

## Optimización Metrológica de los Sistemas de Medición de Gas Natural, tipo transferencia de custodia.

Cusiana - Casanare - Colombia

Carlos Andrés Pérez (CarlosAndres.Perez@equion-energia.com)  
Equión Energía

Jose Augusto Fuentes (jfuentes@cdtdegas.com)  
Corporación CDT de GAS

Erik Stiv Tapias (erik.tapias@ecopetrol.com.co)  
ECOPETROL S.A.



### RESUMEN:

Una estrategia para la optimización de sistemas de medición de gas natural, fue implementada por Equión Energía, con el fin de mantener y aumentar la confiabilidad de las mediciones, reduciendo los potenciales riesgos de pérdidas ratificando el cumplimiento de las exigencias dadas en la regulación nacional y en los estándares aplicables. Para el planteamiento, diseño, desarrollo y puesta en marcha de la estrategia, Equión Energía contó con el apoyo tecnológico de la Corporación CDT de GAS. En el presente trabajo se describen: el alcance, la estructura, implementación y resultados obtenidos con la estrategia de optimización aplicada a los puntos de transferencia de custodia ubicados en la planta de tratamiento de gas natural denominada "CUSIANA".



### 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del sector gas en Colombia no se detiene; hoy diariamente se producen más de 28,35 millones de m<sup>3</sup>/d estándar (1.072 millones ft<sup>3</sup>/d estándar) [1] de gas natural, de los cuales Equión Energía es responsable de entrega de gas natural en dos puntos: la planta de tratamiento de gas natural denominada "CUSIANA" (ubicada en el departamento de Casanare), con una capacidad nominal 5,67 millones m<sup>3</sup>/d estándar (270 millones ft<sup>3</sup>/d estándar) que corresponde aproximadamente al 27% de consumo de Colombia y la Planta de producción de hidrocarburos en "FLOREÑA" con una capacidad aproximada de suministro de gas de 1,13 millones de m<sup>3</sup>/d estándar (40 millones de ft<sup>3</sup>/d estándar), que suministra gas, entre otros al municipio de Yopal, también en el departamento del Casanare.

Desde su expedición a finales de 1999, la Resolución CREG 071 de 1999 "Reglamento Único de Transporte de Gas Natural" (RUT) [2], y sus reformas CREG 054 de 2007, CREG 041 de 2008 y CREG 131 de 2009, ha sido la referencia regulatoria nacional para actividades relacionadas con la comercialización del gas natural, brindando a los Agentes de la cadena las directrices acerca de "qué" y "cómo" medir volúmenes, cómo determinar la energía asociada al gas natural, cuales deben ser los requisitos de control metrológico sobre equipos de medida, definiendo para ello los estándares técnicos aplicables, y fijando las responsabilidades y obligaciones para mantener dentro de control los sistemas de medición.



Figura 1. Sistema de Transferencia de Custodia

Correctamente interpretado por Equión Energía y considerando que las mediciones realizadas en los puntos de transferencia de custodia constituyen procesos claves, debido a que a partir de éstas: (a) se factura la cantidad de gas suministrada al Sistema Nacional de Transporte de Gas; (b) se garantiza la calidad del producto para su uso final; (c) y es prenda de garantía para el control del balance de las redes de gas, Equión Energía, contactó a la Corporación CDT de GAS, para diseñar una estrategia, que al menor costo, permitiera la optimización metrológica de los Sistemas de Medición indicados anteriormente.

El actual documento, describe la estrategia implementada y los resultados obtenidos, destacando los beneficios alcanzados, los cuales demuestran la conveniencia de implementar procesos similares.

### 2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE GAS

El gas producido en la planta CUSIANA (figura 1) es inyectado a la red nacional de transporte a través de dos gasoductos denominados CUSIANA – APIAY- USME y CUSIANA PORVENIR LA BELLEZA y cuyos sistemas de medición de volumen y calidad de gas, son descritos en la Tabla 1.

### 3. ESTRATEGIA PARA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN DE GAS

Se definió que la estrategia de optimización debería estar circunscrita a tres elementos principales a saber: **1.** Cumplir con las exigencias establecidas en el RUT; **2.** Cumplir con buenas prácticas metrológicas establecidas en las normas de referencia internacional, y **3.** Disminuir los niveles de incertidumbre de medición. Estos dos últimos, se ejecutaron analizando previamente la relación costo/beneficio.

La estrategia planteada y ejecutada para lograr la optimización tanto de los sistemas de medición de **cantidad** y de **calidad** de gas, se describe de manera gráfica en la figura 2.

#### 3.1 Etapa de Diagnostico Mediante Inspección Metrológica

Para conocer el estado metrológico de los sistemas de medición de volumen y calidad de gas se programaron y realizaron una serie de actividades en campo, denominadas

El secreto de permanecer siempre vigente, es comenzar a cada momento. *Agatha Christie, escritora británica.*

En Colombia, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS, trabaja para fortalecer la competitividad de los sectores productivos y de servicios, a través de apoyo a programas estratégicos sectoriales y/o proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+I), que impliquen el mejoramiento o desarrollo de nuevos productos, servicios, y procesos productivos u organizacionales. Esta sección destaca entidades que han desarrollado potencialidades en torno a los avances de la ciencia y tecnología, en unión con grupos de investigación de universidades, centros de desarrollo tecnológico o centros de desarrollo productivo.

ELEMENTO PRIMARIO (MEDIDOR TIPO ULTRASÓNICO)		
Tipo	Ultrasónico (tiempo de tránsito)	Ultrasónico (tiempo de tránsito)
Diámetro nominal	100 mm (4 in)	254 mm (10 in)
Numero de trayectorias acústicas	4 (8 transductores)	4 (8 transductores)
Intervalo de medición	25,5 a 814 m <sup>3</sup> /h (900 a 28750 ft <sup>3</sup> /h)	152,9 a 5080 m <sup>3</sup> /h (5400 a 179550 ft <sup>3</sup> /h)

ELEMENTO PRIMARIO (TUBOS DE MEDICIÓN)		
Cantidad	Aguas arriba : 2 Tubos y acondicionador de flujo topo placa Zanker Aguas abajo : Un tubo con conexión para termopozo	Aguas arriba : 2 Tubos y acondicionador de flujo topo placa Zanker Aguas abajo : Un tubo con conexión para termopozo
Diámetro nominal	100 mm (4 in) SCH80	254 mm (10 in) SCH80

ELEMENTO SECUNDARIO (PRESIÓN ESTÁTICA)		
Tipo	Transmisor de presión estática	Transmisor de presión estática
Alcance de medición	0 a 103 barg (0 psig a 1500 psig)	0 a 103 barg (0 psig a 1500 psig)
Ubicación toma de presión	Cuerpo del medidor	Cuerpo del medidor

ELEMENTO SECUNDARIO (TEMPERATURA DEL FLUIDO)		
Tipo	Transmisor de Temperatura con Sensor Tipo RTD Pt 100	Transmisor de Temperatura con Sensor Tipo RTD Pt 100
Alcance de medición	-20 a 55°C (-4 a 131 °F)	-20 a 55°C (-4 a 131 °F)
Ubicación toma de presión	Cuerpo del medidor	Cuerpo del medidor

ANALIZADORES PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE GAS		
Composición de gas	Cromatógrafo de gases	
Punto de Rocío de Hidrocarburos	Analizador de espejo enfriado automático	Analizador de espejo enfriado automático
Contenido de vapor de Agua	Analizador por variación de frecuencia de oscilación	Analizador por variación de frecuencia de oscilación
Contenido de H2S y Azufre total	Analizador por cinta de acetato de plomo	Analizador por espectroscopia de absorción de rayos UV

Tabla 1. Características de los Sistemas de Medición de Volumen y Calidad de Gas.

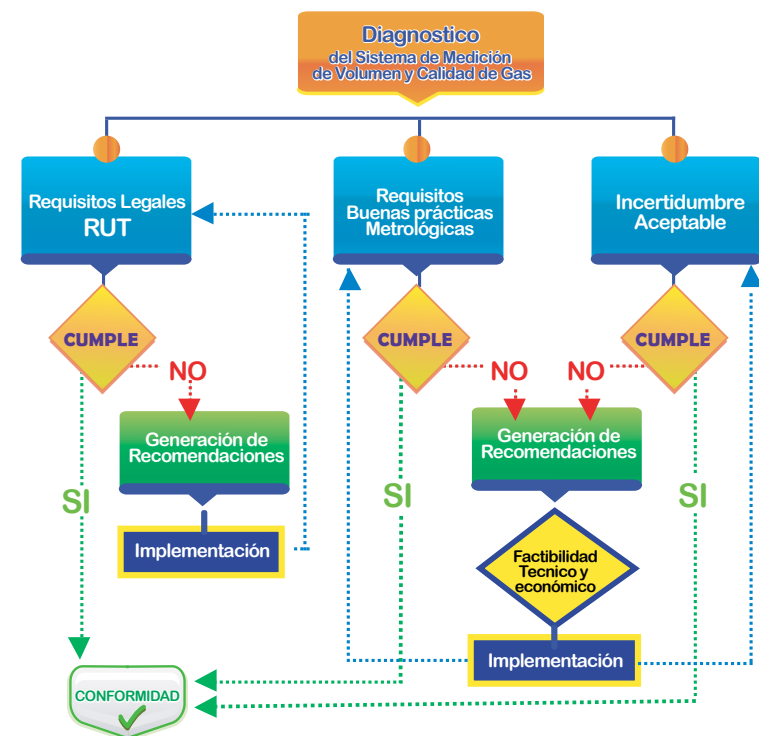


Figura 2. Estrategia para optimización de Sistemas de Medición de Gas.

“Inspección metrológica” que consiste en evaluar específicamente la conformidad del sistema de transferencia de custodia, con respecto a los “Requisitos de Medición” establecidos en la Resolución CREG No. 071 de 1999 “Reglamento Único de Transporte - RUT” y las modificaciones que la complementan.

Para garantizar la confiabilidad y armonía de los resultados, este proceso se realizó a través del Organismo de Inspección del CDT de GAS el cual ha sido estructurado siguiendo los lineamientos establecidos en la ISO/IEC 17020-1998 permitiendo identificar claramente “Conformidad o NO Conformidad” del sistema con los aspectos considerados como de **Obligatorio Cumplimiento**, según el RUT, y sus correspondientes estándares de referencia y también aquellos considerados como **Buenas Prácticas Metroológicas**, las cuales, aunque no son de obligatorio cumplimiento, si facilitan que los sistemas brinden la máxima confiabilidad en los procesos de medición.

Finalmente, y como parámetro clave para conocer el grado de confiabilidad de los sistemas de medición, se estimó y reportó el resultado del proceso de **estimación de incertidumbre asociada al resultado de volumen y energía de gas**, así como la contribución de cada uno los factores que inciden en este resultado.

Estas actividades tuvieron como alcance la evaluación de la condición de instalación, operación y desempeño metrológico de cada uno de los componentes que hacen parte del sistema de medición de gas, y se muestran en la figura 3:

### 3.2 Resultados de Diagnóstico de Sistema de Medición de Volumen (Cantidad) de Gas

La aplicación de la estrategia de optimización para el sistema de medición de volumen de gas, inició en el año 2006 con el diagnóstico inicial y los resultados condensados a continuación:

- La condición de instalación aguas arriba del medidor (2 codos de 90° de radio corto, unidos entre sí, sin separación y posicionados en planos ortogonales): Corresponde a una de las más críticas condiciones clasificadas dentro del contexto de aquellas que afectan la confiabilidad de las mediciones. Se relaciona con la formación de *swirl*<sup>1</sup>. Esta condición quedó establecida con en el auto-diagnóstico realizado con el medidor ultrasónico.
- La presencia de los errores sistemáticos en el sistema de medición de temperatura, por encima de los límites permisibles.
- La incertidumbre asociada al resultado de volumen entregado, estimada bajo las condiciones encontradas durante la actividad de inspección fue de **1,1%** relativa al volumen total a condiciones base.

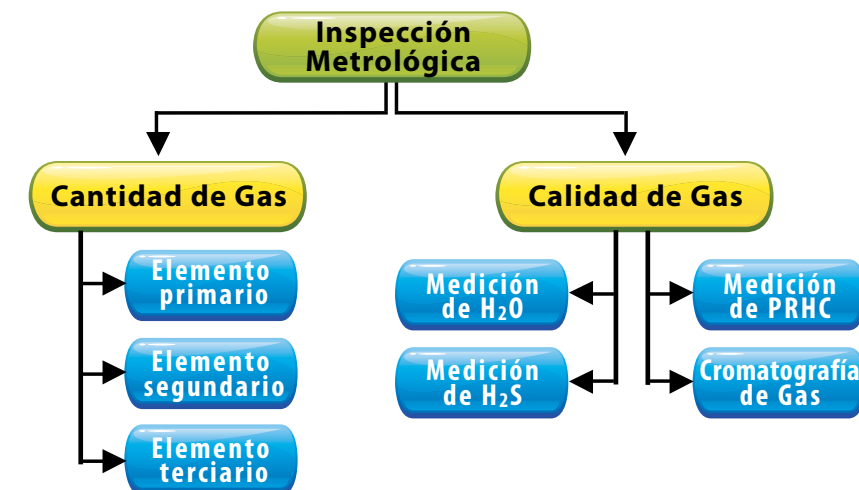


Figura 3. Componentes objeto de inspección de los Sistemas de Medición de Cantidad y Calidad de Gas.

<sup>1</sup> Tipo de patrón de flujo que se presenta común e internamente en las tuberías después de cambios bruscos de dirección (codos), donde el flujo gira de forma helicoidal y persiste por largas distancias.

En la figura 4 y en la primera columna de la tabla 2 se evidencian los principales hallazgos identificados en cada una de las inspecciones periódicas realizadas.

### 3.3 Resultados de Diagnóstico de los Sistemas de Medición de Calidad de Gas

Fue realizada en el mes de Julio de 2010. Durante esta actividad fue posible evaluar cada uno de los sistemas de medición de contaminantes del gas (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, PRHC, composición del gas), el sistema de acondicionamiento y muestreo del gas, la condición de operación, la condición de instalación, el desempeño metrológico y el programa de mantenimiento, siguiendo los requisitos establecidos en el numeral 5 y 6 del RUT y las referencias aplicables.

Los resultados del proceso se muestran en la figura 5.

Como se puede observar la mayor parte de las No Conformidades detectadas estaban relacionadas con los procesos de calibración de los analizadores utilizados para la medición de los contaminantes de gas natural y por la ausencia de métodos de confirmación metrológica.

Este proceso resultó altamente constructivo en razón al aporte, en materia de conocimiento, que inclusive permitió interactuar con los fabricantes y proveedores de los equipos. Se destaca que éstas corresponden a tecnologías emergentes y que aún son poco conocidas en nuestro país, por lo tanto no se ha estudiado suficientemente su comportamiento y el aporte que se recibe en retribución al costo de la tecnología.

### 4 IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS EN LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN

Para la implementación fue necesario trazar una estrategia que permitiera disminuir la intervención en la operación normal de la entrega de gas natural y del sistema de medición, aprovechando las paradas programadas de plantas y en lo posible la reducción de los costos de inversión.

#### 4.1 Mejoras Implementadas al Sistema de Medición de Volumen (Cantidad) de Gas.

En la tabla 2 se observan las mejoras implementadas.

HALLAZGO DETECTADO	MEJORA IMPLEMENTADA	RESULTADO DE LA MEJORA
Errores sistemáticos de los elementos secundarios, muy cerca de los límites regulatorios: 1,0%	Integración de un programa de aseguramiento metrológico que incluye programa de calibración periódica.	Elementos secundarios dentro del límites de 0,25%
Detección de swirl en el sistema de medición de 4 pulgadas, producto de condición de instalación (Ver figura 6)	Cambio de la condición de instalación aguas arriba del sistema de medición y actualización de firmware del medidor. (Ver figura 6)	Evidencia de disminución de swirl a partir de análisis de autodiagnóstico del medidor.
Radiación solar directa sobre los medidores de gas; condición que puede generar desviaciones entre las mediciones de velocidades del sonido de cada trayectoria.	Instalación de techo para protección de radiación solar directa.	Mejora en los resultados de autodiagnóstico realizados por el medidor (con presencia de flujo).
Presencia de ruido ultrasónico, evidenciado a través del autodiagnóstico del medidor, con los siguientes parámetros:	Instalación de cabezales, tanto aguas arriba como aguas abajo del sistema de medición. (Ver figura 6) Esta mejora fue diseñada por profesionales de Equión Energía.  Implementación de un programa de mantenimiento interno de los tubos de medición que permite detectar y corregir condiciones adversa como la mostrada en la figura 7.	Disminución apreciable del ruido ultrasónico, tal y como se observa en el autodiagnóstico "As left".

	Medido	Esperado
SNR	150	>500
Performa	95%	100%
Turbulen	9	—

	Medido
SNR	2300
Performa	100%
Turbulen	3,6

Tabla 2. Mejoras implementadas. S M de Volumen de Gas.

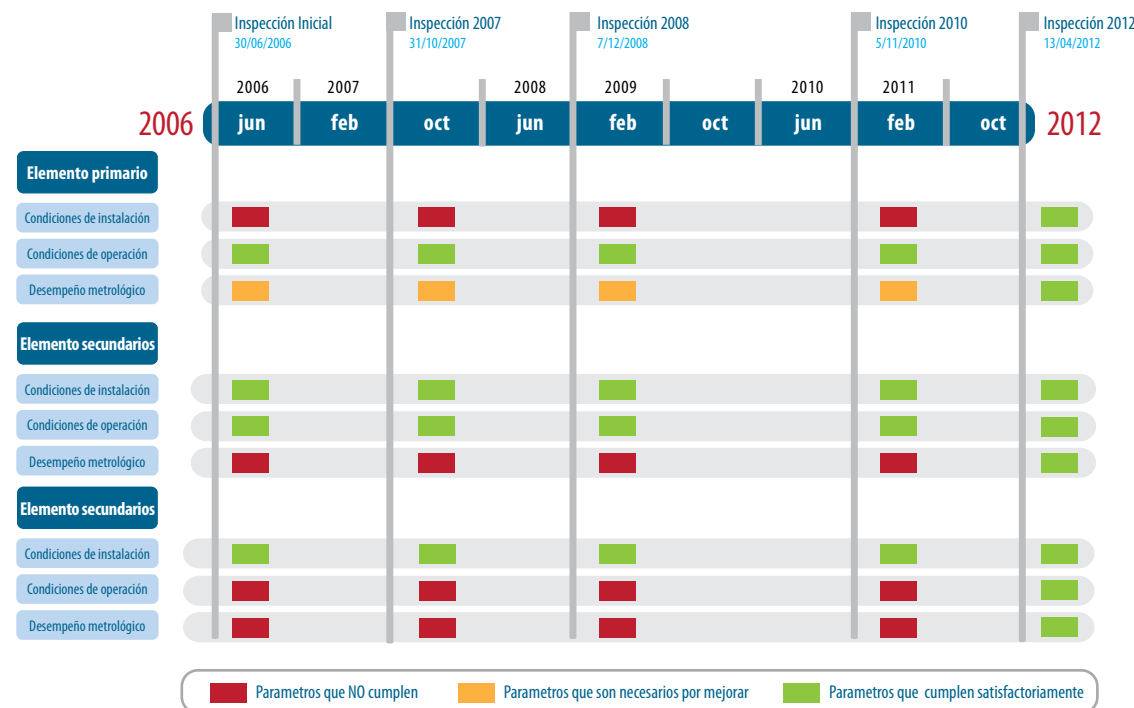


Figura 4. Línea de tiempo de las inspecciones realizadas al Sistema de Medición de Volumen de Gas

ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN											
CUSIANA - APIAY - USME											
		Estado año 2010					Estado actual 2012				
		ANALIZADOR					ANALIZADOR				
		H <sub>2</sub> O	PRHC	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	CG	H <sub>2</sub> O	PRHC	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	CG
ACOND. SISTEMA DE MUESTREO	Sonda de muestreo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Instalación de tubing apropiado para el muestreo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Sistema de filtración	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CONDICIONES ADECUADAS DE OPERACIÓN	Actualización del procedimiento de operación del analizador.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Sistema regulado para aproximar la presión de la línea a la cricondentemica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ACOND. PROCESO CALIBRACION Y VERIFICACIÓN	Instalación de MRC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Instalación del blanco	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	El analizador cuenta con todos los MRC para evaluar linealidad	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CONFIRMACIÓN METROLÓGICA	Programa de calibraciones y verificaciones - iniciales y periódicas	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Realización de pruebas de repetibilidad y reproducibilidad.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Estimación de errores e incertidumbres.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Carta de trazabilidad de la medición.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
PROGRAMA DE MANTENIMIENTO	Programa de calibración de elementos de medición secundarios.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Programa de mantenimiento para los elementos de medición secundarios y primarios.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Actualización procedimientos para verificación de fugas en el sistema de medición.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Disposición final de la cinta de acetato de plomo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figura 5. Resultados inspección 2010 realizada a los Sistemas de Medición de Calidad de Gas

#### 4.2 Mejoras Implementadas a los Sistemas de Medición de Calidad de Gas

En la tabla 3 se presentan los principales hallazgos y las mejoras implementadas.

#### 4.3 Estimación De Incertidumbre: Herramienta Clave para Decisiones de Optimización

El proceso de optimización de los sistema de medición de volumen y de cantidad de gas descritos, tuvo en cuenta la aplicación mínima de inversiones en el mejoramiento de cada sistema, de manera que se obtuvieran resultados de medición que cumplieran con los requisitos legales y buenas practicas metrológicas, así como con el nivel de incertidumbre deseado (el cual, de momento en Colombia, es definido entre las partes interesadas en el proceso de transferencia de custodia). Obviamente el nivel de incertidumbre requerido, se limitó al estado del arte de las tecnologías de medición y al costo de implementación, al mantenimiento y aseguramiento metrológico de los sistemas de medición de volumen y calidad de gas.

Así pues, el proceso de optimización inició e incluyó el análisis del presupuesto de incertidumbre actual el cual fue suministrado en el Informe de Inspección del Organismo de Inspección del CDT de GAS, de tal forma, que fuera

posible identificar aquellas fuentes, que en mayor grado, afectaran la incertidumbre del volumen de gas o energía medida por el sistema de medición.

Para reducir la incertidumbre de medición se estudiaron diversos escenarios:

- Cambio en las prácticas de aseguramiento metrológico
- Reconfiguración de componentes a nivel de software
- Cambio o actualización de componentes
- Instalación de nuevos componentes
- Cambio de condiciones de instalación u operación.

La estrategia diseñada permitió iniciar el proceso de optimización partiendo de aquellas actividades de bajo costo que generaran un impacto positivo (reducción considerable) en la incertidumbre asociada a los resultados de medición.

Finalmente, la incertidumbre evaluada (obtenida mediante la interacción de una herramienta computacional desarrollada por el CDT de GAS) fue comparada contra la incertidumbre requerida, en un proceso iterativo realizado por el usuario, en función de su experiencia, las inversiones disponibles y las limitantes de las tecnologías de medición a mejorar o implementar. (ver figura 8)

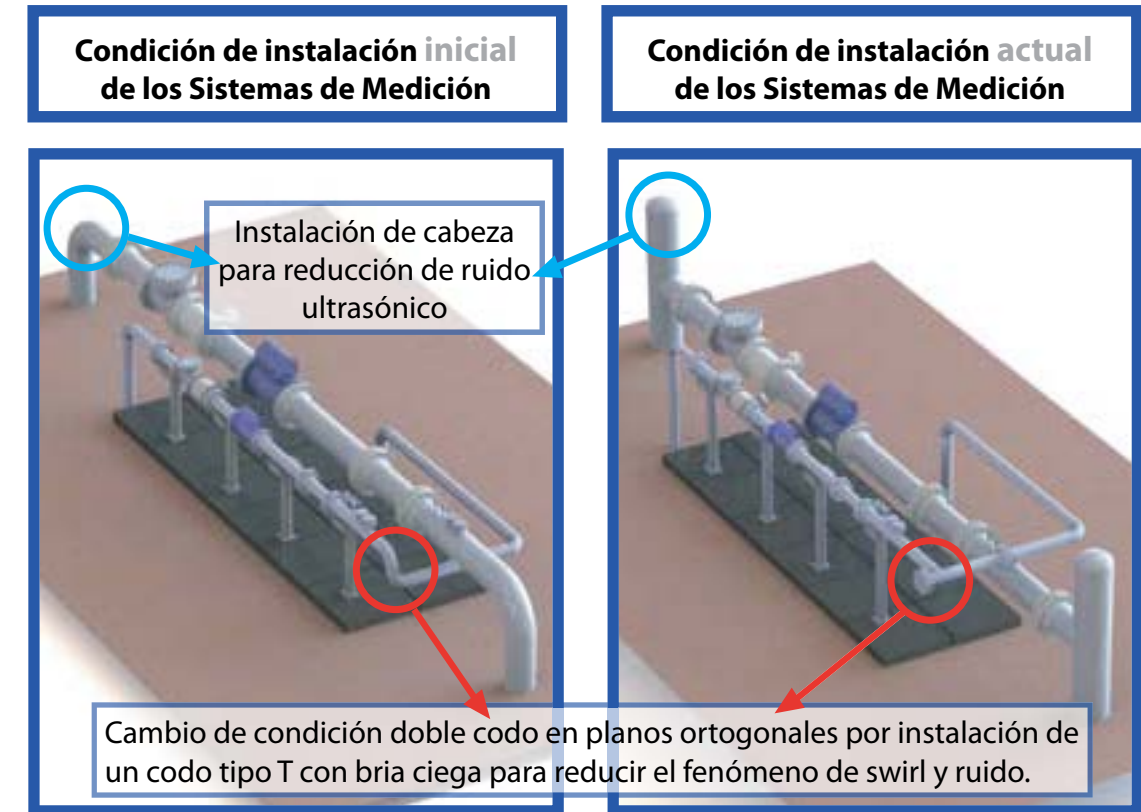


Figura 6. Mejoras en la instalación de los Sistemas de Medición de Volumen de Gas con Tecnología USM.

HALLAZGO DETECTADO	MEJORA IMPLEMENTADA	RESULTADO DE LA MEJORA
Ausencia de sondas de muestreo adecuadas, para obtener muestreo representativo del gas de línea.	Adquisición e instalación de sondas adecuadas.	Cumplimiento de los requisitos dados en la API 14.1[7]
Para el sistema de medición de contenido de H <sub>2</sub> S, no se contaba con el material adecuado del tubing (acero inox. que adsorbe el H <sub>2</sub> S) de la línea de muestreo.	Reemplazo del tubing de acero inoxidable, por tubing recubrimiento electro-pulido.	Disminución de la distorsión por absorción de H <sub>2</sub> S y mejora en el tiempo de respuesta.
Probables errores sistemáticos, dado que no era posible garantizar características metrológicas tales como linealidad y reproducibilidad, en los equipos de medición.	Adquisición de dos (2) y tres (3) gases de referencia por equipo de medición, e implementación de un programa de aseguramiento metrológico.	Mitigación de posibles errores sistemáticos durante las mediciones de calidad de gas.
Parámetros de configuración del analizador de H <sub>2</sub> S y de Punto de Rocío de Hidrocarburos, por fuera de los límites permisibles recomendado por los fabricantes.	Configuración adecuada de los parámetros por parte del fabricante del equipo.	-----

Tabla 3. Descripción de hallazgos detectados y mejoras seleccionadas para su implementación. Sistema de Medición de Calidad de Gas.



Figura 7. Evidencia y corrección de anomalías detectadas en los programas de mantenimiento del Sistema de Medición.

### 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS MEJORAS

La manera práctica para cuantificar el efecto que generaron las mejoras realizadas fue a partir del análisis de incertidumbre de los resultados, antes y después de su implementación.

En la tabla 4 se describe el análisis de incertidumbres para cada uno de los parámetros evaluados:

Cada uno de los valores de incertidumbre reportados, fueron estimados como la incertidumbre estándar combinada (siguiendo los lineamientos dados en la GUM [3] multiplicada por un factor de cobertura  $k=2$  que corresponde a confiabilidad aproximada del 95%.

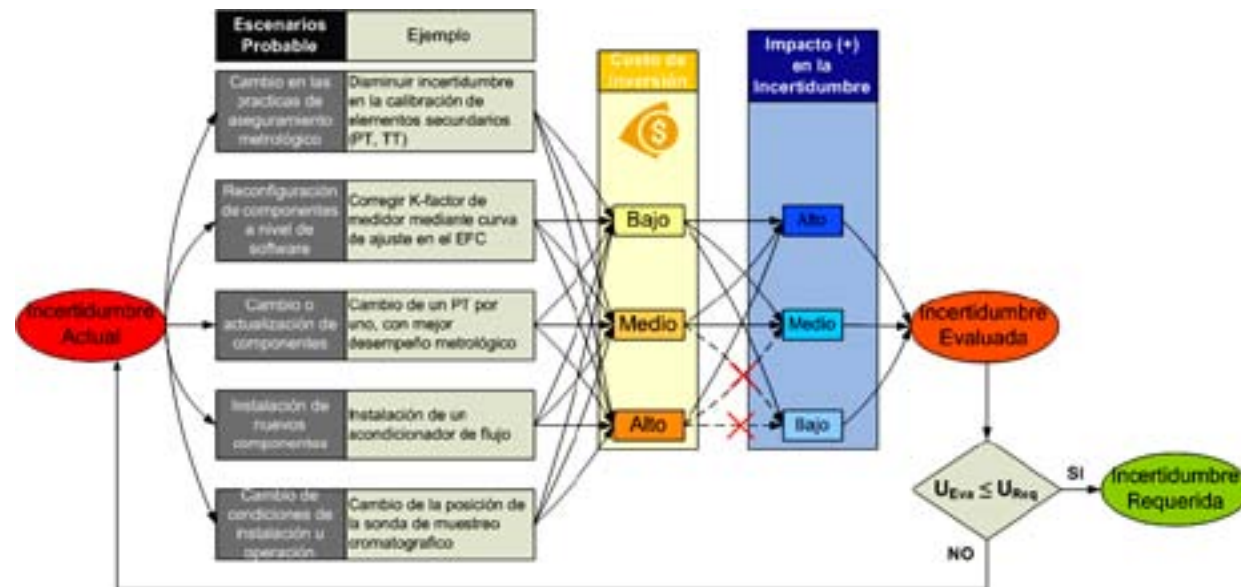
La disminución de incertidumbres producto de la estrategia de optimización implementada, principalmente en los sistemas de medición de volumen y poder calorífico del gas, han permitido establecer un ahorro potencial de 400.000 USD/año, debido a la reducción del riesgo por inadecuada medición.

### 6. CONCLUSIONES:

- Fue posible llevar a cabo, y con éxito, una estrategia para la optimización de los sistemas de medición de gas CUSIANA en conjunto Equión Energía y CDT de GAS y el apoyo de ECOPETROL S.A.
- La experiencia descrita en este documento, ha sido diseñada para actualizar tecnológicamente los sistemas de medición, pero requiere de un control permanente el cual puede ser realizado mediante programas de inspecciones periódicas y actividades de mantenimiento y calibración dentro de un programa previamente establecido.
- La incertidumbre se ha constituido en una de las herramientas más importantes para la toma de decisiones en torno a los procesos de transferencia de custodia, y por ende, para su control y su mejoramiento continuo.

### 7. REFERENCIAS

- [1]. Documento Comité Nacional de estadísticas de Producción (Ene-Oct) de 2012. CNO-GAS
- [2]. Resolución No. 071 de 1999 “Reglamento Único de Transporte de Gas Natural”, CREG.
- [3]. ISO-GUM Guide to the expression uncertainty measurement.
- [4]. ISO 5168, Measurement of fluid flow- Procedures for the evaluation of uncertainties, 2005.
- [5]. AGA 9, Measurement of gas by multi-path ultrasonic Meters, 1998.
- [6]. API 21.1 Flow Measurement Using Electronic Metering System- Electronic Gas Measurement, 1993.
- [7]. API 14.1 Collecting and handling of Natural Gas Samples for Custody Transfer, 2006.



Fuente: Quinta Jornada Técnica Internacional de Medición de Fluidos.

Figura 8. Proceso de toma de decisiones para evaluaciones de factibilidad de implementación de recomendaciones.

SISTEMA DE MEDICIÓN EVALUADO	PUNTO DE ENTREGA CUSIANA - APIAY - USME		PUNTO DE ENTREGA CUSIANA - PORVENIR - LA BELLEZA	
	Incertidumbre inicial	Incertidumbre Actual (2012)	Incertidumbre inicial	Incertidumbre Actual (2012)
VOLUMEN DE GAS	1,1%	0,84%	1,1%	0,79%
PODER CALORÍFICO	0,9%	0,50%	0,9%	0,50%
CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA	--	21 ppmv (1Lb/MPCS)	--	21 ppmv (1Lb/MPCS)
CONTENIDO DE H <sub>2</sub> S	--	1,5 ppmv	--	1,5 ppmv
PUNTO DE ROCÍO DE HC	--	2,5 °C	--	2,5 °C

Tabla 4. Incertidumbre estimada para cada uno de los Sistemas de Medición Evaluados.