONES | 3 |

CONSECUTIVO

CAL-COR-20-1

DATOS DE LA CALIBRACIÓN

| No | CAUDAL [kg/min] | MASA FINAL [kg] |
|----|-----------------|-----------------|
| 1 | 2.000 | 20.000 |
| 2 | 5.000 | 20.000 |
| 3 | 10.000 | 40.000 |
| 4 | 15.000 | 50.000 |
| 5 | 20.000 | 75.000 |
| 6 | 25.000 | 75.000 |

- Ventana de monitoreo de variables: en esta ventana se observan los valores en tiempo real de las variables implicadas en el proceso de calibración (Figura 75). Se observan valores de las condiciones atmosféricas (presión y temperatura), temperatura del fluido de calibración, valores del medidor (caudal, masa, pulsos), valores del sistema de pesaje entre otros. Por medio de esta ventana también se puede operar el dispositivo de control de flujo (válvula solenoide) y la bomba.

Figura 75. Ventana de monitoreo de variables

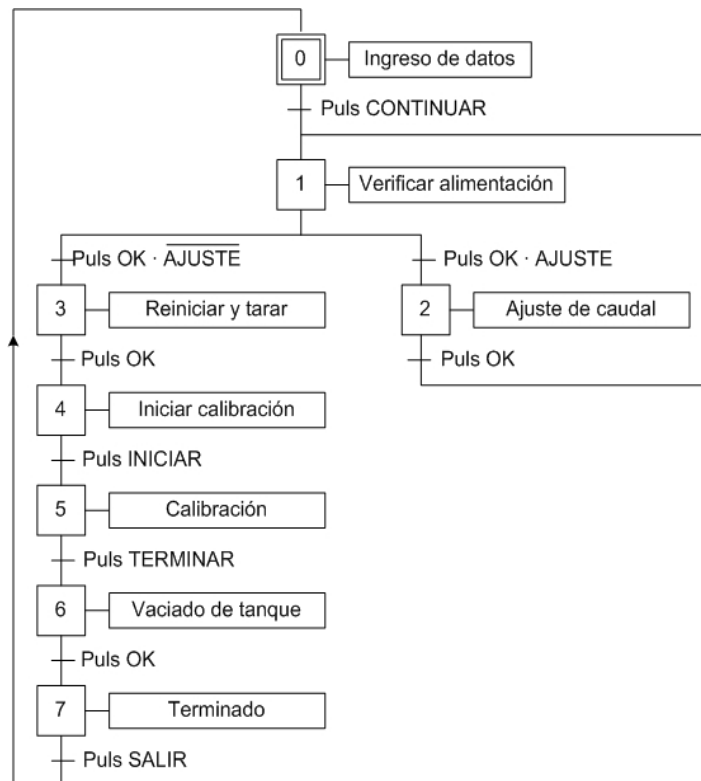


En la parte inferior derecha de esta ventana aparece una indicación del estado actual del proceso de calibración. También, en la parte inferior de la ventana aparece una indicación que muestra al operador la acción que se debe ejecutar.

Para describir las etapas del proceso de calibración de medidores máscos, se utilizó la metodología GRAFCET con la cual se puede representar de forma

gráfica la estructura secuencial de un proceso. El Grafcet del proceso de calibración se muestra en la Figura 76.

Figura 76. Grafcet del proceso de calibración de medidores másicos



5.3 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas a la infraestructura desarrollada y las verificaciones realizadas a los patrones que se utilizan en la calibración de surtidores de GNV.

5.3.1 Verificación del instrumento de pesaje. En la verificación metrológica al instrumento de pesaje se realiza la prueba de tara basada en el

procedimiento desarrollado y se verifica que los valores de los errores sean menores que los máximos permitidos.

Los datos de la verificación metrológica realizada al instrumento de pesaje antes y después de la prestación de un servicio se muestran en las Tablas 26 y 27:

Tabla 26. Verificación metrológica de la balanza antes de la prestación del servicio

| | | VALOR NOMINAL | CARGA CRECIENTE | | | CARGA DECRECIENTE | | |
|------------------|----|---------------|-----------------|-----------|---------|-------------------|-----------|---------|
| VALOR DE LA TARA | No | CARGA kg | INDICACIÓN kg | AUMENTO g | ERROR g | INDICACIÓN kg | AUMENTO g | ERROR g |
| 21,22 kg | 1 | 0 | 0,000 | 0,5 | 0,0 | 0,000 | 0,8 | -0,3 |
| | 2 | 2 | 2,000 | 0,6 | -0,1 | 2,000 | 1,0 | -0,5 |
| | 3 | 4 | 4,000 | 0,9 | -0,4 | 3,999 | 0,1 | -0,6 |
| | 4 | 6 | 6,000 | 0,6 | -0,1 | 5,999 | 0,1 | -0,6 |
| | 5 | 8 | 8,000 | 0,9 | -0,4 | 7,999 | 0,1 | -0,6 |
| | 6 | 10 | 10,000 | 1,0 | -0,5 | | | |

Tabla 27. Verificación metrológica de la balanza después de la prestación del servicio

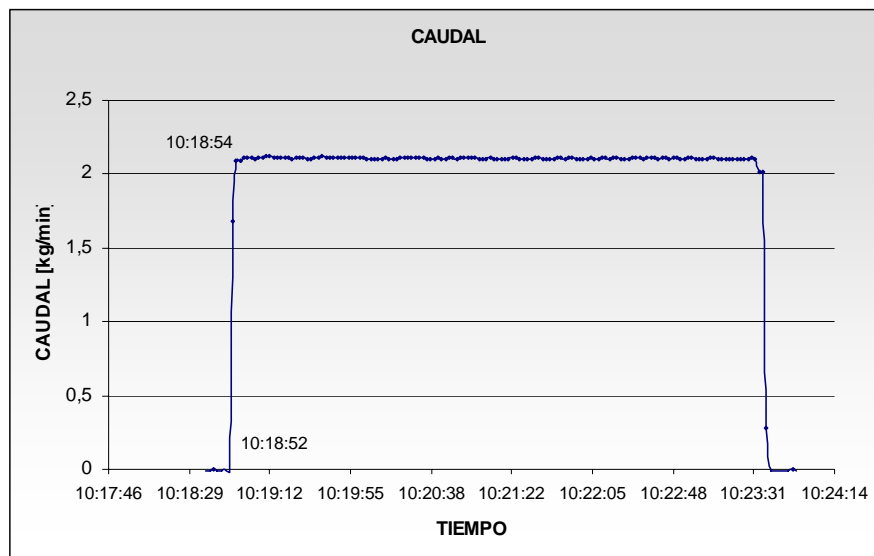
| | | VALOR NOMINAL | CARGA CRECIENTE | | | CARGA DECRECIENTE | | |
|------------------|----|---------------|-----------------|-----------|---------|-------------------|-----------|---------|
| VALOR DE LA TARA | No | CARGA kg | INDICACIÓN kg | AUMENTO g | ERROR g | INDICACIÓN kg | AUMENTO g | ERROR g |
| 30 kg | 1 | 0 | 0,000 | 0,5 | 0,0 | 0,000 | 0,3 | 0,2 |
| | 2 | 2 | 2,000 | 0,5 | 0,0 | 2,000 | 0,2 | 0,3 |
| | 3 | 4 | 4,000 | 0,7 | -0,2 | 4,000 | 0,6 | -0,1 |
| | 4 | 6 | 6,000 | 0,5 | 0,0 | 6,000 | 0,5 | 0,0 |
| | 5 | 8 | 8,000 | 0,6 | -0,1 | 8,000 | 0,4 | 0,1 |
| | 6 | 10 | 10,000 | 0,4 | 0,1 | | | |

El error máximo permitido para la prueba realizada según la OIML R76 es de 1,5 g y el error máximo obtenido durante las pruebas de verificación fue de 0,6 g, cumpliendo de esta manera con el requisito establecido.

5.3.2 Evaluación del desempeño del banco de calibración de medidores másicos. Para garantizar el desempeño adecuado del banco de calibración, se realizaron pruebas que permitieron la evaluación de parámetros específicos como el tiempo de estabilización del caudal y el efecto de reemplazar un diverter por una válvula de globo.

La evaluación del tiempo de estabilización del caudal consiste en realizar varias pruebas a caudales distintos con el fin de observar el tiempo que tarda el caudal en alcanzar un valor estable. Estas pruebas mostraron que el tiempo de estabilización del caudal no supera los 2 segundos como puede observarse en la Figura 77:

Figura 77. Gráfica Caudal Vs Tiempo



Además, con tiempos de prueba de 2 minutos como mínimo, podemos garantizar que el uso de una válvula solenoide tipo globo en reemplazo de un diverter proporciona una estabilidad adecuada al caudal sin afectar el caudal promedio (ver tabla 28).

Tabla 28. Valores de caudal logrados con la válvula solenoide

| CAUDALES | |
|-------------------------|--------------------------------|
| CONFIGURADO [kg/min] | PROMEDIO CALCULADO [kg/min] |
| 2 | 2,06 |
| 5 | 4,98 |
| 10 | 10,03 |
| 15 | 15,04 |
| 22 | 22,34 |
| 31 | 31,11 |
| 40 | 40,11 |

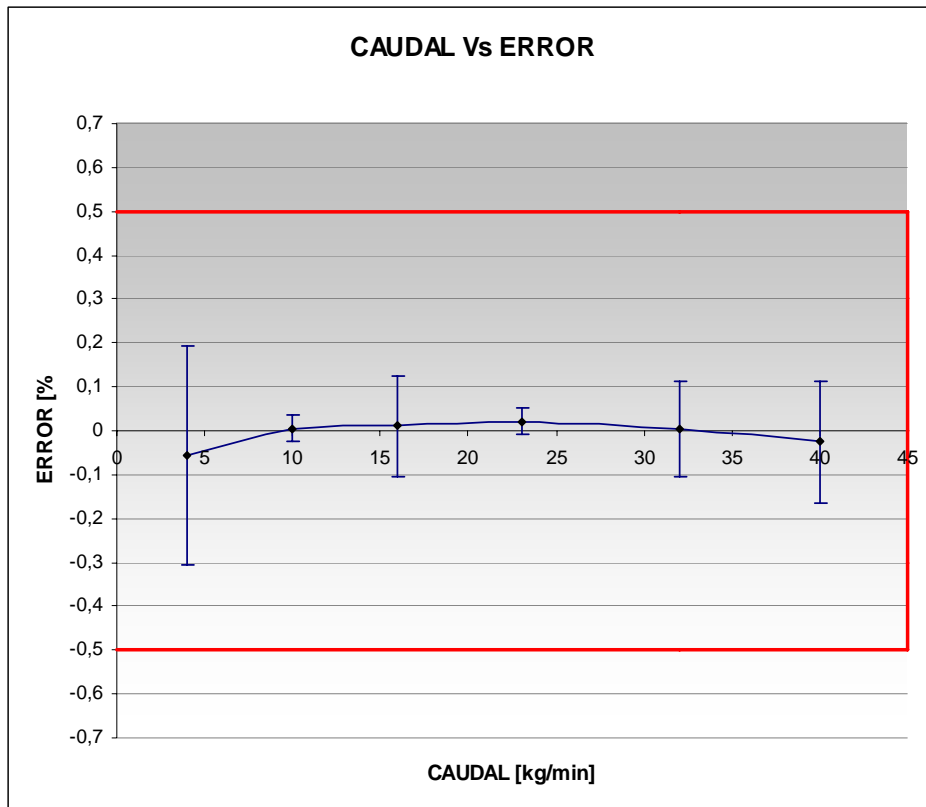
5.3.3 Verificación del medidor. La verificación metrológica del medidor patrón consiste en realizar mediciones simultáneas de masa totalizada entre el medidor y un sistema de pesaje patrón a diferentes caudales y determinar un error de medición con el fin de asegurar que el valor de este error sea menor al máximo permitido.

A continuación se muestran los resultados de una prueba de verificación metrológica del medidor patrón. Estos valores corresponden a los valores promedios debido a que para cada caudal se realizaron tres repeticiones.

Tabla 29. Resultados de la verificación metrológica del medidor patrón

| CAUDAL [kg/min] | ERROR [%] | INCERTIDUMBRE [%] | K |
|--------------------|--------------|----------------------|-------|
| 4 | -0,056 | 0,251 | 2,447 |
| 10 | 0,005 | 0,031 | 1,98 |
| 16 | 0,011 | 0,115 | 2,447 |
| 23 | 0,021 | 0,03 | 1,979 |
| 32 | 0,004 | 0,109 | 2,447 |
| 40 | -0,025 | 0,139 | 2,447 |

Figura 78. Gráfica Caudal vs. Error de la verificación metrológica del medidor patrón



6. PRUEBAS PILOTO

A continuación se presenta el diseño, ejecución, resultado y análisis de la prueba piloto realizadas para probar los procedimientos implementados, la funcionalidad de los sistemas de medición en campo e identificar las opciones de mejoramiento del diseño del servicio. En el presente capítulo, se relaciona aspectos inherentes al desarrollo técnico de la prueba piloto que permiten asegurar que los resultados obtenidos en campo serán lo suficientemente confiables para evaluar un surtidor de gas natural. Cabe anotar, que se realizaron un gran número de pruebas en 3 ciudades del país, pero solo se mostrará la prueba piloto realizada en el área metropolitana de Bucaramanga, cumpliendo con uno de los objetivos específicos de este proyecto.

6.1 ESTRUCTURA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA

Seguidamente se explica como se diseñó la metodología para la ejecución de la prueba piloto.

6.1.1 Selección de las ciudades para ejecución de las pruebas piloto. Las pruebas pilotos se realizaron en tres (3) ciudades representativas del mercado de GNV colombiano, de tal forma que se dieran los criterios predecir el comportamiento de los sistemas de medición en cualquier parte del país. Las ciudades fueron seleccionadas bajo los siguientes criterios:

Teniendo en cuenta que la Red Nacional de gasoductos está conformado por tres (3) sistemas independientes, en lo posible, se seleccione una ciudad representativa de cada uno de ellos.

El origen del gas de cada ciudad debía ser diferente, ya que las cantidades relativas de los diferentes componentes presentes en el gas natural varían, según el tipo de yacimiento.

La ciudad debe contar con la experiencia necesaria en el sector gas, para que brinde en las estaciones de servicio óptimos niveles de calidad y seguridad.

La ejecución de pruebas en EDS con diferente sistema de compresión, para evaluar la influencia de la presión en el comportamiento del metroológico del surtidor.

A partir de estos criterios se seleccionaron tres ciudades, las cuales según la red nacional de transporte de gas pertenecen al sistema de la costa atlántica y al sistema del interior y los yacimientos que le proporciona el gas natural son diferentes. Adicionalmente son ciudades que se han convertido en pioneras del uso del GNV.

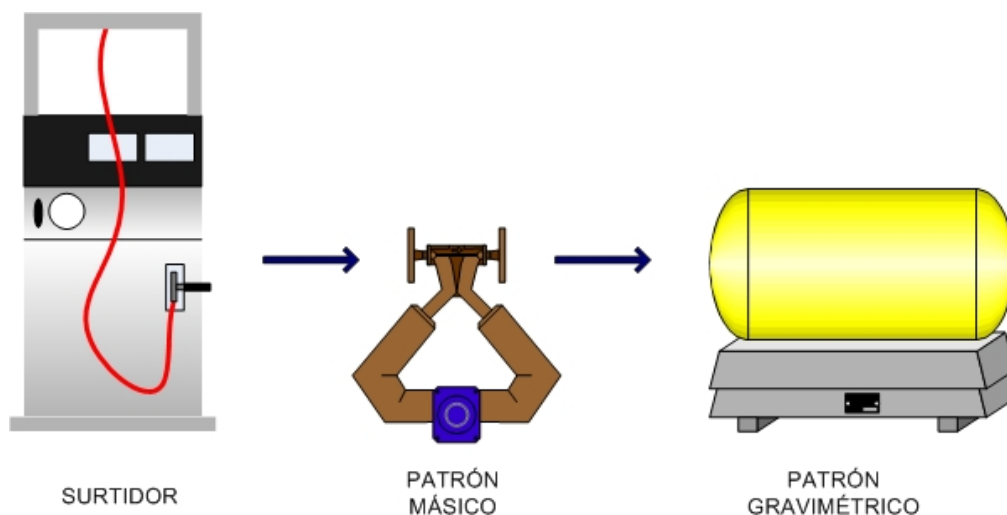
6.1.2 Diseño de estrategia de ejecución de las pruebas piloto. Para seleccionar la metodología a aplicar en las estaciones de servicio y hacer una planeación de las actividades para la ejecución de la prueba piloto, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

a. Parámetros de comparación: los resultados obtenidos deben ser comparables, para lograr esto, la prueba en la estación de servicio debe tener parámetros similares. Los parámetros de comparación son entre otros: el número de repeticiones, el método de verificación y el procedimiento de llenado empleado. Usar los mismos parámetros en la prueba piloto, nos permite evaluar cuantitativamente el efecto producido por cada uno de ellos

en el desempeño de la prueba y en los resultados obtenidos, para de esta manera realizar mejoras en las estrategias de ejecución.

b. Uso de los patrones de verificación: los patrones de verificación se utilizaron de forma simultánea conectándose en serie. La conexión de los patrones en serie se realiza de la siguiente forma: el surtidor se conecta a la entrada del medidor másico a través del pico de carga de la manguera surtidora. La salida del medidor másico cuenta con una conexión $\frac{1}{4}$ " NPT hembra, que permite roscar el conector $\frac{1}{4}$ " NPT macho de una manguera surtidora con su respectivo pico de carga, este es utilizado para ser conectado en cada uno de los cilindros de prueba (ver Figura 79). El gas que pasa a través del medidor másico, llena los cilindros ubicados en la balanza, de esta manera se busca que los resultados de medición con el método gravimétrico y con el método de patrón de referencia sean comparables al estar midiendo la misma magnitud.

Figura 79. Patrones conectados en serie.



c. Repeticiones de los procedimientos: para evaluar la repetibilidad de indicación en el sistema de medición, se necesita desarrollar como mínimo 3 veces cada procedimiento en el mismo surtidor, la misma manguera y en un intervalo de tiempo corto.

6.1.3 Determinación de la variación de la composición del gas. En algunas ciudades del país el gas suministrado no proviene de un solo yacimiento, este es producto de mezcla de diferentes gases, debido a estas mezclas se obtiene un gas con propiedades características (composición), que para el mejor de los casos permanecen relativamente constantes en el tiempo o con variaciones mínimas. Sin embargo, en otros casos, esta variación es crítica, ya que en un mismo día, dependiendo de la presión de la red, pueden inyectarse gases de composiciones muy diferentes; de esta forma, la composición del gas puede variar hora a hora.

En cualquiera de los dos casos, es necesario tener en cuenta la variación en la composición del gas en los procesos de verificación de EDS-GNV, debido a que el esquema de venta de gas natural vehicular en Colombia se basa en volumen (no en masa), exigiendo configurar y verificar periódicamente el valor de la densidad del gas para pasar la indicación en masa a volumen.

Con el fin de determinar el valor de volumen convencionalmente verdadero a partir de las mediciones ejecutadas con los patrones, de tal manera que sea posible evaluar la influencia de la composición del gas en la indicación del surtidor, se tomaron muestras del mismo para determinar su composición, densidad y poder calorífico a través de un análisis cromatográfico.

Teniendo en cuenta las necesidades expuestas anteriormente, se diseñaron las pruebas piloto, la tabla 30 muestra la estructura diseñada para la ejecución de las pruebas piloto en las diferentes ciudades.

Tabla 30. Estructura para la ejecución de la prueba piloto.

| Ciudad | Identificación de las Pruebas | Número de muestras | Patrones utilizados | Procedimientos de llenado | Análisis Cromatográfico | Sistema de compresión |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Ciudad 1 - Piloto 1 | | | | | | |
| 1 | C1-SC-1 | 3 | G/MR | N | NO | Sin Cascada |
| | C1-SC-2 | 4 | G/MR | P1 | NO | |
| | C1-SC-3 | 3 | G/MR | P2 | NO | |
| | C1-SC-5 | 3 | G/MR | P1/P2/N | SI | |
| | C1-SC-6 | 3 | G/MR | P1/P2/N | SI | |
| | C1-SC-7 | 3 | G/MR | P1/P2/N | SI | |
| | C1-SC-8 | 10 | MR | N | NO | |
| Ciudad 1 - Piloto 2 | | | | | | |
| 1 | C1-C-1 | 3 | G/MR | N | NO | Cascada |
| | C1-C-2 | 3 | G/MR | P1 | NO | |
| | C1-C-3 | 3 | G/MR | P2 | NO | |
| | C1-C-4 | 1 | MR | N | NO | |
| | C1-C-5 | 3 | MR | P1/P2/N | NO | |
| Ciudad 2 - Piloto 3 | | | | | | |
| 2 | C2-C-1 | 12 | G/MR | N/P1/P2 | NO | Cascada |
| Ciudad 2 - Piloto 4 | | | | | | |
| 2 | C2-SC-1 | 12 | G/MR | N/P1/P2 | NO | Sin-Cascada |
| Ciudad 3- Piloto 5 | | | | | | |
| 3 | C3-C-1 | 9 | G/MR | N/P1/P2 | NO | Sin-Cascada |
| Ciudad 3- Piloto 6 | | | | | | |
| 3 | C3-S-1A | 9 | G/MR | N/P1/P2 | SI | Sin-Cascada |

6.1.4 Ejecución de las pruebas piloto. Las pruebas fueron realizadas en 6 estaciones de servicio y 6 mangueras, dos estaciones de servicio diferentes en

cada ciudad, con diferentes sistemas de compresión. En la tabla 31, se muestra el número de pruebas realizadas y el sistema de compresión en cada estación de servicio visitada. Se ejecutaron un total de 87 pruebas utilizando diferentes procedimientos y sistemas de verificación como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31. Número de pruebas realizadas en EDS.

| CIUDAD | CIUDAD 1 | | CIUDAD 2 | | CIUDAD 3 | |
|----------------------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|-------------|
| PILOTO | Piloto 1 | Piloto 2 | Piloto 3 | Piloto 4 | Piloto 5 | Piloto 6 |
| Sist. Compresión | Sin cascada | Cascada | Sin Cascada | cascada | Sin Cascada | Sin cascada |
| No de Pruebas por estación | 31 | 14 | 12 | 12 | 9 | 9 |
| Total pruebas: 87 | | | | | | |

Figura 80. Participación de las ciudades en las pruebas pilotos

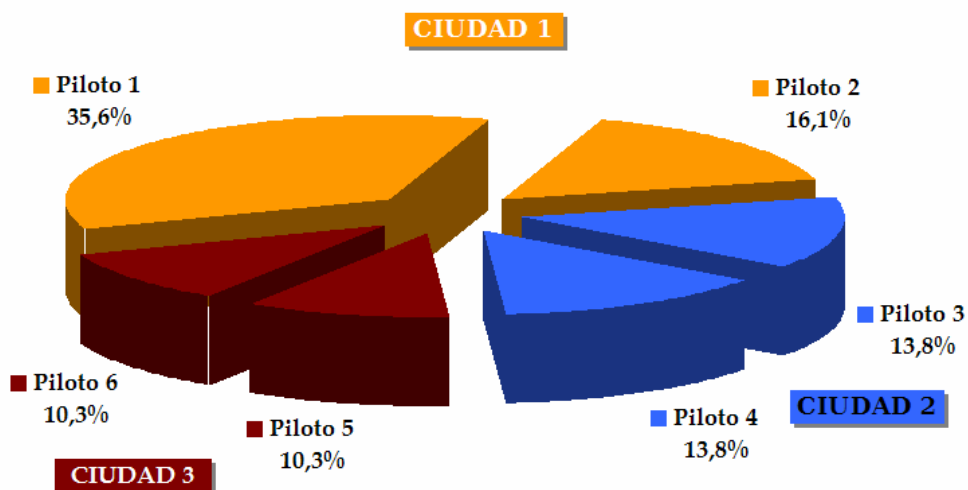
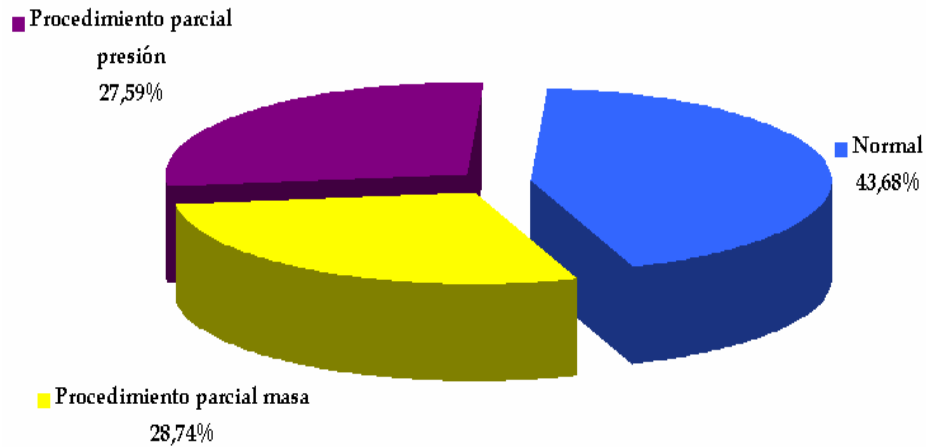


Tabla 32. Procedimientos realizados y métodos de verificación usados

| PROCEDIMIENTO | PARCIAL EN MASA | PARCIAL EN PRESIÓN | NORMAL |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Método de verificación | Másico - Gravimétrico | Másico - Gravimétrico | Másico - Gravimétrico |
| Pruebas | 25 | 24 | 38 |

Figura 81. Procedimientos y métodos realizados



6.2 ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA PRUEBA PILOTO

A continuación se muestran evidencias de las principales actividades ejecutadas en las estaciones de servicio.

Es necesario realizar la determinación del cero del sistema de pesaje en cada una de las pruebas, antes de iniciar. Para esta actividad resulta imprescindible aislar la plataforma de cualquier perturbación que le impida la estabilización de la medición en ese momento.

Figura 82. Ajuste del cero del sistema de pesaje



De la misma forma, para obtener el mejor desempeño posible en los caudales mínimos, se ajusta el cero del medidor másico de Coriolis, a las condiciones de operación existentes en la línea. En la siguiente figura se muestra el instante en que se realiza esta operación. Para esta labor el medidor debe estar totalmente lleno de gas y no debe haber flujo a través de él.

Figura 83. Ajuste del cero del medidor másico de Coriolis



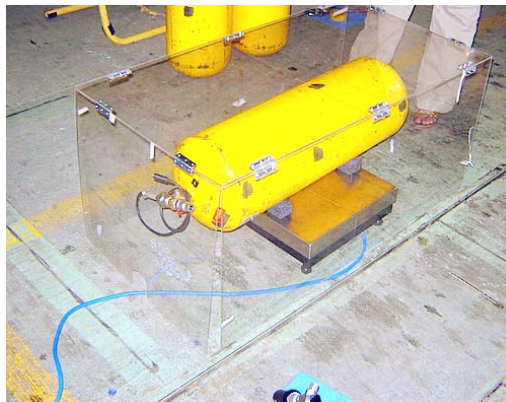
Antes de iniciar la calibración, se ejecuta la prueba de verificación para el sistema de pesaje, como se muestra en la figura 84. Durante la verificación del sistema de pesaje, se deben tener ciertos cuidados, como: manipular las masas adecuadamente para evitar su deterioro y aislar de corrientes de aire la plataforma del sistema de pesaje.

Figura 84. Verificación del sistema de pesaje.



La operación de tara de la balanza se realiza para obtener directamente del display del sistema de pesaje la cantidad de gas suministrada al cilindro.

Figura 85. Operación de tara de la balanza



Adicionalmente a las lecturas de los dos patrones, se realizó el monitoreo de la presión del gas en cada prueba y de la temperatura exterior del cilindro. En la figura se observa el transductor de presión conectado a la válvula y el sensor de temperatura (RTD) adherido a la parte exterior del cilindro.

Figura 86. Medición usando los 2 patrones



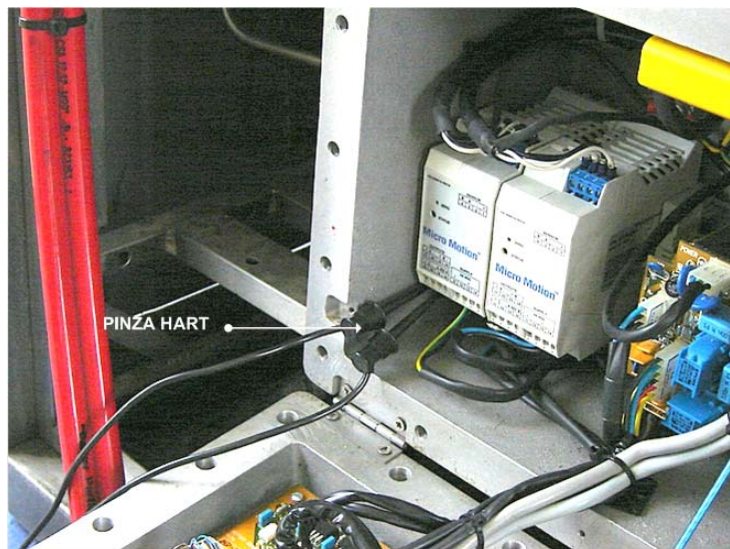
La configuración del medidor másico del surtidor se obtuvo a través de comunicación HART entre el surtidor y el PC. Los parámetros obtenidos se muestran en la tabla 33.

Tabla 33. Parámetros obtenidos del medidor másico del surtidor.

| CONFIGURACIÓN DEL MEDIDOR MÁSIICO | |
|--|--|
| Información general del medidor | Fabricante Modelo del sensor Modelo del transmisor Rango de operación Serial |
| Factores de calibración | Meter Factor Factor de calibración de flujo |
| Valores mínimos | Flujo másico Flujo volumétrico |
| Parámetros de configuración de la salida de frecuencia | |
| Parámetros de configuración de la salida de corriente | |

Figura 87. Obtención de la configuración del surtidor





Para realizar el análisis cromatográfico, fue necesaria la toma de muestras en cilindros especiales, la presión de muestreo fue de 350 psi. En la Figura 88 se puede observar, que la presión es medida simultáneamente al llenado del cilindro de muestreo.

Figura 88. Llenado de la muestra de gas para análisis cromatográfico



6.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO

Luego de la ejecución de la prueba piloto, se realizó el análisis de la información recopilada generando diferentes formas de representación del comportamiento de las variables implícitas en el proceso de verificación metrológica de surtidores de GNV.

Estos resultados son la herramienta para observar el desempeño en campo de los diferentes patrones utilizados, para poder evaluar los procedimientos anteriormente expuestos y lógicamente para evaluar el desempeño metrológico del surtidor.

6.3.1 Presentación de resultados. La información obtenida durante la prueba realizada, se compone por valores de caudal másico de gas, presión de llenado de los cilindros, temperatura del cilindro durante el llenado, masa totalizada por el instrumento de pesaje entre otros. A continuación se presentan en detalle:

a. Información general: la información general de la prueba ejecutada se muestra en la Tabla 34:

Tabla 34. Información general de la prueba piloto

| | |
|----------------------|---|
| CIUDAD | Ciudad 1 |
| ESTACIÓN DE SERVICIO | Piloto 1 |
| MÉTODO | Gravimétrico - Másico |
| PROCEDIMIENTO | Normal - Parcial masa - Parcial presión |
| MUESTREO DE GAS | Tres (3) muestras de gas |

La información general del surtidor de GNV se muestra en la tabla 35:

Tabla 35. Información general del surtidor de GNV

| ITEM | MARCA | REFERENCIA |
|----------------------|-------------------------------|-------------|
| SURTIDOR | Aspro | AS-120-D |
| SISTEMA DE MEDICIÓN | Medidor Másico Micromotion | 1500-2011AD |
| DENSIDAD CONFIGURADA | 0.77 kg/m ³ | |

b. Desempeño del surtidor: para facilitar el análisis de los datos obtenidos en las pruebas piloto, la información se organiza en gráficas. Las gráficas muestran el comportamiento del caudal másico y de la presión de llenado durante cada prueba o llenado de un cilindro.

Adicionalmente, presentan la siguiente información:

Masa totalizada por el sistema de pesaje y el medidor másico

Caudal másico promedio de cada etapa

Caudal másico máximo

Presión máxima de llenado

Tiempo de carga

Las gráficas generadas se muestran a continuación:

Figura 89. Gráfica llenado Normal - Cilindro 1

| ETAPA | PATRÓN | MASA | Qprom | Qmax | Pmax | TIEMPO |
|-------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | kg | kg/min | kg/min | psi | s |
| 1 | BALANZA | 7,117 | 5,83 | 7,17 | 2802,5 | 72 |
| | MEDIDOR | 6,399 | 5,35 | | | |
| 2 | BALANZA | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | |
| 3 | BALANZA | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | |

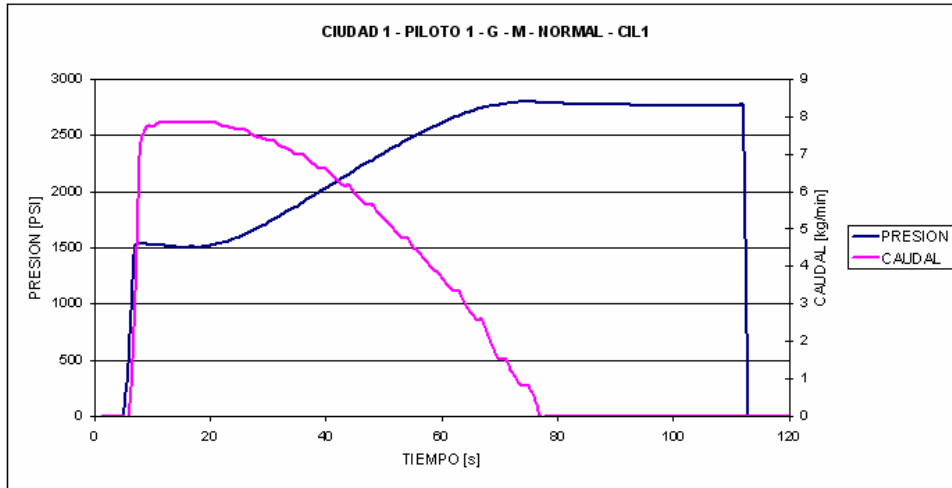


Figura 90. Gráfica llenado Normal - Cilindro 2

| ETAPA | PATRÓN | MASA | Qprom | Qmax | Pmax | TIEMPO |
|-------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | kg | kg/min | kg/min | psi | s |
| 1 | BALANZA | 6,407 | 5,34 | 7,93 | 2802,5 | 72 |
| | MEDIDOR | 6,399 | 5,24 | | | |
| 2 | BALANZA | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | |
| 3 | BALANZA | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | |

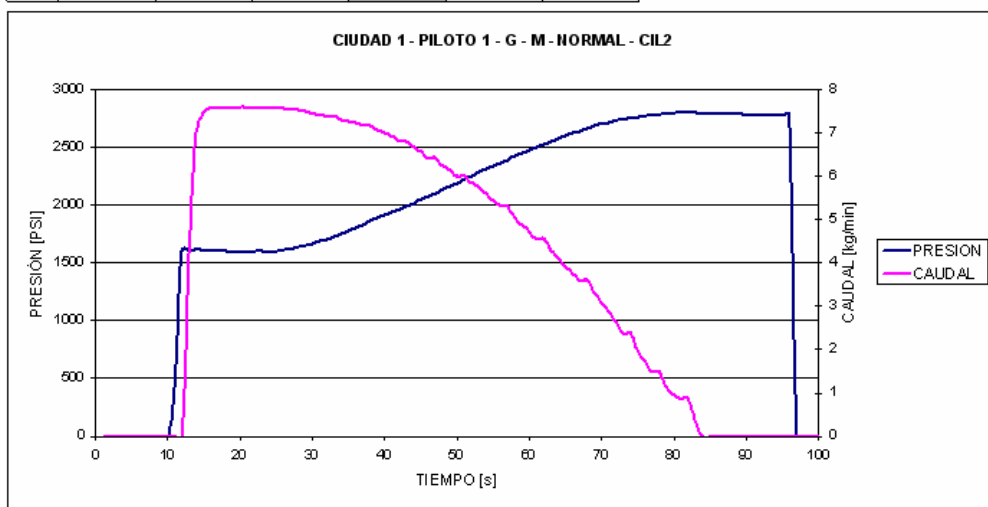


Figura 91. Gráfica llenado Normal - Cilindro 3

| ETAPA | PATRÓN | MASA | | Qprom kg/min | Qmax kg/min | Pmax psi | TIEMPO s |
|-------|---------|-------|--------|-----------------|----------------|-------------|-------------|
| | | kg | kg/min | | | | |
| 1 | BALANZA | 6,536 | 5,03 | 7,55 | 2830 | 78 | |
| | MEDIDOR | 6,529 | 4,94 | | | | |
| 2 | BALANZA | | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | | |
| 3 | BALANZA | | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | | |

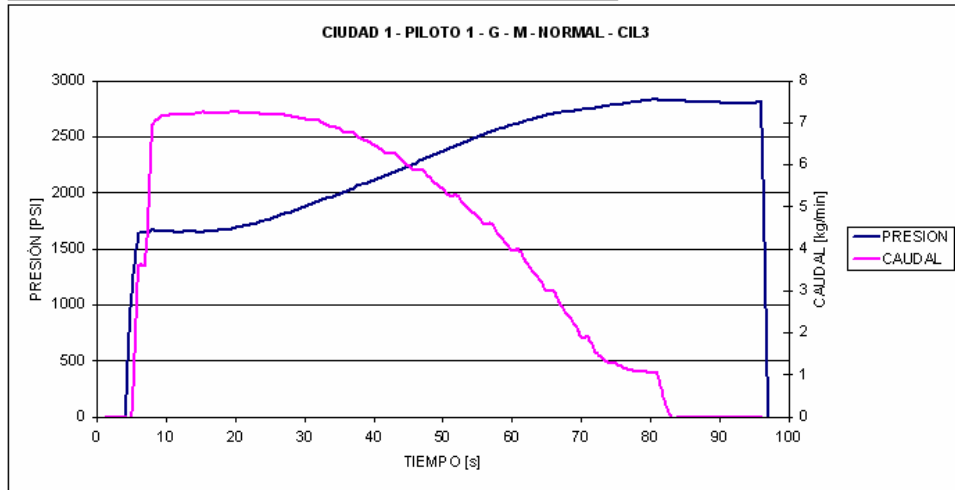


Figura 92. Gráfica llenado Parcial Masa - Cilindro 1

| ETAPA | PATRÓN | MASA | | Qprom kg/min | Qmax kg/min | Pmax psi | TIEMPO s |
|-------|---------|-------|--------|-----------------|----------------|-------------|-------------|
| | | kg | kg/min | | | | |
| 1 | BALANZA | 2,104 | 6,01 | 7,61 | 1646 | 21 | |
| | MEDIDOR | 2,07 | 5,61 | | | | |
| 2 | BALANZA | 2,064 | 5,89 | | 2000 | 21 | |
| | MEDIDOR | 2,048 | 5,71 | | | | |
| 3 | BALANZA | 2,236 | 3,36 | | 2771,5 | 40 | |
| | MEDIDOR | 2,232 | 3,19 | | | | |

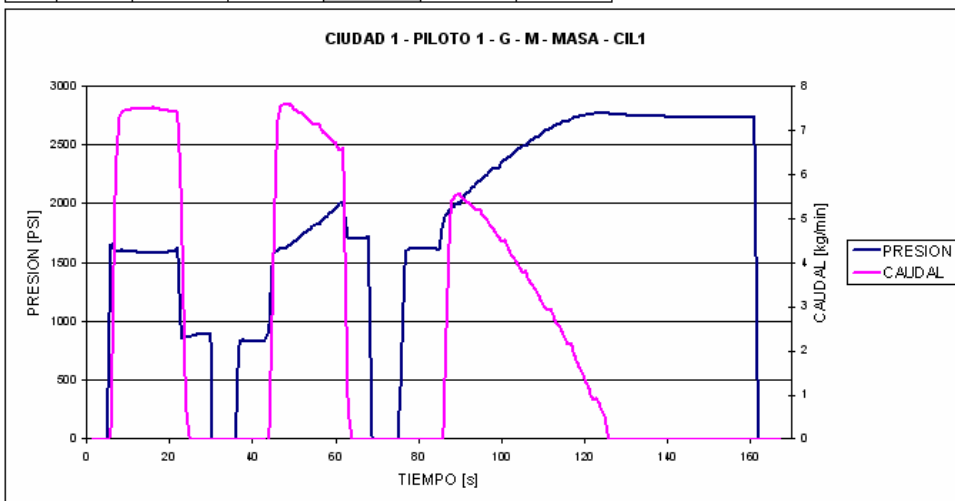


Figura 93. Gráfica llenado Parcial Masa – Cilindro 2

| ETAPA | PATRÓN | MASA | | Q _{prom} | | Q _{max} | | P _{max} | | TIEMPO |
|-------|---------|-------|--------|-------------------|--------|------------------|-----|------------------|--|--------|
| | | kg | kg/min | kg/min | kg/min | psi | psi | | | |
| 1 | BALANZA | 2,054 | 4,74 | 6,57 | 1379,5 | 26 | | | | |
| | MEDIDOR | 2,022 | 4,71 | | | | | | | |
| 2 | BALANZA | 2,104 | 6,01 | | 2042 | 21 | | | | |
| | MEDIDOR | 2,087 | 5,81 | | | | | | | |
| 3 | BALANZA | 2,273 | 3,78 | | 2837 | 36 | | | | |
| | MEDIDOR | 2,275 | 3,68 | | | | | | | |

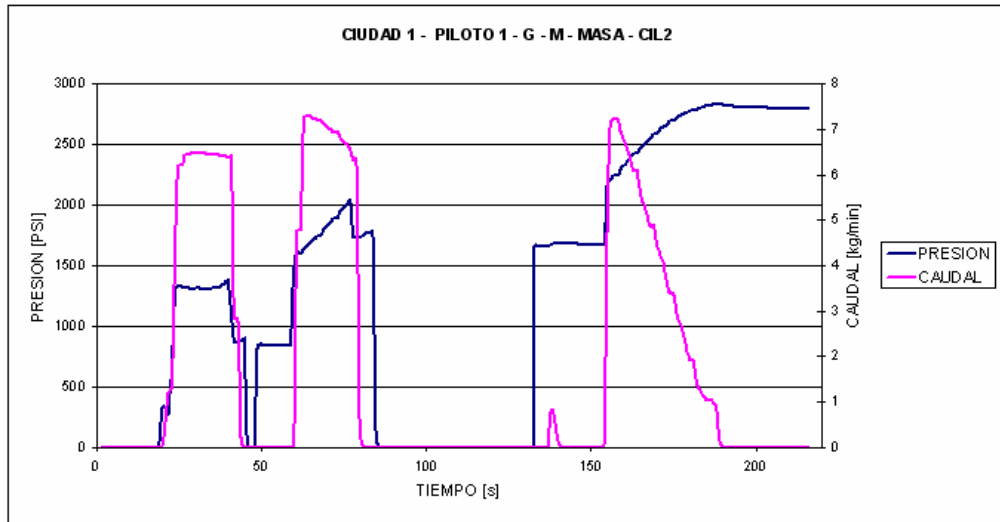


Figura 94. Gráfica llenado Parcial Masa – Cilindro 3

| ETAPA | PATRÓN | MASA | | Q _{prom} | | Q _{max} | | P _{max} | | TIEMPO |
|-------|---------|-------|--------|-------------------|--------|------------------|-----|------------------|--|--------|
| | | kg | kg/min | kg/min | kg/min | psi | psi | | | |
| 1 | BALANZA | 2,084 | 5,68 | 7,47 | 1640,5 | 22 | | | | |
| | MEDIDOR | 2,075 | 5,35 | | | | | | | |
| 2 | BALANZA | 2,047 | 5,85 | | 2076 | 21 | | | | |
| | MEDIDOR | 2,036 | 5,57 | | | | | | | |
| 3 | BALANZA | 2,141 | 3,21 | | 2760,5 | 40 | | | | |
| | MEDIDOR | 2,139 | 3,12 | | | | | | | |

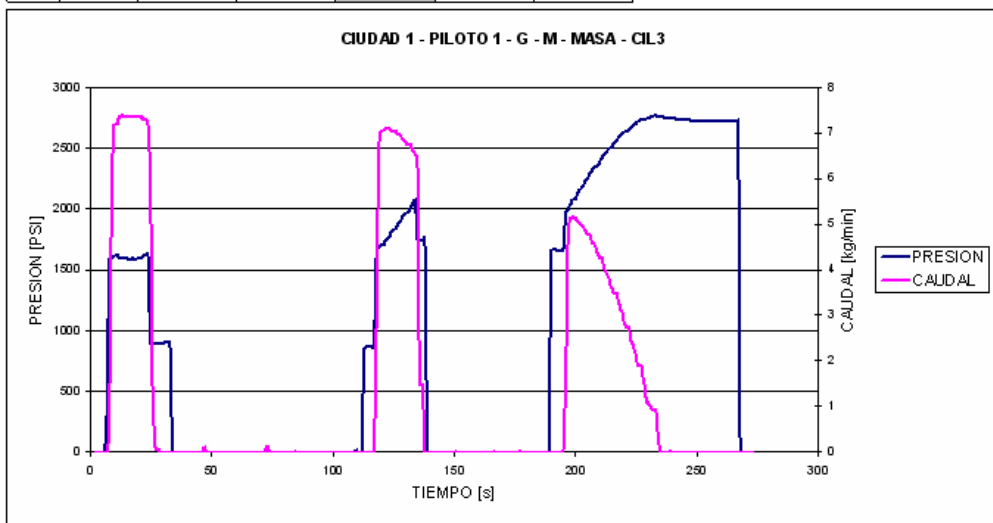


Figura 95. Gráfica llenado Parcial Presión - Cilindro 1

| ETAPA | PATRÓN | MASA kg | Qprom kg/min | Qmax kg/min | Pmax psi | TIEMPO s |
|-------|---------|------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|
| 1 | BALANZA | 3,68 | 6,71 | 8,025 | 1855 | 32 |
| | MEDIDOR | 3,578 | 6,24 | | | |
| 2 | BALANZA | 2,696 | 3,44 | | 2795,5 | 47 |
| | MEDIDOR | 2,662 | 3,35 | | | |
| 3 | BALANZA | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | |

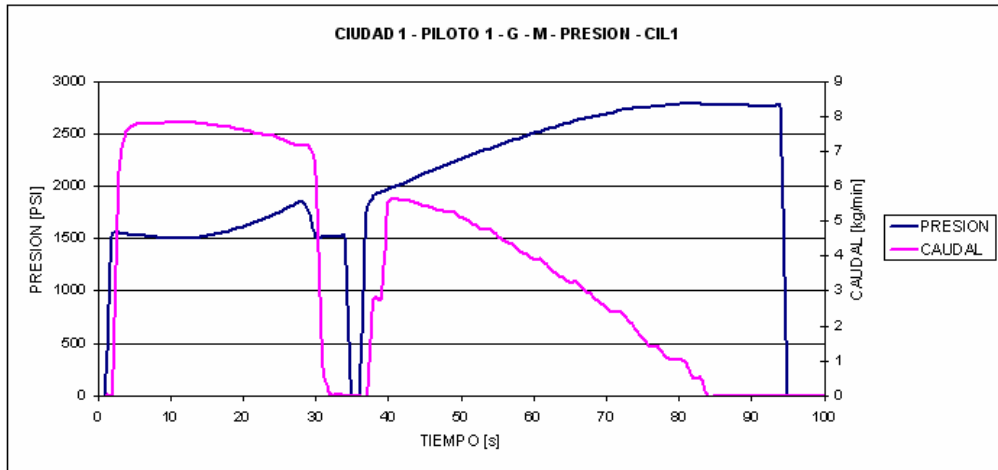


Figura 96. Gráfica llenado Parcial Presión - Cilindro 2

| ETAPA | PATRÓN | MASA kg | Qprom kg/min | Qmax kg/min | Pmax psi | TIEMPO s |
|-------|---------|------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|
| 1 | BALANZA | 3,381 | 6,24 | 6,89 | 1853,5 | 32 |
| | MEDIDOR | 3,375 | 6,14 | | | |
| 2 | BALANZA | 2,86 | 3,73 | | 2788,5 | 46 |
| | MEDIDOR | 2,857 | 3,63 | | | |
| 3 | BALANZA | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | |

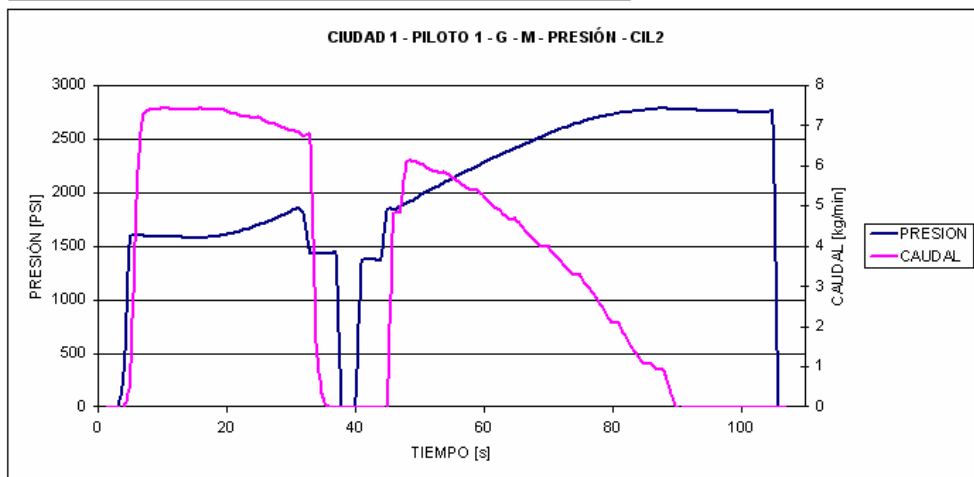
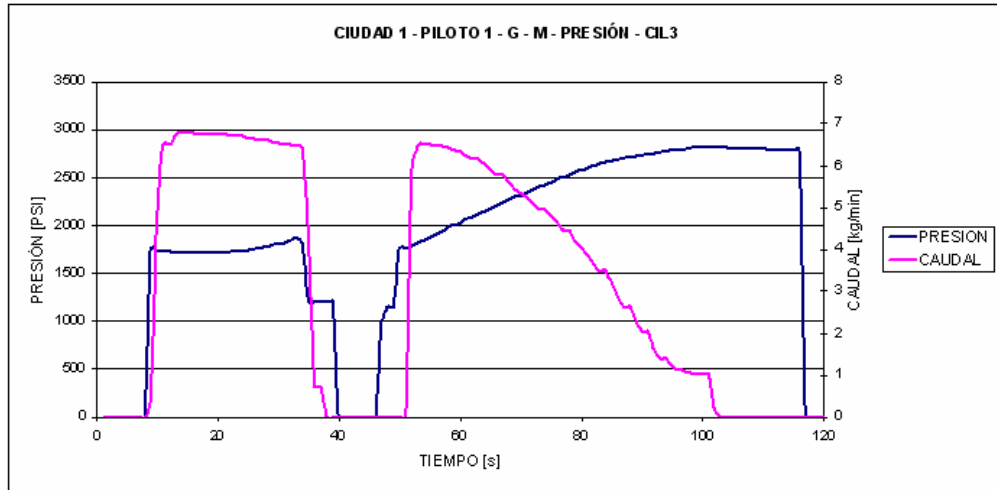


Figura 97. Gráfica llenado Parcial Presión – Cilindro 3

| ETAPA | PATRÓN | MASA | | Q _{prom} | Q _{max} | P _{max} | TIEMPO |
|-------|---------|-------|--------|-------------------|------------------|------------------|--------|
| | | kg | kg/min | kg/min | kg/min | psi | s |
| 1 | BALANZA | 2,841 | 5,68 | 7,05 | 1862 | 30 | |
| | MEDIDOR | 2,835 | 5,5 | | | | |
| 2 | BALANZA | 2,494 | 2,88 | | 2823 | 52 | |
| | MEDIDOR | 3,49 | 3,90 | | | | |
| 3 | BALANZA | | | | | | |
| | MEDIDOR | | | | | | |

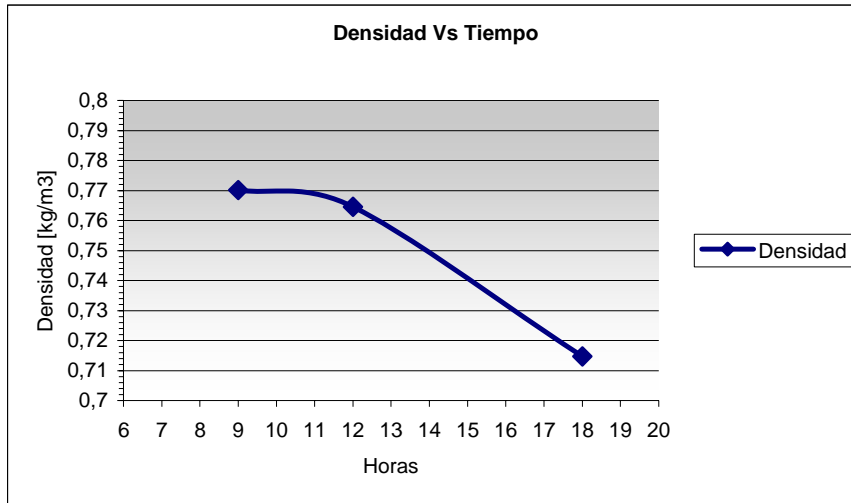


c. *Variabilidad en la composición del gas:* para determinar la composición del gas suministrado y evidenciar la influencia que tiene la variabilidad de la composición de gas en la indicación del surtidor (en volumen) se realizaron tres (3) muestreos a diferentes horas del día, las muestras se analizaron posteriormente por cromatografía. Los resultados de este análisis se presentan a continuación:

Tabla 36. Resultados del análisis cromatográfico de las muestras de gas natural

| | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 3 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| HORA | 9:00 AM | 12:00 M | 6:00 PM |
| DENSIDAD [kg/m ³] | 0.7701677 | 0.7645613 | 0.7147599 |

Figura 98. Variación de la densidad durante el día



6.3.2 Análisis de resultados. Con la información recolectada anteriormente podemos evaluar factores como el caudal máximo promedio del surtidor, los caudales promedios desarrollados por cada procedimiento, presiones máximas del sistema de llenado, error, incertidumbre entre otros.

a. Presión máxima de llenado: la presión máxima de llenado es la presión alcanzada en el cilindro al finalizar la entrega de gas. Los valores de esta presión por cada procedimiento ejecutado se muestran en la tabla 37:

Tabla 37. Presiones máximas de llenado

| PROCEDIMIENTO | ETAPA | PRESIÓN MÁXIMA [psi] | PRESIÓN MÁXIMA PERMITIDA |
|-------------------------|-------|----------------------|--------------------------|
| LLENADO NORMAL | 1 | 2811.7 | 3000 psi |
| LLENADO PARCIAL MASA | 1 | 1555 | |
| | 2 | 2039.3 | |
| | 3 | 2789.7 | |
| LLENADO PARCIAL PRESIÓN | 1 | 1856.8 | |
| | 2 | 2802.3 | |

Por motivos de seguridad, la presión máxima de llenado no debe sobrepasar un valor límite establecido en 3000 psi. Además, el comportamiento metrológico del surtidor puede verse afectado indirectamente por la variación de la presión máxima de llenado. En las pruebas realizadas, el valor de la presión máxima de llenado alcanzado por el surtidor de la estación piloto 1 es de 2811.7 psi cumpliendo de esta manera con el valor máximo permitido por la regulación de 3000 psi.

b. Caudal Máximo: en cada prueba ejecutada se realizó la medición del caudal máximo. La manera de cómo evaluar este caudal se describe en la sección 4.4.2.

El objetivo de esta medición es evaluar que los valores de caudal del surtidor se encuentren dentro del alcance del medidor másico instalado en el surtidor. Además, este valor de caudal máximo es útil como referencia para los valores de caudal promedio. En la tabla 38 se muestran los valores de caudal máximo por procedimiento y el promedio de estos:

Tabla 38. Caudales máximos

| PROCEDIMIENTO | CAUDAL MÁXIMO [kg/min] |
|-------------------------|------------------------|
| LLENADO NORMAL | 7.55 |
| LLENADO PARCIAL MASA | 7.22 |
| LLENADO PARCIAL PRESIÓN | 7.32 |
| PROMEDIO | 7.36 |

c. Caudal Promedio: el valor del caudal promedio de una prueba puede variar de acuerdo con el procedimiento utilizado.

Tabla 39. Caudales promedios

| PROCEDIMIENTO | ETAPA | CAUDAL PROMEDIO [kg/min] | % DEL CAUDAL MÁXIMO |
|----------------------------|-------|-----------------------------|------------------------|
| LLENADO NORMAL | 1 | 5.18 | 70.4% |
| LLENADO PARCIAL MASA | 1 | 5.22 | 70.9% |
| | 2 | 5.70 | 77.5% |
| | 3 | 3.33 | 45.2% |
| LLENADO PARCIAL PRESIÓN | 1 | 5.96 | 80.9% |
| | 2 | 3.63 | 49.3% |

En la tabla 39 se muestran los valores de caudal promedio por procedimiento (este valor se toma de la lectura del medidor másico) y su porcentaje respecto al caudal máximo:

Con base en los valores presentados en la tabla 39, podemos afirmar que:

- Con el procedimiento de llenado normal solo se evalúa un valor de caudal promedio equivalente al 70.4% del caudal máximo.
- Los caudales promedios de las dos primeras etapas en el procedimiento de llenado parcial masa son muy similares (70.9% del caudal máximo para la primera etapa y 77.5% para la segunda etapa) y la tercera etapa se desarrolla a un caudal promedio de 45.2% del caudal máximo. Por lo tanto, podemos afirmar que con este procedimiento se evalúan dos niveles del caudal desarrollado por el surtidor.
- Con el procedimiento de llenado parcial presión se evalúan dos valores de caudal promedio. El caudal promedio de la primera etapa corresponde a un

80.9% del caudal máximo mientras que el caudal promedio de la segunda etapa corresponde a un 49.3% del caudal máximo.

d. Error e incertidumbre de medición: el desempeño metrológico de los medidores se puede expresar en función del caudal de operación. En la tabla 40 se muestran los valores de error e incertidumbre correspondiente a los diferentes caudales promedio obtenidos durante las pruebas.

Tabla 40. Error e incertidumbre de medición

| PROCEDIMIENTO | ETAPA | CAUDAL PROMEDIO [kg/min] | ERROR PROMEDIO [%] | INCERTIDUMBRE [%] | k |
|-------------------------|-------|--------------------------|--------------------|-------------------|---|
| LLENADO NORMAL | 1 | 5.18 | -0.7 | 0.1 | 2 |
| LLENADO PARCIAL MASA | 1 | 5.22 | -3.78 | 0.35 | 2 |
| | 2 | 5.70 | -2.12 | 0.39 | 2 |
| | 3 | 3.33 | -2.16 | 0.49 | 2 |
| LLENADO PARCIAL PRESIÓN | 1 | 5.96 | 0.00 | 0.23 | 2 |
| | 2 | 3.63 | -1.75 | 0.39 | 2 |

Cuando se evalúa el surtidor con los diferentes procedimientos, el error máximo presentado no debe superar el 2% (según el numeral 4.3).

Con base en los valores presentados en la tabla 40 podemos afirmar:

- El máximo error presentado por el surtidor es de -3.78%, por lo tanto no cumple con el valor máximo permitido (2%).

- El valor máximo de incertidumbre permitido por la norma para un factor de cobertura $k=2$ es $1/3$ del error máximo permisible, es decir 0.667%. El valor máximo de incertidumbre presentado por el surtidor es 0.59% con un factor de cobertura de 2, por lo tanto el surtidor cumple con los requisitos establecidos.

e. Error de Repetibilidad: la mayor diferencia entre los valores obtenidos durante la verificación (este valor se toma respecto al patrón gravimétrico) bajo condiciones similares se conoce como error de repetibilidad. En la tabla 41 se presenta el error de repetibilidad de cada procedimiento.

Tabla 41. Error de Repetibilidad

| PROCEDIMIENTO | ETAPA | REPETIBILIDAD [%] | REPETIBILIDAD PERMITIDA |
|-------------------------|-------|-------------------|-------------------------|
| LLENADO NORMAL | 1 | 0.03 | 1% |
| LLENADO PARCIAL MASA | 1 | 0.35 | |
| | 2 | 0.4 | |
| | 3 | 0.68 | |
| LLENADO PARCIAL PRESIÓN | 1 | 0.03 | |
| | 2 | 0.55 | |

Respecto al error de repetibilidad se obtuvo un valor máximo igual a 0.68%, el cual es inferior al valor máximo permitido (1%)

f. Influencia de la variación de la densidad del gas suministrado en la exactitud de la indicación del medidor: el valor de densidad del gas natural

entregado en el surtidor presenta una variación durante el periodo comprendido entre las 9:00 am y las 6:00 pm de aproximadamente 0.05524 kg/m³.

La diferencia entre los valores de la densidad configurada en el surtidor (teniendo en cuenta que el valor configurado es constante) y la densidad real se presentan en la tabla 42.

Tabla 42. Diferencias entre la densidad configurada en el surtidor y la real

| HORA | DENSIDAD | DENSIDAD DEL | DIFERENCIA | % DE LA |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------|
| | REAL [kg/m ³] | SURTIDOR [kg/m ³] | [kg/m ³] | DIFERENCIA |
| 9:00 AM | 0.7701677 | 0.77 | 0.000167 | 0.02% |
| 12:00 AM | 0.7645613 | 0.77 | 0.005439 | 0.7% |
| 6:00 PM | 0.7147599 | 0.77 | 0.05524 | 7.17% |

La variación de la composición del gas afecta la exactitud de la indicación del surtidor en términos volumétricos. Por esta razón, en la tabla 43 se presentan los resultados para el cálculo de error evaluado a partir de la indicación de volumen del surtidor, el volumen real (obtenido a partir de la indicación de masa en el patrón y el valor de densidad del gas obtenido mediante las cromatografías).

Tabla 43. Errores con base en el volumen entregado

| PROCEDIMIENTO | ETAPA | CAUDAL PROMEDIO [kg/min] | VOLUMEN INDICADO [m ³] | ERROR EN MASA [%] | ERROR EN VOLUMEN [%] |
|-------------------------|-------|--------------------------|------------------------------------|-------------------|----------------------|
| LLENADO NORMAL | 1 | 5.18 | 8.32 | -0.7 | -3.64 |
| LLENADO PARCIAL MASA | 1 | 5.22 | 2.6 | -3.78 | -10.74 |
| | 2 | 5.70 | 2.633 | -2.12 | -9.21 |
| | 3 | 3.33 | 2.817 | -2.16 | -9.22 |
| LLENADO PARCIAL PRESIÓN | 1 | 5.96 | 4.24 | 0.00 | -7.2 |
| | 2 | 3.63 | 3.85 | -1.75 | -8.75 |

Los valores de la tabla 43 muestran que la diferencia en la composición del gas (variación de la densidad) afecta la exactitud de la indicación de volumen del surtidor, generando una gran problemática en las ciudades donde se presentan condiciones de mezcla de gases en su esquema de distribución, la presencia de gas de diferentes fuentes ocasionan una variación en la composición y por ende en las propiedades del energético.

CONCLUSIONES

- Como resultado de este proyecto, se desarrolló e implementó un servicio de verificación metrológica de surtidores de GNV en la Corporación CDT de gas, que puede evaluar con una exactitud y una incertidumbre adecuada las mediciones realizadas por los surtidores de GNV y de esta manera, contribuir con el posicionamiento del gas natural como combustible vehicular liderado por el gobierno nacional.
- Se realizó un barrido nacional e internacional acerca del marco legal, normativo y técnico que rige a las estaciones de servicio de GNV en los procesos de transferencia de custodia y metrología legal además de las metodologías aplicables a la verificación metrológica de los surtidores de GNV, estableciendo de esta manera los requerimientos técnicos y metrológicos necesarios para la prestación del servicio acorde a las necesidades de nuestro país.
- Se desarrolló un servicio de verificación metrológica de los surtidores de GNV, apto para cumplir con todas las exigencias impuestas por el proceso de llenado como cambios bruscos de caudal, presión pulsante, altas presiones de trabajo, variación de las propiedades del gas, flujo estacionario.
- Se implementó el servicio de verificación metrológica de surtidores de GNV, usando el método gravimétrico, con un patrón el cual tiene una capacidad de pesaje de nueve (9) kg de gas, con una resolución de 1 g e intrínsecamente seguro.

- Se implementó el servicio de verificación metrológica de surtidores de GNV basado en el método de patrón másico de referencia, el cual tiene un alcance de caudal de 40 kg/min, superando ampliamente los valores de caudal manejados por el surtidor de GNV (15 kg/min), con una exactitud de $\pm 0.4\%$.
- Se desarrollaron procedimientos para la correcta ejecución de las diferentes pruebas implicadas en el servicio de verificación metrológica de surtidores de GNV. Estos procedimientos incluyen los parámetros técnicos y metrológicos a evaluarse y la metodología para ejecutar la verificación en campo de los patrones utilizados y los surtidores de GNV.
- Las pruebas piloto se desarrollaron en tres ciudades diferentes en donde se evaluaron dos (2) estaciones por ciudad. En las pruebas realizadas se verificaron parámetros como el desempeño de los patrones utilizados, la validez de los diferentes métodos y procedimientos y las cualidades metrológicas de los surtidores verificando su desempeño.
- La variabilidad de la composición del gas natural que alimenta la estación de servicio afecta de manera directa la indicación del surtidor. Esta problemática se acentúa en las ciudades donde el esquema de distribución de gas presenta mezcla de gases provenientes de distintos yacimientos.

Como resultado adicional de este proyecto, se implementó en las instalaciones del laboratorio de la Corporación CDT de Gas una infraestructura física y procedimental para la calibración y verificación metrológica de instrumentos de pesaje con un alcance de calibración de 10 kg para balanzas clase II y de 250 kg para balanzas clase III.

- Adicionalmente, se implementó en las instalaciones del laboratorio de la Corporación CDT de Gas una infraestructura física y procedimental para la calibración y verificación metrológica de medidores de flujo másico y volumétrico por el método gravimétrico. Este banco tiene un alcance máximo para medidores de caudal de 40 kg/min.
- La implementación del servicio de verificación metrológica de surtidores de GNV permite el establecimiento de los parámetros para desarrollar una regulación acorde a la realidad de nuestro país.

RECOMENDACIONES

- La verificación metrológica de los patrones debe realizarse antes y después de la prestación de un servicio de verificación metrológica en un surtidor de GNV. Además, los patrones deben tener un plan de verificaciones periódicas con un tiempo máximo entre verificación de seis (6) meses.
- Para contrarrestar los efectos de la variabilidad de la densidad del gas natural, se recomienda la ejecución de un estudio de las diferentes posibilidades de solución a esta problemática como el cambio al esquema de venta del gas natural vehicular o la adquisición de tecnología que permita corregir los efectos producidos por esta variación.

BIBLIOGRAFÍA

AGA REPORT No 11 - API MPMS 14.9. Measurement of natural Gas by Coriolis Meter. 2003.

BECERRA, Luis; GUARDADO, María. Estimación de la incertidumbre en la determinación de la densidad del aire. CENAM. Diciembre de 2001.

COMISIÓN DE REGULACION DE ENERGÍA Y GAS, CREG. Definición de costos en el transporte de gas natural comprimido para poblaciones.

EPO No 28. Examination Procedure Outline for Compressed Natural Gas (CNG) - Reatil Motor-Fuel Dispenser. NIST.

ESPECIFICACIÓN NORMATIVA DISPONIBLE 0025. Sistemas de medición de gas natural comprimido para uso vehicular. ICONTEC. 2005.

Handbook 44. Mass flow meters. NIST. Sec 3.37.

ISO 4185. Measurement of liquid flow in closed conduits - weighting method. 1980.

ISO 5168. Measurement of fluid flow - evaluation of uncertainties of a flow rate. 2005.

ISO 10790. Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidance to the selection, installation and use of Coriolis meters. Second edition 1999.

Measurement Canada. NGV Dispensers. Section 3 – Operational Location. Febrero 2005.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, MINMINAS. Resolución No 180928 de Julio de 2006.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, MINMINAS. Resolución No 80582 de Abril de 1996.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 5335. Calibración de surtidores para gas natural comprimido vehicular (GNCV). ICONTEC. Diciembre de 2004.

OIML TC8/SC7 – 3rd DRAFT. Compressed Gaseous Fuel Measuring Systems for Vehicles. Diciembre de 2002

OIML R76. Nonautomatic weighing instruments – Metrological and technical requirements - Test. 1992

OIML R111. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 y M3. 2004

OIML R105. Direct mass flow measuring systems for quantities of liquids. 1993.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA, UPME. Plan energético - Estrategia energética integral 2003 - 2020.

ANEXOS

ANEXO A. PANORAMA DEL GAS NATURAL

A1. GAS NATURAL

El término gas natural se utiliza para designar al gas proveniente del subsuelo que se extrae durante la explotación del petróleo, ya sea simultáneamente con el petróleo crudo o de manera independiente. La resolución CREG 091 de 1999¹¹, define el gas natural como: *Una mezcla de hidrocarburos livianos que se encuentra en los yacimientos en forma libre o en forma asociada al petróleo.*

En la cabeza del pozo, el gas natural es una mezcla de gases de petróleo que está compuesto en su mayoría por metano (CH₄), las porciones restantes están constituidas por nitrógeno, dióxido de carbono, propano, etano, sulfuro de hidrogeno, agua y otros elementos. El gas natural crudo o no procesado puede contener tanto como 98% o tan poco como 59% de metano dependiendo del campo donde se produjo.

Encontrar yacimientos de gas natural, extraerlo, tratarlo, transportarlo y distribuirlo hasta los centros de consumo, es un proceso muy complejo. Exige un largo tiempo de investigación, diseño, preparación, y avanzados recursos tecnológicos para garantizar su utilización segura. Todos estos esfuerzos e inversiones se justifican al considerar las ventajas que el gas natural presenta respecto a otros combustibles, entre las cuales vale la pena resaltar las siguientes:

¹¹ Resolución donde se establece el Reglamento Único de Transporte, vigente a partir del 19 de enero del 2000.

- La utilización del gas natural como combustible para fines domésticos o industriales es menos costosa (una quinta parte) que la energía hidroeléctrica.
- La combustión de gas natural produce cantidades muchísimo menores de desechos (humo, hollín, compuestos volátiles tóxicos) que otros combustibles (ACPM, fuel oil, gasolina, leña, carbón, etc.), debido a que su principal componente es el metano que es un combustible fósil liviano que produce menos emisiones de CO₂, CO, SO₂, NO_x durante su combustión. En grandes zonas industriales, la utilización masiva del gas natural significa mejorar notablemente la calidad del aire en el ambiente.

A1.1 CADENA DEL SECTOR GAS EN COLOMBIA

El esquema regulatorio de Colombia reconoce la existencia de cinco tipos de agentes independientes en la cadena de desarrollo del gas natural: el productor, el comercializador, el transportador troncal, el distribuidor y el consumidor.

A1.1.1 Producción de gas en Colombia

Las reservas a finales del 2005¹² fueron 3995 GPC¹³ de reservas comerciales, no comerciales 1779, y 937 para consumo propio en campos de producción, lo que significa una relación reserva/producción de más de 17 años.

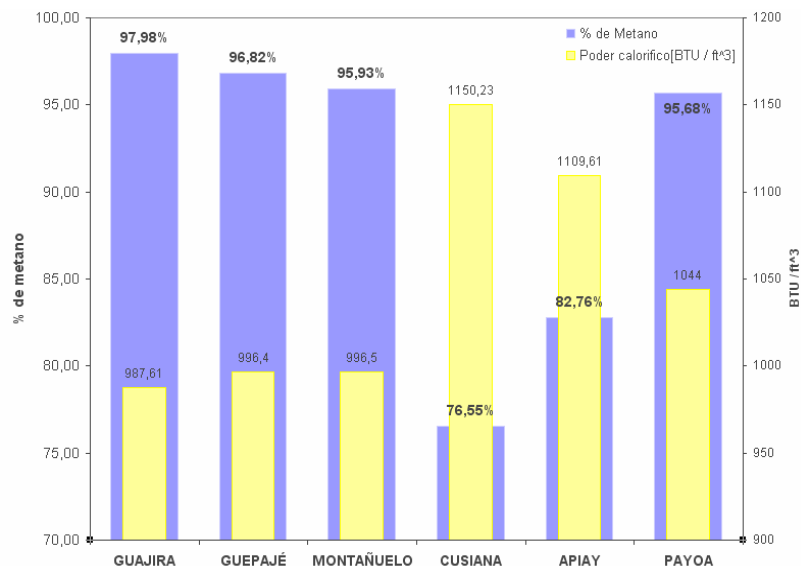
¹² Boletín estadístico de minas y energía 1999-2005 publicado por UPME

¹³ GPC: giga pies cúbicos

Los yacimientos de la Guajira (campos de Ballena y Chuchupa) tiene una participación del 49.4% de las reservas probadas del país, posee un tipo de gas libre o seco y los depósitos están en fondo del mar; a diferencia del resto de campos en los cuáles el gas es asociado (Valle Medio del Magdalena y Cusiana, Apiay, Cupiagua) o Condensado (Floreña, Pauto, Volcanera).

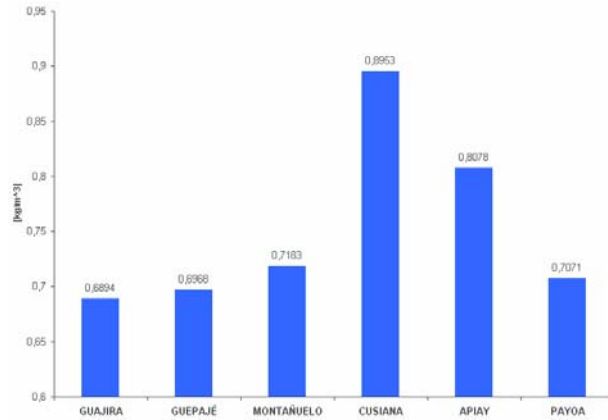
Colombia es un país con una riqueza energética considerable, en cuanto al gas natural que yace a lo largo de su subsuelo. A nivel mundial dichos gases se clasifican dentro de los más puros, con elevados porcentajes de metano que van desde el 75% hasta el 97%. En la figura 1 y 2, muestra el porcentaje de metano, el poder calorífico superior y la densidad del gas producido en algunos campos del país, estas características varían en cada yacimiento, es así que no se puede encontrar 2 gases con la misma composición.

Figura 1A. Propiedades del gas natural de los principales yacimientos Colombianos.¹⁴



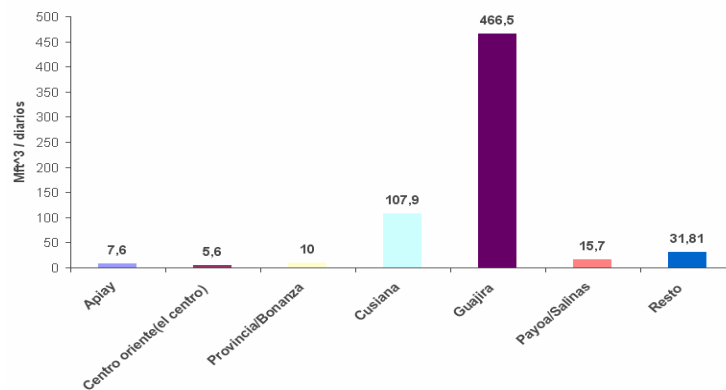
¹⁴ Boletín electrónico de Operaciones de Promigas S.A y Ecogas S.A

Figura 2A. Densidad promedio del gas natural en los principales yacimientos Colombianos.



El yacimiento más importante de gas natural se encuentra en La Guajira, el cual abastece el 72% de las necesidades de los consumidores, le sigue en importancia el yacimiento Cusiana- Cupiagua (ubicado en el departamento del Casanare) que gracias a la puesta en funcionamiento de una nueva planta en el 2003, aumentó su producción en 90 Mft³/ diarios. En la figura 3, se muestra el suministro de gas natural de los diferentes campos del país, reportados al 31 de diciembre de 2005

Figura 3A. Suministro de gas natural.¹⁵



¹⁵ Boletín estadístico de minas y energía 1999-2005 publicado por UPME

A1.1.2 Sistema Nacional de Transporte

Se entiende como Sistema Nacional de Transporte, el conjunto de gasoductos localizados en el territorio nacional, excluyendo conexiones y gasoductos dedicados, que vinculan los centros de producción de gas del país con las Puertas de Ciudad, Sistemas de Distribución, Usuarios No Regulados, Interconexiones Internacionales o Sistemas de Almacenamiento.

Las principales empresas transportadoras del país son Ecogás, empresa de derecho público, propietaria de la gran mayoría de la infraestructura de transporte del interior del país y Promigas S.A., empresa privada propietaria de la gran mayoría de los gasoductos de la Costa Atlántica. Los transportadores restantes, se han desarrollado a través de contratos de concesión con el Ministerio de Minas y Energía, Trasmetano, Transoriente, Gasoducto del Tolima, Progasur y otros por libre iniciativa como en el caso de Transoccidente y Transcogas.

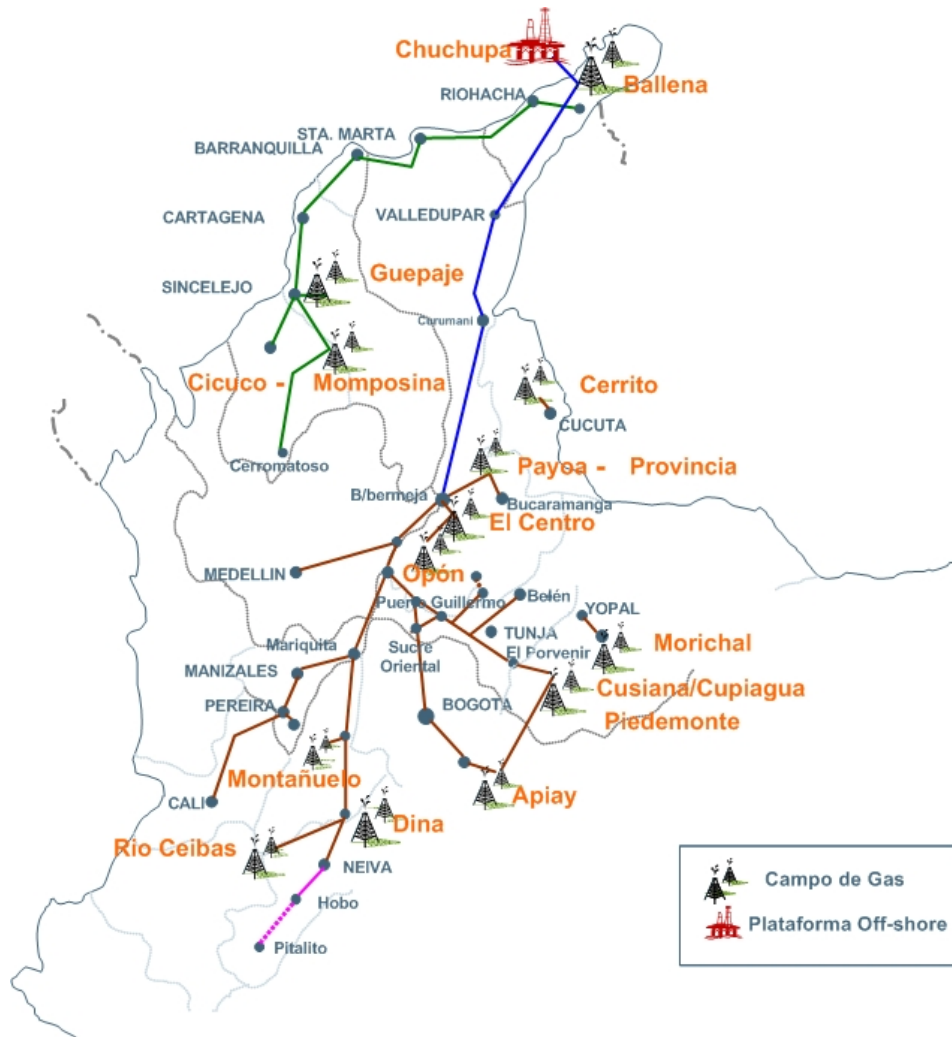
El transporte de gas natural es independiente de las actividades de producción, comercialización y distribución. En consecuencia, los contratos de transporte y las tarifas, cargos o precios asociados, se suscribirán independientemente de las condiciones de compra o distribución y de su valoración.

Las empresas transportadoras no pueden realizar de manera directa, actividades de producción, comercialización, o distribución, ni tener interés económico en empresas que tengan por objeto la realización de esas actividades. El Transportador tampoco puede tener interés económico en empresas de generación eléctrica.

La Red Nacional de Transporte de gas natural, está compuesto por los siguientes sistemas:

- De la Costa Atlántica: Conformado por el sistema troncal que vincula la conexión de los campos de gas natural de La Guajira, Córdoba y Sucre, con las puertas de ciudad (conocidas como city-gates) localizadas en Riohacha, Santa Marta, Barranquilla, Cartagena, Sincelejo y Montería, incluyendo las conexiones de otros campos menores y los subsistemas que se conecten a esta troncal.
- Del Centro: Es la troncal que hace la conexión de los campos de gas natural de La Guajira con la puerta de ciudad de Barrancabermeja (Santander) y los subsistemas y ramales que se conecten a esta troncal.
- Del Interior: Está compuesto por el sistema troncal que vincula la conexión de los campos de gas natural de Casanare, Meta, Tolima, Huila, Santander, y otros existentes en el interior del país, con las ciudades de Villavicencio, Neiva, Medellín, Bucaramanga, Cali y Bogotá, entre otras.

Figura 4A. Sistema nacional de transporte.¹⁶



A1.1.2 DISTRIBUCIÓN DE GAS NATURAL EN COLOMBIA

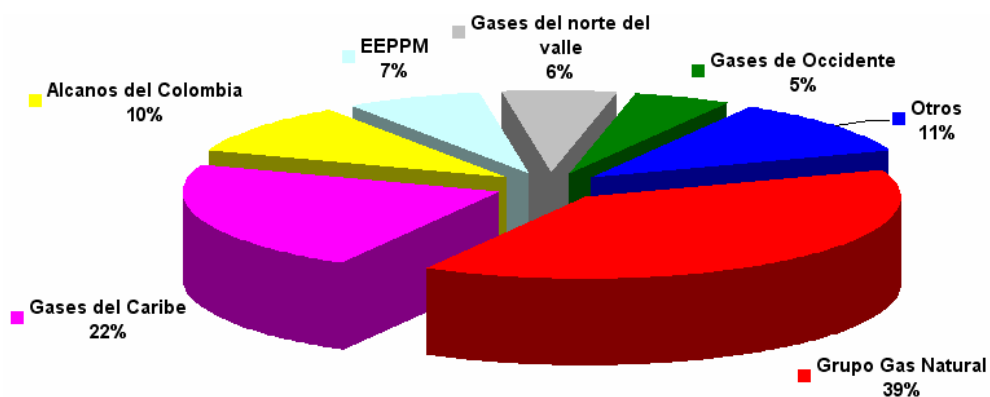
Una vez se dispone del gas en las poblaciones, mediante redes subterráneas de distribución se lleva el energético hasta puerta de usuario para su utilización.

¹⁶ Fuente Gas Natural S.A

En la actualidad existen 31 empresas distribuidoras¹⁷ de gas natural en el país, que operan bajo la modalidad de concesión, algunas de ellas con derecho de exclusividad en su zona de influencia. Se cuenta con un cubrimiento de mas de 400 municipios y localidades del país, y un total de 4.4 millones de conexiones, de los cuales el 98% corresponden al sector residencial, 1,3% son usuarios comerciales y los industriales representan menos del 1%.

Para la comercialización en el mercado regulado (empresas que consuman hasta 300.000 pie³/día), los distribuidores deben licitar las compras. Dentro del mercado no regulado (todas las empresas que presentan consumos por encima de los usuarios regulados) los clientes pueden comprar directamente a los productores.

Figura 5A. Participación de las distribuidoras en el mercado de los usuarios regulados en el 2005.¹⁸



¹⁷ Fuente Superintendencia de servicios públicos domiciliarios

¹⁸ Fuente CREG

El triunfo del programa de masificación de gas natural, se debe a la infraestructura con que cuenta el país, la cual es producto de los esfuerzos hechos por el estado y el sector privado, aportando recursos financieros y tecnológicos. La implementación de políticas que buscan racionalizar el consumo de combustibles líquidos y reducir la contaminación ambiental, favorecen el aumento en la demanda del gas natural en todos los sectores consumidores de energía (transporte, comercial, residencial, etc.), con lo que se proyecta que la expansión continuará y con ella la adecuación de la infraestructura necesaria.

A1.2 USOS DEL GAS NATURAL EN COLOMBIA

A nivel nacional, el gas natural se utiliza como materia prima o como combustible en los sectores industrial, petroquímico, termoeléctrico, doméstico, comercial y como combustible para vehículos. La tabla 6 se muestra los sectores que incluyen dentro de sus procesos el gas natural.

Tabla 1A. Principales usos del gas natural en Colombia

| SECTOR | USOS |
|---------------------|---|
| Industrial | <ul style="list-style-type: none"> Refinería de petróleo Industria del vidrio Minas de ferroniquel Industria alimenticia Hierro y acero <ul style="list-style-type: none"> • Pulpa de papel • Industria de cemento • Cerámica • Industria textil |
| Petroquímica | <ul style="list-style-type: none"> Urea Alcoholes Etileno MTBE (Éter Metil tert- butílico) <ul style="list-style-type: none"> • Nitrato de amonio • Aldehídos • Acetileno • Polietileno |

| SECTOR | USOS |
|------------------------------|--|
| Termoeléctrico | Turbogeneradores • Plantas de Calderas Cogeneración Plantas de ciclo combinado • Plantas de ciclo STIG (Steam Injected gas tubine) |
| Domestico y comercial | Cocinas • Calentadores de agua Secadoras de ropa • Calefacción Refrigeración • Restaurante Acondicionamiento de aire • Hoteles |
| Transporte | Gas natural para uso vehicular en reemplazo de los combustibles líquidos |

En el sector industrial, la industria alimenticia y de bebidas y la industria cementera, el uso de gas natural es llamativo dada la poca contaminación sobre la producción y en el caso de generación de vapor, como sistemas de calentamiento y energía es confiable seguro y económico. En el sector de fertilizante y químicos inorgánicos, el elemento básico para la producción de los químicos fertilizantes es el amoniaco. La síntesis del amoniaco a partir del gas natural es análoga al proceso de producción de metanol. La industria de la refinación del petróleo es clasificada como una gran consumidora de energía proveniente del gas natural, con una alta proporción de autoabastecimiento.

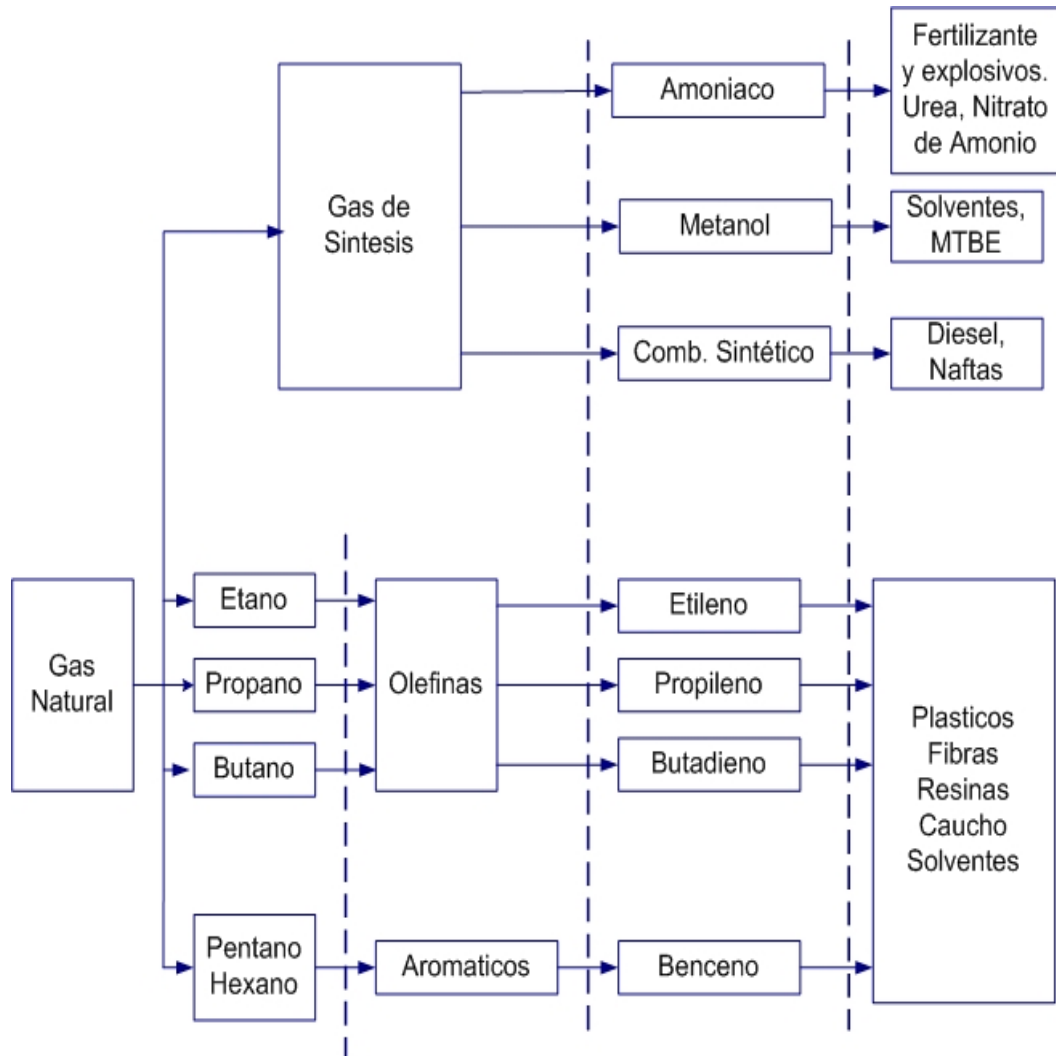
Las aplicaciones domésticas y comerciales son los usos del gas natural más comúnmente conocidos. En los últimos 5 años, el consumo de gas en este sector ha aumentado en un 27.3%, debido a la ampliación de la cobertura por parte de las empresas transportadoras y distribuidoras adicionalmente, las

tecnologías de los gasodomésticos han mejorado ofreciendo mayor seguridad y economía, desplazando de esta forma a los electrodomésticos.

El gas natural es materia prima para la fabricación de diversos productos petroquímicos. Los procesos petroquímicos que más dependen del suministro del gas natural son la producción de metanol y etileno. El metanol es utilizado en la gasolina, con el fin de disminuir las emisiones contaminantes de aromáticos en el combustible vehicular. El proceso de obtención de metano depende en su totalidad del suministro de gas natural como materia prima y para suministro de calor para el proceso. El procesamiento de gas natural arroja compuestos de etano, propano y butano. Cada uno de estos compuestos es usado para obtener un producto químico intermedio el que a su vez, es usado para producir una gran variedad de artículos industriales y de consumo. En la Figura 7, se muestra la gran variedad de productos que se pueden obtener a partir del gas natural.

Las compañías de electricidad y los proveedores independientes de energía emplean cada vez más el gas natural como fuente de energía de sus centrales eléctricas. Generalmente, las centrales que funcionan con gas natural tienen menores costos de capital, se construyen más rápidamente, funcionan con mayor eficacia y emiten menos polución atmosférica que las centrales que utilizan otros combustibles fósiles. Los avances tecnológicos en materia de diseño, eficacia y utilización de turbinas de ciclo combinado, así como en los procesos de cogeneración, fomentan el empleo de gas natural en la generación de energía.

Figura 6A. Gas natural como materia prima de productos petroquímicos



Las preocupaciones respecto de la calidad del aire en la mayor parte de las regiones del mundo, refuerzan el interés por la utilización del gas natural en el sector automotriz. Se estima que los vehículos que utilizan este tipo de combustible emiten un 20% menos de gas con efecto de invernadero que los vehículos que funcionan con gasolina o con diesel. En muchos países, este tipo de vehículos es presentado como una alternativa a los autobuses, taxis y

otros transportes públicos. A nivel nacional, la participación del sector transporte en la canasta energética y su incidencia en la economía, lo perfilan como el principal objetivo de ajuste para garantizar un óptimo uso de los recursos energéticos en el mediano plazo, es por esto, que se implementaron incentivos para masificar el uso del gas natural como combustible vehicular.

Desde el año 2001 hasta 2005 el consumo de gas natural creció en un 7.8%, debido principalmente al crecimiento del sector transporte (300%), lo cual creó incentivos financieros por parte de ECOPETROL y Ecogas para la conversión de vehículos a GNV y hoy existen mas de 100000 vehículos convertidos.

En la Figura 8, se puede observar el crecimiento del sector transporte, doméstico en industrial en los últimos años, mostrando la sustitución del GLP, ACPM, queroseno, fuel oil, crudos pesados y carbón en el área industrial, y electricidad, GLP, queroseno en el sector doméstico y comercial; y la gasolina y el Diesel en el transporte.

La Figura 9, la participación de los diferentes sectores en el consumo de gas a nivel nacional reportado en diciembre 31 del 2005.

Figura 7A. Consumo nacional por sectores desde 2001 – Diciembre 2005.¹⁹

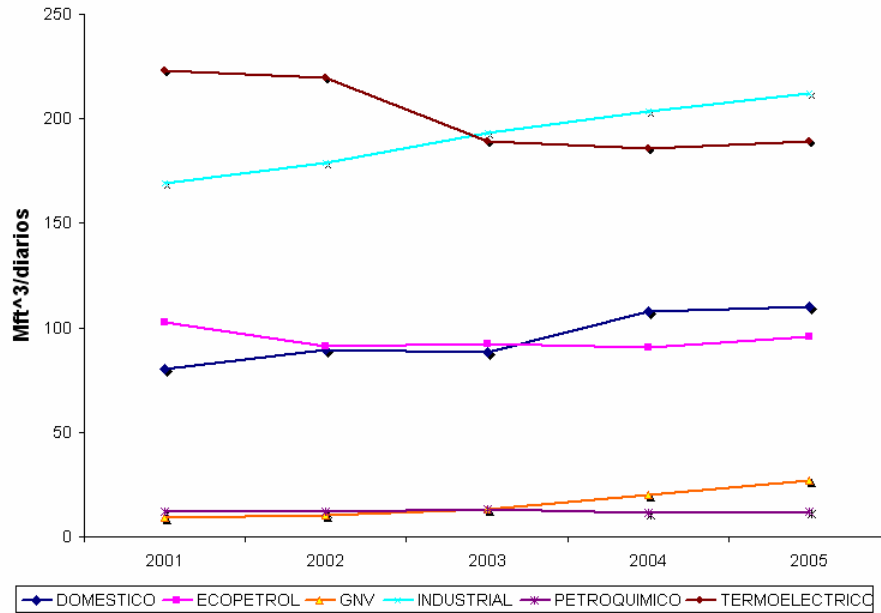
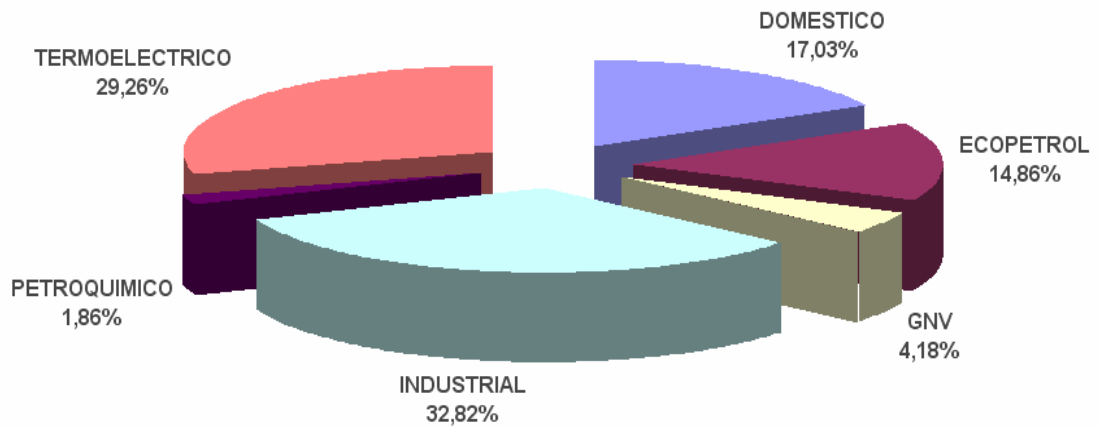


Figura 8A. Consumo de gas natural por sectores 2005.²⁰



¹⁹ Fuente UPME subdirección de Información minero energética.

²⁰ Fuente Boletín estadístico de minas y energía 1999-2005, publicado por UPME.

A1.3. DESARROLLO DEL GNV EN COLOMBIA

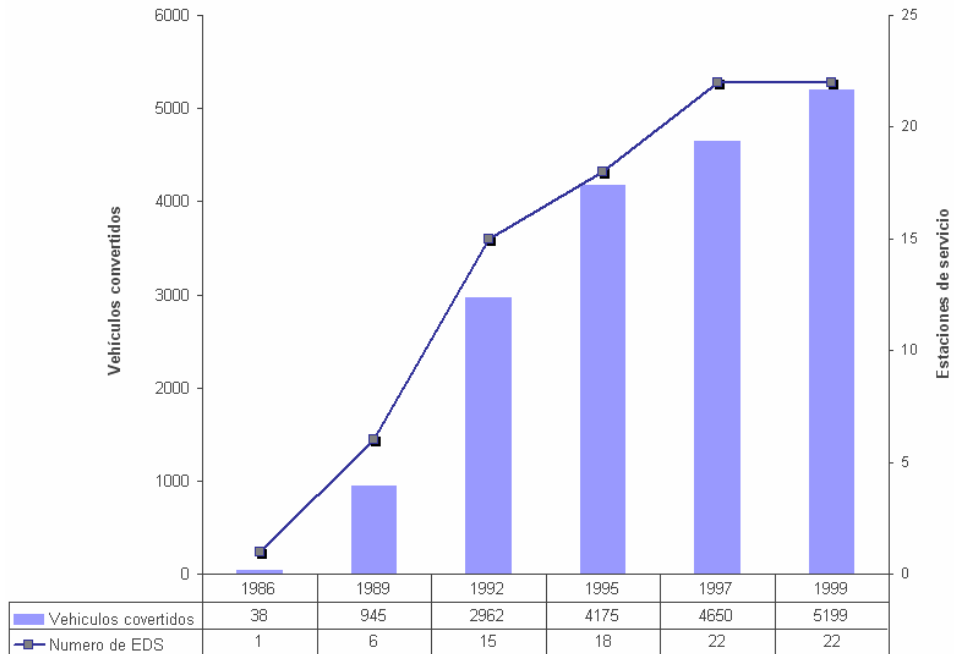
La protección real del medio ambiente implica grandes proyectos como la sustitución de combustible líquido por gas natural. El estado y sector privado, convirtió esta alternativa en realidad y hoy más de 100.000 vehículos del país operan con su combustible GNC: más económico y limpio.

A1.3.1 Inicios del plan de conversión de vehículos a GNV

Los primeros estudios para el desarrollo del proyecto de sustitución de combustibles líquidos por gas natural para el sector del transporte en Colombia fueron realizados por ECOPEPETROL a principios de los años ochenta. En ese entonces, los objetivos perseguidos con el proyecto, que aun están vigentes, fueron; incentivar el uso de un combustible que contribuyera a reducir los índices de contaminación ambiental, remplazar en parte la importación de gasolina con el consecuente ahorro de divisas para el país y brindar a los usuarios de vehículos beneficios económicos gracias a su menor precio.

En el año de 1986, esta iniciativa oficial contó con un decidido impulso por parte del sector privado, Promigas empresa encargada de la comercialización del gas natural en la Costa Atlántica, instaló las primeras estaciones de gas natural comprimido y proporcionó los medios para realizar las conversiones de los primeros vehículos a GNV en su región de influencia. Para esa misma época, en el interior del país fue instalada una estación de suministro de GNV por la empresa Alcanos del Huila, destinada a atender el parque automotor de la ciudad de Neiva.

Figura 9A. Datos generales de vehículos y estaciones de suministro de GNV en el país en 1986-1999.²¹



A partir de estos primeros esfuerzos realizados para promover el uso del GNV y gracias a la construcción de la red nacional de gasoductos que permite llevar este combustible a los grandes centros urbanos, se ha ido consolidando lentamente y a través de los años el uso del gas natural en el sector del transporte del país, en particular en la Costa Atlántica en donde circulan alrededor de 25000 vehículos convertidos. En la figura 11 se observar cómo desde un comienzo el GNV ha tenido una muy buena acogida y su consumo ha mostrado un crecimiento constante.

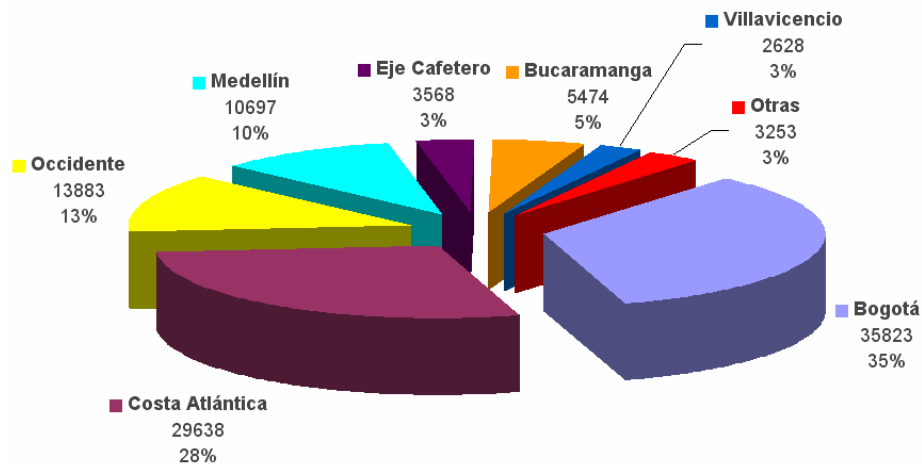
²¹ Fuente Evaluación del programa de conversión a GNV de vehículos de la flota de empresas publicas de Medellín. Compañía de Entrenamiento Técnico Automotriz (CETA) 2001.

A1.3.2 Situación actual del mercado del GNV

Actualmente, el gas natural es considerado un combustible viable no solo para los vehículos pesados como los buses que son los grandes consumidores de combustible, sino para las flotas de vehículos livianos (taxis, camionetas, automóviles, etc.). Es así, como hoy en día los mercados tanto de la Costa Atlántica como el interior del país es usado el GNV y las conversiones aumentan cada día.

La ciudad de Bogotá fue la zona con mayor dinamismo en conversiones en el año 2005, durante el mes de diciembre del 2005 más de 2000 vehículos fueron convertidos doblando la cifra de diciembre del 2004. Esto lleva a Bogotá tener el 35% de los vehículos convertidos en el país, las zonas de la costa y el occidente siguen con el 28% y 13% respectivamente como se muestra en la figura 12.

Figura 10A. Distribución de conversiones a nivel nacional.²²



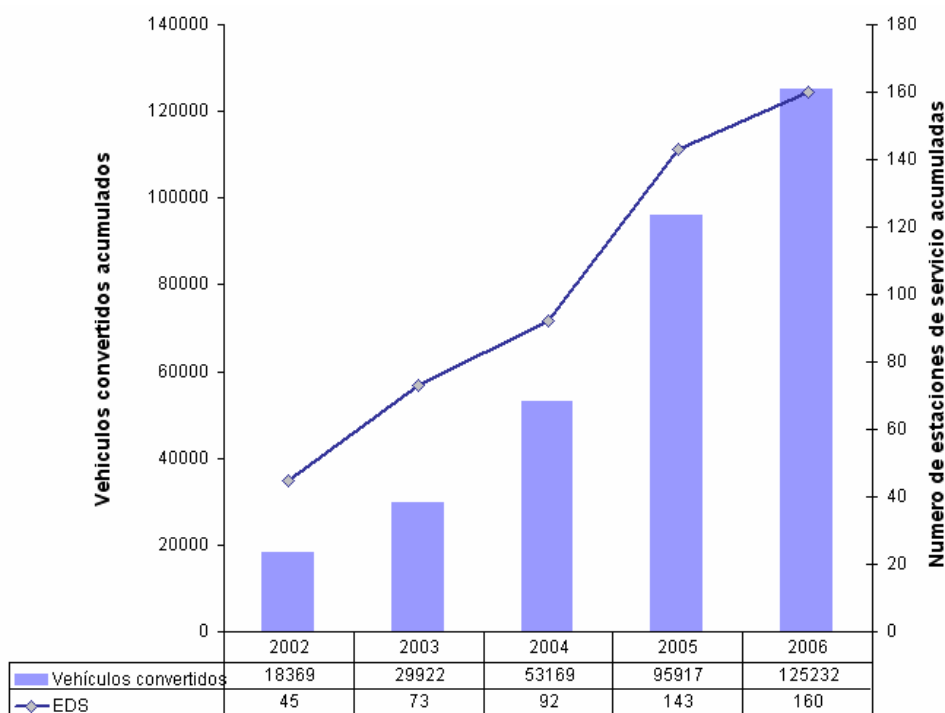
²² Boletín Informativo N° 5 de ECOPETROL S.A., sobre gas natural para vehículos. Marzo 2006

Como parte de la estrategia energética nacional, el Ministerio de Minas y Energía ha venido impulsando el programa de Gas Natural Vehicular, especialmente a través de las siguientes acciones:

- Exenciones arancelarias para la importación de equipos del plan de masificación de gas natural vehicular, que favorecen la construcción de estaciones de servicio de gas natural vehicular y talleres de conversión a GNV, las cuales fueron aprobadas mediante la Ley 788 de Diciembre de 2002.
- Desmante gradual de los subsidios de los sustitutos del gas natural vehicular, como son el diesel y la gasolina. Con esta medida se busca reflejar la competitividad del gas para ser usado en sectores como el vehicular y el industrial. Esta decisión fue adoptada en el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social -CONPES - 3244 de 2003.
- El apoyo institucional al desarrollo de un programa de incentivos económicos para estimular la conversión de vehículos a GNCV, liderado por ECOPETROL, GAS NATURAL S.A. E.S.P., ECOGAS y GNC S.A.

En la Figura 13 se muestra el crecimiento del mercado del gas natural vehicular en Colombia durante 2002 - 2006, estimulado por las acciones tomadas por las empresas del sector gas.

Figura 11A. Vehículos convertidos a GNV y EDS acumulados 2002-2006.²³



A1.4 FUTURO DEL GAS NATURAL VEHICULAR

En las últimas décadas el crecimiento de la demanda mundial de gas natural ha sido mayor al de otros combustibles como el petróleo y carbón, debido principalmente al énfasis creciente en la conservación del medio ambiente y la reducción en la dependencia del petróleo. La tasa de crecimiento en el periodo 2006 a 2025 se estima en un 2.2% (anual promedio) superior al promedio estimado de 1.9% y 1.6% para el petróleo y carbón, respectivamente.

²³ Indicadores de gestión del sector gas publicado por Ministerio de minas y energía agosto 2006. Los datos del 2006 corresponde a los valores acumulados a agosto 1 de 2006.

A1.4.1 Proyectos de interconexión gasífera

El futuro del gas natural vehicular está vinculado a la estabilización de la oferta del combustible. La mayoría de los países está llevando a cabo proyectos de interconexión que permitirán en un plazo no muy largo estabilizar la oferta de gas, reduciendo factores que afecten el suministro del combustible. La dinámica que está mostrando el sector del gas en el aspecto de integración regional, ha permitido avanzar de manera especial en el tema de infraestructura y en las negociaciones con otras naciones para llevar a cabo proyectos de manera oportuna y benéfica para todas las regiones del mundo. Por estas razones, Colombia valiéndose de su excelente ubicación geográfica, ha iniciado la planeación de proyectos de interconexión.

A continuación se describen los principales proyectos de interconexión gasífera.

a. Interconexión gasífera Colombia-Venezuela.

La interconexión entre Colombia y Venezuela se haría a través de un gasoducto de aproximadamente 180 Km, que uniría Maracaibo (Venezuela) y Ballenas (Colombia) con una capacidad de 200 MPCD; y el suministro a Centroamérica se realizaría aprovechando la infraestructura de transporte existente en la Costa Atlántica Colombiana y construyendo un gasoducto desde Cartagena hasta Colón (Panamá). Colombia atendería la demanda de Venezuela hasta el 2009, abasteciendo la zona de occidente y una vez conectado el sistema venezolano, se revertiría el flujo y Colombia recibiría gas de Venezuela para llevar a Centroamérica y Norteamérica.

Actualmente PDVSA estima un presupuesto de US\$ 170 millones para el proyecto de construcción (gasoducto Colombia -Venezuela).

Este proyecto tendría tres etapas:

- Primera Etapa: El gasoducto La Guajira- Maracaibo. Colombia alimentaría desde La Guajira a Maracaibo.
- Segunda Etapa: El gasoducto Venezuela – Caribe Colombiano – Panamá.
- Tercera Etapa: Tubo de poliducto Maracaibo al pacífico Colombiano, Colombia permitiría que Venezuela a través del pacífico exporte petróleo e hidrocarburos al mercado asiático.

b. Interconexión gasífera Colombia-Panamá.

La propuesta diseñada para la interconexión requiere la construcción de una tubería submarina que enlace la Costa Atlántica Colombiana con la de Panamá. En el punto de llegada se conectaría con un gasoducto terrestre que llevaría el energético hasta su destino final en Panamá y Costa Rica, entre Bahía las minas, Panamá y Puerto Limón, Costa Rica. Panamá estaría alimentada en principio por gas Colombiano y posteriormente por gas Venezolano dada la configuración actual de reservas de los 2 países. La interconexión entre Colombia y Panamá se haría a través de un gasoducto de aproximadamente 200 Km. de longitud con una capacidad de 200 MPCD.

b. Interconexión gasífera Colombia - Ecuador

La integración tendrá origen en Cali (Colombia), lo que haría que el sistema interconectado pasara por principales centros de consumo de Colombia y por el altiplano Ecuatoriano, Quito y Guayaquil.

En el norte de Ecuador, en el área de influencia de la de ciudad de Quito, existe una demanda potencial importante de gas natural, cuyo núcleo está constituido por la actual generación termoeléctrica; en el plan de expansión también existe un alto potencial en la industria de rápido desarrollo y en el

sector transporte, cuya dinámica puede ser más lenta pero igualmente interesante.

A1.4.2 Combustibles alternativos para vehículos

La realidad está marcando que la transición hacia combustibles más limpios y por ende menos perjudiciales para el medio ambiente, se está extendiendo por todo el mundo y este proceso continuará con muchas más fuerzas en el siglo próximo. Los incentivos para esta transformación por parte de cada país varía mucho, desde una verdadera preocupación por la calidad del aire hasta estrategias de Marketing que les permitan competir en el mercado local o ingresar a los internacionales, cuyas exigencias de calidad tienen cada vez más a los combustibles reformados. Entre las posibles alternativas de combustibles “amigables con el medio ambiente”, se encuentran:

a. El biodiesel: Es un aditivo del ACPM derivados de aceites o grasas vegetales, alternativa sin tener que introducir ningún tipo de modificación al motor, y que genera una potencia similar al ACPM convencional. Tiene además ventajas adicionales, como ser que es total y rápidamente biodegradable, no contiene azufre, y por su naturaleza de compuesto oxigenado logra una mejor combustión con una notable reducción de los conocidos humos de los motores diesel. Se trata por supuesto, de un recurso renovable, y que siendo derivado de un vegetal, no aporta anhídrido carbónico adicional a la atmósfera.

b. Alcohol Carburante: Es un compuesto inflamable que no tiene color y tiene olor característico de los alcoholes. Se puede producir a partir de cultivos como el maíz, la papa, la remolacha, la yuca, la papa, la remolacha, el sorgo y la caña, ya que estos contienen carbohidratos que fermentan y se

transforman en alcohol. El alcohol carburante se puede mezclar con la gasolina para mejorar su calidad y producir una combustión con menos residuos.

En Colombia se promulgo la ley 693 de 2001, la cual establece que en septiembre del año 2005, las ciudades con mas de 500 mil habitantes, como Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla, deberán Utilizar gasolina en una mezcla 10% de Alcohol carburante.

c. Hidrogeno: Por más de un siglo el hidrógeno se ha considerado como un combustible conveniente y limpio. Puesto que puede obtenerse de una diversa gama de fuentes domésticas, el hidrógeno podría reducir los costos económicos, políticos y ambientales de los sistemas de energía. El hidrógeno es un portador de energía como la electricidad y puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes de energía tales como: el gas natural, el carbón, la biomasa, el agua, etc., así como de las aguas negras, de los residuos sólidos, llantas y desechos de petróleo.

El punto de introducción para la energía con base en el hidrógeno es el sector transporte. La eficiencia de los automóviles modernos es de alrededor del 13 por ciento durante el ciclo de manejo urbano, en tanto que los vehículos a hidrógeno, ya sean híbrido-eléctricos o de celdas de combustible, podrían alcanzar eficiencias del orden de entre 35 y 45 por ciento. Los vehículos impulsados por hidrógeno también pueden cumplir con la demanda creciente de bajas o cero emisiones

d. GNV: La mayor parte del mercado potencial para GNV está conformado por los más altos consumidores de gasolina, como lo son el transporte colectivo, taxis y de carga que circulan en ciudades y zonas que actualmente

disponen de redes de gas. El uso masivo de este combustible esta condicionado a la implementación de una infraestructura adecuada para prestación del servicio y la implementación de políticas destinadas a impulsar su consumo.

**Anexo B. ESQUEMAS DE MONTAJE DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN
DE DATOS Y CONTROL OPTO 22**

Figura B1. CIRCUITO ELÉCTRICO 110 V AC

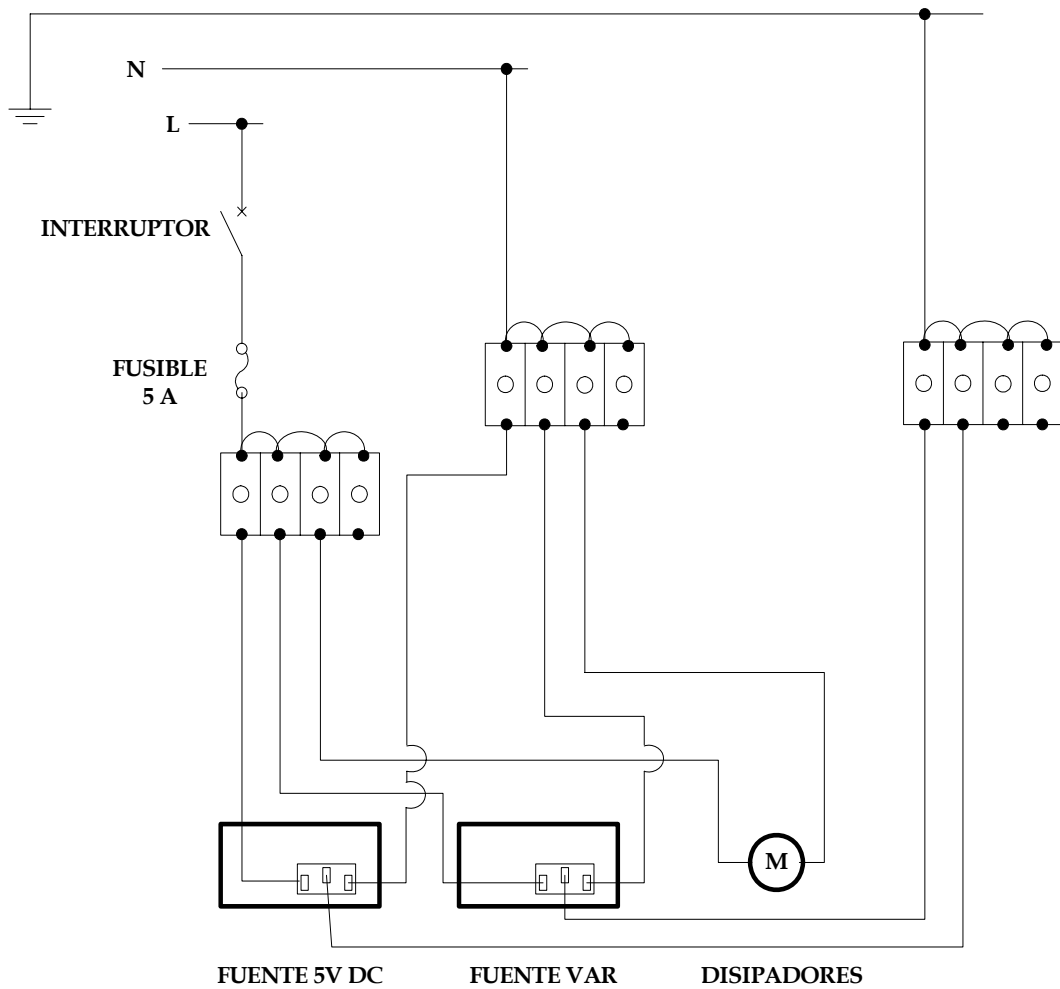


Figura B2. CIRCUITO RTD

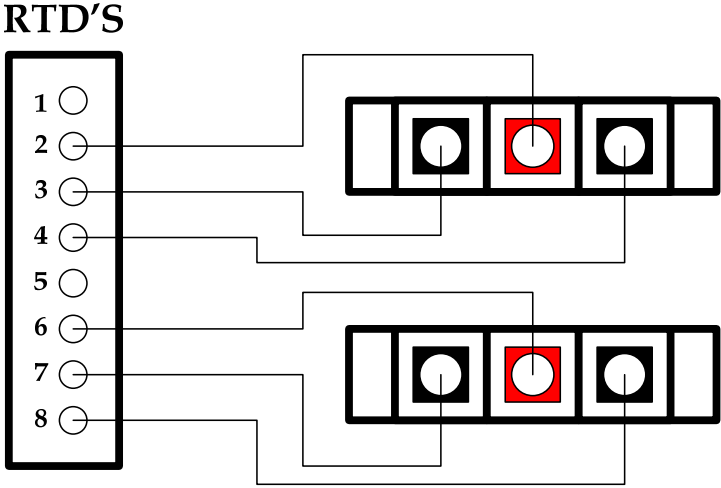


Figura B3. CIRCUITO ELÉCTRICO 5 V DC

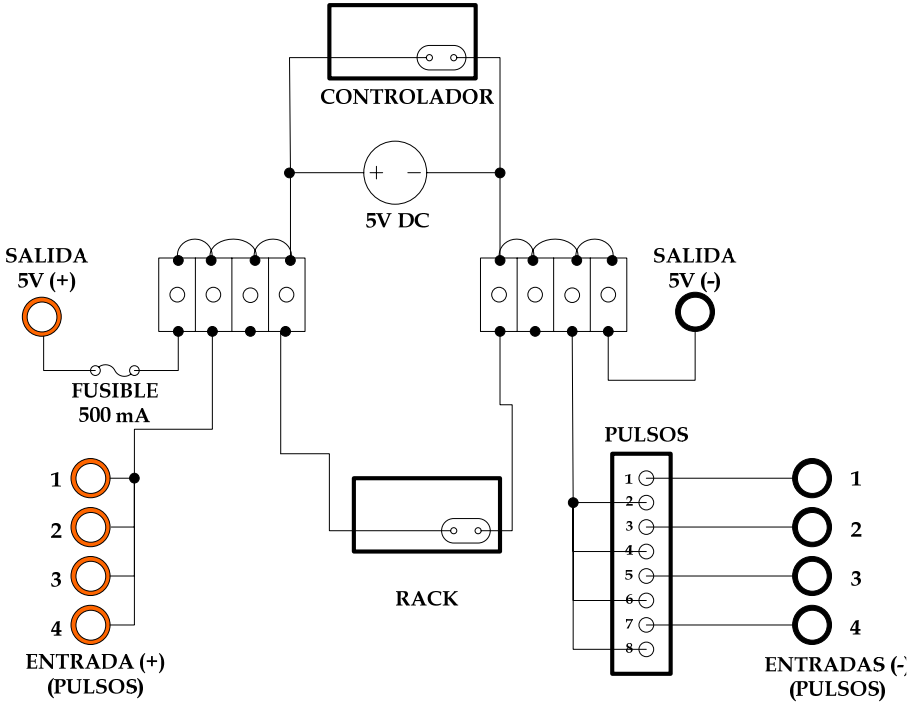
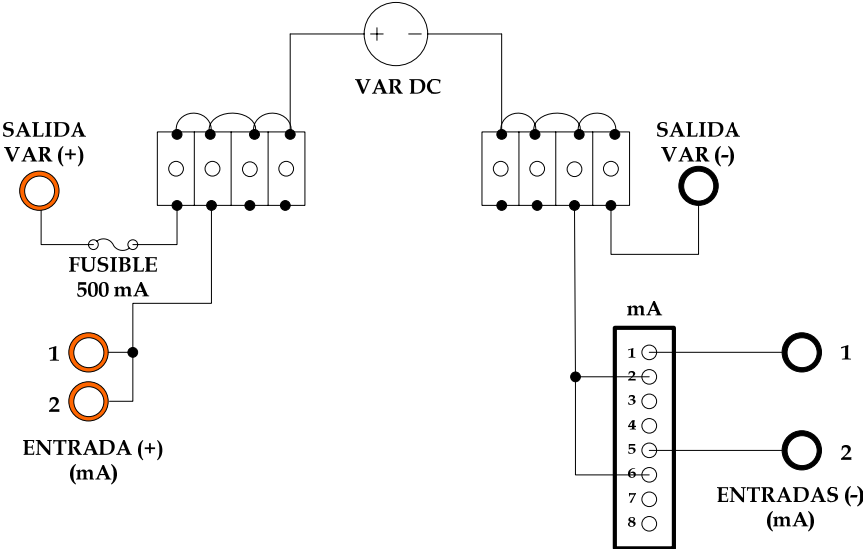


Figura B4. CIRCUITO ELÉCTRICO VARIABLE DC



Anexo C. ESPECIFICACIONES DE LA PLATAFORMA OPTO 22

C1. Controlador LCSX - PLUS

Figura C1. Controlador LCSX - PLUS



Tabla C1. Especificaciones del controlador LCSX - PLUS

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

C2. Brain B3000

Figura C2. Brain B3000

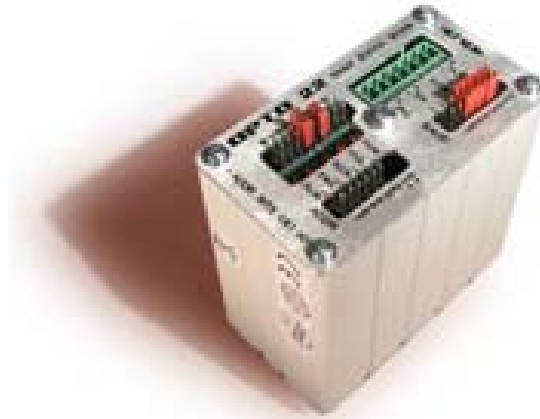


Tabla C2. Especificaciones del BRAIN B3000

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

C3. Módulo de Entradas Analógicas - AIMA

Figura C3. Módulo AIMA



Tabla C3. Especificaciones del módulo AIMA

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

C4. Módulo de Entradas para RTD - AIRTD

Figura C4. Módulo AIRTD



Tabla C4. Especificaciones del módulo AIRTD

| CARACTERÍSTICA | ESPECIFICACIÓN |
|--|----------------------------|
| Rango de entrada de temperatura | -200 a 850 °C |
| Span | 400Ω |
| Tiempo de Respuesta (Entrada) %Rango/Temperatura/Tiempo | 63%/598°C/25ms |
| Resolución | 0.042°C (0.016Ω) |
| Error máximo | 0.6°C |
| Rechazo a modo común (DC) | >-120dB |
| Rechazo a modo común (AC) | >-120dB a 60Hz |
| Fuente lógica de voltaje | 5VDC +/- 5%, 50mA (máximo) |
| Temperatura de operación | 0 °C a 70 °C |
| Temperatura de almacenamiento | -30 °C a 85°C |

C5. Módulo de Entradas para pulsos - IDC5-Q

Figura C5. Módulo IDC5-Q



Tabla C5. Especificaciones del módulo IDC5-Q

| CARACTERÍSTICA | ESPECIFICACIÓN |
|----------------------------------|--|
| Voltaje lógico | 5 VDC |
| Temperatura de Operación | 0 a 70°C |
| Rango de voltaje a la entrada | 4-24 VDC |
| Resistencia de entrada | 1k Ω a 4V 560 Ω a 24V |
| Voltaje máximo de estado en bajo | 1V |
| Frecuencia máxima de entrada | 5 kHz por canal |

C6. Módulo de Salidas Digitales - OAC5

Figura C6. Módulo OAC5



Tabla C6. Especificaciones del módulo OAC5

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

Anexo D. CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ÁREAS PELIGROSAS SEGÚN CANADIAN APPROVALS AGENCY

| CLASE | |
|-------------|---|
| Clase I. | Se consideran como clase I, aquellos lugares donde hay o puede haber gases o vapores en cantidad suficiente para producir mezclas inflamables. |
| Clase II. | Las áreas clasificadas como clase II son aquellas en las que estas presentes productos como: Polvos orgánicos, carbón o metales inflamables |
| Clase III. | En esta clasificación figuran las áreas en las que se encuentran presentes Materiales fibrosos inflamables. |
| DIVISIÓN | |
| División 1. | <p>En esta división se encuentran aquellas áreas donde bajo condiciones normales de operación o debido a labores frecuentes de reparación y mantenimiento, existen fugas de gases o vapores en concentraciones inflamables.</p> <p>Se considera área de división I, también a las que debido a rotura u funcionamiento anormal del equipo de proceso puedan liberarse gases o vapores en concentraciones inflamables y simultáneamente pueda ocurrir una falla en el equipo eléctrico.</p> |
| División 2. | <p>Son consideradas en esta división, aquellas áreas donde se manejan, procesan o almacenan productos inflamables, pero en la que normalmente no existen concentraciones peligrosas, los productos se encuentran en recipientes o sistemas cerrados de los cuales solo pueden escapar en caso de rotura o funcionamiento anormal de los equipos de proceso, así como también, donde las concentraciones inflamables de gases o vapores son impedidas, mediante sistemas de ventilación positiva y por lo tanto, únicamente la falla de dichos sistemas puede dar lugar a la presencia de una atmósfera inflamable, contiguas a lugares clase I, división I, a las que puedan llegar ocasionalmente concentraciones inflamables de gases o vapores, a menos que tal comunicación sea evitada por sistemas de ventilación adecuados y se hayan previsto dispositivos para evitar la falla de dichos sistemas. En consecuencia, las áreas donde se cumplan las condiciones descritas anteriormente se clasifican como División II.</p> |

| GRUPO | | |
|-----------|---------|---|
| Clase I | Grupo A | Acetileno. |
| | Grupo B | Hidrógeno o sustancias con un porcentaje mayor de 30% en volumen. |
| | Grupo C | Ethil, Ether y Etileno. |
| | Grupo D | Acetona, Ammonia, Benceno, Gasolina. |
| Clase II | Grupo E | Aluminio, Magnesio |
| | Grupo F | Carbón, Coque |
| | Grupo G | Harina, Granos, Madera, Plásticos y Químicos |
| Clase III | * | Fibras naturales o sintéticas |