

**EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA TECNOLOGÍA NO
CONVENCIONAL PARA LA MEDICIÓN DE PODER CALORÍFICO EN
PUNTOS DE MEZCLA DE GAS NATURAL**

DIANA MARCELA CASTILLO BLANCO



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS
COHORTE XVI
BUCARAMANGA
2014**

**EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA TECNOLOGÍA NO
CONVENCIONAL PARA LA MEDICIÓN DE PODER CALORÍFICO EN
PUNTOS DE MEZCLA DE GAS NATURAL**

DIANA MARCELA CASTILLO BLANCO

**Monografía de grado para optar al título de
Especialista en Gerencia de Recursos Energéticos**

Director

Ing. Luis Eduardo Jaimes Reatiga

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS
COHORTE XVI
BUCARAMANGA
2014**

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Febrero 27 de 2014

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 9 |
| 2. | OBJETIVOS DEL PROYECTO | 11 |
| 3. | MARCO TEÓRICO | 12 |
| 3.1 | CONCEPTOS GENERALES..... | 12 |
| 3.2 | TIPOS DE TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES..... | 15 |
| 3.2.1 | ANÁLISIS POR CALORIMETRÍA DE GASES..... | 15 |
| 3.3 | ANÁLISIS DE OXÍGENO RESIDUAL | 16 |
| 3.4 | CROMATOGRAFÍA DE GASES..... | 17 |
| 3.5 | TIPOS DE TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES..... | 19 |
| 3.5.1 | PRINCIPIO TEÓRICO DE OPERACIÓN DE LOS MÉTODOS CORRELATIVOS | 20 |
| 3.6 | ANALIZADORES DE PODER CALORÍFICO EN LA INDUSTRIA DEL GAS NATURAL..... | 21 |
| 3.6.1 | EQUIPOS DE MEDICIÓN POR CALORIMETRÍA DE LLAMA ABIERTA | 22 |
| 3.6.2 | COMPARACIÓN DE CALORÍMETROS DE LLAMA ABIERTA..... | 27 |
| 3.6.3 | ANALIZADORES DE OXÍGENO RESIDUAL..... | 28 |
| 3.6.4 | COMPARACIÓN ANALIZADORES DE OXÍGENO RESIDUAL..... | 31 |
| 3.6.5 | CROMATÓGRAFOS DE GASES..... | 32 |
| 3.6.6 | COMPARACIÓN CROMATÓGRAFOS | 44 |
| 3.6.7 | TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES..... | 44 |
| 3.6.8 | COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES..... | 53 |
| 3.6.9 | COSTOS DE ADQUISICIÓN TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES | 53 |
| 3.6.10 | COSTOS DE ADQUISICIÓN TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES | 54 |
| 4. | SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA NO CONVENCIONAL ADECUADA | 55 |
| 4.1 | ESTUDIO DE OPERATIVIDAD DEL ANALIZADOR..... | 57 |
| 4.1.1 | DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE VALIDACIÓN | 58 |
| 5. | EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO..... | 64 |
| 5.1 | EVALUACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL CORRESPONDIENTE A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA TRADICIONAL (CROMATOGRAFÍA DE GASES) | 64 |
| 5.2 | FLUJO DE INVERSIÓN CON LA TECNOLOGÍA CONVENCIONAL..... | 65 |

- 5.3 EVALUACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL CORRESPONDIENTE A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA
TECNOLOGÍA NO CONVENCIONAL 67
- 5.4 FLUJO DE INVERSIÓN CON LA TECNOLOGÍA NO CONVENCIONAL 68
- 5.5 WACC DE LA EMPRESA 69
- 5.6 CÁLCULO DE FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO 70
- 5.7 INDICADORES FINANCIEROS DEL PROYECTO 71
- 5.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES 72
- 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS 75
- 7. CONCLUSIONES 76
- 8. BIBLIOGRAFÍA 77

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de Poder Calorífico | 13 |
| Figura 2. Esquema general de un analizador de oxígeno residual | 17 |
| Figura 3. Esquema general de un cromatógrafo en línea | 18 |
| Figura 4. Relevancia del tamaño molecular en las propiedades del gas natural | 21 |
| Figura 5. Propiedades físicas del gas en función del número de átomos de Carbono | 21 |
| Figura 6. Diagrama de operación del calorímetro ALGAS SDI | 23 |
| Figura 7. Diagrama de operación del calorímetro Thermoscientific FLO-CAL | 24 |
| Figura 8. Diagrama de operación del calorímetro CALOR VAL | 26 |
| Figura 9. Analizador de Oxígeno Residual COSA 9610 | 28 |
| Figura 10. Analizador de Oxígeno Residual WIM COMPAS | 29 |
| Figura 11. Analizador de Oxígeno Residual RHADOX II | 30 |
| Figura 12. Cromatógrafo Daniel Modelo 770 | 33 |
| Figura 13. Cromatógrafo portable DANIEL modelo 575 | 35 |
| Figura 14. Cromatógrafo de gases ABB modelo 8206 | 36 |
| Figura 15. Cromatógrafo Yamatake HGC 303 | 37 |
| Figura 16. Cromatógrafo CHANDLER ENGINEERING 2920 | 38 |
| Figura 17. Cromatógrafo EVENT ENGINEERING Modelo 131 | 39 |
| Figura 18. Cromatógrafo de gases ENCAL 3000 | 40 |
| Figura 19. Cromatógrafo SITRANS CV | 41 |
| Figura 20. Cromatógrafo FXI | 42 |
| Figura 21. Cromatógrafo 1000 MARK II de Yokogawa | 43 |
| Figura 22. Cálculo de poder calorífico por correlación de v.sonido y dióxido de carbono | 47 |
| Figura 23. Analizador EMC 500 de RMG | 49 |
| Figura 24. Interface segura Gas PT2 | 50 |
| Figura 25. Analizador Gas PT2 | 50 |
| Figura 26. Analizador Gas labQ1 de Rhurgas | 52 |
| Figura 27. Carta de Control | 61 |
| Figura 28. Análisis de sensibilidad para la inversión | 73 |
| Figura 29. Análisis de sensibilidad para los ingresos de operación | 73 |
| Figura 30. Análisis de sensibilidad para los costos de operación | 74 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Comparación de características generales de los analizadores de llama abierta | 27 |
| Tabla 2. Comparación de desempeño metrológico de los analizadores de llama abierta | 27 |
| Tabla 3. Comparación de salidas de comunicación e insumos de los analizadores de llama abierta..... | 27 |
| Tabla 4. Comparación de características generales de los analizadores de oxígeno residual | 31 |
| Tabla 5. Comparación de desempeño metrológico, salidas de comunicación e insumos de los analizadores de oxígeno residual | 32 |
| Tabla 6. Comparación de características generales de los cromatógrafos de gases | 44 |
| Tabla 7. Comparación de desempeño, comunicación e insumos de los cromatógrafos de gases..... | 44 |
| Tabla 8. Dispositivos de medición de poder calorífico por técnicas correlativas | 45 |
| Tabla 9. Convenciones para la tabla 8 | 45 |
| Tabla 10. Comparación características generales y de desempeño tecnologías no convencionales | 53 |
| Tabla 11. Comparación de salidas de comunicación e insumos de las tecnologías no convencionales.. | 53 |
| Tabla 12. Costo de adquisición de las tecnologías convencionales | 54 |
| Tabla 13. Costo de adquisición de las tecnologías no convencionales..... | 54 |
| Tabla 14. Pruebas de control estadístico..... | 58 |
| Tabla 15. Validación de resultados - Método ASTM | 59 |
| Tabla 16. Validación de resultados - Método ISO | 60 |
| Tabla 17. Resultados de la evaluación de repetibilidad..... | 61 |
| Tabla 18. Resultados de confirmación de Repetibilidad – Test de Grubb..... | 62 |
| Tabla 19. Resultados evaluación de Reproducibilidad | 62 |
| Tabla 20. Resultados confirmación de Reproducibilidad -Test de Cochran | 63 |
| Tabla 21. Resultados evaluación de Linealidad | 63 |
| Tabla 22. Inversión inicial de la tecnología convencional | 65 |
| Tabla 23. Costos del mes dos para la tecnología convencional y no convencional | 66 |
| Tabla 24. Costos después del mes 3 para la tecnología convencional..... | 66 |
| Tabla 25. Flujo de inversión para la tecnología convencional..... | 67 |
| Tabla 26. Inversión inicial de la tecnología no convencional | 68 |
| Tabla 27. Costos después del mes 3 para la tecnología no convencional | 68 |
| Tabla 28. Flujo de inversión para la tecnología no convencional..... | 69 |
| Tabla 29. Balance General de la empresa..... | 69 |
| Tabla 30. Flujo de caja del proyecto (en pesos colombianos) | 70 |
| Tabla 31. Indicadores Financieros del Proyecto | 71 |
| Tabla 32. Análisis de sensibilidades del proyecto | 72 |

INTRODUCCIÓN

A pesar de que la cromatografía de gases es la tecnología convencional por excelencia para la determinación del poder calorífico, sus altos costos asociados a adquisición, operación, calibración y mantenimiento, han hecho que las investigaciones internacionales en el desarrollo de equipos para la industria del gas natural, se centren en nuevos métodos para la determinación de las propiedades de calidad del gas.

La industria del gas natural en Colombia no es la excepción y tiene múltiples necesidades que podrían ser atendidas si a través de un estudio que involucre ciencia y tecnología, se lograra identificar una solución tecnológica de carácter innovador que a costos moderados permitirá su utilización masiva

Esta necesidad ha impulsado el desarrollo de un proyecto que permita identificar una tecnología, que utilizando un principio de medición diferente al utilizado por la cromatografía de gases, permita realizar la determinación del poder calorífico del gas natural, con una reducción de costos de adquisición, mantenimiento y operación pero garantizando que los resultados entregados están dentro de las especificaciones metrológicas adecuadas.

La presente monografía muestra el proceso de desarrollo de este proyecto, iniciando con una exposición del problema que justifica la necesidad de encontrar una tecnología alternativa para medición de poder calorífico en mezclas de gas natural, así como los objetivos que se esperan alcanzar al finalizar el proyecto. Posteriormente, se muestra el marco teórico en el que incluyen las definiciones más importantes y se describen las tecnologías convencionales y no convencionales disponibles comercialmente. A partir de lo anterior se realiza la selección de la tecnología no convencional más adecuada, la cual va a ser comparada con la actual en el análisis financiero para determinar la viabilidad de implementación de esta tecnología.

Finalmente, se hace un análisis de los resultados obtenidos en la evaluación financiera y a partir de esto se emiten las conclusiones obtenidas del proceso implementado.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las transacciones de gas natural existe la necesidad de conocer tanto el volumen de gas como el poder calorífico del mismo para así obtener su contenido de energía. El interior del país, se abastece de gas natural proveniente de dos (2) fuentes principales: Gas denominado “Guajira” con una contribución aproximada del 44% y gas denominado “Cusiana” con el 52% aproximadamente, el 4% restante corresponde a otros yacimientos ubicados en el sur del país. Estos gases naturales individualmente presentan variaciones máximas mensuales típicas del orden de $\pm 10,0$ BTU/ft³ (para el caso de gas Cusiana). Sin embargo para el suministro en otras localidades, el gas de Guajira y el gas de Cusiana se mezclan en Vasconia, donde está localizada una estación de compresión para transportarlo hacia el sur y el sur-occidente del país, donde también son inyectados otros gases naturales como “Toqui – Toqui”, “Dina”, “Tello”, y otros yacimientos menores. La mezcla de estas corrientes es considerablemente inestable, presenta una variabilidad alta que para algunos casos es del orden ± 45 BTU/ft³ y depende fuertemente de las condiciones operativas de los gasoductos y de los consumos de los diferentes remitentes.

De acuerdo con lo anterior, y exceptuando aquellos remitentes que toman exclusivamente gas Guajira o gas Cusiana, todos los remitentes que reciben gas mezcla, requieren prestar especial atención, a la medición del poder calorífico del gas y a la correcta determinación de valores de poder calorífico representativos para la obtención de la energía del gas.

Para un período de tiempo dado (diario o mensual), se requiere establecer claramente una metodología trazable para la medición del poder calorífico; si el sistema de medición cuenta con un cromatógrafo en línea, es posible que -además del volumen- el computador de flujo contabilice la energía asociada al gas que ha pasado a través del medidor. Sin embargo, para ciertas estaciones donde la relación costo/beneficio de adquirir e instalar un cromatógrafo en línea no es satisfactorio, es común el uso de una media del poder calorífico con base en registros históricos obtenidos a partir de cromatografías asociadas a puntos cercanos que disponen de un analizador en línea. Aplicar estas técnicas tiene un riesgo asociado consistente

en la posibilidad de incurrir en errores, debido tanto al efecto de variabilidad en la composición del gas para el período en que se evaluó la media así como a la representatividad del dato.

En la actualidad los analizadores para la determinación de las propiedades del gas han alcanzado una etapa de desarrollo donde la incertidumbre en las mediciones y la susceptibilidad a la falla son muy bajas. Sin embargo, el capital inicial invertido y los costos de operación y mantenimiento (tanto rutinarios como correctivos) para estas tecnologías son aún considerables. Por lo anterior, a pesar de que la cromatografía de gases es la tecnología convencional por excelencia para la determinación del poder calorífico, a nivel internacional se han intensificado los esfuerzos por encontrar técnicas alternativas y confiables que permitan la determinación de parámetros de calidad de uso común en la industria del gas natural.

Con base en lo descrito anteriormente se observa la necesidad de buscar y evaluar una tecnología alternativa para la determinación de poder calorífico, considerando entre otros aspectos, su capacidad para operar en línea, la obtención de resultados metrológicamente confiables en aplicaciones de transferencia de custodia y los beneficios en cuanto a costos de adquisición, operación y mantenimiento; siendo este último aspecto la principal finalidad del desarrollo de esta monografía.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

- ❖ Realizar una evaluación de las tecnologías existentes y las alternativas disponibles en el mercado para la medición de poder calorífico en mezclas de gas natural.
- ❖ Seleccionar una tecnología no convencional de medición de poder calorífico que cumpla con los requisitos de operación y desempeño metrológico adecuados y que cuente con facilidades para su caracterización, teniendo en cuenta la disminución de costos de adquisición y mantenimiento respecto a las tecnologías actuales.
- ❖ Realizar un estudio del comportamiento operativo del analizador seleccionado, que permita confirmar la viabilidad como herramienta para el cálculo de la energía.
- ❖ Desarrollar el análisis de viabilidad económica del proyecto, evaluando los escenarios de riesgo y el análisis de sensibilidad.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 CONCEPTOS GENERALES

GAS NATURAL: El gas natural es una sustancia de origen fósil, procedente de la descomposición de la materia orgánica atrapada bajo la superficie terrestre en estratos que han impedido su liberación a la atmósfera. Se encuentra en la naturaleza en yacimientos subterráneos tanto terrestres como marinos, en forma de bolsas, que pueden estar asociadas o no con yacimientos de otros combustibles fósiles como el petróleo. Sus principales constituyentes son hidrocarburos livianos en estado gaseoso, con mayor proporción de metano y etano y en menor proporción: propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. Generalmente, esta mezcla contiene impurezas tales como vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno. Otras veces puede contener impurezas como sulfuro de hidrógeno, mercaptanos y helio que dependen del origen y procesos a los que haya sido sometido.

El gas natural es catalogado como una fuente de energía limpia, versátil y sostenible por lo que es utilizado en gran variedad de procesos donde se requiere ambientes limpios, condiciones controladas y combustibles de alta confiabilidad y eficiencia. Se emplea como materia prima y combustible en los sectores: industrial, petroquímico, termoeléctrico, doméstico, comercial y de transporte.

PODER CALORÍFICO: El poder calorífico es la cantidad de energía por unidad de masa desprendida por el proceso de combustión completa. Generalmente se define como la energía liberada en la reacción química entre un combustible (sustancias fósiles) y un comburente (oxígeno en el aire). La importancia de la determinación exacta de esta propiedad radica en el hecho de que el poder calorífico es una medida directa de la calidad de un gas puro (o mezcla de gas) para ser usado como combustible, e indica la cantidad de energía que puede ser obtenida como calor al quemar una unidad de gas. Es por esto que las transacciones comerciales y de facturación en la industria del gas natural se realizan en términos de energía.

Los productos resultantes en el proceso de combustión son dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Dependiendo del estado de referencia del agua formada por la reacción (líquido o gaseoso), se distinguen dos tipos de poder calorífico: superior e inferior.

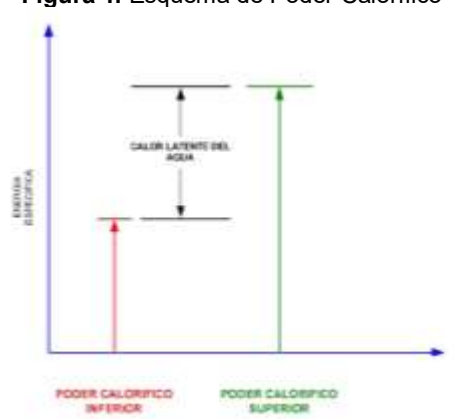
Las unidades de medida del poder calorífico para el gas natural son: energía por unidad de volumen de gas, BTU/ft^3 , cal/m^3 , J/m^3 . Según la norma ISO 6976 el poder calorífico se define como: “la cantidad de calor liberado por la combustión completa de una cantidad específica de gas con aire, considerando que la presión P_1 a la cual la reacción tiene lugar permanece constante, y todos los productos de la combustión retornan a la temperatura inicial de los reactantes T_1 permaneciendo en estado gaseoso a excepción del agua formada por la combustión que se condensa al estado líquido en la temperatura T_1 ”.

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS): También conocido como poder calorífico total, grueso o “gross”, corresponde al calor desprendido por todos los componentes de la masa del combustible al reaccionar con el oxígeno. El vapor de agua formado en la reacción se condensa en forma total a su estado líquido a la temperatura inicial del gas.

PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI): También conocido como poder calorífico neto o “net”, corresponde a la cantidad de energía producida por la combustión ideal del gas con el aire, en el cual el vapor de agua formado en la reacción permanece en su estado de gas ideal.

La Figura 1 muestra la diferencia entre estos dos tipos de poder calorífico.

Figura 1. Esquema de Poder Calorífico



ÍNDICE DE WOBBE (IW): El índice de Wobbe es un valor que indica la facilidad de intercambio de energía de distintos gases combustibles cuando se comparan a un mismo caudal determinado. Este índice es ampliamente usado en la industria del gas para suministrar gases de características caloríficas similares y es útil para expresar un caudal en términos de energía independientemente del tipo de gas. Si dos gases tienen el mismo Índice de Wobbe, para un determinado quemador y una determinada presión en el quemador, el aporte de energía por el gas será el mismo y requerirá la misma cantidad de aire para la combustión independientemente de la naturaleza o tipo de gas. También es una medida de la calidad de combustión de un gas, pues mide los efectos combinados de los cambios en la composición del gas como el poder calorífico y gravedad específica (densidad relativa).

GRAVEDAD ESPECÍFICA: También llamada densidad relativa, es un número adimensional que expresa la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad de un fluido de referencia a las mismas condiciones de presión y temperatura. Para los líquidos el fluido de referencia es el agua a una presión de 1 atm y temperatura de 4°C correspondiente a una densidad de 1000 kg/m³ o 1 g/cm³. Para los gases, el fluido de referencia es el aire a una presión de 1 atm y temperatura de 0°C.

CONDICIONES DE REFERENCIA: Se denomina condiciones de referencia a las condiciones específicas de presión y temperatura que se toman como base para medir o calcular una propiedad. En la industria del gas es común el uso de tres terminologías indistintas asociadas al concepto de condiciones de referencia: condición base, condición normal y condición estándar. Según el Reglamento Único de Transporte (RUT), las condiciones de referencia para el país son: presión de 14,65 psi y temperatura de 60°F. Igualmente establece que a estas condiciones deben ser referidos los volúmenes y el poder calorífico del gas transportado en el sistema nacional de transporte, o su respectiva equivalencia al Sistema Internacional de unidades, que corresponden a 1,01 bar de presión y 15,56°C de temperatura.

3.2 TIPOS DE TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

A continuación, se hace una descripción de manera general del principio teórico de cada una de las tecnologías convencionales para la medición de poder calorífico en línea. Actualmente, el cálculo del poder calorífico se lleva a cabo por las siguientes tecnologías: análisis por calorimetría de gases, análisis de oxígeno residual y cromatografía de gases (siendo ésta la más utilizada).

3.2.1 ANÁLISIS POR CALORIMETRÍA DE GASES

Este tipo de análisis se denomina también de tipo directo y los analizadores se pueden dividir en tres grupos: calorímetros de combustión de muestra de gas en bomba calorimétrica, calorímetros de combustión de gas de llama abierta y calorímetros de oxidación catalítica sin llama.

a) **Calorímetros de combustión de muestra de gas en bomba calorimétrica:** La técnica de combustión utilizando bomba calorimétrica está diseñada especialmente para la medición del calor de combustión de muestras sólidas y líquidas. Cuando se aplica esta técnica a mezclas gaseosas, se tiene una combustión incompleta del gas en las paredes de la bomba debido a que la energía necesaria para superar la energía de activación en la superficie no es entregada por el calor de la reacción. Como la determinación del poder calorífico se basa en términos de la cantidad de energía desprendida por la reacción, la combustión incompleta del gas no es una medida representativa para el cálculo. Por lo tanto esta técnica se restringe solo a casos excepcionales donde la muestra de gas contenga compuestos fluorohidrocarbonados.

b) **Calorímetros de combustión de gas de llama abierta:** Son también llamados calorímetros tradicionales o de registro continuo. El principio básico de estos calorímetros es el mismo y consiste en quemar de manera controlada una cantidad constante de gas. Por medio de un intercambiador de calor, los gases de combustión son transferidos a un fluido de absorción de calor (agua o aire). Como consecuencia, se aumenta la temperatura del fluido de absorción que es directamente proporcional al valor del poder calorífico del gas. En los

calorímetros de operación de llama abierta se debe mantener constante la proporción de gas de muestra, aire para la combustión y aire para la absorción de calor por medidores de gas independientes que se encuentran acoplados en tanques de agua. En general, son equipos robustos que deben estar conformados con los siguientes componentes: medidores y reguladores de flujo, cámara de combustión, sensores de gases de combustión y parte electrónica.

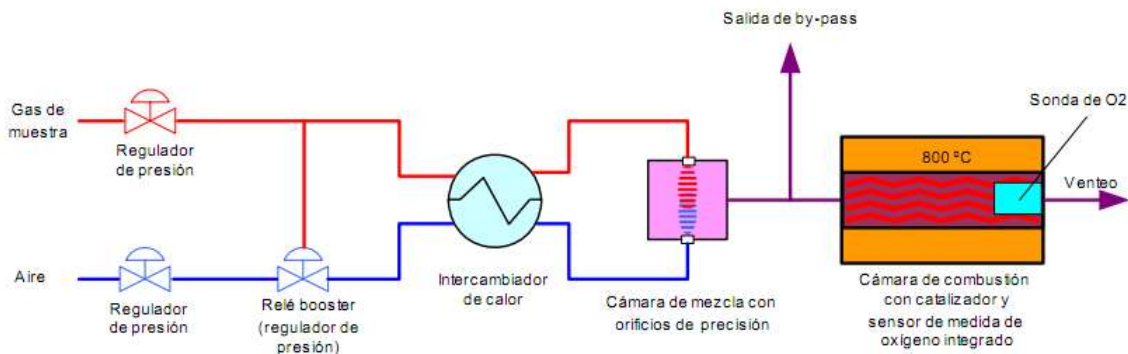
c) **Calorímetros de oxidación catalítica sin llama:** A diferencia de la combustión de gas en un quemador de llama abierta, es posible determinar el poder calorífico por oxidación catalítica, en una llamada “combustión fría sin llama”. Para esto, el gas y el aire se conducen hasta un lecho empacado hecho de *pellets* catalíticos. Durante este proceso el gas se oxida y el calor de combustión liberado incrementa la temperatura del lecho catalítico, la cual es registrada y se toma como referencia para el cálculo del poder calorífico del gas. Al igual que los analizadores que emplean bomba calorimétrica, los equipos de oxidación catalítica también presentan problemas de oxidación incompleta afectando la eficiencia y la confiabilidad en el proceso de determinación de poder calorífico.

3.3 ANÁLISIS DE OXÍGENO RESIDUAL

En los analizadores basados en este método una corriente de gas natural se mezcla con aire seco en una proporción fija y constante. Esta mezcla se oxida en un horno de combustión en presencia de un catalizador a 800 °C. Una celda de óxido de circonio determina la concentración de oxígeno residual en la mezcla después de la combustión. Este método proporciona una medida directa del Índice de Aire Requerido para la Combustión (CARI), se puede correlacionar con el Índice de Wobbe como una medida de la cantidad de energía suministrada por el gas al quemador. Antes de iniciar el proceso de combustión, las corrientes de gas de muestra y aire deben estar a igual condición de presión y temperatura, para tal fin se utilizan reguladores de presión, relés bolster e intercambiadores de calor. Posteriormente las corrientes entran a una cámara de mezclado con orificios de precisión de diámetro específico según el tipo y el rango de poder calorífico del gas de muestra que permiten mantener una relación adecuada de los caudales de aire y gas introducidos al quemador. La cantidad de aire

siempre debe exceder a la cantidad requerida para la combustión completa del gas. La Figura 2 muestra el esquema general de este tipo de analizadores.

Figura 2. Esquema general de un analizador de oxígeno residual



Conociendo la cantidad de oxígeno ingresada a la cámara de combustión y la cantidad de oxígeno residual medida por la celda de óxido de circonio, se puede determinar la cantidad de oxígeno que fue empleado para la combustión como

$$CARI = \text{Oxígeno usado para la combustión} = \text{Oxígeno inicial} - \text{Oxígeno residual}.$$

El índice de Wobbe se calcula partiendo del valor CARI, dada la relación lineal entre ambos parámetros.

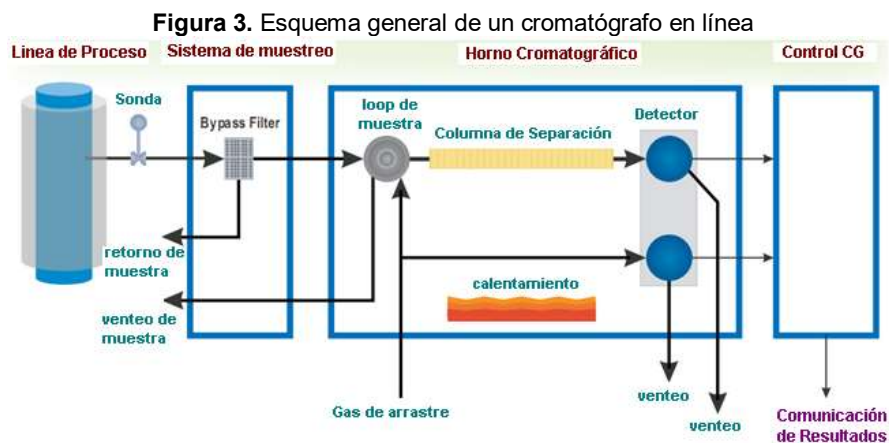
3.4 CROMATOGRAFÍA DE GASES

La cromatografía es un proceso físico-químico usado para identificar y separar componentes de mezclas simples y complejas, en la cual los componentes que se van a separar e identificar se distribuyen en dos fases inmiscibles conocidas como fase estacionaria y fase móvil. La fase móvil contiene el analito que se mezcla comúnmente con una corriente de gas de arrastre para pasar a través de la fase estacionaria. La fase estacionaria retarda el paso de los componentes de la muestra en forma selectiva.

La separación de los componentes de la mezcla tiene lugar en la columna cromatográfica y depende de las diferencias del punto de ebullición, diferencias en la polaridad y diferencias en el tamaño molecular de cada componente. Luego, los componentes separados fluyen hasta un detector apropiado, generalmente un detector de conductividad térmica (TCD) que determina la concentración de cada componente presente en la mezcla de gas.

El método analítico de la cromatografía de gases para la determinación de poder calorífico se basa en el principio que cada constituyente del gas hace una contribución al valor total del poder calorífico del gas según su participación molar en la mezcla. Por lo tanto, si se conoce la composición individual de cada componente es posible calcular con certeza propiedades del gas natural como: poder calorífico, gravedad específica e índice de Wobbe utilizando normas internacionales como ISO 6976 y ASTM D 3588.

El esquema tradicional de un cromatógrafo en línea se puede observar en la Figura 3. Un cromatógrafo en línea difiere de uno de laboratorio, en que está diseñado especialmente para realizar análisis repetitivos inyectando de forma automática muestras con determinada periodicidad. Cada cromatógrafo instalado en línea requiere diferentes configuraciones de diseño según el tipo de gas que vaya a analizar. Algunos puntos a tener en cuenta son: composición típica de la corriente, variabilidad esperada, condiciones de operación del proceso, condiciones ambientales, requerimientos de clasificación eléctrica y cálculo de propiedades deseadas (reportes especiales)



El uso de cromatógrafos instalados en línea es un sistema muy utilizado en la industria del gas para procesos de facturación y determinación de poder calorífico y de otras propiedades como la gravedad específica y el índice de Wobbe. El beneficio de emplear un cromatógrafo en línea está en que proporciona mediciones más exactas y confiables comparadas con las obtenidas por los calorímetros tradicionales.

Independientemente de la técnica de análisis utilizada para la medición de poder calorífico, es necesario implementar un sistema de muestreo de gas riguroso que tenga como objetivo obtener una muestra representativa del sistema que se quiera analizar; es decir, se debe asegurar que la composición y la homogeneidad de la muestra sean las mismas que el gas que fluye en la tubería, pues de lo contrario los resultados de cualquier análisis serían inexactos sin importar el desempeño de medición y reproducibilidad del equipo empleado. El sistema de muestreo o sonda de muestreo debe cumplir con las normas API 14.1 y GPA 2166.

3.5 TIPOS DE TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES

Debido al creciente mercado del gas natural en países pertenecientes a la Unión Europea y Estados Unidos, los cromatógrafos y calorímetros son diseñados para determinar en tiempo real las propiedades del gas como poder calorífico, índice de Wobbe y densidad con gran exactitud y baja susceptibilidad a la falla en operación. El conocimiento exacto de estas propiedades tiene un gran impacto técnico y económico en toda la cadena de valor del gas natural.

Las investigaciones en metrología química hechas por países pertenecientes a la Unión Europea y Estados Unidos se han centrado en desarrollar métodos alternativos de medición de propiedades del gas natural que tengan características metrológicas similares a las de los cromatógrafos pero con la característica particular de un bajo costo de adquisición y operación. Dichos nuevos métodos de medición son denominados métodos correlativos y, en la mayoría de las veces, son muy exactos, compitiendo con los procesos calorimétricos y cromatográficos, otros métodos se centran más en desarrollar una propuesta de bajo costo a expensas de la exactitud.

3.5.1 PRINCIPIO TEÓRICO DE OPERACIÓN DE LOS MÉTODOS CORRELATIVOS

Los métodos correlativos para la determinación de propiedades del gas natural consisten en cuantificar con exactitud algunas de las propiedades del gas natural (típicamente tres de las siguientes: velocidad del sonido, conductividad térmica, absorción infrarroja y permisividad dieléctrica), a partir de las cuales se infiere la composición aproximada de los componentes que constituyen la mezcla de gas natural (hidrocarburos, nitrógeno y dióxido de carbono) o en algunos casos la estimación de las propiedades de interés. En el caso en que se estime una composición para la mezcla de gas, posteriormente pueden emplearse métodos estándar, como los establecidos por ISO, ASTM y AGA, para la determinación de propiedades del gas natural. La exactitud de las propiedades obtenidas depende principalmente del conjunto de propiedades seleccionado, el cual representa los datos de entrada medidos y empleados para una posterior correlación, desde luego también dependerá de la exactitud con la cual se miden dichas propiedades.

La inferencia de la composición del gas natural a partir de la correlación entre datos experimentales y las propiedades del gas natural se realiza en dos etapas:

Etapa 1: Esta etapa tiene en cuenta únicamente la contribución de los alcanos presentes en la mezcla de gas (metano hasta butano), asumiendo que el contenido de nitrógeno y dióxido de carbono en el gas natural es cero. Bajo esta consideración existe una relación lineal entre el número de carbonos y el valor del poder calorífico (Figura 4). Por otra parte existe una relación no-lineal pero continua entre algunas propiedades físicas como la velocidad del sonido y la conductividad térmica y el número de carbonos en las moléculas de los hidrocarburos presentes en la mezcla de gas (Figura 5). El comportamiento regular de algunas propiedades físico-químicas y su relación funcional con el número de carbonos presentes, es la razón por la cual las mezclas de hidrocarburos gaseosos (como el gas natural) ofrecen una buena correlación que puede ser aprovechada en términos prácticos.

Etapa 2: Consiste en incluir en el análisis los elementos excluidos durante la primera etapa (nitrógeno y dióxido de carbono), los cuales no son medidos directamente sino obtenidos

mediante algoritmos de correlación que consideran la relación entre las propiedades de entrada medidas y las propiedades obtenidas en la primera etapa.

Figura 4. Relevancia del tamaño molecular en las propiedades del gas natural

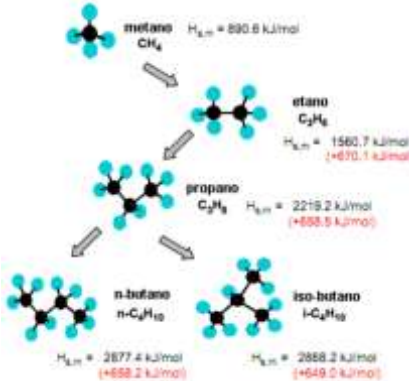
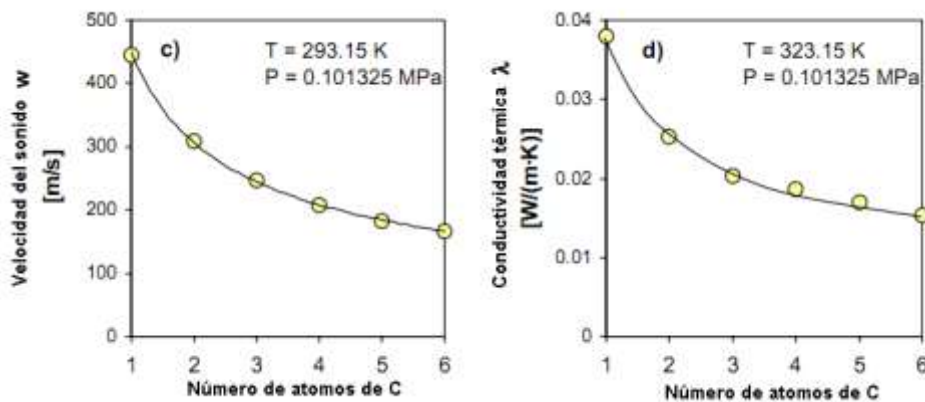


Figura 5. Propiedades físicas del gas en función del número de átomos de Carbono



3.6 ANALIZADORES DE PODER CALORÍFICO EN LA INDUSTRIA DEL GAS NATURAL

En este numeral se presentan los equipos utilizados en la industria (o que se pueden implementar en ella) para la determinación del poder calorífico del gas natural; y se exponen en detalle las principales características y el desempeño metrológico de los equipos, clasificándolos según su tecnología de medición (convencional o alternativa).

Además de las especificaciones particulares, al final de cada sección se encuentran las tablas de comparación de todos los equipos expuestos para cada tecnología, las cuales permiten visualizar cada dispositivo comparándolos con otros de su mismo principio o tecnología de medición. Los criterios a comparar fueron los siguientes: características generales, desempeño metrológico, salidas de comunicación e insumos.

Finalmente se hace una comparación por costo de adquisición, que permitirá definir el equipo más adecuado para ser comparado económicamente con la tecnología convencional.

3.6.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN POR CALORIMETRÍA DE LLAMA ABIERTA

Los calorímetros de llama abierta tienen como principio general el descrito en la sección 3.2.1, sin embargo, cada equipo según la referencia y la casa matriz, puede presentar ligeras variaciones, o cambios en las variables controladas y medidas a fin de determinar el poder calorífico. El principio general de estos equipos se expone a continuación.

a) Calorímetro Algas SDI modelo GA 500:

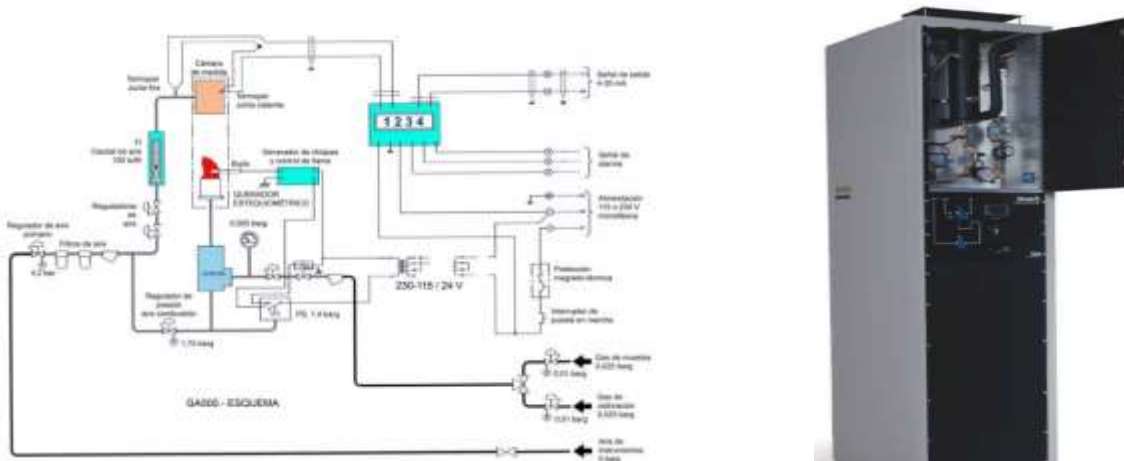
El analizador ALGAS SDI se basa en el método de llama abierta y medición de diferencial de temperatura entre gases de combustión y el aire. En la Figura 6 se presenta el diagrama de operación para este equipo donde una corriente de gas de muestra se quema en presencia de aire de instrumentos bajo condiciones controladas y produce una señal que suministra información, en forma de un indicador o registrador de las características de combustión de la muestra de gas. El analizador ALGAS SDI detecta cambios en el poder calorífico y peso específico del gas analizado y suministra la medida del índice de Wobbe.

El equipo recibe una muestra de gas y aire comprimido para conseguir la llama requerida. Un volumen considerable de aire bajo condiciones controladas pasa a la cámara de medida del analizador que consiste en una atmósfera adiabática térmicamente aislada. El objetivo es mantener el diferencial de temperatura entre los gases de combustión y el aire en un valor fijo y constante en la cámara de medida. Cualquier cambio en el poder calorífico del gas de muestra

cambia la cantidad de calor de combustión añadida a la cámara de medida. Un cambio en la gravedad específica del gas ocasiona cambios en el caudal en el sistema de mezcla gas/aire al quemador, lo que a su vez, provoca cambios en el calor añadido a la cámara de medida.

Como el cambio en el caudal de la muestra ocasionado por cambios en la gravedad específica es una función de raíz cuadrática, la interrelación de los cambios en el poder calorífico y en la densidad produce una salida proporcional al índice de Wobbe que se puede correlacionar con el poder calorífico del gas por una función de comportamiento lineal.

Figura 6. Diagrama de operación del calorímetro ALGAS SDI



Algunas características principales del analizador ALGAS SDI son:

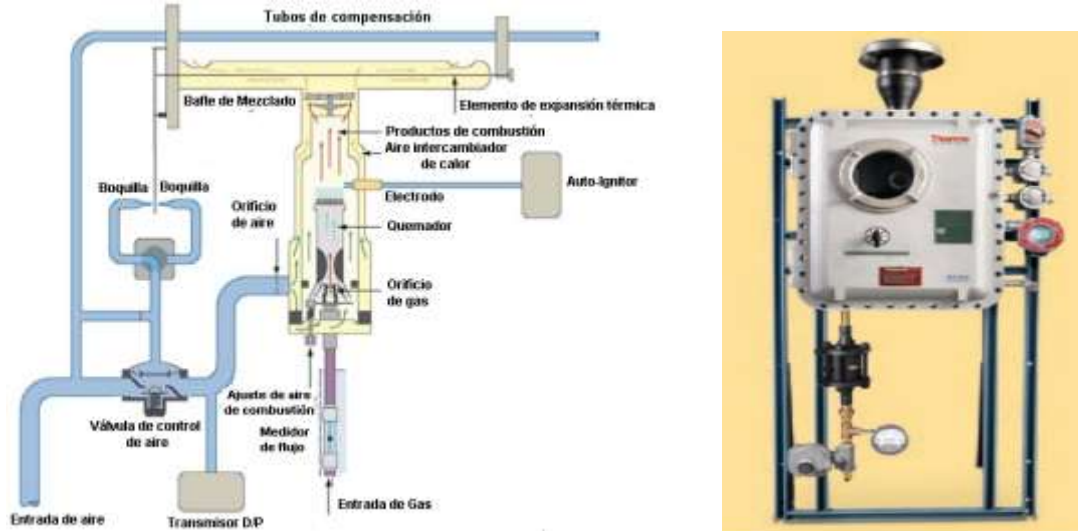
- Alto consumo de aire de instrumentos para su operación: 4250 L/h. (a condiciones estándar)
- Clasificado solamente para áreas de propósito general.
- Equipo de gran tamaño y peso
- Repetibilidad en poder calorífico $\pm 0.3\%$ y exactitud de $\pm 1.5\%$ (Según datos del fabricante)
- Casa matriz: ALGAS SDI Settle, WA, USA.
- No tiene soporte técnico ni distribuidor en Colombia.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

b) Calorímetro ThermoScientific FLO-CAL:

El calorímetro de llama abierta ThermoScientific Flo-Cal modelo 6000 es comúnmente utilizado en la industria del gas natural. Su principio particular de medición se basa en regular el flujo de entrada de aire al quemador para controlar en un punto específico la temperatura de salida de los gases producto de la combustión. Las variaciones en el flujo de aire serán proporcionales al valor del poder calorífico de la mezcla de gas. En la Figura 7 se muestra el principio de operación de este equipo.

Figura 7. Diagrama de operación del calorímetro ThermoScientific FLO-CAL



La muestra de gas entra al instrumento a través de un regulador de presión de alta precisión que mantiene constante la presión del gas mientras fluye a un orificio calibrado en la cámara de combustión. El aire entra al instrumento a través de una cámara de control y sigue hacia la cámara de quemado donde una fracción de su volumen es usada para la combustión, el aire excedente rodea la cámara sirviendo como medio de intercambio de calor. Los tubos de compensación se ajustan por cambios de temperatura en el aire entrante. Los gases de

combustión y el aire calentado pasan a través del elemento de expansión térmica, cuya longitud varía directamente como función de la temperatura.

El ensamblaje de tubos de compensación/elemento de expansión térmica actúa sobre el ensamblaje lengüeta/boquilla modulando de esta forma el flujo de aire a través de la válvula de control. El efecto neto es un diferencial de temperatura constante entre el aire que entra y el aire calentado. Las características generales del equipo son:

- Medición primaria: índice de Woobe, para la determinación de poder calorífico requiere un medidor adicional de gravedad específica.
- Alto consumo de aire de instrumentos para su operación: 4260 L/h (condiciones estándar).
- Equipo clase I división 1 grupos B, C & D y certificación *explosion proof*. Repetibilidad en poder calorífico $\pm 7\%$ en el rango 1000-3000 BTU
- Casa matriz: ThermoFisher Scientific, Houston, TX
- No tiene soporte técnico ni distribuidor en Colombia.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3

c) **Calorímetro CALOR VAL:**

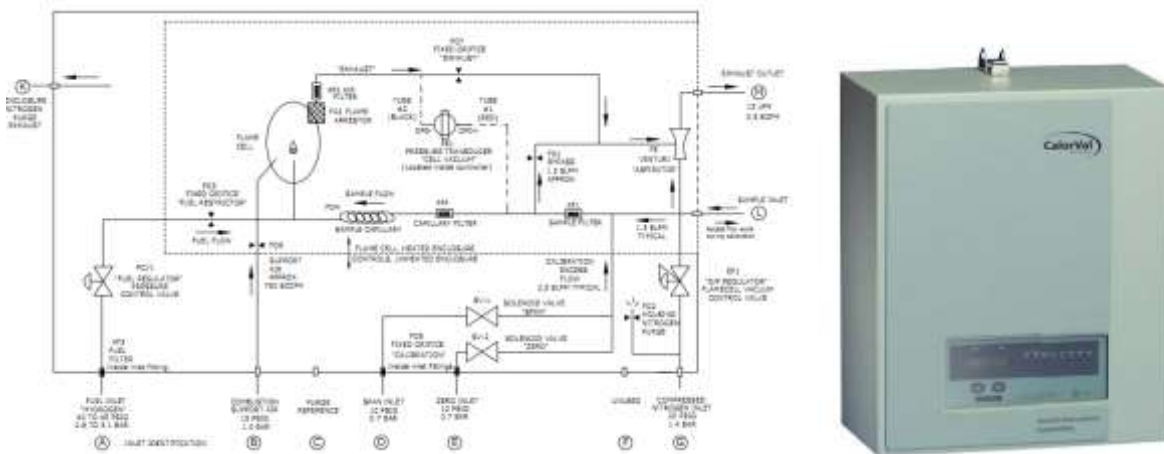
El analizador de llama abierta CALOR-VAL es especialmente desarrollado para cumplir con una variedad de aplicaciones en los campos de procesos químicos, plantas digestoras, BioGas, plantas de etanol, plantas piloto, refinerías, procesos de venteo y distribución de gas natural.

Su principio de operación consiste en pasar el gas de muestra por un tubo capilar hasta una celda de combustión que utiliza hidrógeno combustible para la detección de llama. La temperatura de los productos de la combustión del aire con el gas de muestra y el hidrógeno se miden en una termocupla ubicada arriba del detector de llama, (ver Figura 8). El aumento en la temperatura de la llama se convierte en una señal eléctrica proporcional al valor del poder calorífico de la mezcla de gas.

Las mediciones ocurren en la celda de llama donde un pequeño detector de llama (de hidrógeno) se encuentra en un quemador de tubo. La mezcla es continuamente arrastrada a través de un capilar por succión producida por una aspiradora de nitrógeno, esto produce un constante vacío en el tubo capilar de manera que el flujo de muestra de gas que pasa a través de él siempre es constante.

El detector de llama de hidrógeno es encendido por una descarga producida por una chispa que va desde el electrodo hasta el tubo de quemado. Un regulador de presión alimenta el hidrógeno a una presión constante para producir estabilidad en la llama cuya temperatura cambio solo cuando los gases inflamables se queman.

Figura 8. Diagrama de operación del calorímetro CALOR VAL



Otras características especiales del equipo se mencionan a continuación:

- La celda de llama cuenta con sistema *arrestor flame* que evita la propagación de la llama fuera de la celda de combustión.
- El analizador CalorVal requiere para su operación normal: hidrógeno (detector de llama), aire comprimido (para la combustión) y nitrógeno (para evitar la acumulación de combustible dentro del analizador y como elemento de succión)
- Controlador, celda de combustión, componentes electrónicos y de control integrados en un dispositivo compacto.
- Equipo con clasificación: Clase 1, división 1.

- Repetibilidad $\pm 1\%$ dentro del rango de medición (0-1300 BTU/ft³)
- Exactitud: $\pm 3\%$ a escala máxima
- Casa matriz. Fairfield, NJ, USA.
- No tiene soporte técnico ni distribuidor en Colombia.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3.

3.6.2 COMPARACIÓN DE CALORÍMETROS DE LLAMA ABIERTA

Tabla 1. Comparación de características generales de los analizadores de llama abierta

| EQUIPO | CARACTERÍSTICAS GENERALES | | | | | | | | CARACTERÍSTICAS GENERALES | | | | | | | |
|-------------------|---------------------------|---------|--------|--------------------------|---------|----------------|----------------|------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------|------------------|-------|-------|----------|
| | FRECUENCIA DE ANÁLISIS | | | CONDICIONES DE OPERACIÓN | | | | CALIBRACIÓN | | CLASIFICACIONES DE ÁREA ELÉCTRICA | CERTIFICACIONES | PESO [kg] | DIMENSIONES [cm] | | | |
| | Continua | Cíclica | Manual | Aire | Gas | N ₂ | H ₂ | Temperatura (°C) | Manual | | | | Automática | Largo | Ancho | Profundo |
| ALGAS SDI | ✓ | ---- | ---- | 40-150 | 0,5 - 1 | N.A. | N.A. | -10 - 60 | ✓ | ---- | Propósito General | N.P. | 113 | 224 | 64 | 89 |
| THERMO SCIENTIFIC | ✓ | ---- | ---- | 60-125 | 3 - 5 | N.A. | N.A. | 10 - 40 | ✓ | ✓ | Clase 1, división 1, Grupos B, C, D | CSA | 250 | 190 | 95 | 68 |
| CALOR VAL | ✓ | ---- | ---- | 15 | 3 - 5 | 20 | -40-45 | -10 - 60 | ✓ | ✓ | Clase 1, división 1 | N.P. | 38 | 92 | 31 | 22 |

Tabla 2. Comparación de desempeño metrológico de los analizadores de llama abierta

| EQUIPO | DESEMPEÑO | | | | | | NOTAS |
|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------|---------|---|-------|
| | INTERVALO DE MEDICIÓN [BTU/scf] | TIEMPO DE RESPUESTA (segundos) | EXACTITUD % (FS) | REPETIBILIDAD* | | | |
| | | | | % | BTU | | |
| ALGAS SDI | 800 - 2000 | 180 | $\pm 1,5$ | $\pm 0,3$ | 6 | *ALGAS repetibilidad del valor medido | |
| THERMO SCIENTIFIC | 0 - 3000 | 90 | ± 1 | $\pm 1 \text{ ó } 7$ | 10 ó 74 | * THERMOSCIENTIFIC: repetibilidad de 1% para valores <1000 BTU, 7% intervalo 1000-3000 BTU del valor medido | |
| CALOR VAL | 0-1300 | 60 | ± 3 | ± 1 | 10 | * CALOR VAL: Repetibilidad de 1% del intervalo de medición | |

Tabla 3. Comparación de salidas de comunicación e insumos de los analizadores de llama abierta

| EQUIPO | COMUNICACIÓN | | | | | | INSUMOS | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|--------|---------|----------|-----------|---------|----------------|--------------------|------|-----------|-----------|---------------------------|------------|----------|--|
| | NÚMERO DE SALIDAS | | | | | | CONSUMOS [L/h] | | | | | REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS | | | |
| | 4-20 mA | RS-232 | B-S 485 | Ethernet | Software | Alarmas | Muestra de Gas | Gas de Calibración | Aire | Nitrógeno | Hidrógeno | Voltaje | Frecuencia | Potencia | |
| ALGAS SDI | 3 | N.P. | N.P. | N.P. | N.P. | 4 | 85 | 85 | 4250 | N.A. | N.A. | 115 VAC | 60 Hz | 600 W | |
| THERMO SCIENTIFIC | 2 | N.P. | 1 | N.P. | WinHEM900 | 1 | 3-150 | 3-150 | 4260 | N.A. | N.A. | 115 VAC | 60 Hz | 600 W | |
| CALOR VAL | 4 | N.P. | 1 | N.P. | N.P. | 6 | N.I. | N.I. | 42 | 1500 | 2 | 120 VAC | 60 Hz | 400 w | |

3.6.3 ANALIZADORES DE OXÍGENO RESIDUAL

El cálculo del poder calorífico en los analizadores de oxígeno residual se basa en la determinación de la relación estequiométrica de oxígeno empleado para la combustión y gas de muestra. Cuando se quema gas natural con aire se tiene una relación lineal entre el aire requerido y el valor del poder calorífico.

a) Analizador de Oxígeno Residual COSA 9610

El analizador COSA 9610 (ver Figura 9) proporciona una medida directa del índice CARI del gas de muestra. Esta medida es ideal para el control de la relación aire-combustible en cualquier proceso de combustión. El analizador COSA 9610 está especialmente diseñado para aplicaciones donde se deba controlar la cantidad de energía que se suministra al quemador y para la determinación exacta del poder calorífico. El principio de operación de este analizador es el mismo presentado en la sección 3.3

Figura 9. Analizador de Oxígeno Residual COSA 9610



El índice de Wobbe puede ser correlacionado de una forma muy aproximada al índice de CARI, con un valor de correlación lineal muy cercano a la unidad ($R^2 = 0.9888$) para los gases constituyentes al gas natural. Las características principales de este analizador se presentan a continuación:

- Reproducibilidad en índice de Wobbe: ± 0.4 % del valor medido (según datos del fabricante).

- Para la determinación del poder calorífico se requiere un medidor de densidad con una exactitud de $\pm 0.1\%$ en el valor de la lectura.
- El, controlador, quemador y mezcla de gas se encuentran alojados en un conjunto de cajas de acero inoxidable.
- Casa matriz: COSA INSTRUMENT CORPORATION, USA.
- Soporte técnico y distribución en Colombia: TEKNIK.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 4 y Tabla 5

b) Analizador de Oxígeno Residual WIM COMPAS

El analizador WIM COMPAS (Figura 10) es fabricado en Holanda y tiene el mismo principio de operación del analizador COSA 9610 presentado en la sección 3.3. Sus aplicaciones no solo se restringen al campo del gas natural, pues se usa con mucha frecuencia en el control de turbinas y biogás. Proporciona una medida directa del valor del índice de CARI incluso cuando existen trazas de hidrógeno, monóxido de carbono y olefinas en el gas natural.

Figura 10. Analizador de Oxígeno Residual WIM COMPAS



Sus características principales se resumen a continuación:

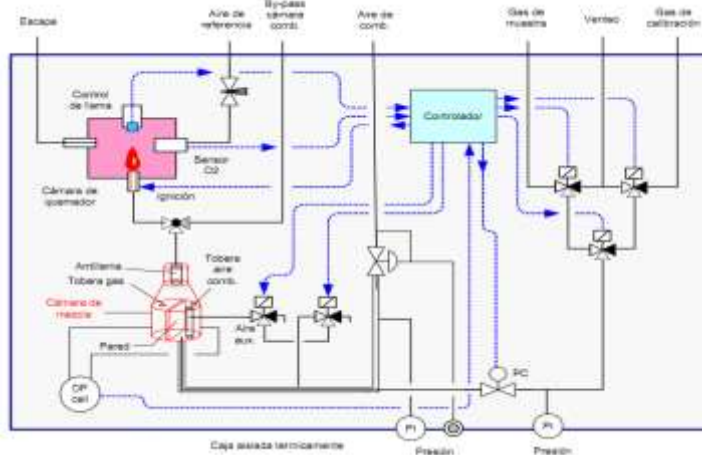
- Equipo clasificado para operación en atmosferas con gases peligrosos controlados. Clase I división 2.
- Exactitud de $\pm 0.5\%$ del valor medido. Repetibilidad de $\pm 0.05\%$ en el valor del índice de Wobbe, (según datos del fabricante).

- Para la determinación del poder calorífico requiere la instalación de un medidor de gravedad específica con exactitud $< \pm 0.5\%$ a escala máxima.
- Este equipo solo tiene salidas análogas, para comunicación remota, puertos RS 232, RS 485 y software de adquisición de datos se debe asumir un costo superior de adquisición.
- Casa Matriz: HOBRE INSTRUMENTS, the Netherlands.
- No tiene soporte técnico ni distribuidor en Colombia.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 4 y Tabla 5.

El modo medida empleado por el analizador Rhadox II se basa en la oxidación catalítica de gas de muestra bajo un exceso de aire y posterior detección y medida del oxígeno residual por medio de una celda de óxido de circonio. El analizador Rhadox II determina el valor de la demanda de oxígeno para la combustión (índice de CARI) e índice de Wobbe, adicionalmente mide densidad y el valor del poder calorífico del gas y está aprobado para revisiones fiscales de gas natural. En la Figura 11 se muestra el principio de operación del analizador Rhadox II.

Figura 11. Analizador de Oxígeno Residual RHADOX II



La parte más importante de este instrumento es la célula de mezcla del gas de muestra con el aire de combustión, la cual consiste en dos partes separadas: la zona de mezcla y la zona

auxiliar. Debido a la instalación integral en la zona de mezcla de toberas de gas del tipo Venturi, tanto para el gas combustible como para el aire, el caudal de ambos se basa en la ley de Bernoulli. Las toberas se diseñan específicamente para cada aplicación dependiendo de la densidad y viscosidad del gas de muestra. Desde la zona de mezcla la combinación aire-combustible pasa a la zona auxiliar que se equipa con una barrera anti-llama con el fin de evitar el retroceso de llama hacia la cámara de mezcla.

El gas y el aire son suministrados a las correspondientes toberas por dos tubos concéntricos de 1 metro de longitud. Estos tubos actúan como un intercambiador de calor ya que las temperaturas del gas y del aire serán idénticas en las restricciones. Un controlador electrónico asegura que la presión de ambos gases en los dos volúmenes de gas sea igual y constante. Las características del analizador Rhadox II son:

- Está alojado en una cabina HF1 que cumple con los estándares de compatibilidad electromagnética.
- La clasificación de área que posee es propósito general
- La exactitud y repetibilidad en el valor medido del poder calorífico de $\pm 0.4\%$ y $\pm 0.1\%$ respectivamente (según datos del fabricante).
- Casa matriz: Imtech Industry International
- No tiene soporte técnico ni distribuidor en Colombia.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 4 y Tabla 5.

3.6.4 COMPARACIÓN ANALIZADORES DE OXÍGENO RESIDUAL

Tabla 4. Comparación de características generales de los analizadores de oxígeno residual

| EQUIPO | CARACTERÍSTICAS GENERALES | | | | | | | | CARACTERÍSTICAS GENERALES | | | | | |
|-------------|---------------------------|---------|--------|--------------------------|-------|------------------|-------------|------------|--|-----------------|-----------|------------------|-------|-------------|
| | FRECUENCIA DE ANÁLISIS | | | CONDICIONES DE OPERACIÓN | | | CALIBRACIÓN | | CLASIFICACIONES DE ÁREA ELÉCTRICA | CERTIFICACIONES | PESO [kg] | DIMENSIONES [cm] | | |
| | Continua | Cíclica | Manual | Aire | Gas | Temperatura [°C] | Manual | Automática | | | | Longitud | Ancho | Profundidad |
| COSA 9610 | ✓ | --- | --- | 40-80 | 28 | 10 - 40 | ✓ | ✓ | Clase 1, división 1 | CSA | N.I. | 100 | 100 | 40 |
| WM COMPAS F | ✓ | --- | --- | 60 | 22-70 | 10 - 40 | ✓ | --- | Clase 1, división 2: Grupos E, C, D | ATEX | 80-250 | 100 | 80 | 40 |
| RHADOX | ✓ | --- | --- | 115 | 58 | 5 - 40 | ✓ | --- | Propósito general | ATEX | 180 | 65 | 80 | 37 |

Tabla 5. Comparación de desempeño metrológico, salidas de comunicación e insumos de los analizadores de oxígeno residual

| EQUIPO | DESEMPEÑO | | | | | COMUNICACIÓN | | | | | | INSUMOS | | | | | |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|---------------|-------------------|--------|--------|----------|----------|-------|----------------|--------------------|------|---------------------------|------------|----------|
| | RANGO DE MEDICIÓN [BTU/scf] | TIEMPO DE RESPUESTA (segundos) | EXACTITUD % (FS) | REPETIBILIDAD | | NÚMERO DE SALIDAS | | | | | | CONSUMOS (l/h) | | | REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS | | |
| | | | | % | BTU/Fullscale | ±10 mA | RS-232 | RS-485 | Ethernet | Software | Relés | Muestra de Gas | Gas de Calibración | Aire | Voltaje | Frecuencia | Potencia |
| COGA 9610 | 1150-2790 | 5 | ±0,4 | ±0,02 | 0,7 | 2 | N.P. | 1 | N.P. | X | 9 | 57 | 57 | 1700 | 110 VAC | 60 Hz | 850 W |
| WIM COMPASS F | 0-1500 | 5 | ±0,3 | ±0,05 | 0,65 | 2 | N.P. | N.P. | N.P. | N.P. | 2 | 60 | 60 | 3600 | 115 VAC | 60 Hz | 850 W |
| SHADOX | 0-1500 | 10 | ±0,4 | ±0,1 | 1,3 | 2 | N.P. | N.P. | N.P. | N.P. | 2 | 50 | 50 | 600 | 110 VAC | 60 Hz | 145 W |

3.6.5 CROMATÓGRAFOS DE GASES

En esta sección se presenta una breve descripción y características de cada analizador basado en la técnica de cromatografía de gases para la determinación del poder calorífico del gas natural. El principio de operación para todos los equipos es el mismo que se expuso en la sección 3.4 del presente documento.

a) DANALYZER Modelo 770

El cromatógrafo de gases Danalyzer modelo 770 está basado en la misma tecnología y software del cromatógrafo de gases Danalyzer modelo 550, ofreciendo mayor confiabilidad, precisión, bajos requerimientos de instalación y costo de operación; se distingue además, por su diseño compacto de unidad analítica (NGC), controlador y display de operación integrados en un solo dispositivo como se aprecia en la Figura 12.

Entre sus diversas aplicaciones en el campo del gas natural se destacan: medición de la calidad del gas, determinación del poder calorífico, detección de trazas de contaminantes, monitoreo del punto de rocío de hidrocarburos, análisis extendido de la composición (hasta C9+), integración de tuberías y procesos de control de calidad.

Figura 12. Cromatógrafo Daniel Modelo 770



Características especiales del cromatógrafo de gases Danalyzer modelo 770:

- Horno Analítico Modular: Constituido por las válvulas, columnas, detectores en un bloque modular que facilita la acción neumática de las válvulas ofreciendo total flexibilidad.
- Detectores: El detector de conductividad térmica (TCD) integrado en el modelo 770 es capaz de detectar niveles de hasta partes por millón (ppm) más allá de su rango normal de medición. También están disponibles los detectores de ionización de flama (FID) y detectores fotométricos de llama (FPD) para aplicaciones específicas.
- Columnas Microempacadas: combinación de las características de los capilares y columnas empacadas convencionales que logra alta velocidad de elución y bajo consumo de gas de arrastre garantizando un tiempo de vida superior al ofrecido actualmente en el mercado (5 años para un estándar de medición C6+).
- Panel local de indicación y operación: donde se puede visualizar el estado actual de las válvulas del cromatógrafo. El panel tiene un set de leds de indicación: verde (OK), amarillo (advertencia) y rojo (falla)
- Pantalla touch de operación (opcional): permite efectuar el mantenimiento y operación del cromatógrafo en zonas clasificadas, sin necesidad de un computador.
- Módulo Electrónico: los componentes electrónicos se encuentran integrados dentro del modelo 770, a diferencia del modelo 550 que tiene un dispositivo aparte de control y electrónica.

- Software MON 2000: En plataforma Windows, permite el control completo del cromatógrafo en cuanto a operación y calibración, además de exportar los datos almacenados en la memoria del equipo con diferentes niveles de seguridad y alarmas.
- Comunicación remota: el cromatógrafo 770 puede conectarse de manera remota a través de un modem, Ethernet o redes RS-485. Para asegurar la integridad de los datos, el cromatógrafo puede almacenar hasta 35 días de análisis o datos de calibración.
- Repetibilidad en los valores de poder calorífico: $\pm 0.025\%$
- Soporte Técnico y distribución en Colombia: Instrumentos y Controles.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7.

b) DANIEL PORTABLE Modelo 575

El cromatógrafo de gases Daniel Modelo 575 está diseñado especialmente para operación discontinua, como es el caso de los laboratorios móviles. Podría instalarse en línea con requerimientos especiales de ubicación y acondicionamiento (Shelter).

Sus características de diseño de módulo analítico, controlador y sistema de comunicación son similares a las anteriormente presentadas para el cromatógrafo Danalyzer modelo 770, sin embargo, posee una característica específica que no lo hace viable para la instalación en línea o requerimientos de medición continua: para efectos de instalación en línea, el cromatógrafo 575 requiere de una ubicación especial alejado de atmosferas con gases peligrosos, esto significa mayor longitud de línea de tubing que transporta el gas entre el punto de muestreo y el analizador con posible efecto de condensación del gas en el trayecto.

En la Figura 13 se muestra el ensamble del cromatógrafo como una “caja negra”, donde se encuentran acoplados el modulo analítico y el controlador. El sistema de acondicionamiento de la muestra es una unidad externa que debe considerarse para la operación óptima del cromatógrafo.

Figura 13. Cromatógrafo portable DANIEL modelo 575



Las principales características son:

- Repetibilidad en los valores de poder calorífico: $\pm 0.05\%$
- Soporte en Técnico y distribución en Colombia: Instrumentos y Controles.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7.

c) ABB TOTAL FLOW Modelo 8206

El cromatógrafo de gases total flow modelo 8206 de ABB es especialmente diseñado para la industria del gas natural. Entrega valores de alta confiabilidad en el valor del poder calorífico y calidad de gas con tiempos de respuesta rápidos en puntos de transferencia de custodia y estaciones de gas natural.

La Figura 14 muestra el diseño modular del cromatógrafo ABB 8206 que junto a sus características automáticas de funcionamiento lo distinguen como un equipo de fácil manejo, calibración y mantenimiento en campo.

Figura 14. Cromatógrafo de gases ABB modelo 8206



Algunas de sus características más importantes se describen a continuación:

- Medición de poder calorífico de hasta cuatro corrientes de gas natural entre 800 y 1500 BTU/ft³, con menos de 100 ppm de H₂S, sin agua y sin hidrocarburos líquidos.
- Gabinete de aluminio fundido en aluminio y certificación *explosion proof*. Diseño aprobado por Nema/Type 4X con opción de montaje en pared, piso o sobre la tubería.
- Módulo Analítico: Es la parte más importante del equipo, con diseño de alta flexibilidad para remoción con un solo perno, lo que facilita su mantenimiento en campo. Está conformado por el procesador analítico (columnas, detectores y horno) el conjunto del múltiple (válvulas, calentador), controlador digital y panel de terminación. Sistema de calibración automática.
- Software Estándar: permite al usuario tener acceso a los datos controlarlos y compartirlos; permite la generación de informes y tener datos históricos de hasta 64 días.
- Alta repetibilidad en los valores de poder calorífico: $\pm 0.025\%$ en el rango de temperatura de operación (-18°C a 55°C). Bajo consumo energético: 7 Watts (en operación).
- Soporte en Colombia: ISATECK- Automatización y control.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7.

d) YAMATAKE Modelo HGC 303

El cromatógrafo Yamatake Modelo HGC 303 es el cromatógrafo más pequeño del mercado (ver Figura 15), puede analizar hasta 11 componentes en un tiempo de 5 minutos y con una repetibilidad del 0,05% en el valor del poder calorífico. Diseñado especialmente para aplicaciones de transferencia de custodia y control de calidad del gas natural.

Figura 15. Cromatógrafo Yamatake HGC 303



Las características principales son las siguientes:

- Proporciona flexibilidad, funcionalidad y bajo costo de adquisición asegurando el desempeño metrológico en áreas clasificadas como Clase I División 1, Grupos C y D.
- Monitoreo electrónico del gas de arrastre y temperatura del horno que asegura la estabilidad en la medición.
- El equipo calcula hasta 20 parámetros de gas según estándares GPA e ISO, incluyendo factores de compresibilidad, poder calorífico superior e inferior, índice de Wobbe y peso específico.
- Se comunica vía protocolo Fieldbus y puede integrarse a sistemas SCADA por medio del controlador electrónico HDM Data Manager modelo 303 que tiene la opción de almacenar los datos por 65 días y convierte la señal de Fieldbus a Modbus.
- El software HGC Monitor HGM para Windows tiene una interface sencilla que permite el manejo de datos, configuración y mantenimiento del analizador.

- No requiere la instalación en shelters especiales por sus certificaciones *flame proof* y *explosion proof*. Y certificaciones de área.
- Soporte técnico y distribución en Colombia: Teknik.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7

e) CHANDLER ENGINEERING Modelo 2920 AMETEK

El cromatógrafo de gases Chandler modelo 2920 está diseñado para medir el poder calorífico de hasta cuatro corrientes de gas natural. Su diseño acoplado en un housing NEMA 4X con protección *waterproof* (ver Figura 16) garantiza su fácil instalación y mantenimiento.

Figura 16. Cromatógrafo CHANDLER ENGINEERING 2920



Otras características son las siguientes:

- Clasificación de seguridad es clase I división 2 que restringe su instalación a áreas con baja presencia de gases peligrosos.
- Sistema de calibración e inyección de muestra automática.
- Su valor de reproducibilidad en poder calorífico es de ± 0.05 (según datos del fabricante).
- Soporte y distribución en Colombia: Continental Process Instrument.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7.

f) ENVENT ENGINEERING Modelo 131

El cromatógrafo de gases Envent Engineering modelo 131(ver Figura 17) analiza hasta 11 componentes del gas natural y está diseñado para su operación en línea y análisis confiables de muestras de gas natural con impurezas, húmedos o secos con bajo requerimiento de mantenimiento en campo.

Figura 17. Cromatógrafo EVENT ENGINEERING Modelo 131



Su principal aplicación es la medición de energía en puntos de transferencia de custodia según estándares internacionales para el gas natural como AGA y normas ISO. Las características de este equipo son:

- Rangos de medición de 0-500 ppm hasta 0-100% molar. Repetibilidad < 0,5 BTU de Repetibilidad en valores de poder calorífico (según datos del fabricante).
- Múltiples tablas de calibración automática, con tiempos de ciclo de análisis y temperatura del horno programables.
- Diseño Intrínsecamente seguro combinado con *explosion proof*.
- Compartimiento electrónico y analítico separados que preserva la vida útil del módulo electrónico al evitar el contacto directo con posibles fugas de H₂S.
- Bajo consumo de gas de arrastre sin requerimientos de aire comprimido para operación de la válvula de 10 puertos.
- Sistema de acondicionamiento de muestra integrado
- Software ICE de plataforma Windows diseñado para configuración, diagnóstico y adquisición de datos. El equipo tiene comunicación remota por medio del protocolo Modbus.

- Soporte en Colombia: Daniel Process

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7.

g) ENCAL INSTROMET Modelo 3000

El cromatógrafo de gases Encal 3000 (ver Figura 18) está diseñado para medición de gas natural en línea y bajo la tecnología MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) que significa un sistema electromecánico de tamaño chips con automatización y control de calidad superior.

Figura 18. Cromatógrafo de gases ENCAL 3000



La tecnología MEMS es aplicada en el cromatógrafo ENCAL 300 en los detectores de conductividad térmica (TCD) con las ventajas de reducir de manera extrema sus dimensiones hasta 100 veces menos que los TCD clásicos, esto se traduce en límites de detección y tiempos de respuesta muy bajos, permitiendo el uso de columnas capilares que contribuyen a un análisis muy estable y preciso. Otras características importantes de este equipo de última tecnología se resumen a continuación:

- Sistema de acondicionamiento de muestra, modulo analítico y controlador todo instalado dentro de un mismo compartimiento *explosion proof*.
- Reporta la más baja incertidumbre y alta repetibilidad de los equipos del mercado. $U < 0,1 \%$ y repetibilidad de $< 0,01\%$ (según datos del fabricante)
- Puede analizar hasta 5 líneas de gas de manera simultánea
- Recomienda doble sistema de inyección de gas carrier al cromatógrafo, con el objetivo de garantizar operación continua.

- Almacenamiento de datos hasta por 35 días y Sistema de comunicación remota: MODBUS y software RGC 300 bajo el entorno Windows.
- Soporte Técnico y distribución en Colombia: Alcanos S.A.

Para más información de las características técnicas de este equipo Tabla 6 y Tabla 7

h) SITRANS CV DE SIEMENS

El cromatógrafo de gases SITRANS CV (ver Figura 19), basado en la tecnología analítica MicroSam es un analizador desarrollado especialmente para el análisis de gas natural que permite determinar de forma rápida, precisa y fiable el poder calorífico superior e inferior, la densidad normalizada y el índice de Wobbe según ISO, AGA 8.

Figura 19. Cromatógrafo SITRANS CV



Sus principales características son:

- Flexibilidad: por su diseño robusto y compacto se puede instalar directamente sobre la tubería de gas. Cuenta con certificación *explosion proof*.
- Sistema de Dosificación Live: la dosificación de la muestra al analizador se hace a través de una microválvula a la presión del gas carrier.
- Conmutación de columnas live sin válvulas: en el sistema pequeño del cromatógrafo solo se puede utilizar una variante sin válvulas por el volumen muerto de las válvulas convencionales. Se produce entonces, un cambio en las direcciones del flujo debido a las diferencias de flujo sobre los reguladores electrónicos de presión en lugares adecuados de disposición de las columnas.

- Sistema de separación y detectores: posee tres columnas capilares en serie y microdetectores TCD integrados en chips de silicio. Los reguladores electrónicos de presión suministran el gas de arrastre a cada columna.
- Desempeño: Reporta reproducibilidad y exactitud para poder calorífico superior y densidad de < 0,01% y <0,1% respectivamente (según datos del fabricante)
- Soporte en y distribución en Colombia: Siemens de Colombia.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7

i) FXI Serie 5

El cromatógrafo de gases FXI Serie 5 es un analizador continuo que reporta la concentración de los componentes del gas natural con opción de integración de detector de conductividad térmica (TCD), detector de ionización de flama (FID), detector fotométrico de llama (FPD) y detector de ionización de helio (HID) para análisis extendido en la composición.

El sistema de acondicionamiento, módulo analítico, controlador y display están acoplados en una mismo compartimiento con certificación *explosion proof* (ver Figura 20). Requiere aire de instrumentos para la acción de las válvulas.

Figura 20. Cromatógrafo FXI



Software LAMS en plataforma Windows, comunicación análoga, digital y puerto MODBUS.
Soporte en Colombia: Grupo Atlas.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7.

j) YOKOGAWA Modelo GC 1000 MARK II

El cromatógrafo de gases de Yokowaga que se muestra en la Figura 21 es un analizador capaz de separar componentes de muestras líquidas o sólidas. Realiza el análisis por las diferencias entre los puntos de destilación y ebullición de los componentes de las muestras líquidas y gaseosas respectivamente. Su principal campo de aplicación es en las refinerías petroleras donde se requiere análisis de puntos de destilación de las mezclas.

Figura 21. Cromatógrafo 1000 MARK II de Yokogawa



Algunas de sus características son:

- Horno termostático programable y control de temperatura de $\pm 0.03^{\circ}$ C.
 - Fácil control, operación y análisis de las funciones de respuesta por medio de displays.
 - Operación de mantenimiento y calibración a través del software GCMT.
 - Detector TCD de alta sensibilidad.
 - Control electrónico de presión de la muestra de entrada al cromatógrafo.
- Reproducibilidad en las mediciones: 1% a escala máxima.

Para más información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 6 y Tabla 7.

3.6.6 COMPARACIÓN CROMATÓGRAFOS

Tabla 6. Comparación de características generales de los cromatógrafos de gases

| EQUIPO | CARACTERÍSTICAS GENERALES | | | | | | | | | CARACTERÍSTICAS GENERALES | | | | | |
|------------------------|---------------------------|---------|--------|--------------------------|-----|------------------|----------|-------------|-------|-------------------------------------|-----------------|-----------|------------------|-------------|------|
| | FRECUENCIA DE ANÁLISIS | | | CONDICIONES DE OPERACIÓN | | | | CALIBRACIÓN | | CLASIFICACIONES DE ARA ELÉCTRICA | CERTIFICACIONES | RESO [kg] | DIMENSIONES [cm] | | |
| | Continua | Cíclica | Manual | PRESIÓN [psi] | | Temperatura [°C] | Manual | Automática | Largo | | | | Ancho | Profundidad | |
| DANIELS | — | ✓ | — | N.A | N.I | 15-20 | -18 - 50 | ✓ | ✓ | Clase 1, división 1 | CSA | N.I | 71 | 44 | 67 |
| ABB | — | ✓ | ✓ | N.A | 90 | 15-20 | -18 - 55 | — | ✓ | Clase 1, división 2. Grupos B, C, D | ATEX | 21,3 | 22,5 | 17,1 | 40,6 |
| YAMATAKE | — | ✓ | — | N.A | 65 | 15-20 | -18 - 55 | — | ✓ | Clase 1, división 1. Grupos B, C, D | ATEX | 3,5 | 24 | 12 | 30 |
| 2920 AMETEK | — | ✓ | — | N.A | 150 | 7-10 | -25 - 45 | ✓ | ✓ | Clase 1, división 2. Grupos C, D | CSA | N.I | 91 | 46 | 58 |
| 131 ENVENT ENGINEERING | — | ✓ | — | N.A | N.I | 15-20 | 0 - 50 | — | ✓ | Clase 1, división 1. Grupos C, D | ATEX | 27,2 | 64 | 92 | 62 |
| ENCAL 3000 | — | ✓ | — | N.A | 80 | 15-20 | -20 - 55 | ✓ | ✓ | Clase 1, división 1. Grupos B, C, D | ATEX | 50 | 37 | 37 (D) | N.A |
| SITRANS CV SIEMENS | — | ✓ | — | N.A | N.I | 15-20 | -20 - 55 | — | ✓ | Clase 1, división 1 | ATEX | 15 | 22 | 36 | 30 |
| RMU | — | ✓ | — | N.A | N.I | 15-20 | -10 - 50 | — | ✓ | Clase 1, división 1. Grupos B, C, D | ATEX | 3,5 | 25 | 10 | 12 |
| AIT - FXI | — | ✓ | — | 100 | 60 | 15-20 | -15 - 90 | ✓ | ✓ | Clase 1, división 2. Grupos B, C, D | ATEX | 118 | 106 | 59 | 39 |

Tabla 7. Comparación de desempeño, comunicación e insumos de los cromatógrafos de gases

| EQUIPO | DESEMPEÑO | | | COMUNICACIÓN | | | | | | | INSUMOS | | | | |
|------------------------|-------------------------------|----------------|-----------|--------------|--------|--------|----------|------------|---------|---------|--------------|---------------------------|----------|-----------------------------|---------------------|
| | TIEMPO DE RESPUESTA (minutos) | REPETIBILIDAD* | | SALIDAS | | | | | | | Helio cc/Min | REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS | | | SOPORTE EN COLOMBIA |
| | | % | STU /1000 | 4-20 mA | RS-232 | RS-485 | Ethernet | Software | Alarmas | Voltaje | | Frecuencia | Potencia | | |
| DANIELS 770 | 4 | ±0,025 | ±0,25 | 4 | 2 | 1 | N.P | MON 2000 | X | 20 | 24 VDC | 60 Hz | 80 W | Instrumentos y Controles | |
| DANIELS 550 | 4 | ±0,025 | ±0,25 | 4 | 2 | 1 | N.P | MON 2000 | X | 20 | 24 VDC | 60 Hz | 80 W | Instrumentos y Controles | |
| ABB | 5 | ±0,025 | ±0,25 | N.P | 1 | 1 | N.P | SENSYS | X | 20 | 21 - 28 VDC | 60 Hz | 7 W | ISATECK | |
| YAMATAKE | 5 | ±0,05 | ±0,5 | 2 | 1 | 1 | N.P | HGC 303 | X | 15 | 110 VAC | 60 Hz | 120 W | TEKNICK | |
| 2920 AMETEK | 12 | ±0,05 | ±0,5 | 2 | 1 | 1 | N.P | BTUCOMM | X | N.I | 115 VAC | 60 Hz | 40 VA | Continental Process Instru. | |
| 131 ENVENT ENGINEERING | 6 | ±0,05 | ±0,5 | 2 | 1 | 3 | 1 | Windows -B | X | N.I | 110 VAC | 60 Hz | 120 W | SERVIDANIEL | |
| ENCAL 3000 | 5 | ±0,01 | ±0,1 | 3 | 1 | 1 | 1 | Enval | X | 8 | 24 VDC | 60 Hz | 18 W | ALCANOS | |
| SITRANS CV SIEMENS | 2,5 | ±0,01 | ±0,1 | 2 | 1 | 1 | 1 | X | X | 50 | 24 VDC | 60 Hz | 60 W | SIEMENS | |
| AIT - FXI | >15 | ±1 | ±10 | 2 | 1 | 1 | 1 | Ramc | X | 600 | 120 VAC | 60 Hz | 1100 VA | GRUPO ATLAS | |
| YOKOWARA | 2,5 | ±1 | ±10 | 4 | 1 | 1 | 1 | CGMT | X | 300 | 120 VAC | 60 Hz | 2800 VA | YDROWAGA COLOMBIA | |

3.6.7 TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES

El diseño de procesos cromatográficos y calorimétricos para la determinación de las propiedades del gas ha alcanzado etapas donde la incertidumbre en las mediciones y la susceptibilidad a la falla son muy bajas o muy poco probables. Sin embargo, el capital inicial invertido y los costos de mantenimientos asociados a eventuales daños para estas tecnologías

son aún considerables. Por lo anterior, se han intensificado los esfuerzos por encontrar técnicas alternativas confiables para la determinación de parámetros de calidad de gas. En el numeral 3.5.1 se expuso el principio de operación de la técnica correlativa para el cálculo del poder calorífico del gas natural; en esta sección se presentan los equipos que utilizan dicha tecnología, enfatizando las propiedades físicas medidas para realizar la correlación y analizando su influencia en el valor de la exactitud para cada método.

En la Tabla 8 se presentan los seis equipos que operan bajo el principio de correlación y que serán detallados a lo largo de este capítulo:

Tabla 8. Dispositivos de medición de poder calorífico por técnicas correlativas

| Nº | MÉTODO (desarrollado por) | Propiedades de entrada | Propiedades de salida* | Incertidumbre [%] | Disponibilidad |
|----|--------------------------------------|---|---|----------------------|-----------------------|
| 1 | ε - method (Ruhrgas AG/Gasunie) | ε, W, X _{CO2} | H _s , W _s , ρ _n , X _{CO2} | 0,2 | En laboratorio |
| 2 | IR Spectrometer (FlowComp) | A(CH), A(CO ₂) | H _s , W _s , ρ _n , X _{CO2} | 0,2 | En laboratorio |
| 3 | 2VOS- meter (Gasunie/Instromet) | w(ρ _L), w(ρ _H), X _{CO2} | H _s , W _s , ρ _n , X _{CO2} | 0,3 | Prototipo de campo |
| 4 | EMC 500 (RMG) | c _p , λ, η, X _{CO2} | H _s , W _s , ρ _n , X _{CO2} | 0,2 a 0,5 | Disponible |
| 5 | GasPT (Advantica) | w, λ(T ₁), λ(T ₂) | H _s , W _s , ρ _n , MN | 0,5 | Disponible |
| 6 | gas-lab Q1 (Ruhrgas AG, FlowComp) | λ, A(CH), A(CO ₂) | H _s , W _s , ρ _n , CO ₂ , MN | 0,4 | Disponible |

Tabla 9. Convenciones para la tabla 8

| CONVENCIONES PARA LA TABLA 8 | | | |
|-------------------------------------|---|------------------------|--------------------------------------|
| H_s | poder calorífico superior | w | velocidad del sonido |
| A(CH) | Absorción infraroja de hidrocarburos | W_s | Índice de Wobbe |
| A(CO₂) | Absorción infraroja de dióxido de carbono | x_{CO2} | Fracción molar de dióxido de carbono |
| c_p | Capacidad calorífica isobárica | ε | Permeabilidad dieléctrica |
| MN | Numero de metano | η | Viscosidad dinámica |
| ρ_L, ρ_H | Baja y alta presión | λ | Conductividad térmica |
| T₁, T₂ | Temperaturas 1 y 2 | ρ_n | Densidad a condiciones normales |

a) Analizador de correlación ϵ -Method

Este dispositivo fue desarrollado por *Gasunie Research Laboratory* en conjunto con *Ruhrgas AG* con el objetivo de proveer un equipo de alta fiabilidad en el sistema de mediciones energético. La exactitud en el valor del poder calorífico es menor a 0,2%, ha sido probado solamente para trabajo en laboratorio. Su costo de manufactura hace que su producción sea baja y su costo de venta sea elevado.

b) Analizador de espectroscopía de infrarrojo

Este método fue desarrollado por *FlowComp Systemtechnik* y opera con un espectrómetro de infrarrojo (IR) de alta resolución para determinar la distribución molecular de los principales componentes del gas (alcanos). Cada enlace de las moléculas contribuye a caracterizar la cantidad de energía y masa de cada componente. Con mediciones adicionales de presión y temperatura es posible determinar la contribución del nitrógeno para finalmente calcular las propiedades de calidad de gas.

Este analizador ha sido probado en laboratorio demostrando buena linealidad y concordancia entre los resultados. A pesar de lo anterior, este analizador no está siendo fabricado ya que *FlowComp* está trabajando en conjunto con *Ruhrgas* desarrollando una nueva tecnología llamada Gas-Lab Q1.

c) Analizador de velocidad del sonido y dióxido de carbono (2VoS)

El nuevo método desarrollado por *Gasunie Research Laboratory* en Europa se basa en la correlación de tres propiedades medidas (propiedades físicas o concentraciones de algunos componentes) para inferir la composición del gas que finalmente se usa para determinar el poder calorífico superior, densidad y factor de compresibilidad bajo condiciones estándar y el índice de Wobbe.

Las propiedades de correlación medidas en este método son: velocidad del sonido a alta presión (40 bar) (VOS_{high}), velocidad del sonido a baja presión (5 bar) (VOS_{low}), la fracción molar de dióxido de carbono (X_{CO_2}). Se miden dos velocidades de sonido a diferentes presiones, pues la velocidad del sonido se reduce cuando la presión se incrementa, mientras que en los hidrocarburos la velocidad del sonido aumenta de manera proporcional al aumento en la presión. Por lo tanto, es posible cuantificar la cantidad de nitrógeno e hidrocarburos con base en la medición de la velocidad del sonido a diferentes presiones.

Este nuevo método requiere de instrumentos y componentes de alta exactitud en las mediciones de las propiedades a correlacionar, con bajos requerimientos de calibración y que hayan sido probados en otras aplicaciones del gas natural. Para adaptación de esta tecnología en campo se podrían utilizar los medidores de flujo con tecnología ultrasónica. El innovador medidor de energía tiene un diseño compacto y se adapta fácilmente al montaje cerca del punto del muestreo; además es apropiado para procesos de control y estaciones de gas.

El primer paso en el desarrollo del método fue la construcción de los medidores de velocidad del sonido, los cuales deberían ser sencillos y compactos pero de alta exactitud. Los sensores deben requerir menor mantenimiento y costos de adquisición comparados con medidores actuales. Un diseño esquemático de los métodos de cálculo implementados se observa en la Figura 22.

Figura 22. Cálculo de poder calorífico por correlación de v.sonido y dióxido de carbono



El procedimiento de cálculo iterativo sigue la siguiente secuencia: una composición inicial de gas se utiliza para determinar la velocidad del sonido a alta y baja presión, que posteriormente

se compara con la velocidad del sonido medida. Como la velocidad del sonido es función de la presión y temperatura, estos dos parámetros deben ser medidos con alta exactitud también.

Dependiendo de las diferencias en el cálculo de la velocidad del sonido, la composición inicial se ajusta y el proceso de iteración se repite hasta que el valor absoluto de las diferencias entre el valor calculado y medido en la velocidad del sonido sean menores al 0.005%. La composición final del gas es usada para calcular el poder calorífico superior bajo condiciones de referencia y condiciones de operación. El valor del poder calorífico superior e inferior, la densidad y el factor de compresibilidad es calculado también a condiciones de referencia y condiciones de operación.

El método se basa en la suposición de que el gas natural puede ser caracterizado como una mezcla de tres componentes: nitrógeno, hidrógeno, dióxido de carbono y mezcla de hidrocarburos (metano + hidrocarburos más pesados). Con estos tres parámetros, se pueden inferir las composiciones de doce componentes principales del gas natural.

Esta nueva tecnología de correlación ha sido probada con diferentes gases de concentración conocida y comparada con los cálculos de las propiedades en un cromatógrafo de gases de laboratorio según la norma ISO 6976. La composición conocida fue usada para calcular el valor del poder calorífico superior real y la velocidad del sonido a baja y alta presión. Los cálculos muestran que el modelo de correlación, basado en las dos velocidades del sonido medidas y en la fracción molar del dióxido de carbono, predice el valor del poder calorífico superior con 0.1% para el rango completo de gas natural.

También es importante la sensibilidad del modelo de correlación con respecto a las desviaciones pequeñas (debido a los errores aleatorios y sistemáticos) en los datos medidos, por ejemplo se encontró que desviaciones de 0.01% en las mediciones de la velocidad del sonido a alta presión y baja presión, producen un porcentaje de error de $\pm 0.12\%$ en el valor del poder calorífico.

El dispositivo de medición de poder calorífico está conformado por instrumentos y componentes que han sido probados con alta precisión y confiabilidad con características de baja frecuencia de calibración. Son dispositivos con diseño compacto que pueden ser fácilmente instalados cerca del punto de muestreo de gas, reduciendo los costos de instalación.

Para mayor información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 10 y Tabla 11.

d) **Analizador EMC 500**

El analizador EMC 500 utiliza tecnología alemana para la determinación de las propiedades de calidad de gas (poder calorífico y densidad) sin necesidad de quemar la muestra. La unidad se basa en diferentes medidores de flujo en los cuales se cuantifica la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la viscosidad del gas. De manera opcional se puede medir la fracción molar de CO₂ por medio de un sensor de tecnología infrarroja. En la Figura 23 se observa el analizador EMC 500 con diseño *explosion proof* y el controlador del equipo.

Figura 23. Analizador EMC 500 de RMG



Otras características del analizador EMC 500 de RMG se muestran a continuación (según datos del fabricante):

- Poca influencia de las condiciones ambientales sobre los resultados.
- Exactitud en la lectura del poder calorífico: $\pm 0,5\%$
- Operación sin *gas carrier* o de arrastre
- Clasificación de seguridad ATEX y *explosion proof*.
- Temperatura de operación: - 0°C hasta 50°C

Para mayor información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 10 y Tabla 11.

e) Analizador GAS PT2

El Gas PT2 es un instrumento que calcula el valor del poder calorífico y la densidad del gas natural que fluye en las tuberías en tiempo real. Se basa en un sistema de correlación de la conductividad térmica, la velocidad del sonido y el dióxido de carbono e infiere a partir de estas propiedades la mezcla efectiva de gas (composiciones de metano, propano, nitrógeno y dióxido de carbono). El sistema utiliza la normatividad ISO 6976 para determinar parámetros de la calidad de gas como el poder calorífico (CV), densidad relativa (RD) índice de Wobbe (IW) y factor de compresibilidad (Z). El analizador GasPT2 se compone de la unidad del sensor y la interface de área segura.

Figura 24. Interface segura Gas PT2



Figura 25. Analizador Gas PT2



La unidad principal del analizador (ver Figura 25) tiene integrados el procesador principal, los sensores de presión, temperatura, velocidad del sonido y conductividad térmica, realiza las mediciones sobre la muestra de gas, calcula la mezcla efectiva y los parámetros de calidad de gas; puede instalarse en zonas clasificadas. La interface segura (ver Figura 24) proporciona el voltaje y aislamiento galvánico entre los equipos de área segura (no peligrosa) y la unidad de sensor. Las especificaciones del equipo y otras características se presentan a continuación:

- Tiempo de respuesta: 4 – 15 segundos
- Exactitud en la lectura del poder calorífico: $\pm 0,2\%$
- Exactitud en el índice de Wobbe: $\pm 0,4\%$ de la lectura
- Clasificación de seguridad ATEX y *flameproof*.
- Temperatura de operación: 0°C hasta 50°C
- Flujo de muestra de gas: 0,7 -2 L/min.
- Para instalación en campo y áreas clasificadas: se recomienda la ubicación de un *shelter waterproof*
- Costo de adquisición: 25.000 (USD) precio FOB en Reino Unido.
- Requiere de un *shelter* especial para instalación en campo por un valor de \$10.000 USD

Para mayor información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 10 y Tabla 11.

f) Analizador GAS LAB Q1

El analizador Gas Lab Q1 es un dispositivo de medición, control y regulación de la calidad de gas, diseñado por Ruhrgas AG en cooperación con Sensor Europe GmbH y FlowComp Systemtechnik. El analizador Gas Lab Q1 está disponible en el mercado desde el año 2003 y es comercializado por Elster Instromet. La tecnología de medición del analizador Gas Lab Q1 es a través de microsensores instalados en una combinación *explosion proof* como se muestra en la Figura 26.

Figura 26. Analizador Gas labQ1 de Rhurgas



Existen tres microsensores en el dispositivo Gas Lab Q1, uno de conductividad térmica y dos de infrarrojo (que difieren entre ellos en el espectro medido). El primer espectro de infrarrojo solamente mide las contribuciones de absorción del dióxido de carbono, determinado así su fracción molar. El segundo espectro de infrarrojo mide las contribuciones de absorción de los hidrocarburos (etano, propano, butano). El microsensor de conductividad térmica es muy sensible al contenido de metano y nitrógeno. Las tres variables medidas son: conductividad térmica, fracción molar de CO₂, y absorción de hidrocarburos.

Las características principales del analizador Gas Lab Q1 se describen a continuación:

- El equipo Gas Lab Q1 fue probado para su operación en campo mostrando un porcentaje de desviación relativa menor al 0,2% (en el valor del poder calorífico) en comparación con un calorímetro de combustión.
- Exactitud en la lectura del poder calorífico: $\pm 0,2\%$
- Repetibilidad de en poder calorífico: $\pm 0,1\%$ (de la lectura)
- Clasificación de seguridad ATEX.

Para mayor información de las características técnicas de este equipo ver Tabla 10 y Tabla 11.

3.6.8 COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES

Tabla 10. Comparación características generales y de desempeño tecnologías no convencionales

| EQUIPO | CARACTERÍSTICAS GENERALES | | | | | | | | | DESEMPEÑO | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|------------------|-------------|------------|----------------------|-----------|------------------|-------|----------|------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|
| | CONDICIONES DE OPERACIÓN | | CALIBRACIÓN | | CERTIFICACIONES | PESO (kg) | DIMENSIONES (cm) | | | PRUEBAS EN CAMPO | TIEMPO DE RESPUESTA (segundos) | EXACTITUD % (valor medido) | REPETIBILIDAD | |
| | Presión (psi) | Temperatura (°C) | Manual | Automática | | | Largo | Ancho | Profundo | | | | % | STU /1000 STU |
| Medidor 2VoS Y CO ₂ | 70 - 580 | -20 - 50 | ✓ | — | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | ✓ | 4 | ± 0,3 | ± 0,03 | 0,3 |
| EMC 500 | 8 - 44 | -20 - 50 | ✓ | ✓ | ATEX Explosion Proof | N.I. | 65 | 50 | 34 | N.I. | 60 | ± 0,5 | N.I. | N.I. |
| GAS PT2 | 4,6 | 0 - 50 | ✓ | — | ATEX Flame Proof | 3 | 20 | 6 (Ø) | — | N.I. | 15 | ± 0,2 | ± 0,2 - 0,7 | 2 - 3 |
| GAS LAB Q1 | 5 - 70 | 5 - 40 | ✓ | ✓ | ATEX Explosion Proof | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | ✓ | 20 - 60 | ± 0,4 | ± 0,1 | 1 |

Tabla 11. Comparación de salidas de comunicación e insumos de las tecnologías no convencionales

| EQUIPO | COMUNICACIÓN | | | | | INSUMOS | | | | |
|--------------------------------|-------------------|---------|---------|----------|----------|----------------|--------------------|---------------------------|------------|----------|
| | NÚMERO DE SALIDAS | | | | | CONSUMOS [L/h] | | REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS | | |
| | 4-20 mA | RS -232 | R-S 485 | Ethernet | Software | Muestra de Gas | Gas de Calibración | Voltaje | Frecuencia | Potencia |
| Medidor 2VoS Y CO ₂ | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. |
| EMC 500 | 4 | ✓ | N.P. | N.P. | ✓ | 15 | N.I. | 24 VDC | 60 Hz | 100 W |
| GAS PT2 | N.I. | ✓ | ✓ | N.P. | ✓ | 100 | N.I. | 110 VAC | 60 Hz | N.I. |
| GAS LAB Q1 | 2 | 3 | ✓ | N.P. | ✓ | 30 | N.I. | 2A VDC | 60 Hz | 30 W |

3.6.9 COSTOS DE ADQUISICIÓN TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

La Tabla 12, muestra un resumen de los costos de adquisición para los equipos que se expusieron anteriormente.

Tabla 12. Costo de adquisición de las tecnologías convencionales

| COSTO DE ADQUISICIÓN PILOTO DE MEDICIÓN DE PODER CALORÍFICO | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|------------------------|---------------------|---------------|--------|-------------|------------|----------------|-------------------------|
| TECNOLOGÍA | EQUIPO | Sonda de muestreo | Acon/miento de muestra | Shelter y/o housing | Medidor de SG | EQUIPO | Controlador | Software | COSTO (USD) | COSTO ¹ (\$) |
| CALORÍMETROS | Algas | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 78.188 | \$ 144.648.350 |
| | Thermo Scientific | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 84.255 | \$ 155.871.150 |
| | Calor Val | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 24.161 | \$ 44.697.188 |
| OXIGENO RESIDUAL | COSA | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 50.808 | \$ 93.994.800 |
| | Wim Compas F * | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 63.060 | \$ 116.661.785 |
| | Rhadox * | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 79.952 | \$ 147.911.548 |
| CROMATÓGRAFOS | Danalyzer 770 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 57.573 | \$ 106.510.335 |
| | Danalyzer 550 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 52.580 | \$ 97.273.185 |
| | ABB | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 36.877 | \$ 68.223.254 |
| | Yamatake | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 36.618 | \$ 67.744.000 |
| | Encal | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 87.539 | \$ 161.946.950 |
| | Chandler | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 58.386 | \$ 108.013.566 |
| | Envent | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 87.539 | \$ 161.946.950 |
| | Siemens | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 48.649 | \$ 90.000.000 |
| | AIT -FXI | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 114.170 | \$ 211.214.500 |
| Yokowaga | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 109.358 | \$ 202.312.300 | |

| | | | | | | | | | |
|---|----------|---|-----------|---|----------|---|-------------|---|-----------------|
| ■ | Incluido | ■ | Integrado | ■ | No posee | ■ | No requiere | ■ | Sin información |
|---|----------|---|-----------|---|----------|---|-------------|---|-----------------|

3.6.10 COSTOS DE ADQUISICIÓN TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES

La Tabla 13 muestra los costos de adquisición de las tecnologías no convencionales. Solo se reportan seis de los tres equipos, ya que son los únicos que se tuvo información por parte de los fabricantes.

Tabla 13. Costo de adquisición de las tecnologías no convencionales

| TECNOLOGÍA | EQUIPO | Sonda de muestreo | Acon/miento de muestra | Shelter y/o housing | EQUIPO | Controlador | Software | COSTO (\$) | SOPORTE |
|---|------------|-------------------|------------------------|---------------------|--------|-------------|----------|----------------|----------------------|
| NO CONVENCIONALES (TÉCNICAS CORRELATIVAS) | EMC 550 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 140.000.000 | T.J GAS (Colombia) |
| | GAS PT2 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 70.000.000 | GL Noble Denton (UK) |
| | GAS LAB Q1 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | \$ 250.000.000 | Alcanos (Colombia) |

| | | | | | |
|---|----------|---|-----------|---|----------|
| ■ | Incluido | ■ | Integrado | ■ | No posee |
|---|----------|---|-----------|---|----------|

4. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA NO CONVENCIONAL ADECUADA

Como se mencionó al inicio de este documento, el principal objetivo de este trabajo es realizar un estudio de viabilidad para la instalación de un equipo basado en una tecnología no convencional para la medición de poder calorífico. Este estudio se basa por lo tanto en la comparación entre los indicadores financieros de esta nueva tecnología y la convencional (cromatografía de gases), para esto se debe en primer lugar seleccionar el equipo más adecuado, el cual va a ser objeto del posterior estudio económico.

En el presente capítulo se hace una evaluación de las tecnologías no convencionales, comercialmente disponibles, esta evaluación permite determinar la tecnología no convencional que será comparada con el cromatógrafo de gases para definir la viabilidad financiera de instalación y utilización de este equipo.

Esta selección está compuesta por una primera fase en donde se muestran los requerimientos y características de cada tecnología:

- El analizador de correlación ϵ - **método** no se considerará para la selección debido a la poca información disponible acerca de su fabricante o distribuidor (según la información recopilada, este equipo tiene una discontinuidad en su producción)
- El analizador de **espectroscopia de infrarrojo** fue reemplazado por el analizador Gas Lab Q1, por lo tanto, no se considera para su selección.
- El analizador de **medición de doble velocidad del sonido y concentración de CO₂** es un prototipo de laboratorio, que hasta el momento no ha sido aprobado para distribución y venta masiva. No se obtuvo respuesta por parte de los productores de este equipo acerca de su estado actual o costo de adquisición, por lo tanto no se considera para la selección.
- El analizador **EMC 500** se presenta como una tecnología innovadora de correlación para el cálculo del poder calorífico (medición de viscosidad dinámica, capacidad calorífica y conductividad térmica), además tiene pruebas en campo que

validan su operación. Sí bien, este equipo tiene representante de ventas y distribución en Colombia (TI Gas), el acceso a la información detallada del equipo es limitado y su costo de adquisición en términos DDP es elevado por lo que se descartó del proceso de selección.

- El analizador **GasPT2** tiene un principio de operación basado en técnicas de correlación de solo tres propiedades (conductividad térmica, concentración de dióxido de carbono y velocidad del sonido), tiene buen desempeño y exactitud en los resultados, además, su diseño ligero y sencillo lo hacen flexible ante la posible instalación en campo. Sin embargo, es un equipo que no posee soporte en Colombia y el costo inicial de adquisición es del orden de los 70`000.000 (DDP). Por su tecnología innovadora, se deja este equipo como posible alternativa de selección.

- El analizador **Gas Lab Q1** presenta una tecnología innovadora de medición por microsensores, desafortunadamente su elevado costo de adquisición, lo dejan por fuera de la posible selección del piloto de medición del poder calorífico.

A partir de lo anterior, se determinó que el dispositivo Gas PT2, al ser una tecnología alternativa, tiene un desempeño metrológico que es aceptable, presenta una tecnología de correlación interesante entre las propiedades físicas del gas natural que permite inferir, a través de algoritmos de iteración, el poder calorífico del gas natural. Por tanto, se propone realizar la evaluación financiera por medio de la comparación entre este equipo y la tecnología convencional de cromatografía de gases.

4.1 ESTUDIO DE OPERATIVIDAD DEL ANALIZADOR

El dispositivo Gas PT2, al ser una tecnología alternativa, tiene un desempeño metrológico que es adecuado para la aplicación en transferencia de custodia pero sus resultados requieren un proceso de validación previo que permitan asegurar su implementación.

Para dicha validación se empleará el estándar ASTM D3764, el cual describe el procedimiento de validación requerido para evaluar el desempeño metrológico de sistemas analizadores de flujos de proceso, mediante la comparación entre los resultados obtenidos por el analizador en prueba y los resultados de un método empleado como referencia para la medición de una misma propiedad, que en este caso particular corresponde al poder calorífico.

Considerando que la validación se realiza con base en el desempeño, al final del proceso de validación, el desempeño se cuantifica en términos de precisión y error sistemático para un rango de condiciones dado.

De acuerdo con el estándar ASTM D3764 la validación total de un sistema analizador de proceso, incluyendo el sistema de muestreo correspondiente, puede ser realizada mediante la combinación de dos procedimientos: procedimiento con material de referencia y procedimiento de muestreo en línea.

- Procedimiento con material de referencia: este procedimiento se implementa con la finalidad de evaluar el desempeño del analizador frente a gases con características que no se encuentren disponibles en el proceso.
- Procedimiento de muestreo en línea: La finalidad de este procedimiento es la evaluación del sistema completo, incluyendo sistema de muestreo, empleando muestras de gas tomadas directamente del flujo del proceso.

Para cada uno de estos procedimientos se puede ejecutar uno de dos tipos de validación: validación general y validación de nivel específico. La validación general se fundamenta en principios estadísticos que validan la operación del analizador en un intervalo más amplio que la validación de nivel específico, por tal motivo para dicha validación se requieren al menos 10 materiales de referencia que cubran completamente el alcance del analizador bajo evaluación. No siempre es posible ejecutar la evaluación general si no se

cuenta con disponibilidad de materiales de referencia diferentes, en tales casos, se ejecutan validaciones de nivel específico sobre un rango limitado de operación.

4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE VALIDACIÓN

El proceso de validación para cada uno de los procedimientos, se ejecuta teniendo en cuenta tres fases:

a) FASE 1 - Control estadístico:

La metodología propuesta por el estándar ASTM D3764 se basa en métodos estadísticos para evaluar el grado de conformidad entre los resultados, por lo cual todas las mediciones, tanto del analizador como del método de referencia, deben estar dentro de control estadístico, lo cual se asegura mediante métodos descritos en ASTM D6299 que se encuentran resumidos en la Tabla 14.

La evaluación de dicho control estadístico se realiza sobre las desviaciones calculadas entre el analizador y el método de referencia, para una muestra representativa, definida por el estándar en mínimo 15 datos.

Tabla 14. Pruebas de control estadístico

| Paso | Actividad a desarrollar | Descripción |
|-------------|---|--|
| 1 | Filtro para resultados sospechosos | Los resultados son filtrados visualmente con el fin de encontrar datos inconsistentes con el conjunto. Los datos sospechosos deben ser investigados y de ser necesario descartados. |
| 2 | Filtro para patrones inusuales | Se grafican las desviaciones (Δ) para encontrar patrones no aleatorios en el conjunto de datos. Si éstos son encontrados debe investigarse y eliminarse la causa de la desviación y el conjunto debe ser descartado |
| 3 | Prueba de hipótesis de Normalidad e independencia de los resultados | Se utiliza para comprobar que los resultados son razonablemente independientes y pueden ser modelados por una distribución normal. Para esto se utiliza una gráfica de probabilidad normal y el estadístico de Anderson-Darling. |

| | | |
|----------|-----------------------------------|--|
| 4 | Construcción de cartas de control | Se determinan los límites de control y se sobreponen en el gráfico obtenido en el segundo paso. Los datos que se encuentren fuera de estos límites deben ser investigados y eliminados del conjunto si es necesario. |
|----------|-----------------------------------|--|

b) FASE 2 - Validación de resultados – Método ASTM:

Una vez se confirme que todo el conjunto de datos se encuentra en control estadístico se procede a realizar la validación metrológica siguiendo los lineamientos de ASTM D6299 y ASTM D6708. En la Tabla 15 se muestra un resumen de los aspectos a evaluar durante la etapa de validación.

Tabla 15. Validación de resultados - Método ASTM

| PASO | ACTIVIDAD A DESARROLLAR | ECUACIÓN RELACIONADA |
|---|---|--|
| Determinación de la desviación. | Se calcula la desviación utilizando la desviación estándar, donde x es cada uno de los resultados obtenidos y n es el número total de mediciones. | $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n-1}}$ |
| Determinación de la repetibilidad | Una vez obtenida la desviación, es posible determinar la repetibilidad de los resultados, la cual se debe comparar con el valor emitido por el fabricante del analizador para confirmar la confiabilidad del sistema. | $r = 2.8 * \sigma$ |
| Determinación de la reproducibilidad | Para la determinación de la reproducibilidad, se necesita más de un conjunto de datos, obtenidos en condiciones de medición diferentes. En este parámetro, se aplica el test chi cuadrado (χ^2). Donde R es el valor de reproducibilidad dado por el fabricante. | $\chi^2 = \frac{(n-1)r^2}{R^2}$ |

c) FASE 3 - Validación de resultados – Método ISO:

Cuando se están validando analizadores de gas natural, los datos de repetibilidad y reproducibilidad validados mediante los métodos de ASTM, pueden confirmarse utilizando las técnicas planteadas en la norma ISO 10723. Adicionalmente, este estándar permite evaluar la linealidad de los resultados. En la Tabla 16 se encuentra el resumen de la metodología propuesta para esta validación.

Tabla 16. Validación de resultados - Método ISO

| Parámetro | Test | Criterio |
|-------------------------|-----------------|--|
| Repetibilidad | Test de Grubb | $r = \frac{ (x - \bar{x}) }{s}$ |
| Reproducibilidad | Test de Cochran | $\text{Reproducibilidad} = \frac{\text{mayor varianza}}{\text{suma de varianzas}}$ |
| Linealidad | Test F | $F = \frac{b * S_{xy} (n - 2)}{S_{yy} - b * S_{xy}}$ |

RESULTADOS DE VALIDACIÓN CON MATERIAL DE REFERENCIA (ETAPA I):

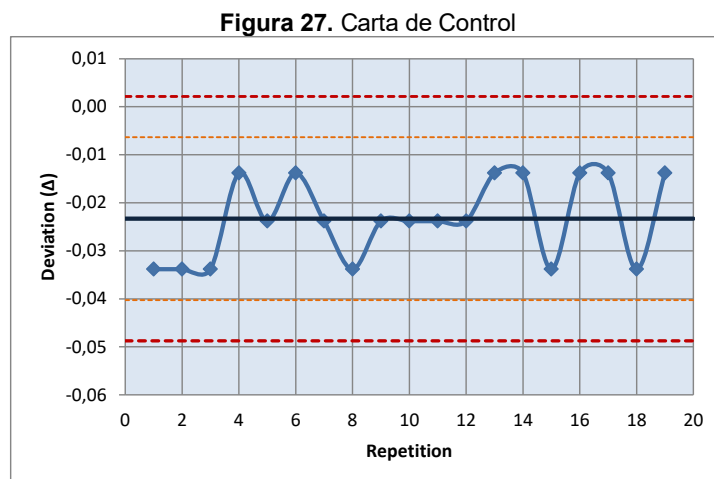
La validación de nivel específico fue desarrollada con los resultados de medición de poder calorífico, teniendo en cuenta que es la propiedad más relevante dentro de las propiedades medidas por el equipo.

El resumen de las pruebas desarrolladas en la validación es el siguiente:

- ❖ Evaluación con cuatro gases de referencia de composición diferente.
- ❖ Tres (3) pruebas con cada gas de referencia.
- ❖ Veinte (20) análisis para cada prueba.

Con todos los datos obtenidos se realizaron las pruebas de control estadístico como requisito previo para la aplicación de los métodos de validación. Como resultado de las diferentes verificaciones realizadas dentro de lo correspondiente a la Fase 1 (filtro visual, filtro de patrones inusuales y cartas de control) no fue necesario prescindir de ningún

resultado de medición, a partir de lo cual se puede concluir que la muestra de los datos obtenidos se encuentra bajo control estadístico y que pueden ser aplicadas las verificaciones posteriores (correspondientes a las Fases 2 y 3). En la Figura 27 se observa un ejemplo de carta de control obtenido con los resultados de una de las pruebas efectuadas.



❖ Repetibilidad (Método ASTM y Método ISO):

Inicialmente, se realizaron las pruebas de repetibilidad según los lineamientos de ASTM D6299-10 e ISO 10723. La Tabla 17 muestra los resultados obtenidos en los tres análisis realizados con este material de referencia.

Tabla 17. Resultados de la evaluación de repetibilidad

| MRGC | Nº DE ANÁLISIS | REPETIBILIDAD | REPETIBILIDAD RELATIVA (%) |
|------|----------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 1 | 0,040 | 0,100 |
| | 2 | 0,024 | 0,060 |
| | 3 | 0,029 | 0,074 |

Conclusión pruebas de repetibilidad – Método ASTM:

La Norma ASTM D6299, establece que la repetibilidad calculada debe ser comparada con el valor dado por el fabricante del equipo. Teniendo en cuenta la repetibilidad máxima reportada por el fabricante (0,040 MJ/m³) y los resultados obtenidos en laboratorio, es posible concluir que el analizador está conforme en lo que concierne a este parámetro, ya que en la mayoría de los análisis de cada material de referencia certificado se obtuvieron

valores de repetibilidad menores, presentándose solo un análisis en el que la repetibilidad fue mayor al valor dado por el fabricante y en ningún caso se superó el valor límite.

La Tabla 18 muestra los resultados obtenidos con el test de Grubb para confirmación de la repetibilidad.

Tabla 18. Resultados de confirmación de Repetibilidad – Test de Grubb

| MRGC | Nº DE ANÁLISIS | Estadístico | Grubb ($\alpha=0,01$) |
|------|----------------|-------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 1,87 | 2,81 |
| | 2 | 1,24 | 2,81 |
| | 3 | 2,23 | 2,81 |

Conclusión pruebas de repetibilidad – Método ISO:

El test de Grubb consiste en la comparación entre el valor calculado del estadístico y el valor crítico de este test, el cual depende del número de repeticiones que se realicen en cada análisis. Según lo planteado en la norma ISO10723, la conformidad del parámetro se da si el valor del estadístico calculado es menor que el crítico. Al observar los resultados mostrados en la tabla anterior se puede afirmar que la repetibilidad es aceptable con respecto a esta prueba.

❖ Reproducibilidad (Método ASTM):

Con estos tres análisis, se realizaron las respectivas pruebas de reproducibilidad, empleando tanto el método ASTM (ver Tabla 19) como el método ISO (ver Tabla 20).

Tabla 19. Resultados evaluación de Reproducibilidad

| MRGC | χ^2 | $\chi^2_{\text{crítico}}$ |
|------|----------|---------------------------|
| 1 | 2,13 | 67,50 |

Conclusión pruebas de reproducibilidad – Método ASTM:

Según lo planteado en la ASTM D6299, la evaluación de la reproducibilidad se realiza por medio de la aplicación del test χ^2 . Se considera que el parámetro aprueba el test si el valor calculado del estadístico χ^2 es menor que el valor crítico, que es función del número

de repeticiones de cada análisis. Por tanto, se puede concluir que la reproducibilidad de los resultados obtenidos experimentalmente cumple con el requisito de la Norma.

Tabla 20. Resultados confirmación de Reproducibilidad -Test de Cochran

| MRGC | Estadístico | Cochran ($\alpha=0,01$) |
|------|-------------|---------------------------|
| 1 | 0,52 | 0,61 |

Conclusión pruebas de reproducibilidad – Método ISO:

El test de Cochran, planteado en la ISO 10723 es utilizado como confirmación de la reproducibilidad de los resultados de un equipo. Al igual que en el test anterior la prueba es aceptada si el estadístico calculado es menor que el valor crítico, como se observa en la tabla anterior esta condición se cumple, confirmando que la reproducibilidad de los resultados obtenidos es satisfactoria.

❖ Linealidad (Método ISO-10723):

Finalmente, siguiendo los lineamientos del estándar ISO 10723 y aplicando el test F empleando todas las repeticiones y análisis se obtuvo el resultado de linealidad (ver Tabla 21). El resultado de linealidad obtenido se confirmó obteniendo el factor de correlación.

Tabla 21. Resultados evaluación de Linealidad

| Estadístico F | Valor crítico | R |
|---------------|---------------|-------|
| 354,964 | 10,128 | 0,994 |

Conclusión pruebas de linealidad:

Para la evaluación de la linealidad, el test F se aplicó a los resultados. En este caso la aprobación se da cuando el valor F calculado supera el valor F crítico. Según la tabla anterior, los resultados obtenidos cumplen con los requisitos normativos.

Una vez analizados los resultados mostrados anteriormente, se determinó que los parámetros de desempeño metrológico del analizador GasPT2 asociados a la medición de poder calorífico, evaluados mediante una prueba de nivel específico desarrollada con el procedimiento de materiales de referencia y ejecutada en laboratorio, fue satisfactoria y que el equipo cumple a cabalidad con las especificaciones técnicas emitidas por el fabricante.

5. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO

5.1 EVALUACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL CORRESPONDIENTE A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA TRADICIONAL (CROMATOGRAFÍA DE GASES)

Como se mencionó anteriormente, la cromatografía de gases es la técnica convencional con la que se realiza el análisis composicional del gas natural comercializado. Como resultado, la cromatografía es una tecnología que ha sido ampliamente estudiada y evaluada, por lo que se conoce su rendimiento y efectividad haciéndola confiable para la industria que utiliza sus resultados en el cálculo del poder calorífico y la posterior facturación.

Por tanto, en caso de que se determine el uso de un cromatógrafo de gases para el cálculo del poder calorífico no se requeriría realizar un estudio profundo para definir la efectividad del equipo. Sin embargo, si es necesario realizar un análisis adecuado para una correcta selección así como una caracterización metrológica del mismo.

La implementación de esta tecnología inicia con el desarrollo de un estudio del estado del arte, por medio del cual se realiza una evaluación de los tipos de tecnologías disponibles, sus principios de operación, ventajas y desventajas de su implementación, así como de los principales proveedores y la selección final del equipo que se considere más adecuado; para esto se requiere contar con un profesional con conocimientos en el tema, que se encargue de realizar dicha evaluación. Se considera por tanto como uno de los costos iniciales el salario de éste profesional, el cual está estipulado en \$3.000.000 incluyendo prestaciones sociales y los recursos asociados a su trabajo (equipo de cómputo, dotación, etc.) y se estima que el tiempo de desarrollo del estado del arte es de seis (6) meses por lo que en total se tiene un costo de \$18.000.000.

A partir del estudio mencionado anteriormente se define el tipo de cromatógrafo requerido, el cual debido a que es una tecnología altamente especializada solamente es fabricado por industrias internacionales, lo que implica que al costo del equipo se debe adicionar el

valor de envío y pago de impuestos por conceptos de nacionalización. De igual forma, se requiere adquirir los materiales de referencia gaseosos certificados (MRCs) necesarios para hacer la calibración del equipo; con el fin de realizar una evaluación adecuada del cromatógrafo se recomienda adquirir tres (3) MRCs, los cuales también se deben adquirir en el extranjero por lo que es necesario sumar costos de envío y nacionalización.

Adicional a esto, el cromatógrafo de gases requiere de ciertos insumos para su funcionamiento (gases de arrastre, filtros para las columnas, etc.) los cuales deben incluirse en la inversión inicial. Finalmente, y con el fin de tener un sistema de adquisición de datos que facilite el desarrollo de los cálculos y que entregue el valor de poder calorífico calculado a partir de la composición entregada por el cromatógrafo se debe adquirir un computador de flujo.

Los costos asociados a estos conceptos se resumen en la Tabla 22, junto con el valor total de la inversión inicial.

Tabla 22. Inversión inicial de la tecnología convencional

| DESCRIPCIÓN | VALOR (COP) |
|--|--------------------|
| Estudio del estado del arte | 18.000.000 |
| Cromatógrafo de gases en línea | 162.334.800 |
| Envío y nacionalización del cromatógrafo | 7.500.000 |
| Materiales de Referencia Certificados | 9.486.615 |
| Envío y nacionalización de los MRC | 4.209.429 |
| Gases requeridos para el funcionamiento del equipo | 1.105.000 |
| Filtros para el cromatógrafo | 4.491.790 |
| Computador de flujo | 6.369.500 |
| TOTAL | 213.497.134 |

5.2 FLUJO DE INVERSIÓN CON LA TECNOLOGÍA CONVENCIONAL

Una vez se tienen los valores asociados a la inversión inicial, se procede a realizar un análisis económico de los costos que se requieren para la puesta en marcha de la tecnología en el punto donde se requiere. Este análisis comprende un flujo de inversión de cinco (5) años de implementación de la tecnología convencional en uno de los puntos

donde se requiere realizar la medición de poder calorífico, teniendo en cuenta que éste es el tiempo estimado de vida útil de los equipos, en el primer mes se toma como el valor de inversión el total calculado en la Tabla 22. Por su parte, el mes dos incluye las actividades de instalación, adecuación y desarrollo de pruebas del equipo en el punto de medición; estas actividades junto con los costos asociados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Costos del mes dos para la tecnología convencional y no convencional

| DESCRIPCIÓN | VALOR (COP) |
|--|--------------------|
| Accesorios requeridos para la instalación del equipo | 5.498.000 |
| Obra civil para adecuación del sitio de instalación | 15.348.000 |
| Personal requerido para instalación y configuración | 10.000.000 |
| Desarrollo de pruebas de operatividad | 12.500.000 |
| Imprevistos | 10.000.000 |
| TOTAL | 53.346.000 |

A partir del tercer mes, una vez el equipo ya está instalado y funcionando correctamente los costos son muy similares en los siguientes meses y comprenden básicamente un mantenimiento preventivo del equipo, insumos consumibles (gases de arrastre y filtros) que se gastan considerablemente teniendo en cuenta que el equipo trabaja en línea y la compra de un (1) material de referencia certificado mensualmente para la calibración y verificación del cromatógrafo. Estos costos se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Costos después del mes 3 para la tecnología convencional

| DESCRIPCIÓN | VALOR (COP) |
|---|--------------------|
| Mantenimiento preventivo del cromatógrafo | 2.500.000 |
| Gases de arrastre | 3.315.000 |
| Filtros para el cromatógrafo | 4.491.790 |
| Material de Referencia Certificado | 3.162.205 |
| Envío y nacionalización del MRC | 1.403.143 |
| TOTAL | 14.872.138 |

Estos valores se mantienen para los meses siguientes hasta finalizar el proyecto (año 5). La Tabla 25 muestra el flujo de inversión para los cinco años de funcionamiento de la tecnología.

Tabla 25. Flujo de inversión para la tecnología convencional

| | Año 1 | | | Año 2 a 5 | | | |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| | Mes 1 | Mes 2 | Mes 3 a 12 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
| Inversión cancelada | \$ 213.497.134 | \$ 53.346.000 | \$ 148.721.380 | \$ 178.465.656 | \$ 178.465.656 | \$ 178.465.656 | \$ 178.465.656 |
| Inversión acumulada | \$ 213.497.134 | \$ 266.843.134 | \$ 415.564.514 | \$ 594.030.170 | \$ 772.495.826 | \$ 950.961.482 | \$ 1.129.427.138 |
| % cancelado en el periodo | 18,90% | 4,72% | 13,17% | 15,80% | 15,80% | 15,80% | 15,80% |
| % total acumulado | 18,90% | 23,63% | 36,79% | 52,60% | 68,40% | 84,20% | 100,00% |

| | |
|------------------------|-------------------------|
| INVERSIÓN TOTAL | \$ 1.129.427.138 |
|------------------------|-------------------------|

5.3 EVALUACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL CORRESPONDIENTE A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA NO CONVENCIONAL

Para realizar el análisis económico que permita definir la viabilidad de la instalación de una nueva tecnología en los puntos de mezcla de gas para la medición de poder calorífico, es necesario en primera instancia realizar un estudio más profundo que para el caso anterior ya que se trata de un principio de operación y medición desconocido, del cual no se tienen muchas referencias de pruebas y resultados obtenidos.

La utilización de esta tecnología requiere entonces el desarrollo de un completo estado del arte, realizado por un grupo de trabajo altamente competitivo y con una amplia experiencia en metrología química de fluidos; es por esto que para cuantificar la inversión inicial de este proyecto debe primero estimarse el valor correspondiente a los salarios y costos asociados a la contratación del grupo de trabajo que se encargue de este estudio. Este valor es de \$8.000.000 mensuales (considerando que el grupo de trabajo esté conformado por un profesional, un técnico y un líder del proyecto), durante seis (6) meses de estudio, para un total de \$48.000.000.

Como resultado de este estudio se obtiene la selección del equipo y la tecnología más apropiada (Gas PT2 como se explicó en el capítulo 4 del presente documento), por lo que el siguiente ítem a tener en cuenta en la inversión inicial es la adquisición del equipo junto con los costos de envío y nacionalización, puesto que debe ser importado desde el Reino Unido donde se encuentra la empresa que lo fabrica. Adicionalmente, y con el fin de

confirmar la validez metrológica de los resultados dados por el equipo se deben realizar unas pruebas de laboratorio, las cuales tienen un valor estimado de \$15.000.000

Finalmente, se debe considerar la compra de un computador de flujo, al igual que con la tecnología convencional, el cual permita realizar la adquisición de los datos dados por el equipo. La Tabla 26 contiene los valores correspondientes a la inversión inicial.

Tabla 26. Inversión inicial de la tecnología no convencional

| DESCRIPCIÓN | VALOR (COP) |
|------------------------------------|--------------------|
| Estudio del estado del arte | 48.000.000 |
| Equipo analizador de P.C (Gas PT2) | 49.059.300 |
| Costos de envío y nacionalización | 9.800.000 |
| Pruebas de laboratorio | 15.000.000 |
| Computador de Flujo | 6.369.500 |
| TOTAL | 128.228.800 |

5.4 FLUJO DE INVERSIÓN CON LA TECNOLOGÍA NO CONVENCIONAL

Teniendo como base la inversión inicial (correspondiente al primer mes), es posible realizar el flujo de inversión total para el proyecto en un tiempo de cinco (5) años. Para esto se deben definir los costos asociados a los siguientes meses; para el mes dos estos costos corresponden a la instalación en campo, puesta en funcionamiento del equipo y desarrollo de pruebas, los costos se consideran iguales a los de esta etapa con la tecnología convencional ya que las actividades son muy similares y se pueden observar en la Tabla 23.

A partir del tercer mes se tienen flujos iguales hasta la finalización del proyecto que consisten en la realización de un mantenimiento preventivo, teniendo en cuenta que el equipo no requiere de insumos consumibles ni materiales de referencia para su funcionamiento. La Tabla 27 muestra estos costos.

Tabla 27. Costos después del mes 3 para la tecnología no convencional

| DESCRIPCIÓN | VALOR (COP) |
|--------------------------------------|--------------------|
| Mantenimiento preventivo del gas PT2 | 2.500.000 |
| TOTAL | 2.500.000 |

Con estos datos es posible construir el flujo de inversión el cual se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Flujo de inversión para la tecnología no convencional

| | Año 1 | | | Año 2 a 5 | | | |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Mes 1 | Mes 2 | Mes 3 a 12 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
| Inversión cancelada | \$ 128.228.800 | \$ 53.346.000 | \$ 25.000.000 | \$ 30.000.000 | \$ 30.000.000 | \$ 30.000.000 | \$ 30.000.000 |
| Inversión acumulada | \$ 128.228.800 | \$ 181.574.800 | \$ 206.574.800 | \$ 236.574.800 | \$ 266.574.800 | \$ 296.574.800 | \$ 326.574.800 |
| % cancelado en el periodo | 39,26% | 16,34% | 7,66% | 9,19% | 9,19% | 9,19% | 9,19% |
| % total acumulado | 39,26% | 55,60% | 63,25% | 72,44% | 81,63% | 90,81% | 100,00% |

| | |
|------------------------|-----------------------|
| INVERSIÓN TOTAL | \$ 326.574.800 |
|------------------------|-----------------------|

5.5 WACC DE LA EMPRESA

Para realizar el cálculo del flujo de caja del proyecto, que permita determinar la viabilidad financiera del mismo es necesario calcular el WACC de la empresa que va a implementar la tecnología para medición de poder calorífico. Para esto, es necesario en primer lugar obtener el balance general de la empresa; esta información se resume en la Tabla 29.

Tabla 29. Balance General de la empresa

| Activo | Pasivo |
|---------------------|-------------------|
| Corriente | Total |
| 746456 | 2635805 |
| No corriente | Patrimonio |
| 4625690 | |
| | Total |
| Total | 2736341 |
| 5372146 | |

A partir de la tabla anterior se calcula el WACC, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$WACC = \frac{2635805}{5372146} * 15\% + \frac{2736341}{5372146} * 20\% = 17,55\%$$

5.6 CÁLCULO DE FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

Teniendo clara la información expuesta en los numerales anteriores, donde se hizo el cálculo de la inversión para el proyecto, es posible seguir con el desarrollo del flujo de caja que permita la posterior evaluación de los indicadores de viabilidad financiera.

La Tabla 30 muestra el cálculo de flujo de caja del proyecto.

Tabla 30. Flujo de caja del proyecto (en pesos colombianos)

| Año | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-------------|------------|------------|------------|------------|
| CONCEPTO | | | | | |
| + Ingreso de operación | 208989714 | 148465656 | 148465656 | 148465656 | 148465656 |
| + Ingreso Financieros asociados | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| - Costo de operación | (206574800) | (30000000) | (30000000) | (30000000) | (30000000) |
| - Intereses crédito | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| - Depreciación | (11085760) | (11085760) | (11085760) | (11085760) | (11085760) |
| =Ganancias operativas gravables | (8670846) | 107379896 | 107379896 | 107379896 | 107379896 |
| -Impuesto a la renta | 2948088 | (36509165) | (36509165) | (36509165) | (36509165) |
| + Ingreso venta de activos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| = Ganancias Netas Contables | (5722758) | 70870731 | 70870731 | 70870731 | 70870731 |
| + Depreciación | 11085760 | 11085760 | 11085760 | 11085760 | 11085760 |
| - Costos de inversión | (60926800) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| - Inversiones financieras asociadas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| + crédito Recibido | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| - Amortización crédito | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| + valor salvamento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| = Flujo de fondos neto | (55563798) | 81956491 | 81956491 | 81956491 | 81956491 |
| = Flujo de fondos neto descontado | (55563798) | 59311388 | 50456307 | 42923272 | 36514906 |
| = Flujo de fondos descontado acumulativo | (55563798) | 3747590 | 54203897 | 97127169 | 133642075 |

5.7 INDICADORES FINANCIEROS DEL PROYECTO

Con la información disponible del flujo de caja mostrado anteriormente se puede realizar el cálculo de los indicadores financieros que permitirán determinar la viabilidad económica del proyecto.

La Tabla 31, muestra los resultados obtenidos

Tabla 31. Indicadores Financieros del Proyecto

| | |
|-----------------------------|------------------------|
| VPN | \$ 166.847.706 |
| TIR | 143% |
| IVAN | 273,85% |
| TRN | 22,82% |
| MÁXIMO ENDEUDAMIENTO | (\$ 55.563.798) |
| PAY OUT | Año 1 |

Estos indicadores representan lo siguiente:

- ❖ Valor Presente Neto (VPN): Representa el valor en pesos de hoy del flujo de fondos neto de cada mes del proyecto.
- ❖ Tasa Interna de Retorno (TIR): Es la tasa de ganancia que dejará el proyecto con respecto a la inversión realizada. Una TIR más alta indica una mayor rentabilidad.
- ❖ Índice de Valor Actualizado (IVAN): Es el rendimiento por unidad de inversión y se calcula por medio de la división entre el VPN y la inversión.
- ❖ Tasa de Retorno Neta (TRN): Se determina por medio de la división entre el IVAN y el tiempo de horizonte del proyecto (en este caso 5 años)
- ❖ Máximo Endeudamiento: Indica el máximo valor que se va a deber a lo largo del proyecto.
- ❖ Pay Out: Indica el punto en el que se pasa de deber dinero a recibir un flujo de caja positivo.

5.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES

Para este análisis se tuvo en cuenta la inversión, los ingresos operacionales y los costos operacionales. Para esto se evaluaron los indicadores financieros mostrados en la tabla anterior tomando un valor de inversión de 10% y 20% más alto que la actual, para el caso de los ingresos operacionales se realizó con un 10% y 20% menor que el considerado inicialmente y los costos operacionales se consideraron como 10% y 20% mayores. La Tabla 32 muestra los resultados obtenidos en cada caso.

Tabla 32. Análisis de sensibilidades del proyecto

| % de Variación | TIR | VPN | IVAN | PAY OUT | MAX. END | S. VALUE |
|-------------------------|------|----------------|---------|---------|-----------------|----------|
| CASO BASE | | | | | | |
| 0% | 143% | \$ 166.847.706 | 273,85% | Año 1 | (\$ 55.563.798) | --- |
| SENSIBILIDADES | | | | | | |
| INVERSIÓN | | | | | | |
| 10% | 128% | \$ 160.755.026 | 239,86% | Año 2 | (\$ 61.656.478) | 274% |
| 20% | 115% | \$ 154.662.346 | 211,54% | Año 2 | (\$ 67.749.158) | |
| ING. OPERACIÓN | | | | | | |
| -10% | 169% | \$ 153.890.082 | 252,58% | Año 1 | (\$ 41.929.862) | -129% |
| -20% | 218% | \$ 140.932.458 | 218,00% | Año 1 | (\$ 28.295.925) | |
| COSTOS OPERACIÓN | | | | | | |
| 10% | 110% | \$ 147.840.494 | 242,65% | Año 2 | (\$ 69.197.735) | 88% |
| 20% | 86% | \$ 128.833.282 | 211,46% | Año 3 | (\$ 82.831.672) | |

El switching value indica el valor de la variable crítica que hace cero el valor presente neto (VPN), es decir el punto donde el proyecto empieza a generar pérdidas para la empresa. Las siguientes gráficas muestran las proyecciones de las variables evaluadas en las sensibilidades.

Figura 28. Análisis de sensibilidad para la inversión

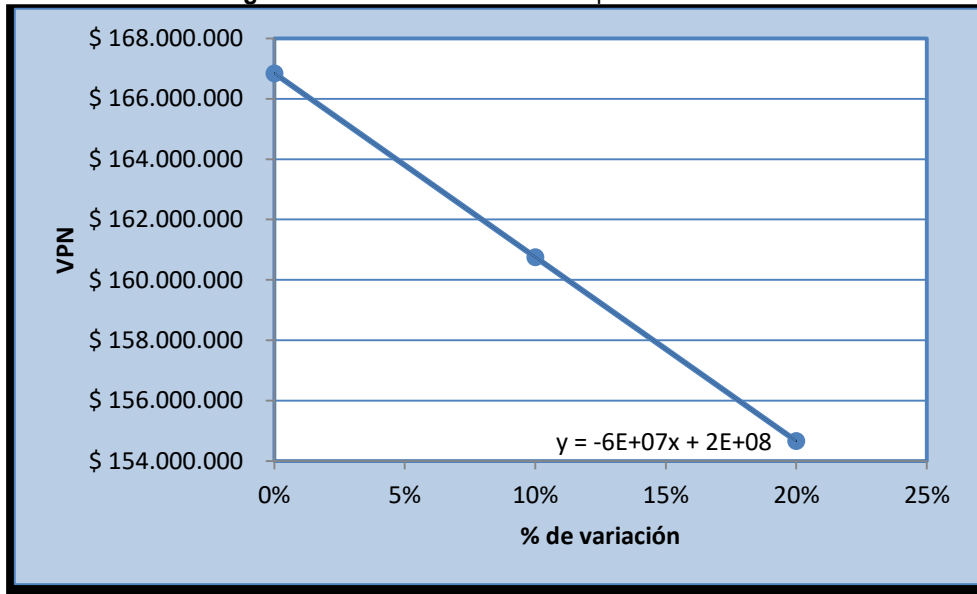


Figura 29. Análisis de sensibilidad para los ingresos de operación

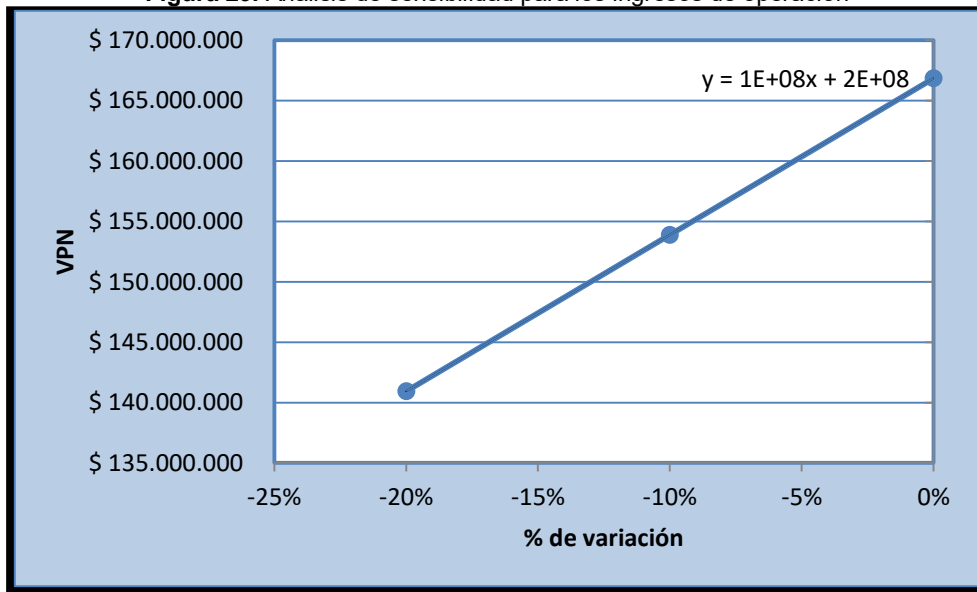
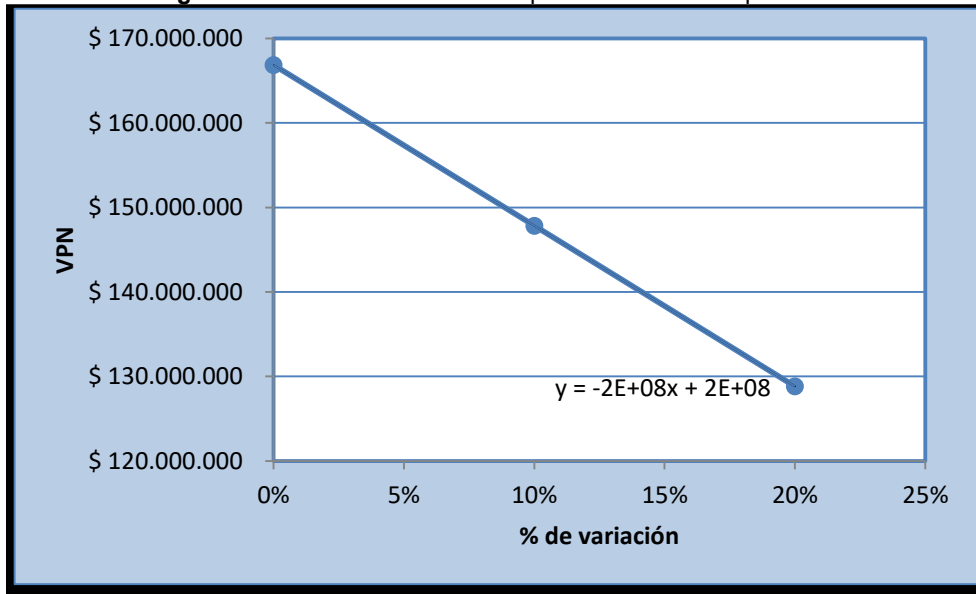


Figura 30. Análisis de sensibilidad para los costos de operación



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez efectuados los flujos de inversión para la implementación de la tecnología convencional y la no convencional y el flujo de caja del proyecto se calcularon los indicadores financieros que permiten conocer la viabilidad del proyecto, los resultados obtenidos de estos indicadores permiten afirmar que la adquisición del analizador Gas PT2 (tecnología no convencional) es recomendable, ya que se tiene un Valor Presente Neto (VPN) de COP 166.847.706, con una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 143%, un porcentaje que refleja un alto beneficio económico para la empresa, teniendo en cuenta que el WACC de ésta es de 17,55%.

El pay out en el año 1 indica que la inversión se recuperará en el primer año y el máximo endeudamiento será de COP 55.563.798. Lo que hace el proyecto atractivo para la empresa que quiere implementarlo.

Al realizar el análisis de sensibilidades se encuentra que la variable que más afecta el proyecto son los ingresos de operación, ya que si estos disminuyen en un 88%, el proyecto dejaría de ser rentable ya que el Valor Presente Neto se haría 0, por lo que sería igual implementar o no la tecnología alternativa. Los costos de operación es el segundo ítem que más afecta la viabilidad financiera del proyecto, ya que el switching value se alcanza si se disminuye un 129%. Finalmente, la inversión es la variable que menos afecta la viabilidad financiera del proyecto, ya que la tecnología alternativa requiere de una inversión mínima para su operación comparada con la tecnología convencional; lo que se ve reflejado en el switching value (274%).

Teniendo en cuenta que es poco probable tener una alta disminución en los ingresos de operación ya que la medición del poder calorífico es una actividad que debe efectuarse continuamente para realizar una correcta facturación del gas y que adicionalmente no se espera tener un aumento significativo en los costos de inversión es posible afirmar que la implementación de una tecnología no convencional para la medición de poder calorífico es viable en términos financieros para la empresa que requiera su aplicación.

7. CONCLUSIONES

- ❖ Se realizó la evaluación metrológica del analizador Gas PT2 seleccionado con el fin de validar los resultados de poder calorífico dados por éste, esta evaluación consistió en la aplicación de distintas pruebas estadísticas y permitió determinar que el analizador está conforme con los requerimientos de los parámetros evaluados (repetibilidad, reproducibilidad y linealidad).
- ❖ La evaluación de la inversión correspondiente a la implementación de la tecnología de cromatografía de gases arrojó un total de \$1.129.427.138, mientras que para la tecnología no convencional seleccionada se determinó que la inversión total es de \$326.574.800. Este flujo de inversión se determinó teniendo en cuenta un tiempo de vida útil de los equipos de cinco (5) años.
- ❖ Con los costos de inversión establecidos se determinó el flujo de caja del proyecto; lo que permitió calcular los indicadores financieros asociados a éste, obteniéndose un valor presente neto de \$166.847.706 y una tasa interna de retorno de 143%, estos datos así como el análisis de sensibilidad realizado para las variables inversión, ingresos de operación y costos de operación permitieron concluir que la implementación de la tecnología no convencional seleccionada es viable y representará un beneficio económico para la empresa que lo implemente, por lo que se recomienda la instalación de éste en los principales puntos de mezcla de gas que requieren la medición de poder calorífico.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASTM D6300-08. Standard Practice for Determination of Precision and Bias Data for Use in Test Methods for Petroleum Products and Lubricants.
- [2] ASTM D3764-09. Standard Practice for Validation of the Performance of Process Stream Analyzer Systems.
- [3] ASTM D6708-08. Standard Practice for Statistical Assessment and Improve of Expected Agreement Between Two Test Methods that Purport to Measure the Same Property of a Material.
- [4] ASTM D6299-10. Standard Practice for Applying Statistical Quality Assurance and Control Charting Techniques to Evaluate Analytical Measurement System Performance.
- [5] ISO 10723. Natural gas – Performance evaluation for on-line analytical systems.
- [6] Vergence Systems. GasPT2 User Manual Versión: 1.35. Marzo de 2012.
- [7] New Technologies for gas quality determination. Peter Schley, Manfred Jaeschke, Klaus Alfeld. Ruhrgas AG, Essen, Germany.
- [8] CUI Global GAS PT2 – Gas properties Transmitter. Brochure & Datasheet.
- [9] CLASE DE GESTION EVALUACION DE PROYECTOS. (1: 2013: Colombia). Memorias EGRE XVI Especialización En Gerencia De Recursos Energéticos. Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2013. 456 d.
- [10] CLASE DE GERENCIA FINANCIERA. (1: 2013: Colombia). Memorias EGRE XVI Especialización En Gerencia De Recursos Energéticos. Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2013. 87 P.
- [11] CLASE DE INGENIERIA ECONOMICA. (1: 2012: Colombia). Memorias EGRE XVI Especialización En Gerencia De Recursos Energéticos. Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2012. 8 P.