

**MET&FLU**

ciencia - tecnología - innovación

Corporación CDT de GAS

**10 AÑOS**

**Aplicando Metrología**  
para Apoyar la Transformación Productiva  
**de COLOMBIA**



Corporación CDT de GAS  
Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS

# Colombia Construye y Siembra Futuro



Libertad y Orden

Departamento Administrativo de  
Ciencia, Tecnología e Innovación  
**Colciencias**

---

Republica de Colombia

## Director/

Henry Abril Blanco

## Editor/

Corporación CDT de GAS

## Comité Editorial/

Erik S. Tapias Chávez

José A. Fuentes Osorio

Luis E. García Sánchez

Jorge. A. Reyes Valdés

## Comité Científico/

PhD Kazuto Kawakita – Director  
Centro de Metrología de Fluidos  
del IPT – Brasil

PhD Dionisio Laverde – Profesor  
Universidad Industrial de  
Santander – Colombia

## Diseño/

Leonardo Manzano Paredes

## Editorial/4

### Tecnología/6

Mediciones para la Evaluación de la Eficiencia de  
Combustión en Equipos Generadores de Vapor \_\_\_\_\_ P.7

Aplicación de Análisis de Incertidumbre a la  
Optimización de Balances en Redes de Flujo de Fluidos \_\_\_\_\_ P.14

### Innovación/22

EuroLoop. Facilidades Tecnológicas para la  
Investigación y Desarrollo en el Área de la Medición  
de Flujo y Volumen de Gas y Petróleo \_\_\_\_\_ P.23

### Ciencia/28

Efectos de la Deposición de Contaminantes en Placas  
de Orificio \_\_\_\_\_ P.29

Modelado y Simulación de Medidores Ultrasónicos de  
Tiempo de Transito: Desarrollos y Avances \_\_\_\_\_ P.37

### Casos de Éxito/44

Transportadora de Gas Internacional S.A. E.S.P. (TGI),  
aprovechando las ventajas que ofrece la CT + i \_\_\_\_\_ P.45

### Metrología a su Alcance/50

Corporación CDT de GAS, 10 años \_\_\_\_\_ P.51

### Conocimientos Fluidos/60

Respuestas Tecnológicas a Preguntas Puntuales de los  
Lectores \_\_\_\_\_ P.61

Los artículos publicados son de exclusiva  
responsabilidad de sus autores.

## EL VERDADERO PROGRESO ES EL QUE PONE LA TECNOLOGÍA AL ALCANCE DE TODOS.

---

Que interesante es llegar, con una institución fortalecida, a sus primeros 10 años de existencia, pero más aún, que satisfactorio es celebrarlo con la emisión de esta 1ª edición de **"MET&FLU (Metrología & Fluidos): Ciencia, Tecnología e Innovación"**, un nuevo medio de difusión, que facilita la transferencia del conocimiento hacia los diversos sectores de nuestra sociedad... tenemos la certeza de estar contribuyendo enormemente -con el apoyo de las instituciones que conforman nuestro Consejo Directivo, de COLCIENCIAS, y de diversas instituciones del sector empresarial- a que nuestra patria tenga nuevas oportunidades y se continúe convirtiendo en "Líder Tecnológico Regional" al hacer uso de las ventajas que aporta el acceso a la ciencia y a la tecnología.

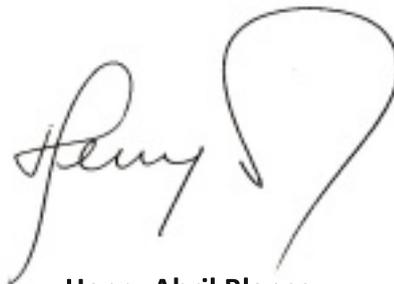
**MET&FLU: "Ciencia, Tecnología e Innovación"** es una revista especializada en la Aplicación de la Metrología de los Fluidos como una **herramienta extraordinaria** para optimizar los diversos procesos involucrados en el desarrollo productivo de cualquier país, logrando que éstos, a medida que evolucionan, se conviertan en totalmente competitivos dentro de sus entornos de influencia, por ello, semestralmente nuestros selectos amigos, encontrarán al menos seis (6) secciones especialmente diseñadas para lectores de todas las índoles, comenzando por quienes hacen su ingreso al conocimiento de esta temática especializada, pasando por los conocedores asiduos y llegando hasta lograr transmitir conocimientos científicos alrededor del tema mencionado. Este nuevo medio de difusión ha sido ideado, diseñado y configurado en su totalidad, por el equipo de profesionales de nuestra corporación, quienes han recibido el apoyo de expertos nacionales y extranjeros; la edición digital, igualmente podrá ser consultada en nuestra WEB: [www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

Por su parte, y a medida que los colombianos vayamos interiorizando las ventajas que nos ofrece la metrología aplicada, (mediante la comprensión e interiorización del contenido de esta revista y otros elementos adicionales), resultará preponderante, clave y estratégico que se gesten "alianzas tecnológicas", entre la academia y los centros de desarrollo tecnológico para atender a la industria, como se referencia en el «Triángulo de Sábado» con

el Estado como diseñador y ejecutor de las políticas, para que cada quien aporte lo que puede y debe aportar: ciencia y mucho más desde la academia, capacidad de convertir ciencia en tecnología desde los CDT y necesidades y recursos económicos desde el sector empresarial; solo de esta manera, creo que la investigación realizada actualmente en Colombia, generará innovación y desarrollo tecnológico con alto impacto sobre el producto interno bruto nacional, sobre la calidad de vida de la población y sobre la reducción y el mayor control en el impacto ambiental. Abramos las compuertas de cada institución, para que podamos avanzar al ritmo que el país y nuestra sociedad nos lo exige. **¡El instante es AHORA... adelante!!!**

Comencemos a disfrutar de este interesante documento, que fue diseñado con un objetivo principal: dotar a nuestras instituciones (Academia, Empresa y Estado) de herramientas alineadas con el avance de la ciencia, la tecnología y la innovación, en temas relacionados con la aplicación de la metrología de manera que, nuestros procesos, productos y servicios colombianos, cada día sean más competitivos.

Una invitación especial a los investigadores, académicos y profesionales de la industria para que aporten sus conocimientos, a través de este medio, de manera que puedan ser difundidos en el entorno nacional.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Henry', followed by a large, stylized flourish that resembles a question mark or a large '9'.

**Henry Abril Blanco**  
Director: Corporación CDT de GAS

# Tecnología

Todas las teorías son legítimas y ninguna tiene importancia. Lo que importa es lo que se hace con ellas. Jorge Luis Borges (1899-1986) Escritor argentino

Conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico, orientados a producir bienes y servicios de utilidad económica, social, y política.

En esta sección, cada semestre, expertos nacionales y/o extranjeros, ofrecerán artículos técnicos que buscan sensibilizar a nuestros lectores, acercándolos con conocimiento, a la aplicación de la metrología en las diferentes actividades de nuestra sociedad.



**Escribanos**

Si desea publicar un artículo,  
escriba al correo  
[revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)  
o visite nuestra página web  
[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

# MEDICIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN EN EQUIPOS GENERADORES DE VAPOR

Luis E. García Sánchez (lgarcia@cdtdegas.com)

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

## Resumen:

El presente artículo aborda las generalidades de las mediciones en torno a la evaluación de la eficiencia de combustión en generadores de vapor, centrandó su temática en el modelo matemático utilizado por los analizadores de combustión de uso común. Este es el primero de una serie de artículos en los cuales se presentarán y analizarán en detalle, las mediciones y el aseguramiento metrológico en la evaluación de la eficiencia de combustión, con el objeto de brindar herramientas que permitan validar los resultados de estas mediciones y mejorar el control sobre los procesos de combustión.



# 1 NOMENCLATURA

c	%	Eficiencia de combustión
c-SIE	%	Eficiencia de Combustión Modelo Siegert
T <sub>g</sub>	°C	Temperatura de los gases de combustión
T <sub>amb</sub>	°C	Temperatura ambiente
PC <sub>Comb</sub>	kJ	Poder calorífico del combustible
L <sub>stack</sub>	kJ	Pérdidas en chimenea
L <sub>fg,dry</sub>	kJ	Pérdida por humos secos
L <sub>fg,vapor</sub>	kJ	Pérdidas en el vapor de agua, por oxidación de hidrogeno (H), agua en el combustible (f) y humedad del aire ambiente (a)
L <sub>ug</sub>	kJ	Pérdida por combustión incompleta
L <sub>cm</sub>	kJ	Pérdida por combustible no quemado
n <sub>i</sub>	mol	Numero de moles de un componente
ΔH <sub>i</sub>	kJ/mol	Cambio en la entalpia de un componente.
%O <sub>2</sub>	%	Fracción volumétrica de O <sub>2</sub> en los gases de combustión
%CO	%	Fracción Volumétrica de CO en los gases de combustión
%CO <sub>2</sub>	%	Fracción volumétrica de CO <sub>2</sub> en los gases de combustión
%CO <sub>2-max</sub>	%	Máxima fracción volumétrica de CO <sub>2</sub> que puede generarse en la combustión de un combustible particular
HxCy		Fracción volumétrica del combustible no quemado, en los gases de combustión
q <sup>o</sup> <sub>CO</sub>	kJ/mol	Poder Calorífico del CO a condiciones de referencia.
q <sup>o</sup> <sub>C<sub>HY</sub></sub>	kJ/mol	Poder Calorífico del combustible no quemado a condiciones de referencia
c	%	Fracción másica del carbono en el combustible
h	%	Fracción másica de hidrogeno en el combustible
HHV	kJ/Nm <sup>3</sup>	Poder calorífico superior del combustible a condiciones de referencia
LHV	kJ/Nm <sup>3</sup>	Poder calorífico superior del combustible a condiciones de referencia

## 2 INTRODUCCIÓN

La eficiencia de combustión constituye uno de los principales indicadores para el monitoreo y control de equipos generadores de vapor. Permite establecer los requerimientos de mantenimiento y ajuste, así como evaluar oportunidades de ahorro energético. Debido a su importancia para la industria a nivel mundial y nacional, abunda la literatura relacionada con la evaluación de la eficiencia de combustión, los parámetros de control y los ajustes necesarios para mantener la eficiencia dentro de límites especificados, acorde con la tecnología y condición del equipo, o los establecidos por las regulaciones aplicables. Sin embargo, las referencias técnicas se limitan, en gran medida, a las acciones que se deben tomar para la mejora de la eficiencia de combustión, sin abordar las mediciones que intervienen y constituyen la base para la toma de decisiones en relación a la mejora del proceso de combustión.

<sup>1</sup> El agua presente en el gas natural (<97 mg/m<sup>3</sup> a condiciones de referencia) bajo condiciones RUT puede considerarse despreciable, para efecto de la evaluación de la eficiencia de combustión.

El interés general de la industria se halla centrado en la evaluación de la eficiencia global de los equipos de combustión, sin embargo el proceso de evaluación puede resultar costoso y complejo si no se cuenta con la instrumentación, procedimientos y personal competente, para la ejecución de esta labor. Por esta razón la eficiencia de combustión, que considera solo las pérdidas de energía en la chimenea, es uno de los métodos más difundidos para monitorear la eficiencia de los generadores de vapor.

El presente artículo inicia con la definición de eficiencia de combustión, describe los modelos comunes para su evaluación, identificando las pérdidas consideradas en cada uno de estos modelos. Luego presenta consideraciones claves para lograr una evaluación de la eficiencia de combustión representativa y reproducible. Finalmente brinda una introducción a las mediciones requeridas para la evaluación de la eficiencia de combustión y concluye con la importancia de la eficiencia de combustión y los parámetros necesarios para lograr una evaluación técnicamente válida.

## 3 LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

La eficiencia de combustión en un equipo generador de vapor es un parámetro clave que debe ser garantizado por el fabricante del equipo, debido al alto costo de los combustibles [2]. Su evaluación se realiza a partir de mediciones, y permite conocer que tan bien, el equipo está convirtiendo un combustible específico en energía útil (liberada por el combustible), durante un periodo de operación [3].

La eficiencia de combustión se calcula a partir de las pérdidas de chimenea y la energía que libera el combustible utilizado en el equipo generador de vapor [4], sin considerar las pérdidas por radiación, convección o conducción, como se describe en la Ec. 1. Una eficiencia de combustión completa (100%) permitiría extraer toda la energía disponible en el combustible, sin embargo la combustión con 100% de eficiencia no sucede en la realidad, debido a las pérdidas en la chimenea y pérdidas en las superficies de transferencia de calor, que limitan la eficiencia a valores típicos de 10% a 95% [5].

<sup>2</sup> La eficiencia de combustión no debe ser confundida con la eficiencia del equipo.

### 3.1 MÉTODO DE ENTRADAS Y SALIDAS

En la evaluación de la eficiencia térmica de equipos generadores de vapor se utiliza principalmente el método de entradas y salidas (o Indirecto) descrito en la Norma ASME PTC 4.1 [6].

Este método detalla las pérdidas a través de los gases de chimenea (Ec. 2), permitiendo la evaluación de la eficiencia de combustión. Estas pérdidas pueden ser cuantificadas a partir de la composición del combustible y de los gases de combustión, y del cambio de entalpías (Ec. 3).

$$\eta_c = 100 - \frac{L_{Stack}}{PC_{Comb}} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

$$L_{Stack} = L_{fg,dry} + L_{fg,vapor} + L_{ug} + L_{cm} \quad \text{Ec. 2}$$

$$L_{Stack} = \sum n_i \cdot \Delta h_i + n_w^H \cdot \Delta h_w + n_w^f \cdot \Delta h_w + n_w^o \cdot \Delta h_w + n_{CO} \cdot q_{CO}^o + n_{C_dHy} \cdot q_{C_dHy}^o \quad \text{Ec. 3}$$

Bajo condiciones normales, las pérdidas principales se encuentran asociadas al calor sensible de los gases de chimenea [7]. Pero, dependiendo del ajuste del sistema de combustión, la calidad del combustible y las condiciones ambientales, podrían ser relevantes las pérdidas por vapor de agua, combustión incompleta y combustible no quemado. Para ilustrar las pérdidas consideradas en la evaluación de la eficiencia de combustión se presenta en la Figura 1, un diagrama

Sankey [4], en el cual se pueden apreciar los niveles de pérdidas que típicamente se obtienen en generadores de vapor [7].

La evaluación de cada una de las pérdidas en los gases de combustión, requiere de múltiples mediciones. Tales mediciones pueden ser complejas si no se cuenta con la instrumentación e información de referencia válida para las propiedades físico-químicas de los compuestos que intervienen en la reacción. Por esta razón se utilizan comúnmente modelos de evaluación menos complejos que facilitan la evaluación de la eficiencia de combustión con una mayor periodicidad.

### 3.2 MODELO SIEGERT

Entre los modelos más comunes para la evaluación de la eficiencia de combustión se encuentra el modelo Empírico de Siegert (Ec. 4), el cual es utilizado por la mayoría de los analizadores comerciales que determinan automáticamente la eficiencia de combustión. Este modelo, asume que las únicas pérdidas que afectan la eficiencia de combustión, son las debidas a los gases secos, sin considerar pérdidas por combustión incompleta, calor latente del vapor de agua, y combustible no quemado. Por tal razón debe considerarse que la eficiencia evaluada utilizando el modelo Siegert no es exacta, pero provee un indicador que permite evaluar la tendencia en la eficiencia de combustión. [5].



Figura 1. Diagrama Sankey Típico para un Generador de Vapor

$$\eta_{c-SIE} = 100 - k_1 \cdot \left( \frac{T_g - T_{amb}}{\%CO_2} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

En analizadores de combustión actuales, que permiten la medición directa de %CO<sub>2</sub> y %CO, es posible evaluar las pérdidas debidas a la combustión incompleta, combustible no quemado y vapor de agua (Ec. 5). De esta forma se logra una evaluación equivalente a la eficiencia de combustión mediante el método indirecto descrito por ASME PTC 4.1.

$$\eta_{c-SIE} = 100 - k_1 \cdot \left( \frac{T_g - T_{amb}}{\%CO_2} \right) + k_2 \cdot (1185 + T_g - 2 \cdot T_{amb}) + k_3 \cdot \frac{\%CO + H_2C_x}{\%CO_2 + \%CO + H_2C_x} \quad \text{Ec. 5}$$

De la EC. 5 se deduce que la eficiencia puede ser evaluada si se mide la temperatura del ambiente, la temperatura de los gases de combustión y el contenido de CO<sub>2</sub>, CO y CxHy. Sin embargo, se hace necesario conocer la composición, el poder calorífico y el contenido de agua del combustible, para establecer los coeficientes k1, k2 y k3 [8]. En la Tabla 1 se listan estos coeficientes para algunos combustibles comunes, en base seca [9].

Combustible	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub> (seco)	k <sub>3</sub>
Fuel oil Liviano	0,5	0,00491	54
Fuel oil pesado	0,51	0,00489	54
Gas Natural	0,39	0,00887	40
Propano	0,41	0,00683	48
Carbón	0,62	0,003	63
Butano	0,43	0,00662	48

Tabla 1. Coeficientes Siegert para combustibles comunes

La aplicación del modelo Siegert, supone las particularidades descritas a continuación, las cuales afectan el resultado de la eficiencia de combustión y deben ser consideradas a la hora de ejecutar un análisis, y se desean obtener resultados con bajos niveles de incertidumbre:

- La fracción %CO<sub>2</sub> puede ser una medición directa o una estimación indirecta a partir de la medición de oxígeno (en base seca) y la composición del combustible, que determina el %CO<sub>2-max</sub>, como se expresa en la Ec.6.

$$\%CO_2 = \frac{CO_{2-max} \cdot (20,9 - \%O_2)}{20,9} \quad \text{Ec. 6}$$

En caso de estimarse el %CO<sub>2</sub>, se debe conocer la composición del combustible, debido a que el % CO<sub>2-max</sub> (Ec. 7), se obtiene de la reacción estequiométrica de C y H

$$\%CO_{2-max} = \frac{c}{c + \frac{79,1}{20,9} \cdot \left( c + \frac{h}{4} \right)} \% \quad \text{Ec. 7}$$

- La temperatura del aire a la entrada, se asume igual a la temperatura ambiente y ésta corresponde generalmente a la indicada por el analizador de combustión. Esta asunción, no siempre es correcta, especialmente en generadores de vapor que poseen precalentadores que elevan la temperatura del aire de entrada, por lo que se hace necesario muestrear los gases de combustión, aguas abajo del precalentador y no a la salida del generador de vapor [3].
- Las pérdidas por vapor de agua (Lfg, vapor), por combustión incompleta y por combustible no quemado, solo pueden ser evaluadas si se cuenta con sensores para CO y CxHy, y el poder calorífico del combustible.

Para evidenciar las relaciones existentes entre los modelos matemáticos, y las mediciones requeridas en la evaluación de la eficiencia de combustión, se presenta en la Figura 3, el desglose del modelo simplificado de Siegert. En los dos modelos ASME y Siegert se consideran las mismas pérdidas y su diferencia radica en la base en que se realizan las estimaciones (molar, másica o volumétrica) y el tipo de pérdidas incluidas, según la disponibilidad de mediciones directas o indirectas, como en el caso del CO<sub>2</sub>. En conclusión, sin considerar aspectos metrológicos, y con base en la disponibilidad de sensores que permitan evaluar las pérdidas, se deduce la exactitud a obtener, como se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Mediciones y Exactitud<sup>3</sup> en la eficiencia de Combustión

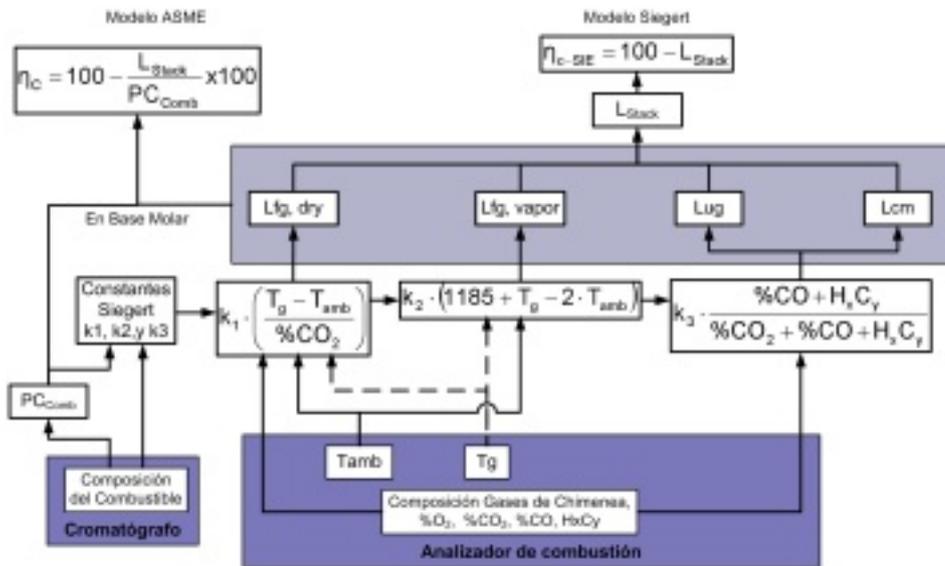


Figura 2. Evaluación de la Eficiencia de combustión

de  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  y la temperatura de chimenea se encuentran entre los límites especificados por el fabricante del generador de vapor o equipos de similar tecnología y condiciones de operación.

## 4.2 Análisis Húmedo versus Análisis Seco

La diferencia radica en que durante el análisis en base seca, la mayor parte del agua es extraída de la muestra de gas, mediante una trampa<sup>4</sup>, lo cual reduce el volumen de la muestra e incrementa la fracción

volumétrica de los componentes. Los analizadores de combustión electrónicos generalmente emiten resultados en base seca y de requerirse en base húmeda; se debe conocer el contenido de agua del combustible y configurarlo en el equipo.

## 4 CONSIDERACIONES EN LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

Los modelos presentados hasta el momento, se basan en aproximaciones que permiten evaluar la eficiencia de combustión instantánea, por lo que se deben considerar los siguientes parámetros o referencias al realizar ensayos de combustión, para que los resultados obtenidos sean reproducibles y permitan establecer una tendencia real en la eficiencia de combustión.

### 4.1 Condición operativa (Nivel de carga)

La eficiencia de combustión depende enormemente de la carga a la cual opera el equipo, en otras palabras de la relación de potencia actual a la potencia máxima de operación del equipo, debido a que el sistema de combustión no posee la capacidad de balancear exactamente las relaciones de aire/combustible, extraer el calor y operar a la misma eficiencia sobre todo su ciclo de carga. Por tal motivo al evaluar la eficiencia de combustión se debe establecer y declarar la condición operativa bajo la cual se ejecutó la evaluación.

Las mediciones deben ser realizadas bajo condiciones de repetibilidad, cuando el equipo generador de vapor se encuentre en estado estable, lo cual se evidencia al estabilizarse las mediciones de composición en los gases de combustión y la temperatura de los gases en la chimenea. Es de resaltar que la eficiencia evaluada bajo estas condiciones es válida si las concentraciones

### 4.3 Composición y estabilidad del Combustible

Al evaluar la eficiencia de combustión con el modelo indirecto (ASME) o el Siegert, se requiere la composición del combustible, a partir de la cual se obtiene el poder calorífico. Por esta razón los analizadores de combustión poseen pre-configurados algunos combustibles comunes (Ver Tabla 1), que generalmente no corresponden al combustible utilizado en el equipo generador de vapor. Por lo cual es necesario configurar el combustible utilizado, a partir de un análisis cromatográfico como en el caso de los gases naturales y GLP's, o directamente el poder calorífico obtenido de un calorímetro en el caso de combustibles líquidos y sólidos.

De otra parte, se deben realizar los análisis de combustión, garantizando la estabilidad en la composición del combustible. Esto es especialmente necesario en generadores de vapor que no poseen un lazo de control que retroalimente el sistema para balancear la relación aire combustible, o en aquellos equipos que operan con gas natural, cuya composición horaria varía debido a las mezclas de gases que se presentan en los sistemas de transporte.

<sup>3</sup> Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando [10]

<sup>4</sup> Para disminuir la incertidumbre de los resultados se debe cuantificar el agua residual a partir de la presión parcial del vapor a la temperatura de la trampa o enfriador utilizado. Aunque para efectos prácticos, la humedad residual es despreciable.

#### 4.4 Poder calorífico del combustible

El poder calorífico generalmente aplicado en la evaluación de la eficiencia de combustión, cuando se utilizan analizadores electrónicos, depende del modelo y casa fabricante, debido a que los equipos Europeos son preconfigurados con el LHV de los combustibles comunes, mientras los equipos americanos son preconfigurados con el HHV [8],[11]. En la realidad el calor latente del vapor de agua formado durante la combustión, no es recuperable, por lo que es aconsejable evaluar la eficiencia de combustión preconfigurando o utilizando el LHV del combustible correspondiente.

#### 4.5 Referencias

Al realizar la evaluación de la eficiencia de combustión entran en juego mediciones directas, datos y propiedades de referencia, modelos matemáticos y el fenómeno objeto de medición, los cuales influyen directamente el resultado del mensurando eficiencia. Por tal razón es necesario identificar, aplicar y expresar las condiciones bajo las cuales se realice la evaluación, de forma tal, que se facilite la comparación de resultados y se brinde validez a los mismos [12].

### 5 MEDICIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

Dejando de lado el requerimiento de la composición del combustible, y su poder calorífico, los cuales serán tema de un próximo artículo, se presenta a continuación una introducción a los analizadores de combustión.

#### 5.1 Analizadores de Combustión

Los analizadores de combustión actuales, cuentan con todas las ventajas que brinda la electrónica,

permitiendo el tratamiento de señales para tecnologías de sensores como las celdas electroquímicas, infrarrojas y catalíticas. Existen analizadores portátiles y estacionarios, pero estos últimos, utilizados en monitoreo continuo, son menos comunes en nuestro medio. Principalmente se hallan en grandes instalaciones, donde las regulaciones ambientales como la Resolución 909 de 2008 expedida por el MAVD, exigen el monitoreo continuo de los gases de combustión.

Los analizadores de combustión portátiles son los equipos más utilizados, por la industria en general, para la evaluación y monitoreo de la eficiencia de combustión de los generadores de vapor. Estos consisten de una sonda de muestreo, con filtro de material sinterizado que retiene el material particulado, a través de la cual se extrae la muestra de gases de combustión. Un cordón o manguera conduce el gas hasta una trampa, en la cual se retiene el vapor de agua, para luego iniciar el paso del gas por los diversos sensores del analizador. En algunos casos, se realiza retención selectiva, mediante filtros químicos, para evitar errores debido a la sensibilidad cruzada de los sensores, como el que se presenta en los sensores de CO que registran lecturas ante la presencia de H<sub>2</sub>S, especialmente en análisis de combustión de equipos que operan con carbón.

Como todo instrumento de medición, el analizador de combustión debe ser seleccionado y utilizado considerando el alcance de medición del proceso, los errores máximos permisibles y el nivel de incertidumbre esperado. Para ilustrar acerca de las características de estos instrumentos se listan en la Tabla 2, los sensores comunes que poseen y los alcances de las concentraciones de gases encontradas en equipos generadores de vapor operados a gas natural.

Adicional a los sensores listados en Tabla 2, los analizadores pueden poseer sensores para la medición de NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, que son incluidos en los equipos, debido a motivaciones relacionadas con el control del impacto ambiental, más que por su aporte a las pérdidas por chimenea. Esto debido a que sus concentraciones en los gases de chimenea son despreciables si se comparan con el N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub>.

Principio	Gas	Und Típica - GN	Concentración	Alcance medición	Emax
Electroquímico	CO	ppm	0 100	2000	10
Infrarrojo	CO <sub>2</sub>	%	10 12	25	0,3
Electroquímico	O <sub>2</sub>	%	2 4	25	0,3
Catalítico (Pellister)	CxHy	ppm	0 100	5000	10

Tabla 2. Sensores comunes en los analizadores de combustión

## 5.2 Medición de temperatura

La temperatura es otra de las variables que junto a la composición de los gases de combustión, intervienen en la eficiencia. Esta magnitud se mide mediante una termocupla, generalmente tipo K, ubicada junto con la sonda de muestreo del analizador de combustión. Las termocuplas Tipo K permiten realizar mediciones de hasta 700 °C, pero la limitación real la impone la sonda de muestreo y el cordón o manguera de conducción de gases de combustión. Bajo condiciones normales de operación un generador de vapor presenta temperaturas de chimenea que no superan los 300 °C.

Para las mediciones de temperatura ambiente, los analizadores poseen internamente una termocupla tipo J, o K, u otro sensor como RTD's o termistor.

## 6 CONCLUSIONES

- La evaluación de la eficiencia de combustión puede ser utilizada como una herramienta de monitoreo y control, pero se deben considerar las limitaciones que poseen los modelos empíricos utilizados para estimarla y la innumerable cantidad de variables y condiciones de influencia que pueden limitar la reproducibilidad de los resultados obtenidos. En este sentido es válido aplicar, mejorar y tomar decisiones con base en la tendencia (incremento o disminución) de cambio de la eficiencia de combustión, si esta es evaluada bajo condiciones controladas.
- Es necesario estudiar en detalle la configuración disponible y los modelos matemáticos utilizados por los analizadores de combustión para evaluar la eficiencia, ajustando la configuración con la información más detallada y válida disponible.
- Se deben utilizar y declarar condiciones de referencia estandarizadas para cada una de las variables o propiedades que intervienen en la evaluación de la eficiencia de combustión. Para lo cual es recomendable tomar como referencias bases de datos de propiedades termodinámicas actualizadas como las provistas por la NASA [13] o CODATA [14].

## 7 REFERENCIAS

- [1] Reglamento Único de Transporte de Gas Natural- (RUT) RESOLUCIÓN N° 071 DE DICIEMBRE 03 DE 1999 y las RESOLUCIONES N° 054 DE JUNIO 21 DE 2007 y N° 041 DE ABRIL 23 DE 2008 Por la cuales se modifica y complementa el RUT.
- [2] Corporación CDT de GAS. Principios De Combustión – Curso de Conversión De Equipos Industriales y Uso con Gas Natural. Bucaramanga 2003.

- [3] Donald R. Wulfinhoff. Energy Efficiency Manual 1. Test boiler efficiency on a continuing basis. 1999.
- [4] Baukal, Charles E. Jr. Industrial burners handbook. CRC PRESS. USA 2003. ISBN 0-8493-1386-4
- [5] Fowler Simon. Principles and Basics of Flue Gas Analysis. Madur electronics. 2004.
- [6] Fired Steam Generators”, Performance Test Code 4: 2008, ASME, New York, NY; the U.S. standard since first released in 1998.
- [7] Eoff, David. Understanding Boiler Heat Losses. ASHRAE Journal. December 2008.
- [8] Institute for Prospective Technological Studies, Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. EUROPEAN COMISION, June 2008
- [9] Instruction Manual. LANCOM Series II Portable Flue Gas Analyser. Land Combustion instrument. 2001.
- [10] BIPM – JCGM. Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). 1ª Edición en español, 2008.
- [11] TSI Incorporated. Combustion Analysis Basics. An Overview of Measurements, Methods and Calculations Used in Combustion Analysis, 2004 USA.
- [12] Lang, Fred D. P.E. ERRORS IN BOILER EFFICIENCY STANDARDS. Proceedings of the 2009 ASME Power Conference Albuquerque, New Mexico, July 21-23, 2009
- [13] McBride, Bonnie J. Zehe Michael J. and Gordon, Sanford. Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species. Glenn Research Center, NASA 2002.
- [14] <http://www.codata.org/resources/databases/index.html>
- [15] Kosanovic, Beka. System Operation and Improvements – Case Study Center for Energy Efficiency and Renewable Energy. EEUU 2003.
- [16] MAVD. Protocolo Para El Control Y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas. Versión 1.0 No Aprobada. Julio de 2008.
- [17] Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente. Eficiencia Energética en la Generación y Distribución del Vapor. UPME COLCIENCIAS 2007.
- [18] Australian Greenhouse Office .Department of the Environment and Heritage. Generator Efficiency Standards. December 2006.
- [19] Moir, Bill. Industrial Steam Efficiency for Manufacturing Facilities. Steam Engineering Inc. 2006 USA.
- [20] CIBO Energy Efficiency Handbook Council Of Industrial Boiler Owners (CIBO) 2002.
- [21] Gas Research Institute Method GRI-96/0008.. Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters Using Portable Analyzers. 1997.
- [22] Francis Wildy. Fired Heater Optimization. Ametek Process Instruments. Pittsburgh, EEUU. 2006.
- [23] Baukal, Charles E. Jr. The John Zink Combustion Handbook. CRC PRESS. USA 2003.
- [24] API Publication 535, Burners for Fired Heaters in General Refinery Services, first edition, July, 1995
- [25] <http://www.bacharachtraining.com>
- [26] [www.habmigern2003.info](http://www.habmigern2003.info)

# APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE A LA OPTIMIZACIÓN DE BALANCES EN REDES DE FLUJO DE FLUIDOS

Juan Manuel Ortiz Afanador \* (juanmanuel.ortiz@tgi.com.co)

John Fredy Velosa Chacón \*\* (john.velosa@tgi.com.co)

Transportadora de Gas Internacional – TGI S.A. ESP

## Resumen:

Este artículo describe la metodología para mejoras en el balance de la red de transporte de gas natural de TGI (Transportadora de Gas Internacional). El abordaje se basa en la aplicación del análisis de incertidumbre a dos niveles. Un primer nivel “micro-escala”, definido por el presupuesto de incertidumbre de los sistemas de medición de flujo, y un segundo nivel “macro-escala”, relacionado con la incertidumbre asociada al resultado del balance para toda la red. De esta manera, se aplica un proceso cíclico para simular los efectos de las diferentes acciones de mejora, tanto sobre la incertidumbre original de los sistemas de medición como sobre la incertidumbre asociada al balance. El proceso finaliza cuando para una acción de mejora dada no se observa un cambio significativo en la incertidumbre asociada. Con la aplicación de esta metodología ha sido posible programar un plan de inversiones óptimas, orientado a obtener mejores balances en un corto plazo.

*Este artículo fue presentado en el 7th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM), realizado entre el 12 y el 14 de agosto en la ciudad de Anchorage (Alaska - USA). Este simposio es organizado por el North American Fluid Flow Measurement Council y en su desarrollo se presentan trabajos sobre una amplia variedad de tópicos de ciencia y tecnología asociados con la medición de flujo de fluidos.*

\*Especialista de Medición de TGI S.A. ESP. Ingeniero Mecánico. Especialista en Ingeniería del Gas Natural.

\*\*Profesional de Medición de TGI S.A. ESP. Ingeniero Mecánico.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la operación de redes de petróleo y gas es necesario ejecutar periódicamente cálculos de balance de masa y energía. Estos cálculos son usados para establecer la correspondencia entre el total de fluido ingresado a la red y el total de fluido entregado por la red. Los cálculos se ejecutan con base en las mediciones obtenidas a partir de los sistemas de medición de flujo, los cuales usualmente cuentan con una aprobación para su uso en procesos de transferencia de custodia.

Desde un punto de vista ideal, en un mundo libre de errores e incertidumbre, sin fugas: los balances deberían ser perfectos; la cantidad asociada a las entradas sería exactamente la misma para un período de tiempo definido. Sin embargo, e infortunadamente, en el mundo real los resultados del balance son diferentes de cero. Aún con el más estricto control, es claro que detrás de cualquier medición hay un trasfondo probabilístico y que se generarán errores aleatorios que oscilarán en torno a la referencia. Esto significa que a veces será posible observar estados de balance con pérdidas y a veces con ganancias, pero el efecto podría asociarse a la aleatoriedad del proceso.

Por otra parte, una de las componentes claves en la búsqueda de los balances “perfectos” es la complejidad de la red. Éste es un término difícil de definir ya que es una interrelación dada por múltiples componentes, como por ejemplo:

- La cantidad de los sistemas de medición y el tipo de tecnologías de medición
- La cantidad de flujos de entrada y de salida
- Las propiedades y la composición

de los flujos de entrada

- La cantidad de mezclas de gas (formadas por la conjunción de dos o más corrientes)
- La longitud de la red y la definición del volumen de control
- Los cálculos de inventario de gas acumulado en las tuberías y las condiciones de balance (estacionario - transitorio)
- Un apropiado diseño y construcción de la red, incluyendo sus sistemas de medición e instrumentación
- La cantidad y la calidad de la información usada como materia prima para los cálculos de balance
- Los procedimientos para el mantenimiento y la operación de la red
- El período de tiempo fijado para el balance
- La gestión para el control de pérdidas, fugas y hurtos
- El conocimiento, las certificaciones, los entrenamientos y la cualificación del personal
- El control de los errores de medición y la disponibilidad de trazabilidad
- Los sistemas de información, software, comunicaciones y SCADA
- Los aspectos legales y contractuales

En la industria del petróleo y el gas es común ignorar la incertidumbre en las mediciones; algunas veces se margina, posiblemente porque hay una carencia de conocimiento acerca de la utilidad de la incertidumbre aplicada a propósitos prácticos. Generalmente, cuando el resultado de una medición se expresa, su incertidumbre no se reporta como información complementaria al mismo. Sin embargo, este parámetro es absolutamente necesario para evaluar la calidad de las mediciones. Por otra parte, es aún menos común expresar la incertidumbre asociada al

resultado del balance; existe una confianza ciega que envuelve al resultado obtenido: la incertidumbre y la confiabilidad nunca se tienen en cuenta; pareciera como si la incertidumbre no existiera para propósitos de los balances.

En el presente artículo se formula una propuesta de metodología para la optimización de balances en redes de flujo de fluidos. La metodología opera bajo un modelo cíclico, iniciando con la estimación de la incertidumbre en los sistemas de medición de flujo que operan en la red, como parámetro de referencia para la determinación de la calidad de la información usada en los cálculos del balance. Posteriormente, la incertidumbre de cada sistema es usada para caracterizar la incertidumbre del balance. De esta forma se establece una condición inicial de incertidumbre (línea base original), la cual es usada para planear acciones de mejora de carácter estratégico, centradas en los sistemas de medición más relevantes para el balance, así como en los componentes con las mayores incertidumbres y específicamente en su impacto esperado sobre la incertidumbre del balance.

La metodología está siendo aplicada actualmente en la Transportadora de Gas Internacional (TGI S.A. ESP), brindando resultados satisfactorios en los balances y eficiencia en las inversiones, orientándose a alcanzar sus metas como una compañía de clase mundial.

Aunque el desarrollo presentado fue proyectado sobre una red de gas natural, los autores consideran que la metodología es aplicable a otras redes de fluidos, como por ejemplo en el sector del petróleo y la petroquímica, el agua, los alimentos, etc.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA RED

Las principales fuentes de abastecimiento de gas para TGI están localizadas en la zona centro-oriental (Cusiana) y en la costa norte de Colombia (Guajira), las actividades de la compañía se orientan al suministro de gas al interior del país, entregando gas en las principales ciudades (incluyendo Bogotá), así como a la mayor refinería colombiana, algunas plantas de generación eléctrica y varias industrias. En el año 2008 TGI transportó aproximadamente el 49% del consumo total de gas en Colombia<sup>1</sup>, un país con una producción total de gas de aproximadamente 21,5 millones de metros cúbicos por día (760 MMSCFD).

En la Tabla 1 se presenta un breve resumen de las características de la

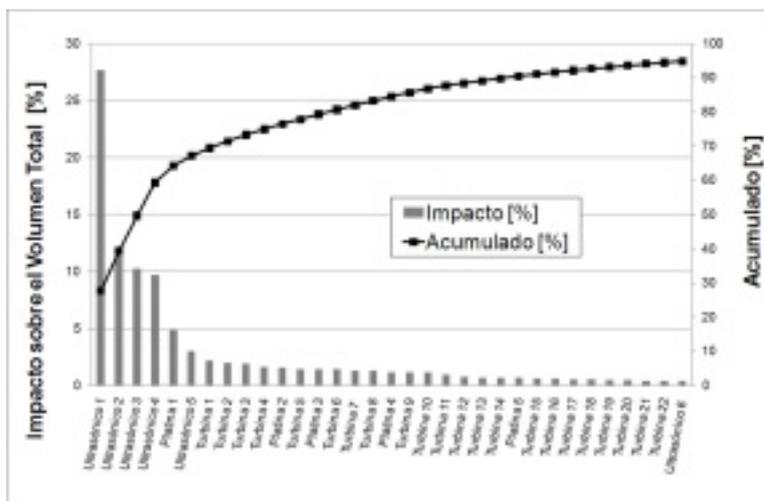


Figura 1. Análisis de Pareto (Condiciones normales de operación)

red de TGI. Esta información es útil para fijar un punto de referencia acerca de la red, considerada como el objeto de estudio para la aplicación de la metodología de optimización de balances.

La red de transporte de gas descrita en la Tabla anterior fue analizada estadísticamente. El objetivo

principal era obtener una descripción cuantitativa del impacto de cada sistema de medición de flujo sobre el volumen total transportado, tanto al nivel de las entradas de gas como de las salidas.

Para desarrollar lo anterior, se recolectaron los datos asociados a las entradas y las salidas de gas, tal y como se registraron en los sistemas de medición de flujo, para un período anual. Con esta información, se generaron dos estadísticas, la primera se asocia a las condiciones comunes de operación y la segunda a las condiciones operacionales extremas, por ejemplo como consecuencia de una alta demanda de gas, generalmente asociada al despacho de las plantas de generación eléctrica, o a incrementos en los consumos de gas por parte de clientes industriales.

Como resultado, los sistemas de medición fueron clasificados, generándose categorías en función de su impacto sobre el volumen total transportado en la red. También se desarrolló un análisis de Pareto (Figura 1); el principal objetivo de este trabajo fue definir las proporciones entre los sistemas de medición de alto impacto y aquellos

Aspecto	Valor
Volumen diario transportado (promedio)	10,5 x 106 m <sup>3</sup> /día (372 MMSCFD)
Volumen máximo transportado	12,5 x 106 m <sup>3</sup> /día (441 MMSCFD)
Capacidad adicional bajo construcción	7,1 x 106 m <sup>3</sup> /día (250 MMSCFD)
Longitud de tuberías principales (Diámetros entre 300 mm (12") y 550 mm (22"))	2749 km (1708 mi)
Longitud de tuberías auxiliares (Diámetros menores a 300 mm (12"))	953 km (592 mi)
Total de puntos de entrada de gas	9
Total de puntos de salida de gas	239
Total de puntos de mezcla (unión de dos o más corrientes diferentes)	5
Estaciones de compresión	6
Estaciones de compresión en construcción	6
Potencia total de compresión instalada	34,3 MW (46035 hp)
Potencia adicional bajo construcción (Fase 1)	57 MW (76445 hp)
Potencia adicional bajo construcción (Fase 2)	19,9 MW (26750 hp)

Tabla 1. Características de la red de TGI

<sup>1</sup>La segunda compañía transportó el 31%.  
Fuente: Superintendencia de Servicios Públicos

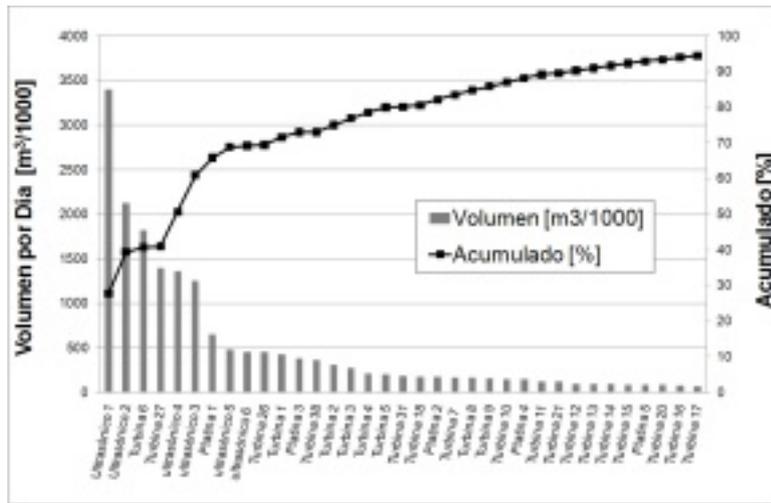


Figura 2. Análisis de impacto (Condiciones de operación extremas)

de impacto medio y bajo. Desde un punto de vista práctico, se definió una cobertura equivalente al 95% del volumen total transportado como un punto de referencia para establecer la división.

Para el caso específico de las condiciones operacionales extremas, se desarrolló un análisis adicional, considerando el efecto de aquellos sistemas con una baja frecuencia de operación pero con una alta demanda de gas natural. En la Figura 2 puede observarse el reordenamiento de los sistemas de medición (eje "x") con respecto al Pareto ilustrado en la Figura 1. Así mismo, en las Figuras 1 y 2, puede observarse el tipo de tecnología de medición instalada.

La conclusión de este trabajo previo, fue la identificación de un reducido número de sistemas (33 en el estudio de Pareto -condiciones normales de operación- y 35 en el análisis de impacto -condiciones operacionales extremas-), los cuales registran la mayor proporción de gas transportado (95%). Esta situación ofrece un importante punto de partida para el establecimiento de prioridades y la proyección de planes de acciones de mejora.

### 3. NIVEL MICRO-ESCALA (Incertidumbre de los sistemas de medición)

Después de la consolidación de la descripción de la red, el siguiente paso fue llevar a cabo inspecciones sobre los sistemas de medición de flujo de alto impacto, considerando los siguientes dos principios:

- Debe evaluarse el cumplimiento de estándares técnicos, así como los aspectos técnicos incluidos en los contratos y en la regulación.
- Debe evaluarse la incertidumbre de medición asociada a cada sistema de medición, usando la metodología de la GUM [1] y obteniéndose un

presupuesto de incertidumbre detallado para cada sistema.

Considerando el bajo número de sistemas de entrada, se tomó la decisión de inspeccionar todos los 9 sistemas (100%). Con respecto a los sistemas de salida, se tomó la decisión de inspeccionar los 35 sistemas que representan el 95% de cobertura, obtenidos a través de los dos análisis estadísticos mencionados.

TGI suscribió un convenio con la Corporación CDT de GAS (institución colombiana de I+D, especializada en metrología de flujo y tecnologías del gas natural) para las inspecciones de los sistemas de medición. El CDT de GAS ejecutó las inspecciones a través de su Organismo de Inspección, el cual está acreditado bajo los lineamientos de la norma ISO/IEC 17020. El convenio tenía el enfoque e incluía las actividades necesarias para lograr coherencia con los dos principios mencionados anteriormente.

Esta etapa se denomina micro-escala porque su objetivo principal se centraba en el análisis de los sistemas de medición como unidades particulares, sin considerar su relación con el balance de gas.

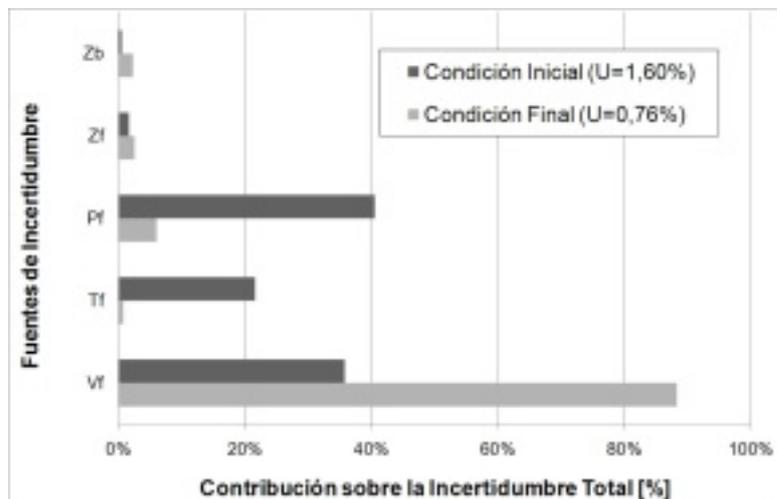


Figura 3. Presupuesto de incertidumbre para un sistema de medición

Para llevar a cabo las estimaciones de incertidumbre, la Corporación CDT de GAS diseñó una herramienta sistematizada, basada en MS-Excel [2]. Esta aplicación (denominada STO-FLOW) permitió obtener estimaciones de incertidumbre de acuerdo con la metodología de la GUM, usando una base de conocimiento normalizada y predefinida, suministrando un medio efectivo y ágil para el procesamiento de la información recolectada durante las inspecciones. Un presupuesto de incertidumbre típico para un sistema de medición se presenta en la Figura 3, sobre la misma gráfica se puede observar la condición inicial (en el momento de la inspección) y la condición final (después de las mejoras).

Los informes de inspección contenían una completa descripción del estado de los sistemas de medición de flujo a un altísimo detalle, incluyendo el desempeño metrológico de cada elemento (primarios, secundarios, terciarios) y los siguientes aspectos:

- Características metrológicas de los elementos de medición
- Trazabilidad que soporta las mediciones
- Procedimientos de operación y mantenimiento
- Aspectos de instalación
- Estabilidad en la mediciones

Una vez adquirido el conocimiento relativo a los errores y problemas de medición, era posible establecer un plan preliminar de mejoras. Cada sistema se analizaba bajo un procedimiento paso a paso. La incertidumbre inicial era el punto de partida. Después, se simulaba el efecto de cada acción de mejora individual mediante el software STO-FLOW de la Corporación CDT de GAS, iniciando con el componente de mayor incertidumbre dentro del

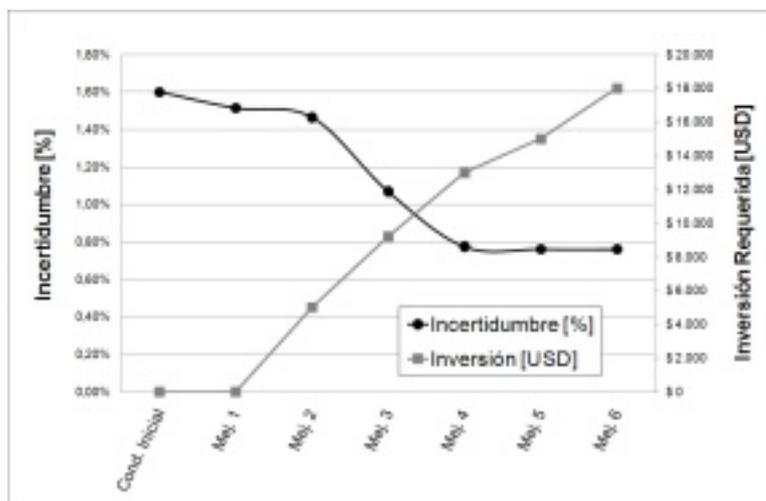


Figura 4. Análisis costo-beneficio para un sistema de medición

presupuesto. Tanto los efectos sobre el sistema de medición, como las inversiones requeridas se evaluaron a cada paso, con el propósito de desarrollar una relación costo-beneficio. Este análisis se muestra en la Figura 4 (para el mismo sistema mostrado en la Figura 3).

Vale la pena aclarar que aquellos sistemas de medición que no fueron inspeccionados de manera directa, fueron analizados y clasificados por medio de atributos comunes. Del estudio se determinó que lo más apropiado era crear categorías de acuerdo con su participación o

impacto dentro del balance. Las incertidumbres típicas de medición que se asignaron a estos sistemas se encontraban entre 2% y 5%, de acuerdo con el conocimiento que se tenía de los mismos (tecnología, obsolescencia, detalles de su operación, estabilidad en las calibraciones, etc.). Esta estrategia era necesaria para poder completar la información que posteriormente se requeriría para la siguiente etapa de la metodología, relacionada con la estimación de incertidumbre para el balance de la red. Los resultados de la clasificación por categorías se presentan en la Tabla 2.

Categoría	Impacto sobre el balance (Imp)	Cantidad de sistemas de medición de flujo
1	$Imp \geq 5\%$	4
2	$0,5\% \leq Imp < 5\%$	24
3	$0,05\% \leq Imp < 0,5\%$	28
4	$Imp \leq 0,05\%$	183

Tabla 2. Clasificación de sistemas de medición de flujo de acuerdo con su impacto sobre el balance

#### 4. NIVEL MACRO-ESCALA (Incertidumbre del balance)

En su último libro “El andar del borracho. Cómo el Azar gobierna nuestras vidas” [3], el físico Leonard Mlodinow escribió:

“Ésta es una de las contradicciones de la vida: aunque las medidas siempre lleven incertidumbre, la incertidumbre en la medida raramente se discute cuando se citan las medidas.”

Esta cita es la realidad, no solo en nuestras vidas, como lo afirma Mlodinow, sino en la industria. Para la metodología descrita en este artículo, si la incertidumbre no se estima y expresa para una sola de las mediciones, no sería posible estimar la incertidumbre asociada al cálculo del balance.

La regulación colombiana aplicable a transporte de gas natural [4], establece que si el desbalance excede el valor de 1% (positivo exclusivamente), las pérdidas por encima del 1% deben ser asumidas por la empresa de transporte, pero si el desbalance está por debajo de 1% (pero únicamente hasta 0%), las pérdidas deben ser asumidas por los remitentes, a través de una distribución proporcional de las mismas.

De esta manera, podría afirmarse que la regulación anteriormente descrita posee dos problemas:

- El control de errores de medición, exigido por la misma regulación, establece un error máximo permisible de  $\pm 1\%$  para cada instrumento de medición asociado al sistema de transferencia de custodia. De otra parte, la misma regulación establece que el error combinado (sin citar la metodología para su cálculo) debe ser a su vez inferior a  $\pm 1\%$ . Como se puede

observar, no se tiene en cuenta el impacto de cada magnitud o su grado de contribución dentro de la incertidumbre combinada de todo el sistema, en contraste con lo establecido en OIML R140 [5]. Así mismo, se pretende controlar el balance en 1% con mediciones de  $\pm 1\%$ .

*“Ésta es una de las contradicciones de la vida: aunque las medidas siempre lleven incertidumbre, la incertidumbre en la medida raramente se discute cuando se citan las medidas.”*

- El control de los desbalances se realiza sobre un intervalo de 0 a 1%, no se considera la posibilidad de obtener valores negativos en los balances, no se declara (como es común) mediante un intervalo simétrico en torno a cero, con lo cual se ignora la naturaleza aleatoria de las mediciones sobre las cuales se calcula el balance.

No hay discusiones acerca del impacto positivo que tienen los balances con resultados cercanos a cero sobre los clientes y sobre el transportador. La satisfacción de los clientes se incrementa en la medida en que éstos paguen menos pérdidas; por otra parte, un transportador con un control efectivo de sus balances obtiene excelentes indicadores de sus operaciones y evita riesgos económicos.

Una de las preguntas más reiterativas en las industrias que operan redes de flujo de fluidos y que desarrollan cálculos de balance, al momento de trazar planes de acción para su control es: ¿Cuánto

mejorará el balance después de las acciones y/o inversiones propuestas? Inevitablemente, la respuesta a esta pregunta se esconde en la incertidumbre de las mediciones, y precisamente la incertidumbre es una de las mayores debilidades en la industria.

De acuerdo con lo planteado, el interés de expandir el concepto de incertidumbre a partir de sistemas individuales hacia la red de gasoductos era una prerrogativa del presente estudio. Era necesario lograr alcanzar un panorama global e integral de la red. Para tal efecto, las incertidumbres asociadas a los sistemas individuales se cargaron dentro de un modelo matemático para el balance, al cual se le aplicó a su vez la metodología dada en la GUM para obtener la incertidumbre asociada al resultado del balance.

Inicialmente, los resultados obtenidos fueron preocupantes. El intervalo de incertidumbre para el balance era de  $\pm 1,17\%$ , es decir, por encima del límite del 1%. En este punto, se decidió llevar a cabo una simulación de Monte Carlo [6], [7] para confirmar los resultados obtenidos mediante la GUM, así como para llevar a cabo un análisis más ágil de la influencia de aspectos tales como el efecto de las diferencias en el inventario de las tuberías (efecto de acumulación). Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, encontrándose una buena concordancia entre los dos métodos.

La incertidumbre obtenida representó la incertidumbre típica asociada a los resultados del balance. Se le asignó el término “línea base de incertidumbre”, una línea de partida usada como referencia para la evaluación de la conveniencia de las mejoras, como se verá a continuación.

## 5. PLANEACIÓN DE MEJORAS

El conocimiento es clave para tomar decisiones acertadas. El grado de incertidumbre de medición identificado presentaba la necesidad de ejecutar acciones correctivas sobre los sistemas de medición con el propósito de incrementar la confiabilidad en los resultados de medición. Era claro que todas las acciones de mejora que se desarrollaran sobre los sistemas de medición de flujo tendrían un impacto positivo sobre los resultados del balance, sin embargo, había una duda relacionada con el punto de inflexión, es decir, con la determinación del momento en el cual las inversiones podrían continuar pero no tendrían un

impacto visible sobre la incertidumbre del balance. La duda fue resuelta mediante la ejecución de múltiples simulaciones, aprovechando los modelos creados

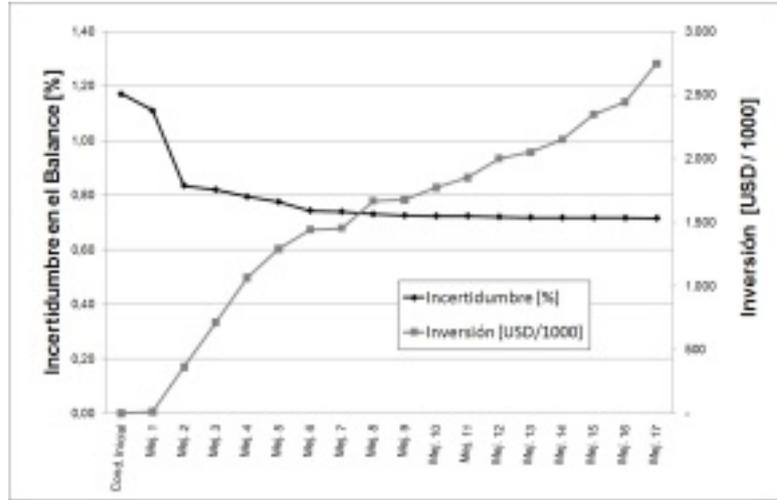


Figura 6. Análisis costo-beneficio para el balance

para la incertidumbre del balance de la red, así como los datos obtenidos en las inspecciones de los sistemas de medición de alto impacto, sus incertidumbres particulares y las potenciales mejoras a las que podrían someterse, incluidos sus costos. Se definió un proceso de evaluación de tipo cíclico, como se presenta en la Figura 5.

En el momento en que se aprecia un comportamiento asintótico en la evolución de la incertidumbre del balance, partiendo de la línea base definida, el proceso finaliza. En el modelo creado, aquellas inversiones sin un reflejo inmediato y significativo sobre la incertidumbre del balance representaban inversiones riesgosas.

Si las inversiones continúan más allá de la convergencia, los efectos solamente podrían verse luego de muchas mejoras consecutivas. Esto podría interpretarse como si al converger se agotaran las acciones con efectos inmediatos sobre la incertidumbre del balance y las acciones que quedaron pendientes fueran refinamientos adicionales que no le aportarán mucho al control del balance, aún cuando las mismas mejoren la incertidumbre del sistema de medición en particular.



Figura 5. Diagrama de flujo correspondiente a la metodología

En la Figura 6 se muestra el comportamiento obtenido para la evolución en la incertidumbre del balance, considerando las mejoras e inversiones, aplicadas de manera progresiva sobre los sistemas de medición. Las mejoras y las inversiones parten del equilibrio obtenido del análisis costo-beneficio realizado para cada sistema de medición en particular.

En la misma figura, puede observarse el establecimiento de una asíntota en un valor de incertidumbre asociada al balance de 0,7%, habiendo partido del valor de incertidumbre de la línea base de 1,17%. Vale la pena aclarar que cada mejora de la gráfica representa un sistema de medición optimizado al nivel dado por el equilibrio costo-beneficio individual. Así mismo, puede observarse que el equilibrio natural costo-beneficio se logra con la implementación de las mejoras en el 6° sistema, a partir del cual se alcanza la asíntota de incertidumbre. En términos prácticos, este punto se estableció como parámetro de control de la aplicación de la metodología expuesta.

## 6. PLANES FUTUROS

Actualmente TGI está evaluando la posibilidad de implementar técnicas de reconciliación de datos y detección de errores para la ejecución de sus balances. En dicho proyecto TGI espera aprovechar la

redundancia en las mediciones de flujo que posee en sus estaciones de compresión, con el propósito de tener una mejor resolución en sus balances.

## 7. CONCLUSIONES

"La optimización de balances en redes de fluidos es un trabajo complejo que involucra varias disciplinas, su integración dentro de un plan coherente es una tarea difícil. En el presente trabajo, se llevó a cabo una integración por medio de la aplicación sistemática de: inspecciones, estimaciones de incertidumbre para sistemas individuales y la proyección de sus efectos sobre el balance de la red mediante la aplicación del análisis de incertidumbre a los balances."

partir de la línea base de incertidumbre se proyectaron hasta alcanzar un comportamiento asíntótico, de forma paralela se consideró el equilibrio costo-beneficio derivado de las inversiones necesarias para disminuir la incertidumbre. Los dos aspectos permitieron trazar el plan óptimo de acciones-inversiones, así como la definición de una incertidumbre objetivo para el balance.

- La optimización de balances en redes de fluidos es un trabajo complejo que involucra varias disciplinas, su integración dentro de un plan coherente es una tarea difícil. En el presente trabajo, se llevó a cabo una integración por medio de la aplicación sistemática de: inspecciones, estimaciones de incertidumbre para sistemas individuales y la proyección de sus efectos sobre el balance de la red mediante la aplicación del análisis de incertidumbre a los balances.

- La metodología presentada es de gran utilidad para propósitos de planeamiento. Con su aplicación fue posible identificar y trazar un camino seguro y confiable para ejecutar optimizaciones metrológicas que redunden en una mejora de los balances. Las mejoras proyectadas a

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a todos sus compañeros de la Gerencia de Infraestructura por su valioso apoyo en la implementación del Plan de Aseguramiento Metrológico de TGI.

## Referencias

- [1] JCGM 100:2008 "GUM 1995 with minor corrections - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement" First edition September 2008.
- [2] Luis E. García S., Jose A. Fuentes O., John F. Velosa C. "A Statistical Tool to Support the Optimisation of Measurement Systems" Corporación CDT de GAS. 26th International North Sea Flow Measurement Workshop, St. Andrews, Scotland, 2008.
- [3] Leonard Mlodinow. "The Drunkard's Walk", Random House Inc. 2008.
- [4] Resolución CREG No. 071 de 1999 "Reglamento Único de Transporte de Gas Natural - RUT". Comisión de Regulación de Energía y Gas. Colombia. 1999.
- [5] OIML R 140 "Measuring systems for gaseous fuel", International Organization of Legal Metrology. 2007.
- [6] JCGM 101:2008 "Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method" First edition 2008.
- [7] Martin Basil, Andrew W. Jamieson "Uncertainty of Complex Systems by Monte Carlo Simulation", FLOW Ltd - Shell UK Exploration and Production - 16th North Sea Flow Measurement Workshop, Gleneagles, Scotland, 1998.
- [8] Nico Keyaerts, Leonardo Meeus, William D'haeseleer "Natural Gas Balancing: Appropriate Framework and Terminology", University of Leuven (K.U.Leuven), Energy Institute. 2008.
- [9] L.M. Petherick, F.U. Pietsch "Effects of Errors in Linepack Calculations on Real-Time Computational Pipeline Monitoring". Interprovincial Pipe Line Inc. Edmonton, Alberta. Canada, 1994.
- [10] V.V. Veverka, F. Madron "Material and Energy Balancing in the Process Industries - From Microscopic Balances to Large Plants". Computer Aided Chemical Engineering, Volume 7. Elsevier Science, First Edition. 1997.
- [11] Shankar Narasimhan, Cornelius Jordache "Data Reconciliation and Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data", Gulf Professional Publishing. 1999.

# Innovación

El acceso libre a la autopista de la Internet, ha permitido que países en vías de desarrollo como Colombia, puedan conocer el "norte" de la ciencia y la tecnología en temas relacionados con la aplicación de la metrología para beneficio de la sociedad.

En el CDT de GAS seguimos atentos a los movimientos internacionales, mediante la vigilancia tecnológica y la inteligencia competitiva; a partir de este momento, en esta sección compartiremos dicha información para que los lectores conozcan hacia donde se dirige la investigación, y como valor agregado en cada entrega, haremos un análisis particular del porqué y para qué estos esfuerzos están siendo realizados.



**Escríbanos**

Si desea publicar un artículo,  
escriba al correo  
[revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)  
o visite nuestra página web  
[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

An aerial photograph of a large industrial facility, likely a refinery or petrochemical plant, situated along a river. The facility is characterized by a dense grid of numerous large, cylindrical storage tanks, interconnected by a network of pipes and roads. The surrounding area includes other industrial structures, parking lots, and some green spaces. The river is visible in the foreground and background, with a few boats and a large ship docked at the facility's piers.

# EuroLoop

**FACILIDADES TECNOLÓGICAS  
PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN EL ÁREA DE LA  
MEDICIÓN DE FLUJO Y VOLUMEN DE  
GAS Y PETRÓLEO**

Erik S. Tapias Chávez (etapias@cdtdegas.com)  
Corporación CDT de GAS

## ¿Que es el EUROLOOP?

El Instituto Nacional de Metrología de Países Bajos – NMI (Netherlands Measurement institute para sus siglas en inglés) está actualmente construyendo uno de los proyectos mas grandes y ambiciosos en el campo de la metrología de fluidos.

Conocido como Euroloop, este lugar se proyecta como el centro de investigaciones y pruebas de tecnologías y productos de la medición de gas natural y petróleo mas grande del mundo, el cual la industria podrá emplear como herramienta para evaluar el comportamiento y determinar desempeño metrológico de los medidores de flujo y/o volumen bajo condiciones similares a las de operación, tanto para medidores en uso como para prototipos.

Como complemento a las facilidades tecnológicas para la calibración y experimentación, EuroLoop dispondrá de una escuela de metrología (Metrology Collage) con programas educacionales y capacitaciones enfocadas a la enseñanza de la metrología de fluidos.

Ubicado en Botlek, Róterdam - Países Bajos, a orillas del río “Nieuwe Maas”, estará constituido por tres secciones:

- “HyCal”, Hydrocarbon Calibration Facility;
- “GasCal”, Gas Calibration Facility;
- “GasSep”, Gas Separation Test Facility

Todas las instalaciones estarán ubicadas en el mismo sitio y serán operadas, mantenidas y administradas por el NMI, estrategia que garantiza la absoluta independencia, imparcialidad e integridad del centro y que adicionalmente constituye las piedras angulares de un Centro Nacional de Metrología, de acuerdo con lo expresado por Mijndert P. van der Beek [1] .

Las instalaciones están diseñadas para realizar calibración de medidores, ensayos para aprobación de modelos y algunas otras pruebas conforme con los parámetros establecidos por los diferentes estándares internacionales, tales como la OIML R137-1 Gas Meter. Part 1: Requirements y la OIML R117-1: Dynamic measuring system for liquids other than water, documentos que fueron claves en el diseño de las instalaciones del EuroLoop[2]. A continuación se describen las características técnicas de los laboratorios de flujo de líquido y gas[1] y [2]:

## Loop para calibración de medidores de líquido (HyCal):

Tipo	Circuito cerrado, por master meter o proving
Caudal	10 a 5000 m <sup>3</sup> /h
Bombas	3 a 5000 m <sup>3</sup> /h cada una
Dimensión medidores	4 a 24 pulgadas
Fluido	Derivados del petróleo
Viscosidad	1, 10 y 100 cSt
Presión Máxima	Mayor a 10 Bar
Temperatura línea	19 a 35 °C ajustable
Piston Prover	2 (40 metros de longitud, U<0,02% k=2)
Medidor Patrón	18 (U<0,05% k=2)
Trazabilidad	Piston prover, on line geometric
Estabilidad temperatura	Mejor que 0,5°C
Calibraciones paralelas	6 secciones de medición (2 por líquido)

## Loop para calibración de medidores de gas (GasCal):

Caudal	5 a 30000 m <sup>3</sup> /h a presión de trabajo 5 a 1800000 m <sup>3</sup> /h equivalente a condición atmosférica
Dimensión medidores	2 a 30 pulgadas
Presión de línea	1 a 78 Bar ajustable
Temperatura de línea	5 a 35 °C ajustable
Fluido	Gas natural, Metano, CO <sub>2</sub> , aire, mezclas variables
Incertidumbre	0,15% típica (k=2)
Trazabilidad	Gas Oil Piston Prover
Estabilidad presión	Mejor que 5 mbar
Estabilidad temperatura	Mejor que 0,05°C
Calibraciones paralelas	5 secciones de medición
Master Meter	Medidores tipo turbina

## Detalles de diseño del HyCal

El banco de pruebas para la calibración de medidores de flujo de hidrocarburos líquidos estará conformado por (Ver Figura 2):

- Tres circuitos separados los cuales emplearan tres tipos de hidrocarburos líquidos diferentes con viscosidades del orden de 1, 10 y 100 cSt,
- Dos probadores bidireccionales tipo pistón,

con diámetros aproximados de 60 cm y 120 cm, ambos con una longitud aproximada de 40 metros, dotados con un pistón inteligente.

Cada uno de los tres circuitos posee:

- Un loop pequeño y uno grande, con medidores de referencia tipo ultrasónico de 6", 10" y 16" respectivamente,
- Dos líneas para la instalación de medidores bajo prueba de 12" y 24"
- Un sistema de bombeo con motores de velocidad variable, intercambiadores de calor y válvulas reguladoras de caudal,
- Un sistema de control automático de expansión por presión en el líquido, para el estudio de los efectos de empaquetamiento de la línea.

Uno de los puntos claves para el diseño del sistema consistió en conectar los circuitos y considerar la menor cantidad de volumen muerto entre el medidor bajo prueba, los medidores de referencia y el probador tipo pistón.

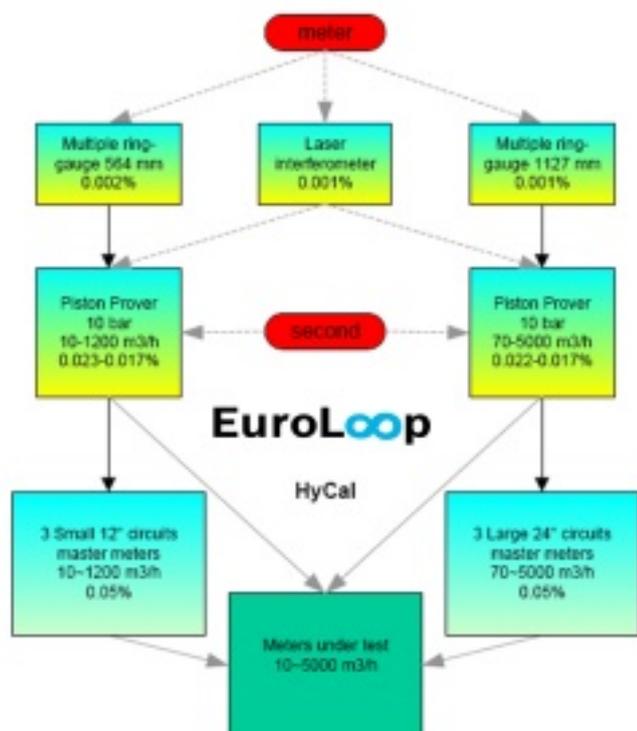


Figura 1. Esquema de trazabilidad del HyCal [1].

De los avances tecnológicos empleados en el HyCal se destaca la implementación de un pistón inteligente, dotado con una serie de sensores que permiten determinar constantemente el volumen de referencia

del probador, obtenido a partir de la comparación entre el diámetro del tubo y el diámetro de anillos de referencia (Primary Ring Gauge) ubicados en el probador y la medición de la distancia entre los interruptores empleando un interferómetro láser.

Pero, ¿Qué es un pistón inteligente? Después de varios estudios, NMi concluyó que para obtener las incertidumbres proyectadas, era necesaria la calibración geométrica continua del volumen disponible durante cada corrida de medición. Es así como se diseña un pistón dotado de una serie de sensores con la capacidad de evaluar el diámetro punto a punto del tubo del probador, determinar la presión diferencial en el pistón, cuantificar el flujo de fuga entre los sellos del pistón, medir la temperatura del fluido y determinar su aceleración y velocidad, para nombrar algunas de sus funciones. En la figura 3 se muestra un esquema de este equipo.

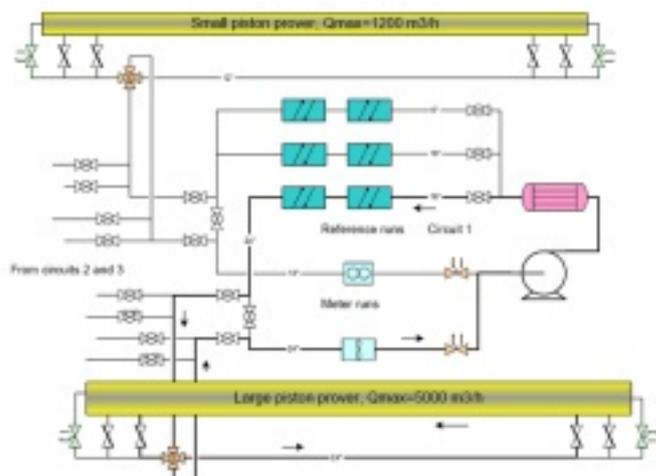


Figura 2. Diagrama de flujo simplificado del HyCal (Un solo circuito de tres) [1].

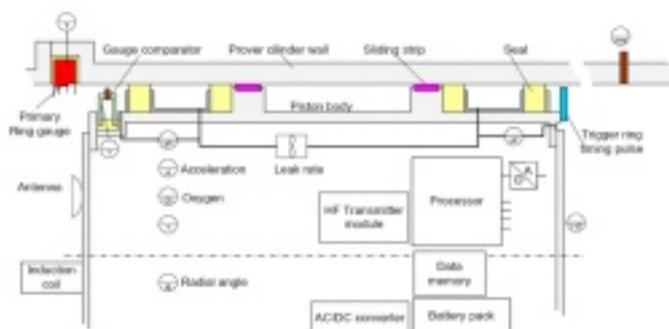


Figura 3. Pistón inteligente [1].

### Detalles de diseño del GasCal

El diseño del banco de pruebas para la calibración de medidores de gas se distingue por:

- Cinco (5) líneas de referencia<sup>1</sup>, cada una de ellas constituida con un medidor patrón tipo turbina y un medidor ultrasónico instalado en serie, este último usado para el constante monitoreo del comportamiento de los medidores tipo turbina, pero que bajo ninguna circunstancia intervienen en el proceso de calibración de los medidores bajo prueba (Ver Figura 4).

La razón para emplear medidores ultrasónicos como elementos para el monitoreo de los medidores de referencia fue la baja caída de presión que estos elementos ofrecen. El alcance total de esta sección es de 32500 m<sup>3</sup>/h.

- Tres líneas de referencia para medidores pequeños, constituidos por varios medidores patrón y medidores de monitoreo. El alcance total de esta sección es de 3000 m<sup>3</sup>/h.

- Motores de velocidad variable, ventiladores, válvulas de control de flujo fino filtros e intercambiadores de calor.

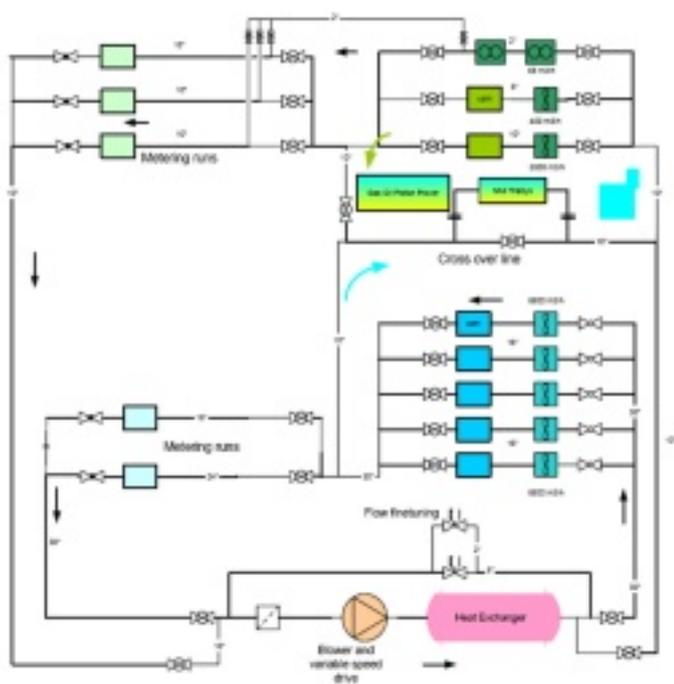


Figura 4. Diagrama de flujo del GasCal [1].

Para obtener bajas incertidumbres en la medición, NMI apunta a la estabilidad del proceso, específicamente a las variables de presión y temperatura. Otro factor de vital importancia, es

brindar la trazabilidad al sistema a través de un Gas Oil Piston Prover (Ver Figura 5) junto con un “booster” llamado “NMI TraSys”. En este equipo, el gas a alta presión desplaza un pistón que a su vez, desplaza cierta cantidad de volumen de aceite el cual es medido con una alta exactitud. Adicionalmente, para disminuir la diferencia con respecto a los valores de referencia nacional, se ejecutó un proceso de armonización del valor de referencia, realizado entre NMI, PTB y LNE.

## EuroLoop y el Medio Ambiente

En la actualidad, el cambio climático es una realidad y la temperatura de la tierra cada vez es mayor debido a la gran cantidad de gases de invernadero que diariamente se emiten a la atmósfera. NMI, comprometido con el medio ambiente, ha diseñado una estrategia para evitar ventear los gases empleados en la calibración hacia la atmósfera. Para esto, emplea dos grandes contenedores de gas (cada uno con 20 metros de sección aproximadamente) los cuales serían usados temporalmente para el almacenamiento del gas cuando este no se necesite, por ejemplo, en los casos en el que se requiera desempacar las líneas o cuando el sistema opere a baja presión. Los dos grandes contenedores con capacidad de 3500 m<sup>3</sup>, mantienen el contenido del Loop a una presión 30 mBar por encima de la presión atmosférica.

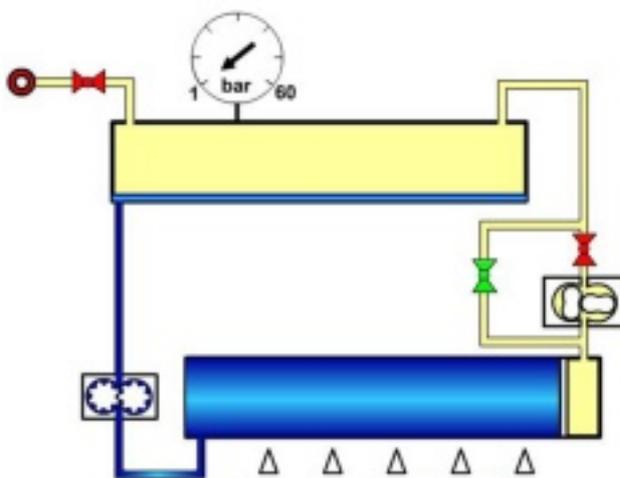


Figura 5. Gas Oil Piston Prover.

<sup>1</sup> Llámese líneas de referencia a la sección de tubería recta en la cual se encuentran instalados los medidores patrón

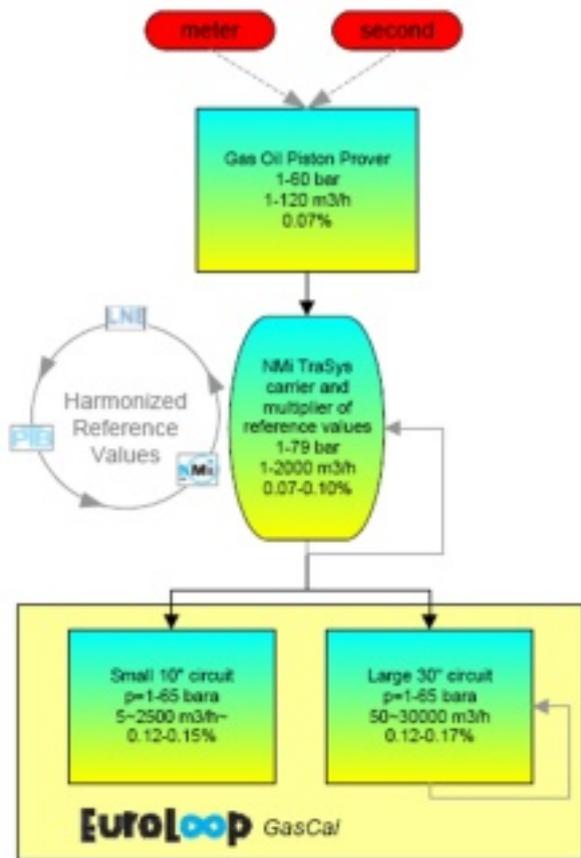


Figura 6. Cadena de trazabilidad del GasCal.



Figura 7. Contenedores de gas.

Estos contenedores tienen un diseño en particular, la parte externa consiste en un plástico inflado con ventiladores con la capacidad de generar velocidades de flujo hasta de 200 km/h. En la parte interna de este gran globo, se encuentra un gran “saco” el cual se llena o se vacía dependiendo de la demanda de gas requerida en el circuito del EuroLoop. Detectores de nivel miden la cantidad de gas en almacenamiento y determinan el tamaño del saco. Entre el recubrimiento exterior y el saco interior, se encontrarían localizados una serie de detectores de fuga los cuales identificarían cualquier escape de gas del saco interior;

en este caso, el recubrimiento exterior se convertiría en una segunda línea de defensa en caso de fuga. “Con orgullo podemos decir que muy difícilmente una molécula de gas se va a desperdiciar ya que no se necesita mas ventear o quemar el gas. Todo el gas puede ser utilizado repetidamente”, NMI [4]

## Conclusión

Como se ha podido observar, EuroLoop promete ser uno de los centros de investigación y pruebas mas grande del mundo en el campo de la metrología de fluidos, el cual contribuirá enormemente con el mejoramiento en las mediciones y el desarrollo de nuevos productos gracias a sus bancos de calibración diseñados con tecnología de punta que permiten no solo ofrecerle al sector petroquímico un centro integral para la evaluación de medidores a condiciones semejantes a las de operación, sino también, bajas incertidumbres en las mediciones, factor de vital importancia dado el exigente mercado internacional y la necesidad de incrementar la eficiencia de los procesos industriales.

Adicionalmente, EuroLoop se muestra orgulloso de ser un centro que minimiza la emisión de gases producto de sus procesos (calibraciones y/o pruebas con gas natural, metano-CH<sub>4</sub>, y dióxido de carbono-CO<sub>2</sub> principalmente) que contribuyen al efecto invernadero y por ende, al ya conocido calentamiento global, mostrándose como un ejemplo a seguir.

Estas instalaciones, mas que un laboratorio de calibraciones es un centro de investigaciones que contribuirán con el entendimiento de los fenómenos de flujo y el avance de la ciencia y la tecnología en el área de la metrología de fluidos. Esperamos con ansias su inauguración

## REFERENCIAS

- [1]. Mijndert P. van der Beer, “EuroLoop: Metrological concepts for efficient calibrations and primary realization of accurate referente values in flow” NMI
- [2]. Vim Volmer, “EUROLOOP: Unique oil and gas calibration facilities”, OIML Bolletin volume XLVIII, number 4, October 2007.
- [3]. Jacob Freeke, “EuroLoop: Innovative verification, calibration and test facility for flow measurement”, Elster-Instromet.
- [4]. Newsletter, “EuroLoop’s Sustainable Gas logistics”, NMI, July 2009

# Ciencia

La ciencia no es sino una perversión de sí misma, a menos que tenga como objetivo final, el mejoramiento de la humanidad. Nicola Tesla, Inventor Austrohúngaro.

La actividad científica esta orientada a satisfacer la curiosidad, y a resolver las dudas, acerca de cuáles son y cómo están organizadas las leyes de la naturaleza.

Seguros de que la comunidad científica nacional e internacional, utilizará la Revista MET&FLU como un medio para compartir los hallazgos de alta relevancia, cada semestre nuestros lectores encontrarán un tema de su agrado que facilitará la transferencia del conocimiento al ritmo que nuestra sociedad, nos lo exige.

**Escríbanos**

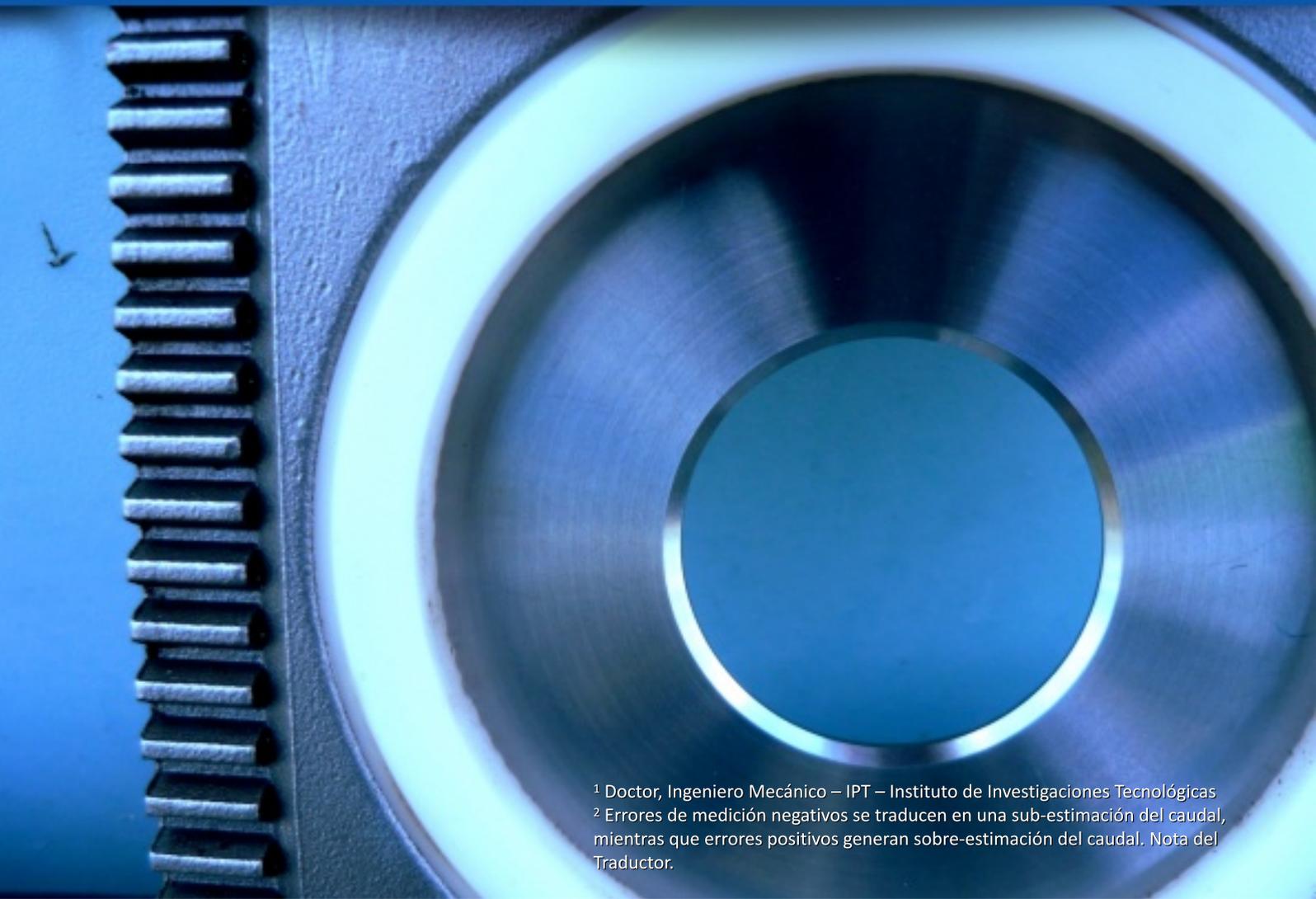
Si desea publicar un artículo,  
escriba al correo  
[revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)  
o visite nuestra pagina web  
[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

# EFFECTOS DE LOS DEPÓSITOS DE CONTAMINANTES EN PLACAS DE ORIFICIO

Este Trabajo Técnico fue cedido por el autor, para ser presentado en el volumen 1 de la Revista MET & FLU. Igualmente fue autorizada su traducción, del idioma original, el portugués, a nuestro idioma castellano.

## Resumen

La mayoría de los sistemas de medición fiscal y de transferencia de custodia de gas natural utilizados actualmente en Brasil se basan en la tecnología de medición por placa de orificio. Para cumplir los niveles de exactitud reglamentados, los sistemas de medición deben atender las especificaciones y límites definidos en las normas de referencia, especialmente en relación con los parámetros dimensionales, de forma y de calidad superficial del elemento primario. Las desviaciones sobre estas condiciones, pueden conducir a la generación de errores de medición. La cuantificación exacta de estos errores es difícil, aunque puede realizarse una estimación con base en referencias pertinentes como la ISO/TR 12767:1998 o en los resultados de una investigación más reciente desarrollada por técnicos de Advantica (UK) que suministran estimaciones de los errores de medición ocasionados por depósitos de materiales no-gaseosos sobre placas de orificio. El presente artículo busca sintetizar los tipos de contaminación tratados en la norma ISO/TR 12767 y en los ensayos desarrollados por Advantica. Presenta los resultados obtenidos que revelan errores de medición negativos<sup>2</sup> que varían de 0 a 24% para diversos grados de contaminación ocasionada por depósitos de aceite, grasa, líquidos, polvo, sólidos, etc.



<sup>1</sup> Doctor, Ingeniero Mecánico – IPT – Instituto de Investigaciones Tecnológicas

<sup>2</sup> Errores de medición negativos se traducen en una sub-estimación del caudal, mientras que errores positivos generan sobre-estimación del caudal. Nota del Traductor.

## 1. Introducción

Actualmente, los sistemas de medición por placa de orificio representan la solución más utilizada en Brasil para medición fiscal y de transferencia de custodia de gas natural. Los sistemas de medición por placa de orificio deben atender las especificaciones de condiciones de operación constantes dadas en la norma ISO 5167, debido a que las desviaciones sobre estas condiciones pueden ocasionar una medición no exacta de los caudales de gas. Las fuentes de desviación más comunes son las contaminaciones por depósitos de materiales no-gaseosos sobre el elemento primario del sistema de medición. La literatura sobre el tema contiene diversas referencias que muestran que los depósitos de contaminantes en las caras de una placa de orificio pueden ocasionar errores significativos en la medición de caudal de gas.

La cuantificación exacta de estos errores es difícil, aunque puede realizarse una estimación con base en referencias pertinentes como la ISO/TR 12767:1998. Esta norma proporciona una estimación de los errores de medición ocasionados por depósitos de materiales no-gaseosos sobre el elemento primario. El trabajo experimental, que constituyó la base de la norma fue desarrollado originalmente en la década de 1970 y reveló errores de medición que variaban de cero a 24% para diversos grados de contaminación, ocasionados por depósitos de polvo, aceite, grasas, líquidos, etc. Los experimentos fueron realizados a presión atmosférica utilizando aire como fluido de ensayo, y empleando placas de orificio con relaciones beta entre 0,2 y 0,7. Sin embargo, estas condiciones no reflejan la práctica operacional y, por consiguiente, existía la necesidad de evaluar la exactitud de los errores estimados en esta norma sobre placas de orificio utilizadas bajo condiciones reales de operación.

Con el objetivo de atender esta necesidad, los investigadores de la empresa Advantica, del Reino Unido, desarrollaron un estudio inicial cuyo objetivo era evaluar el efecto de los depósitos de materiales no-gaseosos sobre placas de orificio utilizadas bajo condiciones reales de operación. Para simular la situación real, todos los ensayos fueron realizados utilizando placas de orificio instaladas en un tubo de medición de 12" (300 mm) ANSI 600 de acuerdo con los requisitos de la norma ISO 5167. Se realizaron ensayos con placas de orificio de relaciones beta con valores de 0,6, 0,7 y 0,75 y todos los ensayos fueron ejecutados con gas natural a una presión de 55 bar. Durante los ensayos, se llevaron a cabo mediciones de caudal, presión, presión diferencial y temperatura aguas arriba y aguas abajo de las placas de orificio.

## 2. Medición de Caudal por Placa de Orificio

La tecnología de un sistema de medición por placa de orificio se encuentra bien fundamentada, con los requisitos de diseño e instalación descritos en normas internacionales, como por ejemplo las normas ISO 5167 y AGA #3. El medidor consiste de una placa de orificio concéntrica, instalada transversalmente respecto al tubo de medición por medio de un porta-placa o entre un par de bridas para placa de orificio, con tramos rectos aguas arriba y aguas abajo de la placa, suficientemente largos para asegurar un flujo uniforme, completamente desarrollado en la placa de orificio. El flujo de gas a través de la placa de orificio genera un diferencial de presión en el flujo que puede medirse mediante transmisores de presión. Cuanto mayor sea el caudal, mayor será la presión diferencial generada por el elemento de restricción.

El presente trabajo no tiene como intención abordar la teoría de funcionamiento de una placa de orificio. En ese sentido, las dudas eventuales, relacionadas con el dimensionamiento, diseño, construcción y operación de sistemas de medición por placa de orificio pueden abordarse a través una consulta a las normas ISO 5167:2003.

## 3. Análisis de los Resultados de Trabajos Anteriores

Las características constructivas de una placa de orificio son parámetros críticos para la aplicabilidad de la ley de semejanza inherente a su principio de medición y cualquier desviación con relación a la especificación de la norma puede provocar alteraciones en el coeficiente de descarga. Por ejemplo, placas de orificio que no posean un borde afilado en la entrada del orificio, de acuerdo con el ítem 8.1.6.2 de la ISO 5167-1, presentarán valores de coeficientes de descarga progresivamente mayores (errores negativos en el caudal) en la medida en que el radio de curvatura del borde del orificio aumente.

De forma análoga, una rugosidad superficial excesiva en la cara aguas arriba de la placa también genera un aumento en el valor del coeficiente de descarga, siendo estos errores más significativos para placas de orificio con relaciones beta mayores.

Una cantidad considerable de ensayos se desarrolló con medidores tipo placa de orificio con el objetivo de

determinar el efecto de las no-conformidades de estos sistemas con relación a los requisitos de la ISO 5167-1. Un resumen de los descubrimientos derivados de este trabajo se compiló e incluyó en la norma ISO/TR 12767:1998.

Los efectos causados por las desviaciones de las condiciones especificadas en la ISO 5167-1 fueron descritos en el documento de Advantica, en función de las variaciones en el coeficiente de descarga. Las desviaciones se clasificaron en términos de construcción, instalación y operación.

### 3.1 La Norma ISO/TR 12767:1998

La norma ISO/TR 12767:1998 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices – Guidelines to the effect of departure from the specifications and operating conditions given in ISO 5167-1 describe que los depósitos de contaminantes sobre la cara aguas arriba de una placa de orificio afectan su coeficiente de descarga de forma similar a una rugosidad superficial excesiva de la placa, indiscutiblemente tendiendo a aumentar el valor del coeficiente de descarga. La severidad de este efecto dependería del grado de contaminación de la placa, conforme se presenta en la Tabla 1.

Las figuras de la Tabla 1, tomadas de la norma, muestran los efectos causados por el depósito de una capa de granos de arena de tamaño uniforme (0,4 mm) y también el efecto de manchas de grasa (cada una de un diámetro nominal de 6,3 mm y una altura de 2,5 mm) sobre una placa de orificio instalada en un tubo de medición de 100 mm de diámetro, midiendo aire a presión atmosférica.

La Tabla 1 muestra, también, la importancia de las condiciones superficiales de la región anular

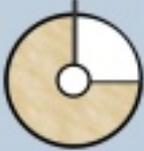
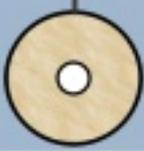
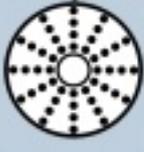
Depósito		Variación en el coeficiente de descarga, $C_d$		
		$\beta = 0,2$	$\beta = 0,7$	
Arena	1 cuadrante de arena		+1,0%	+0,8%
	2 cuadrantes de arena		+2,8%	+1,9%
	3 cuadrantes de arena		+3,9%	+2,4%
	4 cuadrantes de arena		+6,2%	+3,0%
	4 cuadrantes de arena con un anillo de 6 mm esparcido alrededor del borde del orificio de la placa		+0,3%	+0,3%
Grasa	4 depósitos de grasa		+1,0%	+0,1%
	8 depósitos de grasa		+2,8%	+1,3%
	16 depósitos de grasa		+2,1%	+1,2%
	32 depósitos de grasa		+2,6%	+0,6%

Tabla 1. Efectos sobre el coeficiente de descarga de placas de orificio, ocasionados por la deposición de contaminantes en la cara aguas arriba de las placas.

alrededor de la entrada del orificio de la placa. Como esta región es normalmente barrida por el flujo, los errores efectivos probablemente son menores que los indicados en la Tabla. Es necesario reconocer que muchos de los patrones de contaminación descritos en la figura no representan las condiciones que se encuentran normalmente en la práctica. Sin embargo, se consideró importante replicarlos de modo que se pudiera efectuar una comparación con los trabajos anteriores.

Adicionalmente, la norma ISO/TR 12767 presenta los resultados de ensayos realizados con la intención de simular los efectos de la deposición de desechos y de la acumulación de material líquido al interior del tubo de medición, junto a la cara aguas arriba de la placa de orificio. La Figura 1 muestra que se utilizaron varillas de soldadura en los experimentos realizados para simular la acumulación de desechos en el tubo de medición, las cuales provocaron un aumento en el valor del coeficiente de descarga, siendo dicho aumento más pronunciado en la placa con relación beta 0,7 que en la de beta 0,2.

La Figura 2 muestra los resultados de los ensayos desarrollados para simular los efectos de la acumulación de líquido en el tubo de medición. Los resultados indican que, si el nivel del líquido acumulado se encontraba por debajo de la altura del borde de ataque de la placa de orificio, el coeficiente de descarga aumentaba. Si el nivel de líquido excedía dicha altura límite, el área efectiva de la sección transversal del orificio de la placa comenzaba a reducirse, ocasionando una disminución en el valor del coeficiente de descarga de la placa.

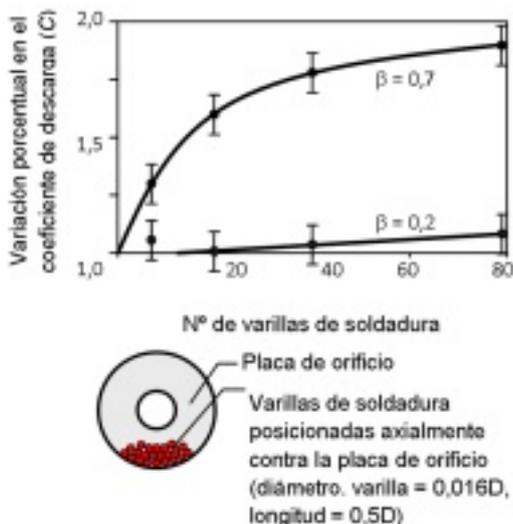


Figura 1. Efecto de varillas de soldadura en el tubo de medición.



Figura 2. Efecto de la acumulación de líquido en el tubo de medición.

### 3.2 Investigaciones Realizadas por Otros Autores

#### 3.2.1 Contaminación por película de líquido sobre la placa de orificio y el tubo de medición

K.K. Botros (1992) y W. Studzinski (1988) reportaron que los errores relacionados con la contaminación por líquidos dependen del tipo de líquido y del modo como las placas y los tubos de medición están contaminados por el mismo. Concluyeron que películas muy finas de líquido pueden acabar reduciendo la rugosidad superficial de las placas y de los tubos de medición ocasionando errores positivos de caudal, mientras que trazas o gotas grandes de líquido pueden aumentar la rugosidad superficial ocasionando un error negativo de caudal.

B. Johansen (1996) investigó el efecto de una película fina de aceite de lubricación de compresor sobre las superficies de placas de orificio y tubos de medición. Los ensayos se ejecutaron con medidores de 2, 6 y 16 pulgadas a diferentes valores de beta. Las placas de orificio y los tubos de medición fueron sumergidos en aceite, dejando que el exceso del producto escurriera antes de la instalación y del inicio de los ensayos. El trabajo mostró que el efecto de una película fina de este tipo de aceite sobre la placa de orificio generaba un error de medición negativo, inferior a 0,25% del caudal. El trabajo de B. Johansen mostró también que la presencia de aceite en el tubo de medición, en la sección aguas arriba del sistema de medición, generaba errores del orden de 0,75%. La magnitud del error disminuía con el tiempo, probablemente en la medida en que el aceite era arrastrado gradualmente de la superficie del tubo de medición por el flujo.

### 3.2.2 Depósitos de grasa sobre placas de orificio

E.J. Burgin (1971) reportó que, si el espesor de los depósitos de grasa y el área de la placa cubierta por la grasa variaban, el efecto en la exactitud del caudal también se modificaba. Los resultados de Burgin también mostraban un mayor efecto de la contaminación por grasa sobre la cara aguas arriba de la placa que en la cara aguas abajo. Se observaron errores negativos de 0% a 13%, dependiendo del porcentaje de superficie cubierta. Por ejemplo, una placa 100% cubierta con una capa de grasa de 1/16 de pulgada generó un error negativo de 8%.

K.K. Botros (1992) realizó ensayos con placas de betas 0,2 y 0,6, utilizando discos para simular la contaminación por grasa y evaluar sus efectos sobre la exactitud del medidor. Se posicionaron ocho discos cercanos al borde de ataque de la placa, observándose errores negativos significativos, del orden de 1% para la placa de orificio de beta 0,6 y de 3,5% para la placa de orificio de beta 0,2. Sin embargo, no se observó ningún efecto significativo en el error del caudal cuando los discos se localizaron a la mitad de la distancia entre la pared interna del tubo y el borde del orificio de la placa.

## 4. Experimentos

El principal objetivo de los experimentos ejecutados por Advantica fue evaluar los errores de medición de caudal ocasionados por la contaminación de la cara aguas arriba de las placas de orificio, por la deposición de materiales en el interior del tubo de medición y por la contaminación de las líneas manométricas con aceite.

## 4.1 Montaje

Los experimentos se llevaron a cabo en las instalaciones para ensayos de Advantica Flow Centre en Bishop Auckland, conforme se ilustra en la Figura 3, el gas natural recibido en el Centro de Ensayos, a una presión promedio de 55 bar, pasa inicialmente por una turbina y posteriormente a través de la placa de orificio. Un medidor de tipo turbina de 12 pulgadas se instaló a aproximadamente 40 diámetros de tubería (40D) aguas arriba de la placa de orificio. Se instaló un rectificador de flujo del tipo haz de tubos aguas arriba de la turbina para proporcionar un perfil de velocidades completamente desarrollado para el gas en el punto en que este ingresaba al medidor. La longitud de 40D de tubería recta entre la turbina y la placa de orificio permitía que el flujo retornara nuevamente a su estado completamente desarrollado. Un rectificador de flujo adicional del tipo haz de tubos se instaló entre la turbina y la placa de orificio a una distancia de 13,2 diámetros aguas arriba de la placa de orificio.

La presión diferencial a través de la placa de orificio se midió utilizando dos transmisores de presión diferencial, con alcances de medición para alta y baja presión diferencial. También se instaló un transmisor de presión manométrica aguas arriba de la placa de orificio para registrar la presión de la línea, inmediatamente antes de la placa. Un transmisor de temperatura se instaló a 5,5D aguas abajo de la placa de orificio, cuyas lecturas fueron corregidas para las condiciones aguas arriba.

Para los ensayos se fabricaron tres placas de orificio con betas 0,6, 0,7 y 0,75, de 6 mm de espesor y de acuerdo con la ISO 5167. Durante los experimentos, estas placas fueron montadas entre dos bridas para placa de orificio. Las tres placas de orificio fueron escogidas porque representaban las placas de común uso y por permitir una comparación con el trabajo utilizado en la elaboración de la norma ISO/TR 12767.

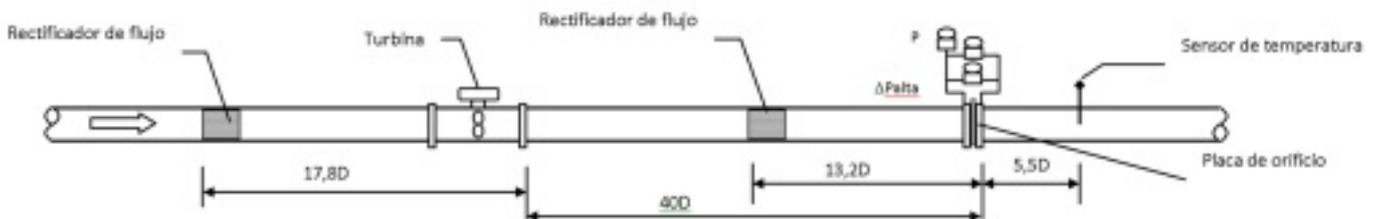
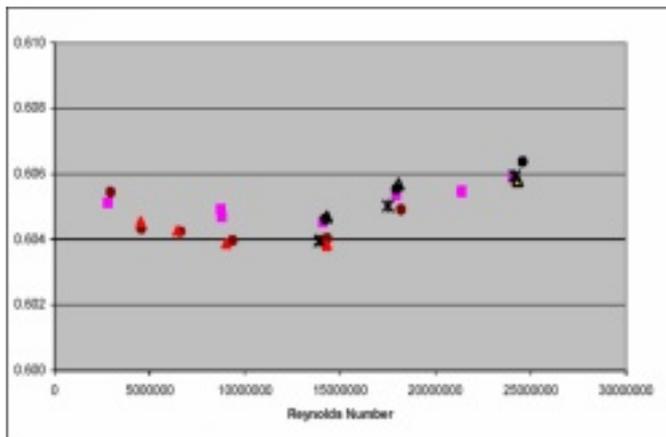


Figura 3. Lay-out de la instalación utilizada en los ensayos de contaminación de placas de orificio

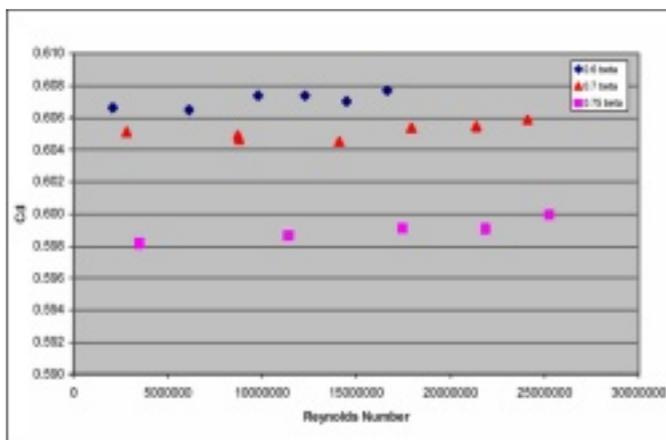
## 4.2 Resultados

### 4.2.1 Calibración de la placa limpia

Todas las tres placas, con relaciones beta de 0,6, 0,7 y 0,75, fueron calibradas bajo condiciones de presión y caudal estables en seis números de Reynolds diferentes, representando presiones diferenciales en las placas de orificio entre 10 y 750 mbar. Los ensayos fueron repetidos en determinados números de Reynolds para establecer la repetibilidad de los resultados. El Gráfico 1 muestra los datos obtenidos a partir de tres repeticiones de ensayos con la placa beta 0,7, realizados en tres días diferentes. Hubo una excelente repetibilidad de los datos, adicionalmente se obtuvieron resultados similares para las otras dos placas. Los resultados promedio para cada placa con beta diferente se presentan en el Gráfico 2.



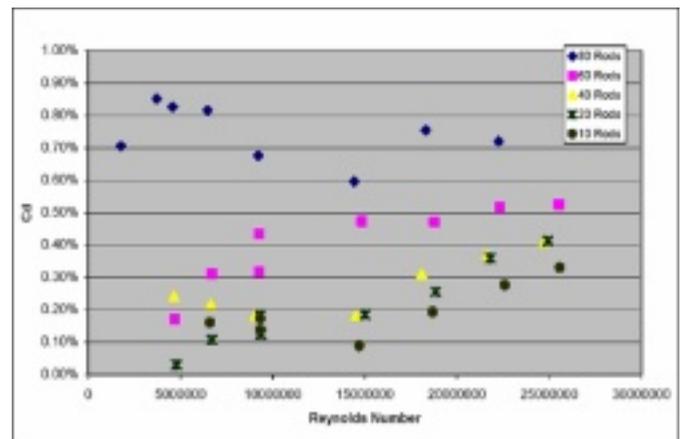
**Gráfico 1.** Coeficiente de descarga para la placa de beta 0,7 con repetición de ensayos. (Fuente: M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall)



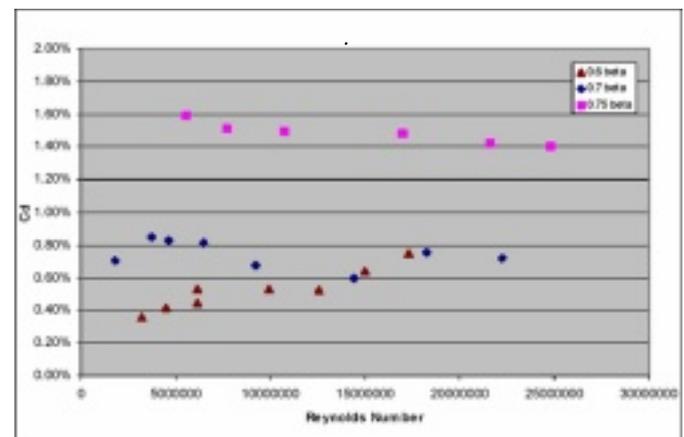
**Gráfico 2.** Coeficiente de descarga promedio para placas con betas 0,6, 0,7 y 0,75. (Fuente: M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall)

### 4.2.2 Contaminación del tubo de medición por sólidos

Las placas de orificio con betas 0,6 y 0,75 se ensayaron con cúmulos de 80 varillas de soldadura utilizadas para simular el efecto de la deposición de materiales sólidos en el tubo de medición. Las desviaciones máximas observadas en los coeficientes de descarga fueron de 0,6% y de 1,6% para las placas con betas 0,6 y 0,75, respectivamente. A su vez, la placa con beta 0,7 fue sometida a los ensayos completos con 10, 20, 40, 60 y 80 varillas, iniciándose con las 80 varillas. La desviación máxima observada en el coeficiente de descarga para la placa con beta 0,7 fue de 0,8% y los resultados se presentan en el Gráfico 3. El Gráfico 4 muestra la variación en el coeficiente de descarga para las tres relaciones de beta con las 80 varillas.



**Gráfico 3.** Variación en el coeficiente de descarga de una placa con beta 0,7 debido a la contaminación por sólidos (varillas). (Fuente: M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall)



**Gráfico 4.** Variación en el coeficiente de descarga debido a la contaminación por sólidos (80 varillas). (Fuente: M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall)

Para propósitos de comparación, los ensayos realizados bajo condiciones atmosféricas indicaron una desviación de 1,8% con las 80 varillas para una placa de beta 0,7.

### 4.2.3 Contaminación de la placa de orificio por grasa

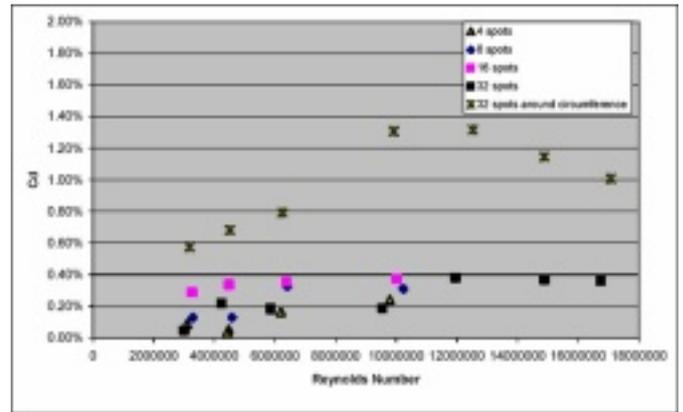
Los resultados iniciales de los ensayos realizados con la placa de beta 0,6 con 4, 8, 16 y 32 manchas de grasa mostraron un impacto variable sobre el coeficiente de descarga de la placa (Gráfico 5). Similarmente con los estudios anteriores, el grado de aumento en el coeficiente de descarga (error negativo en la medición de caudal) varió con el grado de contaminación. Se observaron alteraciones muy pequeñas cuando la placa se ensayó con 4 manchas de grasa. Con 16 manchas de grasa los ensayos ya mostraban un aumento de 0,25% en el coeficiente de descarga y con 32 manchas de grasa el incremento fue de 0,4%, pero todos ellos inferiores a los observados en los ensayos a presión atmosférica. El ensayo adicional con las 32 manchas dispuestas alrededor del borde del orificio de la placa, produjeron una desviación de aproximadamente 1,3%. Estos resultados fueron muy similares a los obtenidos por K.K. Botros en los ensayos realizados en 1992 sobre una placa de beta 0,6.

En los ensayos con grasa realizados sobre la placa de beta 0,7 se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 1 y las desviaciones máximas observadas en el coeficiente de descarga fueron de aproximadamente 0,13% con las 32 manchas de grasa. A caudales superiores, este error fue reduciéndose casi hasta llegar a cero en la medida en que los números de Reynolds aumentaban.

### 4.2.4 Contaminación de la placa de orificio por polvo

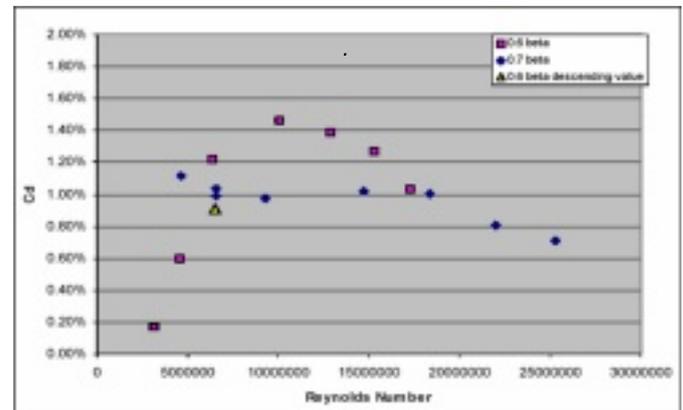
En la secuencia de los ensayos con grasa, la placa con beta 0,6 fue sometida al ensayo de polvo en los 4 cuadrantes con el contaminante cubriendo toda la superficie de la placa. Este se consideró como el peor caso y por eso fue el único ensayado. El máximo aumento observado en el coeficiente de descarga durante el ensayo fue de aproximadamente 1,4%, variando con respecto al número de Reynolds. Se observó un pico de desviación para un número de Reynolds del orden de 10 millones. Después de este pico, se observó una reducción en los errores en la medida en que los números de Reynolds aumentaban. En Reynolds menores, alrededor de 6 millones, el error en el coeficiente de descarga era casi 0,3% inferior al error observado durante los caudales mayores. Los resultados se presentan en el Gráfico 6.

El ensayo con polvo en los cuatro cuadrantes de la placa con beta 0,7 indicó un error máximo de 1,1%. Los resultados se presentan en el Gráfico 6. Al igual que en la placa de beta 0,6, los errores variaban con respecto al número de Reynolds.



**Gráfico 5.** Resumen de los ensayos con una placa de beta 0,6 contaminada con grasa.

(Fuente: M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall)



**Gráfico 6.** Resumen de los ensayos con contaminación por polvo.

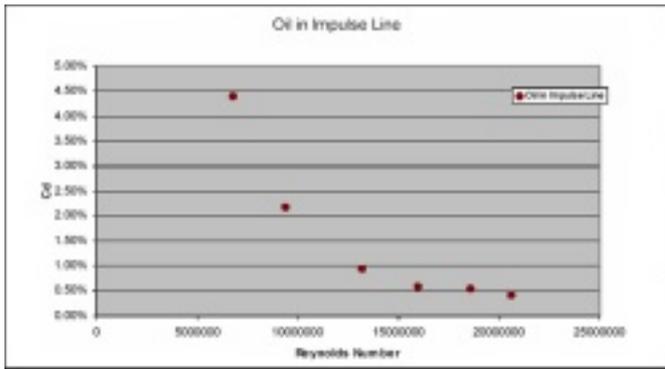
(Fuente: M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall)

### 4.2.5 Contaminación de la línea manométrica

La línea manométrica del lado de alta presión se contaminó con 50 ml de aceite, extraído de un sistema de filtración. Las lecturas iniciales de los dos transmisores de presión diferencial produjeron un off-set de -3,8 mbar, estando el sistema presurizado y sin paso de flujo. Durante los ensayos con flujo se observaron desviaciones significativas en el coeficiente de descarga, indicando un error negativo en el caudal. Se realizaron seis ensayos con caudales equivalentes a 50, 100, 200, 300, 400 y 500 mbar. A una presión diferencial de 50 mbar, el error en el coeficiente de descarga fue de hasta 4,2% (error negativo en la medición de caudal). Esta desviación disminuía en la medida en que el caudal aumentaba conforme se presenta en el Gráfico 7.

## 5. Conclusiones

El trabajo compara los efectos de la contaminación de placas de orificio sobre el coeficiente de descarga, y por consiguiente en la medición de caudal bajo condiciones



**Gráfico 7.** Contaminación de la línea manométrica de una placa con beta 0,7. (Fuente: M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall)

reales, con los resultados de trabajos anteriores realizados bajo condiciones atmosféricas. La ISO/TR 12767 presenta los efectos de los depósitos de contaminantes en la cara aguas arriba de la placa y en el tubo de medición. Los resultados incluidos en dicha norma son de trabajos desarrollados con aire a presión atmosférica. Ensayos similares realizados con gas natural a presiones cercanas a 55 bar y bajo condiciones de números de Reynolds variables produjeron resultados diferentes, los cuales podrán servir de respaldo para la revisión de la norma.

Todos los trabajos analizados sobre contaminaciones en placas de orificio, invariablemente concluyen que los depósitos de grasa o arena en la cara aguas arriba de una placa de orificio generan un aumento en el valor de su coeficiente de descarga ( $C_d$ ). Este efecto puede explicarse de la siguiente manera: en la práctica, el coeficiente de descarga es la relación entre el área efectiva a través de la cual ocurre el flujo del fluido y el área geométrica del orificio de la placa. Típicamente, las placas normalizadas presentan valores de coeficiente de descarga alrededor de 0,6. Dicho valor es menor que la unidad porque en el flujo a través de una placa de orificio, las líneas de corriente del flujo terminan concentrándose en una sección transversal aguas abajo de la placa, denominada vena contracta, conforme se ilustra en la Figura 4.

El flujo de gas en el tramo recto de tubería aguas arriba de la placa está caracterizado por componentes predominantemente axiales. Sin embargo, al aproximarse a la placa, el flujo experimenta un cambio radical, motivado por la necesidad del fluido de atravesar el elemento de restricción. Para esto, en el tramo del tubo de medición, el

flujo exhibe variaciones sustanciales de presión, temperatura y de velocidad.

Más cerca a la placa, las líneas de corriente del flujo sufren la acción de las componentes de flujo radial generadas por la placa. En una placa limpia, la capa límite del flujo sobre ésta es delgada, lo que hace que la componente radial del flujo sea casi perpendicular al eje, desviando fuertemente las líneas de corriente y definiendo un área característica de vena contracta. Por otra parte, una placa contaminada tiende a presentar una capa límite más gruesa debido a su mayor rugosidad. Dicha capa límite termina inclinando la componente radial del flujo, haciendo que la misma no ejerza el mismo efecto de desviación sobre las líneas de corriente del flujo, lo que resulta en una mayor área de la vena contracta ( $C_d$  mayor) que la de una placa limpia.

## 6. Referencias

- M.Pritchard, A.Niazi, D.Marshall. *Assessment of the effect of contamination on orifice plates*, FLOMEKO 2003, Groningen, The Netherlands, May 12-14, 2003.
- AGA Report No.3:1992. (AGA #3) *Orifice metering of natural gas*.
- AGA Report No.8 1985, 1992 & 1994 *Detailed and Gross. (AGA8) Compressibility and supercompressibility for natural gas and other hydrocarbon gases*.
- ISO 5167-1:1991. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices*.
- ISO 5167:2003 *Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-section Running Full, Part 1 - General Principles and Requirements e Part 2 - Orifice Plates*
- ISO TR 12767:1998. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices – Guidelines to the effect of departure from the specifications and operating conditions given in ISO 5167-1*.
- GRI Report 00/0141. *Metering Research Facility Program: Operational Factors That Affect Orifice Meter Accuracy. This includes the references listed below:*
- B.Johansen, W.Seidl and T.Kegel (1996). *The Effects of Oil Coating on the Measurement of Gas Flow Using Sharp-Edged Orifice Flow Meters*.
- W.Studzinski, D.Berg, D.Bell and D.Richards (1988). *Effects of Orifice Surface Conditions on Accuracy Of Flow-rate Measurements*.
- K.K.Botros, W.Studzinski and P.Barg (1992). *Results of NOVA's Gas Metering Research*.
- E.J.Burgin (1971). *Factors Affecting Accuracy of Orifice Measurement (primary element)*



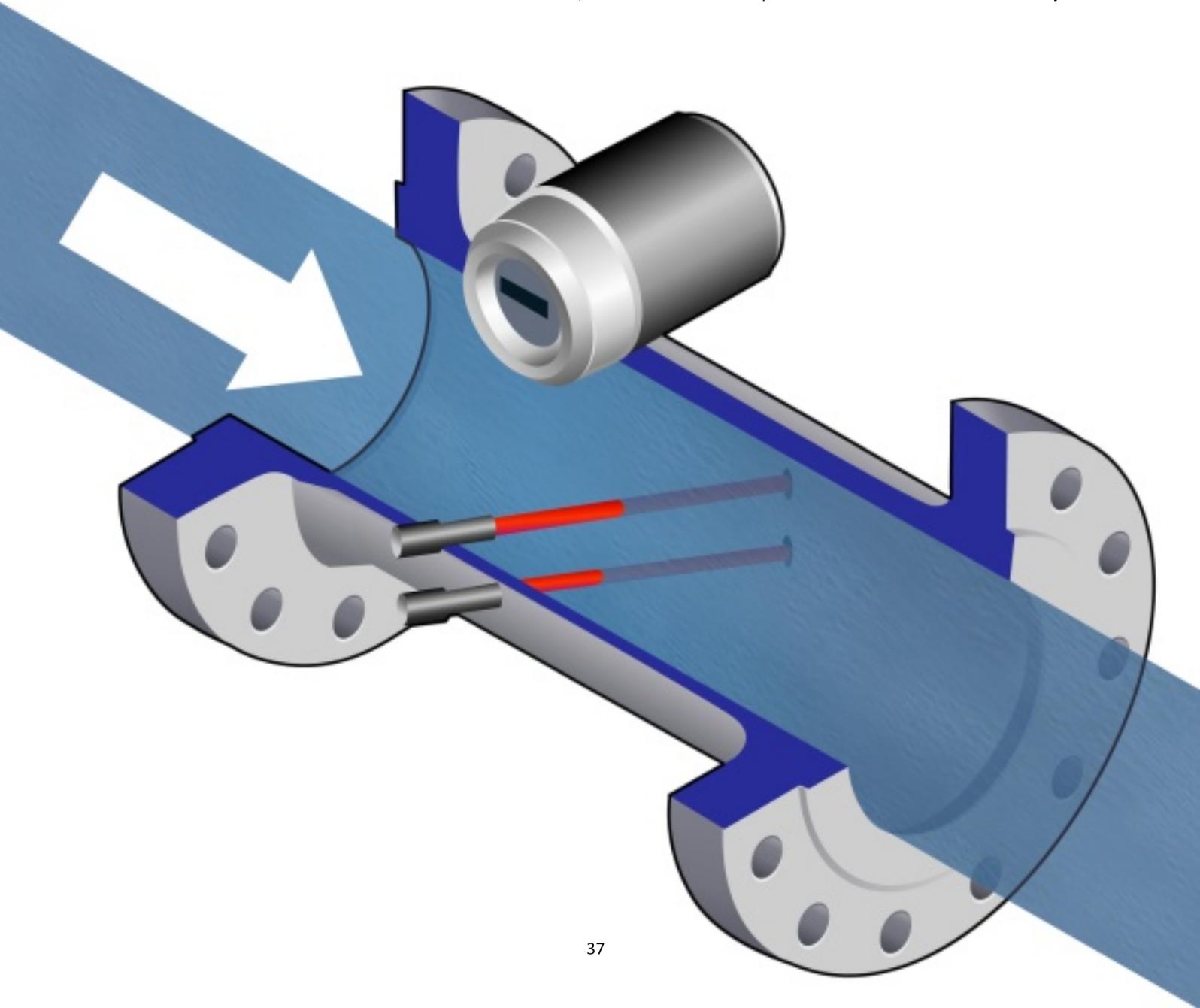
**Figura 4.** Efecto de la contaminación sobre el coeficiente de descarga de la placa

# Modelado y Simulación de Medidores Ultrasónicos de Tiempo de Transito: Desarrollos y Avances

Jorge Reyes y Alfredo Acevedo ( jreyes@cdtdegas.com y aacevedo@uis.edu.co )  
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas - Universidad Industrial de Santander

## Resumen:

En este artículo se presenta una revisión de los trabajos mas relevantes relacionados con el modelado y la simulación de medidores de flujo ultrasónicos de tiempo de transito. El trabajo se realizó basado en publicaciones extraídas de bases de datos, sitios web especializados, portales de universidades y algunas publicaciones impresas. De la revisión se mencionan los fenómenos que han despertado mayor interés en trabajos de modelado y simulación de medidores ultrasónicos, así como también, cuales son los modelos y métodos más utilizados en estos trabajos.



# 1 INTRODUCCIÓN

La medición de volumen y caudal de fluidos ha sido y sigue siendo uno de los grandes retos de la ciencia y la tecnología en diversos campos de aplicación, desde la medición del flujo sanguíneo en el área de salud hasta la medición del caudal de los grandes ríos del mundo en hidrografía [1]. En particular uno de los campos donde la metrología de caudal y volumen de fluidos ha mostrado mayores desafíos y avances es el caso de la medición de líquidos y gases en tuberías. Esto se debe a la importancia que estas mediciones tienen para los procesos de facturación, (generalmente denominados puntos de transferencia de custodia), la monitorización y el control de procesos [2].

Dentro de las tecnologías existentes para medición de caudal y volumen de fluidos en tuberías se encuentran los medidores ultrasónicos (USM por sus siglas en inglés *Ultrasonic Flow Meter*) [1-3]. Estos sistemas son una de las tecnologías de más rápido crecimiento en el campo de la instrumentación para el monitoreo y control de procesos [4]. El crecimiento en el uso de los USM económicamente hablando se ve reflejado en la captura de aproximadamente el 10% del mercado de los medidores de volumen y caudal de fluidos en los últimos cincuenta años de acuerdo con las cifras disponibles al año 2005 [4]. Por otro lado se encuentran los progresos en capacidades operativas y desempeño metrológico que esta tecnología ha tenido desde sus capacidades iniciales [5]. Dentro de los mayores avances se encuentra la capacidad de detección del perfil de velocidades y la corrección de la medición en función de este [6-8], mediciones de gas a baja presión [9-10] y los estudios que se están llevando a cabo con el fin de realizar medición de flujo de energía para el caso del gas natural y otros gases con esta tecnología [11-12].

Los avances y progresos de los USM se deben en gran medida a los avances de la electrónica y los procesos de investigación y desarrollo que se ha llevado a cabo sobre esta tecnología de

medición de flujo. Dentro de las investigaciones y desarrollos realizados una de las herramientas fundamentales ha sido el modelado y la simulación del desempeño de los USM bajo múltiples condiciones de operación. En el presente artículo se lleva a cabo una revisión de los trabajos más relevantes relacionados con el modelado y la simulación de USM de tiempo de tránsito. El tema se inicia con una breve descripción de su principio de operación. Continuando el tema se exponen los principales fenómenos (que afectan el desempeño de los USM) que han sido investigados con ayuda del modelado y simulación de los medidores. Por último se presentan los diferentes modelos y metodologías utilizados para llevar a cabo el modelado y simulación de los USM en los diferentes trabajos mencionados.

# 2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Existen en el mercado principalmente tres tipos de medidores ultrasónicos para la medición del caudal y/o el volumen de fluidos. Cada uno de ellos realiza la medición del flujo basado en métodos diferentes como son: el tiempo de tránsito, el efecto Doppler y la correlación de señales [1-3]. La revisión desarrollada para el presente artículo hace referencia exclusivamente a los medidores ultrasónicos de tiempo de tránsito. El principio de operación de estos USM consiste en ondas acústicas que viajan con una velocidad específica a través del fluido. Las ondas acústicas (ultrasónicas) utilizadas por USM usan una señal de pulso corto (ver Fig 1), emitida por un transductor ubicado a un lado de la tubería, que es detectada por un receptor en el costado opuesto [1-3].

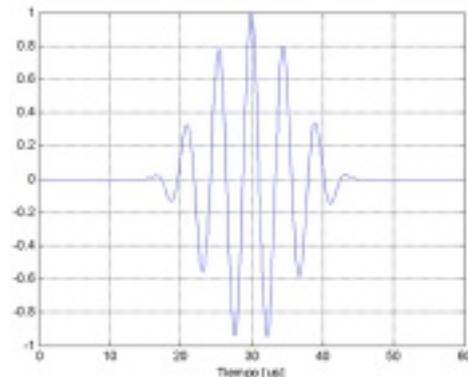


Fig 1. Pulso emitido por un USM

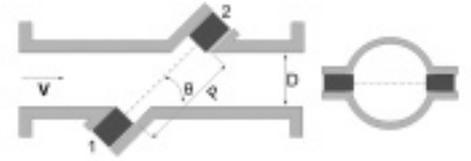


Fig 2. Diagrama esquemático para una trayectoria del principio de operación de un USM

Las ondas son emitidas en el sentido y contra el sentido del flujo (aguas arriba y aguas abajo), (ver Fig 2). Para calcular el caudal se mide el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción (tiempo de tránsito) de las ondas emitidas en los dos sentidos, y la diferencia de los tiempos de tránsito esta relacionada con la velocidad del flujo y el caudal volumétrico de acuerdo con las ecuaciones 1 a 4 que se obtuvieron de [3], [13-14]:

$$\int_1^2 dt = t_{12} = \int_1^2 \frac{dP}{c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}} \approx \frac{P}{c + \bar{V} \cos \theta} \quad (1)$$

$$t_{21} = \int_1^2 \frac{dP}{c - \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}} \approx \frac{P}{c - \bar{V} \cos \theta} \quad (2)$$

$$\bar{V} = \frac{P}{2 \cos \theta} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (3)$$

$$Q = \int \bar{V} dA \approx \frac{\pi \cdot \bar{V} \cdot D^2}{4} \quad (4)$$

En la ecuación 1 y 2 se presenta la relación de los tiempos de tránsito aguas arriba y aguas abajo ( $t_{12}$  y  $t_{21}$  respectivamente), con la velocidad del sonido en el medio  $c$ , el vector velocidad del fluido ( $\mathbf{V}$ ) y el vector unitario tangente a la trayectoria  $\mathbf{e}$ , a través de una integral sobre la trayectoria acústica. Adicionalmente se muestra aproximación de la integral en función de la velocidad de fluido promedio en la trayectoria ( $\bar{V}$ ) y el ángulo de la trayectoria acústica  $\theta$ . Combinando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene la ecuación 3 que relaciona la velocidad de fluido promedio en la trayectoria con los tiempos de tránsito y el ángulo de la trayectoria acústica. Por último la ecuación 4 muestra el cálculo del caudal en función de la velocidad de fluido promedio en la trayectoria y el diámetro de la tubería  $D$ .

Es importante resaltar que los modelos matemáticos presentados para el principio de operación corresponden a una sola trayectoria directa (sin reflexión en el tubo), sin ángulo azimutal (transmisor y receptor en la misma ubicación vertical) y un perfil de velocidad de flujo ideal. Los modelos matemáticos pueden variar y las aproximaciones perder validez para diferentes configuraciones y/o perfiles de velocidad del fluido.

### 3 ASPECTOS ESTUDIADOS CON EL MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS “USM”

Existen diversos aspectos de diseño y/o condiciones de operación que pueden llegar a afectar el desempeño de USM [15-21]. Con el fin de conocer y cuantificar los efectos de algunos de estos aspectos se han ejecutado proyectos de investigación que involucran procesos de modelado y simulación. A continuación se presentan los principales parámetros que afectan el desempeño de los USM analizados por medio de investigaciones como las ya mencionadas.

#### 3.1 Desempeño Global del Medidor

Generar, recibir y analizar los pulsos acústicos descritos en numeral 2 de forma adecuada es una tarea compleja. Realizar estas labores requiere la operación de varios subsistemas actuando de forma conjunta como se puede apreciar en la Fig 3.

Es evidente ahora la necesidad de conocer el desempeño y los factores que afectan un USM como conjunto, teniendo en cuenta los diferentes sistemas que lo conforman. Contar con herramientas adecuadas de modelado y

simulación para esta necesidad es un campo de interés, en especial para los fabricantes de medidores, debido principalmente a que el correcto modelado y simulación de un USM puede generar información que permita a los diseñadores y analistas explorar más alternativas de diseño en un menor tiempo, y reducir el número de prototipos necesarios para obtener el producto final [19].

Sin embargo, el modelado y simulación de un USM es una tarea compleja, que requiere consideraciones especiales. En primer lugar, un USM representa un problema de simulación de campos acoplados, es decir, la combinación de varios subsistemas caracterizados por diferentes campos de la física y de sus interacciones mutuas. En segundo lugar, los USM son sistemas de grandes dimensiones, que generan ondas de corta longitud. Esta desproporción resulta en extensos problemas numéricos, que exigen muy altos desempeños computacionales [19].

Debido a la complejidad que representa el modelado y simulación de un USM en su totalidad, el problema se aborda por subsistemas. Para esto se separa el modelado y la simulación de la generación y recepción de onda acústica, que son generalmente realizados usando la ecuación de onda y métodos de aproximación numérica para resolverla; como se describe en el numeral 4.1. Por otro lado se ejecuta el modelado y simulación de la propagación de onda en el fluido (medio en movimiento), que es llevado a cabo usando el mismo método de la ecuación de onda y métodos de aproximación numérica, o otros modelos y métodos mas eficientes para esto, como el Método de Traza de Rayos RTM o el Método de la Integral de Helmholtz-Traza de Rayos HIRM descritos en los numerales 4.2 y 4.3 [17], [22-23].

#### 3.2 Efectos del Perfil de Velocidad

Dentro de las condiciones de operación que afectan el desempeño de los USM, el efecto del perfil de velocidad del fluido es el de mayor estudio y análisis a través de modelado y simulación. El fin de estos estudios es conocer, analizar y cuantificar el error de medición que se puede generar en un USM debido a diferentes condiciones y perturbaciones en el perfil de velocidad del flujo. Por ejemplo flujo laminar, flujo turbulento, asimetría en el perfil de velocidad y vórtices en fluido entre otros [13-14], [23-29]. Estas perturbaciones sobre el perfil de velocidad son causadas por las condiciones de instalación del medidor. El efecto de estas condiciones de instalación también ha sido investigado a través de estudios completamente experimentales [30-31].

Las condiciones y el perfil de velocidad del fluido alteran el desempeño de los USM principalmente debido al efecto que tiene el perfil sobre la propagación de ondas en el medio. Por esta razón el modelado y simulación dentro de las investigaciones del efecto del perfil de velocidad se enfoca a la propagación de ondas en el medio. El método más usado para modelado y simulación dentro de las investigaciones sobre el efecto del perfil de velocidad es el RTM para la propagación de ondas, en conjunto con el uso de modelos teóricos o herramientas CFD “Computer Fluid Dynamics” para el perfil de velocidad del fluido [13-14], [23], [26-28]. Otra forma en el cual se ha abordado el análisis de este efecto es tomando como base el modelo matemático del principio de operación del USM de tiempo de tránsito, que fue descrito en el conjunto de ecuaciones 1-4, integrándole un modelo particular para la velocidad de fluido [25],[29].

#### 3.3 Otros Efectos de las Condiciones del Fluido

Otra condición de operación que afecta el desempeño de un USM es la temperatura de operación del fluido. Los efectos de la temperatura son principalmente dimensionales sobre el cuerpo del medidor [32] y sobre la



Fig 3. Sistemas que conforman la medición de flujo utilizando ultrasonido

propagación de las ondas en el medio [33]. Este último efecto puede generar desviaciones en la medición afectando el desempeño del USM. Dentro de los trabajos revisados, se destacan [33-34] donde se realizó el análisis y cuantificación de los efectos térmicos sobre el desempeño del USM usando la ecuación de onda.

Adicionalmente en las investigaciones realizadas respecto a las condiciones del fluido también se encuentra un trabajo enfocado al efecto del denominado flujo pulsante sobre el desempeño de los USM. En este se analizan los errores que genera el flujo pulsante en la medición del USM usando el principio de operación descrito en el numeral 2. En particular se analiza el error generado para un USM que utiliza el algoritmo de detección de cruce por cero para la cuantificación del tiempo de tránsito [35].

### 3.4 Transductores

Los transductores constituyen una parte fundamental en el diseño y el desempeño de un USM. Su función es transmitir y recibir las señales acústicas en el fluido a medir de la forma más eficiente (un pulso bien definido y con buena dirección), tratando de evitar la transmisión de acústica al cuerpo del medidor [3], [36]. En este contexto los estudios realizados a través del modelado y la simulación de transductores se han enfocado principalmente a optimizar los diseños en corto tiempo reduciendo la realización de experimentos, la evaluación de nuevos materiales y la comprensión más profunda de la propagación de ondas ultrasónicas en sólidos [37-42]. Existen diferentes modelos para los transductores basados en el principio de piezoelectricidad como los usados en los USM, desde los unidimensionales simples como KLM o el modelo Manson, hasta la solución numérica del modelo completo del transductor descrito por las ecuaciones 5 y 6 que se presentan en [37], [43-44]:

$$[\sigma] = [c^E][S] - [e]E \quad (5)$$

$$D = [e][S] + [\epsilon^S]E \quad (6)$$

En la ecuación 6 se muestra la función para el cálculo del desplazamiento eléctrico  $D$ , causado por polarización con un campo eléctrico  $E$  en un cristal piezoeléctrico con una matriz de constantes dieléctrica  $[\epsilon^S]$ , a una tensión mecánica  $S$ , que también es función del tensor de tensiones lineales  $[S]$  y el modulo piezoeléctrico  $[e]$ . De otra parte la ecuación 5 relaciona el tensor de tensiones mecánicas  $[\sigma]$  con el tensor de rigidez mecánica  $[c^E]$  para un campo eléctrico constante  $E$ , el tensor de tensiones lineales, y la transpuesta del módulo piezoeléctrico.

Cuando se afronta el problema de modelado y simulación de los transductores partiendo de las ecuaciones anteriores, se llega a un sistema de ecuaciones en derivadas parciales que incluyen la ecuación de onda en sólidos. La solución numérica de las ecuaciones resultantes en la mayoría de los casos se obtiene utilizando el método de los elementos finitos [37-42]. De igual forma diversos paquetes de simulación comerciales (por ejemplo Comsol® o Ansys®) que poseen la capacidad de simular transductores lo realizan a través del método descrito [45-46]. Es necesario aclarar que los trabajos relacionados con el modelado y la simulación de transductores no solo están enfocados a USM, sino a múltiples campos de la física y la ingeniería donde la generación de ondas acústicas a través de estos dispositivos es utilizada.

## 4 MÉTODOS Y MODELOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE "USM"

### 4.1 Ecuación de Propagación de Onda

Una de las primeras formas de modelar y simular la propagación de ondas fue a través de la ecuación Helmholtz [47]. Para las aplicaciones relacionadas con los USM, es necesario, mediante la aproximación de una solución numérica, resolver la ecuación con condiciones de frontera definidas para sólidos (transductores y paredes del tubo para el caso de los medidores con transductores exteriores a la tubería

denominados clamp-on [3]) y fluidos (la variable a medir) [19]. La ecuación de onda en su forma más general para sólidos y fluidos se presenta en las expresiones 8 y 9 respectivamente[44]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$\nabla \left( \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - (\lambda_L + 2\mu_L) \nabla \cdot \nabla \psi \right) + \nabla \times \left( \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \lambda_L \nabla \cdot \nabla \psi \right) = 0 \quad (9)$$

Donde:

$$\lambda_L = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (10)$$

$$\mu_L = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (11)$$

En (8) se puede observar la ecuación diferencial que describe la propagación de la presión acústica  $p$  (generada por una onda acústica) en el espacio (a través del laplaciano  $\nabla^2$ ) y en el tiempo ( $t$ ), incluyendo la velocidad del sonido en el medio. De otra parte, la ecuación diferencial 9 describe el comportamiento de las componentes escalar y vectorial del potencial del desplazamiento mecánico  $u$  (ver ecuación 12) causado por la propagación de una onda en un sólido. En esta ecuación aparecen los dos parámetros de Lamé  $\lambda_L$  y  $\mu_L$  que forman una parametrización del módulo de elasticidad para un medio isótropo homogéneo y son función del módulo de Young  $E$  y radio de Poisson  $\nu$  (ecuaciones 11 y 12) [43-44].

$$u = \nabla \psi + \nabla \times \Psi \quad (12)$$

Para el caso de los fluidos es importante mencionar que existen diferentes modelos matemáticos que describen la propagación de las ondas acústicas en fluidos en movimiento. En las aplicaciones relacionadas con modelado y simulación de USMs, los resultados obtenidos con diferentes modelos de la propagación de onda pueden presentar desviaciones bajo diferentes condiciones del perfil de velocidad del fluido [48].

Como ya se mencionó, para realizar la simulación basándose en la ecuación de onda es necesario aproximar numéricamente su solución. Una técnica generalmente utilizada en esta labor es el método de los elementos finitos FEM (por sus siglas en inglés Finite Element Method) [19]. En términos generales, el método consiste en discretizar el dominio o volumen de trabajo en una

serie de pequeños elementos que tienen una geometría simple. El comportamiento de cada elemento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”, obteniendo un conjunto de ecuaciones algebraicas de la cantidad física (presión acústica para el caso de la ecuación 8) en estos nodos [44], [49].

El modelado basado en la ecuación de onda y FEM, es herramienta validada y de amplio uso principalmente para el análisis de los transductores dentro del campo del modelado y simulación de USM [37-42]. Por otro lado, la ecuación de onda y FEM no son muy utilizados para el modelado y simulación de propagación de onda en el fluido debido a sus costos computacionales en las condiciones de aplicación específicas de los USM (longitud de onda corta y volumen de trabajo de grandes dimensiones) [22].

## 4.2 Método de Traza de Rayos

El “Ray-Trace Method” RTM como se denomina en inglés, es un método que forma parte de la denominada teoría de rayos. La teoría de rayos es una noción alternativa de la propagación de ondas acústicas en fluidos en reposo y movimiento. Esta teoría tiene la ventaja de ser más clara y simple que la teoría de ondas. No obstante, la teoría de rayos pura no puede explicar algunos efectos de la propagación de ondas como la difracción [19]. Este método fue presentado por primera vez en 1968 con el fin de predecir el comportamiento acústico de salas de conciertos [50]. En el RTM la energía de una onda acústica es dividida en diferentes elementos (rayos) que se emiten en varias direcciones desde la superficie de la fuente. Los rayos acústicos se propagan a través del medio con la velocidad del sonido, obedeciendo las leyes de la acústica geométrica. La distribución de la energía del sonido en función del tiempo, cuando se utiliza el RTM, se obtiene por integración en todos los rayos que llegan al punto de recepción, y así estimar el tiempo de tránsito de la onda acústica [27].



Fig 4. Diagrama esquemático modelo matemático RTM basado en el diagrama reportado en [19]

Los modelos matemáticos de la teoría de rayos están basados en el concepto de frente de onda (ver Fig 4). Para determinar la trayectoria de un punto en movimiento en un frente de onda que se propaga en un fluido en movimiento se tiene el conjunto de ecuaciones 13 a 15 que se presentan en [19]:

$$\mathbf{b} = \frac{\mathbf{n}}{(c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{n})} \quad (13)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_r}{dt} = \frac{c^2 \mathbf{b}}{1 - \mathbf{V} \cdot \mathbf{b}} + \mathbf{V} \quad (14)$$

$$\frac{d\mathbf{b}}{dt} = -\mathbf{b} \times (\nabla \times \mathbf{V}) - (\mathbf{b} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (15)$$

La ecuación 14 permite obtener la trayectoria que sigue cada rayo desde la fuente puntual en función de la velocidad del fluido, la velocidad del sonido en el medio y el vector lentitud de onda  $\mathbf{b}$ . La ecuación 13 muestra la relación entre el vector lentitud de onda con la velocidad del fluido, la velocidad del sonido en el medio y el vector normal al frente de onda  $\mathbf{n}$ . Por último la ecuación 15 permite calcular el cambio del vector  $\mathbf{b}$  en el tiempo debido a la velocidad del fluido [19].

Los resultados obtenidos con este método de modelado han sido validados a través de la comparación con resultados de pruebas experimentales y/o datos obtenidos mediante otros métodos y modelos. En particular para el caso de las validaciones con datos experimentales es importante tener en cuenta que las condiciones del fluido de prueba sean tenidas en cuenta en el modelo, por ejemplo el perfil de velocidad [13], [17], [23], [51].

## 4.3 Método de la Integral de Helmholtz-Traza de Rayos HIRM

El HIRM (por sus siglas en inglés Helmholtz-Integral-RayTracing Method) es un método para el modelado y la simulación de la propagación de ondas

acústicas en medios en movimiento. Este método publicado en año 2004 permite el modelado y la simulación de la propagación de ondas en medios en movimiento con menores requerimientos computacionales que la resolución numérica de la ecuación de onda utilizando FEM [52]. Comparado con el RTM el HIRM presenta la ventaja de tener en cuenta los fenómenos ondulatorios que la acústica de rayos omite [52], aunque su complejidad de implementación es mayor.

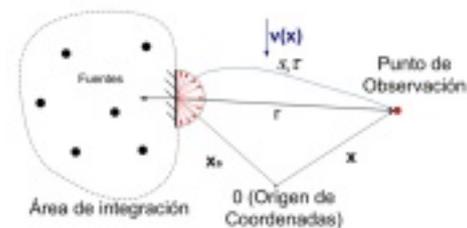


Fig 5. Integral de Helmholtz para medio estático y en movimiento presentado en [52], traducido por el autor

El HIRM se basa en la combinación de la técnica de RTM y la integral de Helmholtz derivada de la función de Green generalizada. La integral de Helmholtz puede interpretarse como la expresión matemática del principio de Huygens: El campo acústico en un punto determinado se obtiene mediante la superposición de ondas elementales generadas por fuentes primarias a lo largo de una superficie en torno al punto. Esta interpretación es la idea fundamental del método, la propagación de las ondas elementales de cada fuente primaria se modela por medio de RTM, mientras que la estructura de la integral de Helmholtz se mantiene sin cambios. En la Fig 5 se puede observar cómo cambia la trayectoria original  $r$  (medio estático) a la trayectoria  $s$  (medio en movimiento), la cual es obtenida con el RTM. El HIRM parte de modificar la longitud de la trayectoria  $r$  en la función de Green  $G(X_0 | X_s)$  para fuente puntual ubicada en la posición  $X_s$ , un observador ubicado en  $X_0$  y un medio estático (ecuación 16), por la trayectoria para un medio en movimiento  $s$  y su respectivo tiempo de viaje  $t$ . Realizados los cambios se obtiene la función de Green para un medio en movimiento  $\tilde{G}(X_0 | X_s)$  (ecuación 18). Por último se reemplaza la

G por  $\tilde{G}$  en integral de Helmholtz (ecuación 17), obteniendo la ecuación 19 con cual se modela la propagación de ondas acústicas en medios en movimiento [19].

$$G(\mathbf{x}_s|\mathbf{x}_r) = \frac{e^{-i\omega t}}{r} \quad (16)$$

$$\psi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \iint_A \left( \psi \frac{\partial G}{\partial n_s} - G \frac{\partial \psi}{\partial n_s} \right) dA + \eta(\mathbf{x}) \quad (17)$$

$$\tilde{G}(\mathbf{x}) = \frac{e^{-i\omega t}}{s} \quad (18)$$

$$\psi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \iint_A \frac{e^{-i\omega t}}{s} \left( -\frac{1}{s} \frac{\partial \psi}{\partial n_s} \psi + \frac{\partial \tau}{\partial n_s} \psi - \frac{\partial \psi}{\partial n_s} \right) dA \quad (19)$$

La validación del HIRM se realizó comparando contra resultados obtenidos utilizando FEM para un ejercicio teórico. El ejercicio consistió en un pistón vibrante que genera ondas acústicas en dirección perpendicular a un fluido en movimiento [52]. Adicionalmente se realizó una validación usando datos experimentales para la propagación de ondas acústicas en agua, al interior de una tubería [53].

#### 4.4 Modelo Matemático del USM

Uno de los métodos utilizados para estudiar los diferentes aspectos mencionados en el numeral 3 es el análisis numérico del modelo matemático del principio de operación de los USM presentado en el numeral 2). En particular lo que se realiza es incluir el efecto del fenómeno a estudiar en alguno de los parámetros del modelo matemático. Por ejemplo se incluye el efecto del perfil de velocidad en el vector velocidad del fluido [33], o efecto del flujo pulsante en el tiempo de tránsito [35].

#### 5 CONCLUSIONES

En el presente artículo se llevó a cabo una revisión de los modelos y métodos más utilizados en el modelado y simulación de USM, junto con los principales parámetros de operación y diseño que han sido estudiados y analizados a través de modelado y simulación. Dentro de los modelos y métodos se destaca el uso del RTM para el modelado y la simulación de las ondas en el fluido. El RTM tiene como ventaja su menor complejidad de implementación comparada con los

métodos basados en la ecuación de onda. Adicionalmente presenta buenos resultados en especial para los trabajos relacionados con el perfil de velocidad del fluido. No obstante presenta algunas limitantes debidas a la omisión de algunos fenómenos ondulatorios. Dentro de este contexto en el año 2004 se publicó un nuevo método de modelado de la propagación de ondas en el fluido denominado HIRM. El HIRM combina el RTM con la integral de Helmholtz con el fin incluir los fenómenos ondulatorios que son omitidos por el RTM puro. La aplicación más relevante del HIRM, consistió en el modelado y simulación de un USM tipo clamp-on para medición de líquidos, donde se obtuvieron buenos resultados comparados con datos experimentales.

Por otra parte para los transductores y la propagación de ondas en la pared de la tubería para el caso de los clamp-on, se destaca el uso de la ecuación de onda con FEM como método de resolución numérica. Esta forma de modelado y simulación de la propagación de las ondas acústicas (ultrasónicas en el campo de USM) en sólidos (transductores y pared del tubo), es un método bien establecido y ha mostrado resultados válidos comparados con datos experimentales y valores teóricos. Del mismo modo, en los software comerciales para modelado y simulación de ondas acústicas en transductores y sólidos, es común el uso de FEM para la resolución numérica de la ecuación de onda.

En resumen se puede observar que el modelado y la simulación son herramientas que han sido de gran utilidad en estudio de los diferentes aspectos que afectan el desempeño de los medidores ultrasónicos para volumen y caudal de fluidos. El objetivo final que se debe alcanzar con ayuda de estas herramientas (modelado y simulación), no solo debe ser el de mejorar el diseño de los medidores, sino también conocer y cuantificar los aspectos que afectan esta tecnología, para que puedan ser tenidos en cuenta con el fin de realizar mediciones correctas en las diferentes condiciones de operación en las que los medidores ultrasónicos son utilizados.

#### REFERENCIAS

- [1] Endress+Hauser Flowtec AG, "Medición de Caudal", Endress+Hauser Flowtec 2005.
- [2] The Instrumentation, Systems, and Automation Society ISA, "Flow Measurement", D. W. Spitzer Editor 2001.
- [3] R. Baker, "Flow measurement handbook", Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [4] L.C. Lynnworth and Y. Liu, "Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005", Ultrasonics Vol 44, pp.1371-1378, 2006.
- [5] M. Yamamoto et Al, "Ultrasonic Flow Quantity Apparatus", US Patent 3329017, 1967.
- [6] V. Klooster et Al, "Ultrasonic Flowmeter", US Patent 20080141786A1, 2008.
- [7] J. Drenthen, M. Kurth and M. Vermeulen, "A Novel Design of a 12-Chord Ultrasonic Gas Flow Meter", KROHNE New Technologies, 2009.
- [8] J. Drenthen, M. Kurth and M. Vermeulen, "Verification of ultrasonic gas flow meters", KROHNE New Technologies, 2009.
- [9] V. Herrmann and T. Dietz, "Low Pressure Gas Measurement Using Ultrasonic Technology", SICK MAIHAK, 2009.
- [10] V. Herrmann, M. Wehmeier, T. Dietz, R. Kramer and B. Mickan, "A New Low Pressure Calibration Facility Using 8-Path Ultrasonic Meters as Working Standards", SICK MAIHAK, 2006.
- [11] P. Martinsson, "Characterization of Energy Gases by Ultrasound – Theory and Experiments", Ph.D. Thesis, University of Lulea Sweden, 2004.
- [12] P. Martinsson and J. Carlson, "Investigating the Feasibility of Using Principal Component Analysis for Ultrasonic Classification of Gas Mixtures", IEEE Ultrasonic Symposium, 2003.
- [13] F. Weber, "Ultrasonic Beam Propagation in Turbulent Flow", Worcester polytechnic institute. Doctor of Philosophy Thesis. Worcester, Massachusetts, EEUU, 2003.
- [14] T. Yeh and G. Mattingly, "Computer Simulation of Ultrasonic Flow Meter Performance in Ideal and Non-Ideal Pipeflows", ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, 1997.
- [15] M. Willatzen and H. Kamath, "Nonlinearities in ultrasonic flow measurement", Flow Measurement and Instrumentation Vol. 19 pp. 79–84, 2008.
- [16] Groupe Europeen de Recherches Gazieres GERG, "Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II", 2004.
- [17] N. Temperly, "Optimisation of an Ultrasonic Flow Meter Based on Experimental and Numerical Investigation of Flow and Ultrasound Propagation", University of New South Wales. Doctor of Philosophy Thesis. Sydney, Australia, 2002.
- [18] M. Dell'Isola, M. Cannizzo and M. Diritti, "Measurement of High-Pressure Natural Gas Flow

- Using Ultrasonic Flowmeters”, Measurement Vol. 20, No. 2, pp. 75-89, 1997.
- [19]M. Bezděk, “Numerical Modeling of Ultrasonic Flowmeters: A Coupled Finite-Element, Boundary-Integral Method”, Saarbrücken Germany: VDM Verlag, 2008.
- [20]American Gas Association AGA, “Report N° 9 Measurement of gas by multipath ultrasonics meters”, Second Edition, 2007.
- [21]American Petroleum Institute API “Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 5 Section 8-Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flow Meters Using Transit Time Technology”, First Edition, 2005.
- [22]M. Bezděk, H. Landes, A. Rieder and R. Lerch, “A Coupled Finite-Element, Boundary-Integral Method for Simulating Ultrasonic Flowmeters”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 54, pp. 636-646, 2007.
- [23]Symposium T. Yeh and G. Mattingly, “Ultrasonic Technology: Prospect for Improving Flow Measurement and Standars”, Flow Symposium National Institute of Standars and Technology NIST, USA 1999.
- [24]M Rychagov and S Tereshchenko, “Multipath Flowrate Measurements of Symmetric and Asymmetric Flows”, Inverse Problems, Vol 16, pp. 495-504, 2000.
- [25]P. Moore, G. Brown and B. Stimpson, “Ultrasonic Transit-time flowmeters Modeled with Theoretical Velocity Profiles: Methodology”, Measurement Science and Technology, Vol 11, pp. 1802-1181, 2000.
- [26]K. Frøysa, P Lunde and M Vestrheim, “A Ray Theory Approach to Investigate the Influence of Flow Velocity Profiles on Transit Times in Ultrasonic Flow Meter for Gas and Liquid”, 19th International North Sea Flow Measurement Workshop, 2001.
- [27]H. Koehnner and A. Mellig, “Numerical Simulation of Ultrasonic Flowmeters”, Acustica, Vol 86, pp.39-48, 2000.
- [28]P. Moore, U. Piomolli, A. Jonson and P. Espina, “Simulation of Ultrasonic Transit Time in a Fully Developed Turbulent Flow Using a Ray-Tracing Method”, North Sea Flow Measurement Workshop, 2002.
- [29]T. Yeh and P. Espina, “Special Ultrasonic Flowmeters for In-Situ Diagnosis of Swirl and Cross Flow” Fluid Flow Group of National Institute of Standards and Technology NIST, USA 2001.
- [30]C. Ruppel and F. Peters, “Effects of Upstream Installations on the Reading of an Ultrasonic Flowmeter”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol 15, pp. 167-177, 2004.
- [31]C. Carlander and J. Delsing, “Installation Effects on an Ultrasonic Flow Meter With Implications for Self Diagnostics”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol 11, pp. 109-122, 2000.
- [32]P. Lunde and K. Frøysa, “Handbook of Uncertainty Calculations Ultrasonic Fiscal Gas Metering Stations”, The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (NFOGM) and The Norwegian Petroleum Directorate (NPD), 2001.
- [33]M. Willatzen, “Temperature Gradients and Flow-Meter Performance”, Ultrasoncis, Vol 39, pp. 383-389, 2001.
- [34]M. Willatzen, “Ultrasonic Flowmeters: Temperature Gradients and Transducer Geometry Effects”, Ultrasonics, Vol 41, pp. 105-114, 2003.
- [35]J. Berrebi, P. Martinsson, M. Willatzen, and J. Delsing, “Ultrasonic Flow Metering Errors due to Pulsating Flow”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol 15, pp. 179-185, 2004.
- [36]Instroment, “Ultrasonic GasMeters Handbook”, 2002.
- [37]R. Lerch, “Finite Element Analysis of Piezoelectric Transducers” IEEE Ultrasonics Symposium, 1988.
- [38]R. Ramesh , C. Prasad, T. Kumar , L. Gavane and R Vishnubhatla, “Experimental and Finite Element Modelling Studies on Single-Layer and Multi-Layer 1-3 Piezocomposite Transducers”, Ultrasonics, Vol 44, pp. 341-349, 2006.
- [39]H. Li, C. Chonga, H. Lai-Wah, and P. Chou-Kee, “Finite Element Analysis on 1-3 Piezocomposite Rings for Ultrasonic Transducer Applications” Ceramics International Vol 30, pp. 1827-1830, 2004.
- [40]W. Loveday, “Analysis of Piezoelectric Ultrasonic Transducers Attached to Waveguides Using Waveguide Finite Elements”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 54, pp. 2045-2051, 2007.
- [41]R. Lerch, “Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements” IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 37, pp. 233-247, 1990.
- [42]W. Montealegre, E. Nelly, F. Buiocchi and J. Adamowski, “Modelling of FGM Piezoelectric Transducers Using Graded Finite Element Concept”, ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol 3, pp. 552-561, 2008.
- [43]J. Cheeke, “Fundamental and Applications of Ultrasonic Waves”, Florida: CRC Press LLC, 2002.
- [44]M. Kaltenbacher, “Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators”, Universität Erlangen ,LS Sensorik, Springer 2007.
- [45]J. Dunec, “Multiphysics Simulation of Acoustics”, Comsol Web Seminar, 2009.
- [46]S. J. Ippolito, K. Kalantar-zadeh, D. A. Powell and W. Wlodarski, “A 3-Dimensional Finite Element Approach for Simulating Acoustic Wave Propagation in Layered SAW Devices”, IEEE Ultrasonics symposium, 2003.
- [47]M.G. Blytha and C. Pozrikidis, “A Comparative Study of the Boundary and Finite Element Methods for the Helmholtz Equation in Two Dimensions”, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol 31 pp. 35-49, 2007.
- [48]M. Willatzen, “Flow Acoustics Modelling and Implications for Ultrasonic Flow Measurement Based on the Transit-Time Method”, Ultrasonics, Vol 41 pp. 805-810, 2004.
- [49]M. J. Crocker, “Handbook of Acoustics”, New York: John Wiley & Son, 1998.
- [50]P. Svensson, “The Early History of Ray Tracing in Room”, Norwegian University of Science and Technology, Research Report, Trondheim, Norway, 2008.
- [51]S. Manneville, C. Prada, M Tanter, and M. Fink, “Ultrasound Propagation Through a Rotational Flow: Numerical Methods Compared to Experiments”, Journal of Computational Acoustics, Vol. 9, pp. 841-852, 2001
- [52]M. Bezděk, A. Rieder, H. Landes, R. Lerch and W Drahm, “A Novel Numerical Method for Simulating Wave Propagation in Moving Media”, IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 934-937, 2004.
- [53]M. Bezděk, A. Rieder, H. Landes, R. Lerch and W Drahm, “A Novel Boundary Integral Formulation for Acoustic Radiation in a Nonuniform Flow: Coupling to FEM and Applications”, IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.

# Casos de ÉXITO

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 empresas 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.

**Escríbanos**

Si desea publicar un artículo,  
escriba al correo  
[revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)  
o visite nuestra página web  
[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

Transportadora de Gas Internacional S.A. E.S.P. (TGI)

# Un Caso de Éxito

Aprovechando las ventajas que ofrece la CT + i

Entrevista al Ingeniero Fredi López, Gerente de Infraestructura de TGI S.A. ESP



**1) *Ingeniero Fredi López, Usted es el Gerente de Infraestructura de TGI S.A. ESP y tiene a su cargo la Operación y el Mantenimiento de la más extensa y compleja red de gasoductos de Colombia, ¿Cómo es el proceso de gestionar un reto de tales proporciones?***

Es una responsabilidad muy grande. En la actualidad, y gracias a la masificación del gas a todo nivel, el gas natural es un energético vital para la sociedad y la industria.

Transportar el gas desde los centros de producción hasta donde nuestros Remitentes lo requieran sería una labor imposible de ejecutar si no se contara con un recurso humano de alta calidad técnica, comprometido con una ejecución responsable de los procesos, no solo desde el punto de vista de la excelencia operacional de los mismos sino también desde la perspectiva ambiental, de seguridad industrial y de salud ocupacional.

**2) *¿Cómo se ha involucrado TGI en actividades de I+D, cuál ha sido su trayectoria?***

TGI es una empresa joven. No obstante, acercándonos a sus 3 años de operación, hemos adelantado iniciativas de I+D, tanto a nivel creativo como de asimilación, predominantemente en las áreas de integridad y de metrología.

Desde el 2007 hemos suscrito convenios con instituciones colombianas del sector de la ciencia y la tecnología, reconocidas por sus trabajos de alta calidad y la vanguardia de sus desarrollos e investigaciones.

En el caso de integridad, contamos con un convenio vigente con la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) para el monitoreo de la corrosividad de las corrientes gaseosas del sistema de transporte de TGI incluyendo la participación de la empresa en el programa estratégico para el manejo integral de la corrosión aprobado por COLCIENCIAS.

De manera similar, en metrología acabamos de culminar un convenio con el CDT de GAS para el desarrollo de actividades tecnológicas en el campo de la metrología, tendientes a lograr la mayor confiabilidad en la medición del gas en el sistema de transporte de TGI. Actualmente se está suscribiendo un nuevo capítulo con el CDT de GAS para el fortalecimiento y optimización de los procesos de medición de gas natural y el balance.

**3) *En este sentido, ¿Cuáles han sido los mayores éxitos obtenidos?***

Dentro de la cultura organizacional, incursionar en actividades de I+D le aporta a la organización un potencial enorme en términos del conocimiento y el aprendizaje, paradójicamente estos dos aspectos son intangibles por naturaleza pero constituyen el insumo necesario para innovar a futuro.

En este orden de ideas, consideramos que en el ámbito de la I+D los logros y éxitos se plasman en artículos que representan la síntesis de las investigaciones y los desarrollos tecnológicos ejecutados, en la novel trayectoria de TGI se destacan dos trabajos:

- En materia de integridad, el trabajo “Agrietamiento inducido por el medio”, desarrollado en asocio con la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC). Este trabajo fue galardonado con el Premio a la Mejor Ponencia del One Day Corrosion Show 2009, evento de alta calidad organizado por la Asociación Colombiana de Ingenieros de Corrosión NACE – Colombia.
- En metrología, el artículo “Application of Uncertainty Analysis to Balance Optimization of Fluid Flow Networks” fue puesto a consideración del Comité Técnico del 7th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM), siendo aprobado para su presentación y para formar parte de las memorias del Simposio, el cual se celebró en la ciudad de Anchorage (Alaska), presentándose 54 trabajos originales, provenientes de 19 países.

**4) *¿Qué ventajas ha identificado al desarrollar actividades cooperativas de I+D en asocio con instituciones nacionales reconocidas en el ámbito científico y tecnológico?***

Es realmente difícil medir todo aquello que proporciona ventajas estratégicas. Un aspecto claro en el orden productivo actual es que si no se investiga no es posible consolidar un liderazgo. Involucrarse en actividades cooperativas de I+D aporta a las empresas una visión diferente al día-día, de manera que sus actividades sufran una transición hacia la toma del conocimiento como base productiva.

Como entidad beneficiaria de convenios de base tecnológica, recibimos soluciones a problemas críticos que demandan una gran capacidad de análisis, generación de nuevos conocimientos, investigación aplicada y desarrollos tecnológicos que en muchos casos requieren de infraestructura especializada. Adicional al beneficio directo, somos conscientes de

que al trabajar en asocio con instituciones nacionales de I+D se apoya directamente el desarrollo del país, tanto en materia de ciencia y tecnología, como desde la perspectiva académica, representando un valioso aporte a la sociedad al fortalecerse sus capacidades.

Por último, reconocemos que el estado valora las inversiones en desarrollo científico y tecnológico y que es posible obtener deducciones tributarias, las cuales contribuyen a la promoción del trabajo cooperativo con las instituciones científicas y tecnológicas.

**5) *En el caso específico de la metrología, ¿cuál es su percepción del estado del sector gas en esta materia?***

En Colombia se han dado desarrollos importantes, algunos de ellos muy interesantes. No puede negarse que existe un notable retraso con respecto al entorno internacional. El estado de la metrología varía significativamente a lo largo de la cadena del gas, incluso entre empresas del mismo eslabón. Creemos que en términos generales la radiografía del sector gas en materia metrológica puede hacerse a partir de la relación de las empresas con la tecnología, pudiendo discriminarse en: empresas que han adquirido tecnologías, en empresas que han adaptado tecnologías y, por último, en empresas que han desarrollado sus propias tecnologías.

La mayoría se enmarcan dentro de la primera categoría y como consecuencia sufren una fuerte dependencia, en este caso el conocimiento está en un segundo plano. En el sector de adaptación se pueden observar desarrollos interesantes pero que generalmente le apuntan al cumplimiento de metas de corto y mediano plazo en materia metrológica. En el último sector se enmarcan empresas que evidencian una fuerte relación entre sus metas estratégicas corporativas y los planes de acción que desarrollan para lograr las mismas, en estos casos tienden hacia el equilibrio entre el conocimiento y la infraestructura.

**6) *Actualmente existen múltiples normativas técnicas, así como regulaciones aplicables a las mediciones de gas natural, tanto nacionales como extranjeras, ¿asegurar el cumplimiento de las mismas es suficiente para obtener resultados exitosos?***

La respuesta es no, es decir, no basta con cumplir exclusivamente las normas técnicas y la regulación para asegurar el éxito. La experiencia en TGI ha mostrado que en el caso de las normas técnicas hay muchos aspectos que no son reglamentarios o normativos, sino que se presentan a manera de recomendaciones o sugerencias. Creemos que en la

medida en que estas recomendaciones o “buenas prácticas metrológicas” se implementen, se obtendrán mejoras sobre los procesos de medición y -por lo tanto- un efecto positivo directo sobre la incertidumbre de medición y la confiabilidad de los sistemas.

En el caso de la regulación, creemos que existen algunos aspectos que deben mejorarse pues no corresponden al estado del arte en materia de metrología legal aplicable a medición de gas. En el 2007 TGI le solicitó al ICONTEC trabajar en el desarrollo de una normativa aplicable a grandes volúmenes de gas, proponiéndole crear un comité para avanzar en el tema, iniciando sobre la base de la OIML R 140 “Measuring systems for gaseous fuel”, la cual se tradujo al español y se hizo una primera reunión en el 2008. Con esta iniciativa se pretendía dar un cambio trascendental en el esquema regulatorio aplicable a la medición de gas, mediante la adopción de un estándar internacional. En la primera reunión se tuvo una gran asistencia pero finalmente las empresas no continuaron apoyando el proyecto.

En conclusión, podría afirmarse que los resultados exitosos son una conjunción de: personal de altísimo nivel técnico y excelencia en prácticas y políticas corporativas.

**7) *¿Cuál es la visión de TGI en materia de metrología?***

Dentro de la visión de TGI está incluida la obtención de reconocimiento por su gestión de clase mundial. En materia de metrología, existe una relación directa entre el tipo de empresa y el nivel con el que asume sus necesidades y retos en materia metrológica. Indiscutiblemente, las empresas de clase mundial integran elementos de I+D+i en sus procesos de medición, de esta forma, para poder cumplir con su visión desde la perspectiva metrológica TGI ha venido incorporando estos elementos en su gestión operativa y del mantenimiento, así como en los proyectos que actualmente lidera, tanto en Colombia como en el exterior.

**8) *¿Considera Usted que Colombia cuenta con fortalezas en personal e infraestructura metrológica, que le permitan al sector gas desarrollarse a un nivel competitivo respecto al entorno internacional?***

Colombia cuenta con un gran potencial humano, lo cual es el recurso más valioso para el desarrollo y el avance de la ciencia y la tecnología, podría decirse que es un intangiblepreciado. Particularmente en materia de metrología, la Corporación CDT de GAS cuenta con unas fortalezas importantes en cuanto a su recurso

humano e infraestructura.

Sobre la infraestructura metrológica, en términos generales existen vacíos importantes que deben ser superados satisfactoriamente para contar con una autosuficiencia tecnológica a nivel nacional, como es el caso de la metrología analítica (calidad de gas) y las calibraciones bajo condiciones de semejanza desde el punto de vista de la mecánica de los fluidos. Creemos que la autosuficiencia tecnológica es imprescindible para que cualquier sector se desarrolle a nivel competitivo.

Las empresas de transporte y las distribuidoras colombianas han llevado a cabo proyectos de gran impacto para el sector y la sociedad, como es el caso de las unidades para verificación metrológica de medidores de gas en el sector de distribución y el laboratorio de PROMIGAS para la calibración de medidores con gas natural a una presión máxima de 285 psi (19,65 bar).

**9) Con respecto al sector gas, ¿hacia cuáles tópicos específicos considera que deben encaminarse los esfuerzos en materia de ciencia, tecnología e innovación en Colombia?**

- Metrología analítica (calidad de gas)
- Implementación de sistemas inteligentes e inteligencia artificial en la operación de redes
- Desarrollo de tecnologías en el campo de las herramientas inteligentes para la inspección de tuberías
- Almacenamiento y Peak-Shaving
- Gas Natural Licuado
- Captura, Transporte, Almacenamiento y Transformación de CO<sub>2</sub> proveniente de la combustión del gas natural
- Reducción de emisiones mediante la adición de hidrógeno al gas natural

**10) Recientemente TGI participó en el Séptimo Simposio Internacional de Medición de Flujo de Fluidos, con un artículo sobre la aplicación de análisis de incertidumbre a la optimización de balances. ¿Cuál ha sido la experiencia de TGI con la aplicación de dicha metodología?**

El control de los balances sobre una red compleja como la que opera y mantiene TGI es un reto corporativo de grandes proporciones. La génesis de la metodología se aloja en la necesidad de dar respuesta a la pregunta ¿Cuánto mejora el balance si ejecutamos determinada o determinadas acciones?, sobre este interrogante se fueron sumando elementos adicionales de gran relevancia como: ¿Hasta qué nivel

debe TGI proyectar sus inversiones de mejora en materia metrológica? La conjunción de elementos técnicos y económicos produjo la metodología de optimización planteada en el artículo. Su desarrollo tomó aproximadamente un año, tiempo necesario para recolectar las evidencias principales y madurar la estrategia tecnológica.

Desde el inicio de operaciones de TGI se ha observado una evolución satisfactoria del índice de pérdidas, pero no puede afirmarse categóricamente que todo ha sido gracias a la implementación de la metodología, dada la complejidad de la red y considerando que se han ejecutado acciones de mejora paralelas con el mismo propósito. No obstante, en términos económicos, su filosofía ha sido clave para establecer las mejoras a realizar bajo un precepto de costo-beneficio.

Actualmente estamos trabajando sobre los lineamientos dados por el modelo planteado en la metodología y esperamos llegar pronto al punto de control para evaluar los resultados sobre una base técnicamente soportada.

**11) Por último, ¿está Usted de acuerdo que “para mejorar hay que aprender a medir”?**

Por supuesto. Medir bien guarda una relación directa con el conocimiento de los procesos y sus fenómenos asociados.

En la medida en que se avanza en el proceso de aprendizaje es necesario dejar a un lado conocimientos preestablecidos para poder dejar la vía libre a nuevos y mejores procedimientos y prácticas.

En este sentido, nos enfrentamos a un ciclo retroalimentado pues entre más aprendemos encontramos problemas más diversos y especializados, demandando un sentido crítico para establecer la conveniencia de las acciones de mejora, el cual se fundamenta a su vez en el conocimiento que se ha apropiado a partir del mensurando.



# Instrumento de Apoyo a la Innovación y el Desarrollo Tecnológico

El Estado colombiano, a través de COLCIENCIAS apoya a las empresas colombianas interesadas en el fortalecimiento de su competitividad; mediante los siguientes instrumentos

## Portafolio de Instrumentos

### Para Incrementar la FORMULACIÓN DE PROYECTOS

- Misiones Tecnológicas
- Vinculación de Investigadores
- Estructuración de Proyectos: FINBATEC
- Formación en Gestión de la Innovación
- Programa IBEROEKA
- Capacitación en el Exterior de Gerentes Innovadores y Personal Vinculado a al Innovación en las Empresas

### Para MOVILIZAR INVERSIÓN Hacia Proyectos

- Incentivar al inversionista Privado o Rentabilidad:
  - Deducción Tributaria
  - Exenciones de Renta
  - Incentivos o Riesgos
  - Riesgo Tecnológico Compartido
- Acceso a Capital
  - o Inversión Pública
    - Riesgo Tecnológico Compartido
    - Crédito (BANCOLDEX - FNG)
    - Cofinanciación
    - Recuperación Contingente
  - o Inversión Privada

### Para Incrementar la Capacidad de Éxito en EJECUCION DE PROYECTOS

- Misiones Tecnológicas
- Vinculación de Investigadores
- Cofinanciación: Ejecución de Proyectos por parte de Universidades y CDT
- Construcción de Oferta de servicios Técnicos y Tecnológicos para la Innovación:
  - Calidad
  - Propiedad Intelectual
  - Centros y Laboratorios
  - Vinculación de Jóvenes Investigadores u Empresas
  - Financiación de Patentes o tecnologías

#### MAYOR INFORMACION.

Dirección de Desarrollo Tecnológico e Innovación  
<http://www.colciencias.gov.co/web/empresas/home>  
Tel 57 – 1 – 6258480 Ext. 2316  
Bogotá D.C.

# Metrología

## a su Alcance

El desarrollo tecnológico de un país está directamente relacionado con la disponibilidad y la calidad de la infraestructura utilizable, por ello concientes de que Colombia aún se encuentra en etapa de fortalecimiento de su infraestructura tecnológica alineada con estándares internacionales, a partir de este momento en esta nueva sección, se presentarán infraestructuras disponibles a nivel nacional así como a nivel internacional que merezcan destacarse porque pueden aportar a la transformación productiva nacional.

### Escribanos

Si desea publicar un artículo,  
escriba al correo  
[revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)  
o visite nuestra página web  
[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

# CORPORACIÓN CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS

*10 AÑOS: Ayer, Hoy y Mañana Aplicando la Metrología*

**Resumen:** El CDT de GAS de Colombia, cumple 10 años de existencia, por esta razón se ha preparado este artículo que busca hacer un paralelo entre su pasado, el presente y la estrategia de futuro que deberá impactar fuertemente en nuestra sociedad. El documento se preparó con base en la recopilación de las experiencias del equipo de trabajo, y en mi caso, habiendo tenido el placer de disfrutarlas vivamente, desde cinco (5) años antes de su creación cuando me desempeñaba como trabajador activo de la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL. Adicionalmente consideré clave, hacer mención de algunas ideas muy especiales que escribió el Dr. Warren Bennis en su libro: "De la Autoridad Controlada al Liderazgo Colaborador". Éste contribuyó enormemente a la claridad de los conceptos expresados. El documento persigue en su interior, colocar a disposición de la sociedad colombiana, las potencialidades institucionales, y llamar la atención para que, a la mayor brevedad posible, se haga de la metrología, la herramienta fundamental para la transformación productiva nacional.

HENRY ABRIL BLANCO ([habril@cdtdegas.com](mailto:habril@cdtdegas.com))  
Corporación CDT de GAS - Colombia



## 1 UN POCO DE NUESTRA HISTORIA

La Corporación CDT de GAS fue creada el 19 de diciembre de 1999 en la ciudad de Bucaramanga como una entidad de derecho privado y participación mixta, de carácter Científico y Tecnológico, sin ánimo de lucro, con patrimonio propio dentro del marco legal de la Ley 29 de febrero de 1990, Ley Marco de Ciencia y Tecnología. [1]

El CDT de GAS ha experimentado dos etapas claves: la primera (2000-2002) como entidad de carácter virtual en la cual se destaca el resultado del estudio prospectivo del sector gas 2002 – 2015, realizado con recursos de COLCIENCIAS-SENA. Este estudio, que puede verse en detalle en la página WEB [www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com), fijó la ruta de navegación de la corporación.

No	TOPICO TECNOLÓGICO
1.	Uso del gas natural como combustible vehicular
2.	Control de calidad de partes y equipos utilizados en la cadena del gas
3.	Medición de gas
4.	Administración, planeación, gestión, diseño, construcción, operación y mantenimiento de gasoductos y redes.
5.	Optimización del procesamiento y tratamiento de gas
6.	Calentadores de agua a partir del uso del gas
7.	Uso del gas en procesos Industriales del acero, papel, cemento, cerámica, vidrio, alimentos, textiles, etc.

Tabla 1 Priorización de tópicos resultantes del estudio prospectivo del sector gas, 2002 - 2015

Fuente: Estudio Prospectivo, CDT de GAS 2003 [2]

La segunda etapa (2003 hasta nuestros días) ha estado caracterizada por decisiones estratégicas tal como el aprovechamiento de los recursos competidos provistos por COLCIENCIAS-SENA para consolidar la Infraestructura Metrológica con el fin de brindar trazabilidad a las mediciones de gases en Colombia, logrando generar competencias de alto nivel en el tercer tópico detectado durante el estudio prospectivo.

El CDT de GAS nació hace 10 años -30 años después del surgimiento del sector gas- y al encontrar a su paso empresas fortalecidas en lo operativo, en lo financiero, en lo económico e inclusive en lo político, "romper el muro", ha sido quizás la tarea más difícil de cumplir y por ello nuestro posicionamiento se ha hecho lento... *afortunadamente firme y sostenible*, con un incremento del conocimiento constante y con el gran aporte, del soporte para el cambio de cultura metrológica en Colombia. Sin embargo y para nuestra tranquilidad, en el sector gas y en general en todos los sectores productivos nacionales, aún falta mucho por hacer, por ahora en lo tecnológico y si se logra establecer la sinergia y en especial la confianza, quizás en el mediano plazo, hasta en lo científico también se impactará.

**¡A VECES SE TRABAJA TODA UNA VIDA PARA AVANZAR APENAS UN METRO, PERO ASÍ CRECIERON LAS GRANDES MONTAÑAS, AVANZANDO SIGLO A SIGLO, METRO A METRO!!!**

## 2 CORTA EXPLICACIÓN DE LA RUTA EMPRENDIDA

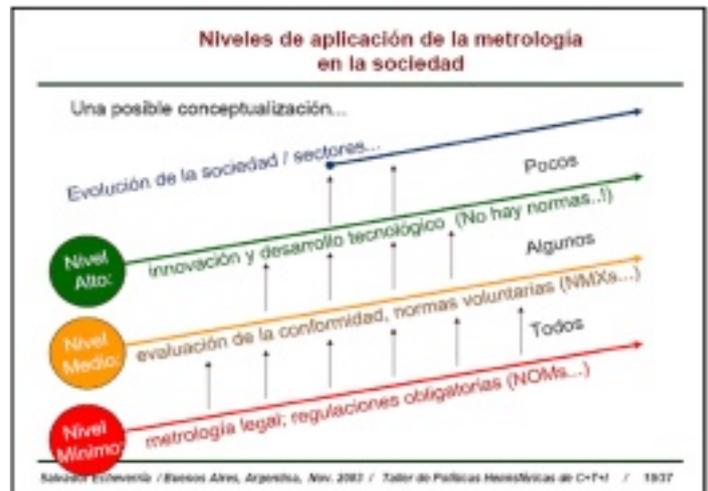


Fig. 1. Niveles de Aplicación de la Metrología en la Sociedad.

Fuente: Salvador Echeverría - CENAM

Como lo explicó el Dr. Salvador Echeverría en el taller de políticas hemisféricas realizado en 2003 en Buenos Aires, la evolución de la sociedad en cualquier país, está directamente relacionada con los niveles de aplicación de la metrología, por ello considero que en países, donde ésta se aplica en su nivel mínimo (como en la región andina, por ejemplo), su papel tecnológico y su desarrollo social será muy limitado. En razón a lo anterior, el direccionamiento del CDT de GAS con un foco claro, que beneficiara a la sociedad colombiana, fue tomado en el seno del Consejo Directivo: se realizarían todos los esfuerzos para consolidar en Colombia un programa tecnológico que permitiera dotar al país de conocimiento en el campo de la metrología de los fluidos.

Al respecto de la importancia de la metrología, en agosto de 2009 el Dr. Oscar Harasic, Secretario Ejecutivo de la Organización de Estados Americanos OEA, escribía un artículo denominado METROLOGÍA, INNOVACIÓN Y COMPETITIVIDAD [3], donde mencionaba: *"a través de la historia no ha habido desarrollo tecnológico que se haya logrado, sin una base de mediciones confiable. La metrología, que es la ciencia de las mediciones, cuenta con instrumentos cada vez más sofisticados que son producto de constantes innovaciones tecnológicas, y que generalmente son provenientes de los países con alto grado de desarrollo"*.

El mensaje del Dr. Harasic, invita a la comunidad internacional a considerar, con sumo cuidado, la gran importancia de aplicar la metrología en los procesos productivos, pero adicionalmente genera una alerta acerca de tener en cuenta, *que los esfuerzos que se realicen sin la metrología, seguramente no generarán el impacto esperado*: en Colombia por ejemplo, para el desarrollo de programas nacionales que impactan positivamente sobre el medio ambiente y para la naciente industria de los biocombustibles sería muy conveniente ponerla en práctica, pero más aún, estoy seguro que es fundamental aplicarlo, a todos los procesos que arrojan resultados de investigación, los cuales posteriormente se convierten en "decisiones" para futuras inversiones de capital.

La metrología es la base fundamental para la adecuada evaluación, control y mejoramiento de las tecnologías utilizadas para generar, transformar, transportar y en general para lograr la anhelada transformación industrial, aspecto que fue ratificado como estratégico para el desarrollo de Colombia en el documento CONPES 3582 de abril de 2009 [4].

### 3 EL CDT de GAS EN LA ACTUALIDAD

#### 3.1 La Sostenibilidad Económica Institucional

No puede dejarse de lado, quizás el más difícil de todos los retos que se presenta en las instituciones de ciencia y tecnología en Colombia: me refiero a la sostenibilidad económica institucional. Cada CDT debe identificar sus procesos productivos internos y en la medida de la disponibilidad de recursos, debe asumir el pago de su nómina de personal y hacer las respectivas provisiones de Ley, *realizar inversiones para la formación continua del recurso humano*, atender los costos fijos operacionales, las cargas de impuestos a las cuales curiosamente no se está exento, y en la medida de lo posible, está obligado a generar nuevos procesos (que se llevan a cabo a través de la investigación tecnológica), procesos que posteriormente representarán la fuente de recursos, para continuar aportándole a la sociedad.

La primera y fundamental herramienta de sostenibilidad económica la constituye el apoyo que provee el gobierno nacional a través de COLCIENCIAS-SENA. Para el CDT de GAS este recurso provisto, año por año, *permite mantener “viva” la diferencia* entre lo que representa un Centro de Desarrollo Tecnológico y una empresa típica de ingeniería. Por supuesto que esperamos que este recurso permanezca y que adicionalmente crezca en la medida en que crece la organización.

#### 3.2 El CDT de GAS no se detiene



Fig 2. Mecanismo Sinérgico del CDT de GAS

Como lo muestra la figura 2, las instituciones enmarcadas dentro del sistema nacional de ciencia y tecnología (SNCT) en Colombia, interiormente deben funcionar como un engranaje sincrónico, donde todas las partes involucradas trabajan sinérgicamente. De igual manera en un futuro cercano deberán buscarse las estrategias para establecer la sinergia con otras instituciones del SNCT.

#### 3.2.1 El CDT de GAS internacional

Para el caso específico del CDT de GAS se resalta la gran importancia del apoyo internacional recibido desde el Instituto de Pesquisas Tecnológicas del Estado de Sao Paulo, entidad con quien se tiene un convenio tecnológico firmado desde el año 2000 y del Centro Nacional de Metrología de México CENAM de quien se recibe apoyo desde el año 2002. Así mismo en los últimos tres años se han establecido contactos con otras entidades del orden internacional como el Laboratorio Nacional de Ingeniería del Reino Unido TUV NEL Ltd, el Centro Tecnológico de Minas Gerais CETEC del Brasil y el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de la Argentina, e inclusive con algunas instituciones tecnológicas del País Vasco. En resumen, el conocimiento internacional, en materia de metrología de fluidos aplicado al desarrollo de la sociedad, ha llegado a Colombia, a través del esfuerzo del equipo de trabajo que conforma el CDT de GAS.

#### 3.2.2 El aporte de los órganos de dirección

De igual forma, cabe destacar la confianza y la credibilidad de los miembros de los órganos de dirección del CDT de GAS quienes desinteresadamente, año tras año, han visto transformar un “sueño en realidad” por un equipo de trabajo comprometido con el desarrollo del país. Es importante anotar que en este “piñón” del mecanismo se encuentra COLCIENCIAS entidad del orden nacional que permanentemente impulsa el proceso de crear ciencia, tecnología e innovación en Colombia.

#### 3.2.3 El aporte del sector productivo

Sin duda, como uno de los piñones y quizás como el más importante, es el del Sector Productivo; sin éste sería totalmente imposible transformar la ciencia en tecnología, y



Fig 3. Estrategia de transformación del sector productivo nacional: ¡Confianza!!!



Fig 4. El CDT de GAS en acción

por ende apoyar la transformación productiva nacional. Para nuestra fortuna cada día son más y de mayor importancia, las instituciones que confían en el proceso emprendido por el CDT de GAS.

### 3.2.4 El CDT de GAS por dentro

En un mundo como el nuestro en el que, todos los días, los problemas se vuelven más complejos, nuestras interacciones se vuelven más globales y en donde la tecnología genera cambios constantes, se hace necesario tratar de desarrollar organizaciones ajustadas a estas necesidades. Representan las “empresas del futuro”, aquellas instituciones atípicas en las cuales el conocimiento del ser humano es considerado como la columna vertebral de la organización. Durante estos 10 años en el CDT de GAS se trabaja permanentemente para estrechar un lazo de comunicación muy sólido y sincero, entre profesionales jóvenes que poseen dos perfiles claves: los capaces de apropiarse y acumular conocimientos para luego transferirlos a la sociedad basados en procesos sólidos de planificación y operatividad y aquellos con su creatividad, fruto de la imaginación, y con el don de gentes autóctono, que facilitan la interacción con dicha sociedad.

Desde el punto de vista institucional, en el CDT de GAS la primera gran acción consiste en lograr que los profesionales sientan que están en capacidad de lograr cualquier cosa que se propongan; en el CDT de GAS no existen límites y se busca a todo lugar, que en un futuro muy cercano, seamos un “teatro de investigación aplicada” donde a cada momento se libere la capacidad intelectual de los profesionales, brindando a la gente un alto grado de autonomía y un alto grado de participación en la toma de decisiones claves.

**¡HAY UN PODEROSO MOTOR DENTRO DE CADA SER HUMANO QUE, UNA VEZ LIBERADO, PUEDE HACER REALIDAD CUALQUIER VISIÓN, SUEÑO O DESEO!!!**

En este sentido, en el CDT de GAS se trabaja armónicamente con alta ingerencia del trabajo participativo, asumiendo en todo momento grandes retos y luchando por atraer, retener e influir en el talento humano; es claro en el orden mundial, que mantener el talento superior dentro de una institución se convirtió en una prioridad máxima de liderazgo.

### 3.2.5 Apuesta Estratégica por el Talento Humano

Desde el punto de vista de la definición de los perfiles dentro de la organización puede mencionarse que se han clasificado en tres muy importantes grupos: Metrologos, No Metrologos y Técnicos; cada clasificación ha sido conformada por anillos que facilitan la visualización del crecimiento individual y por ende, el desarrollo y potencialización de sus competencias.

En el CDT de GAS cada profesional entiende la gran responsabilidad de tener un “espejo” a su lado, de manera que el proceso no se detenga, por el contrario, cada día debe ser mas nutrido, igual como hasta el momento, ha sido la demanda de nuestros servicios especializados.

En resumen, la suma entre la sostenibilidad económica institucional mencionada en el aparte 3.1 y la sostenibilidad del conocimiento apropiado (el talento humano), da como resultado la sostenibilidad corporativa.

### 3.2.6 El aporte actual del CDT de GAS para Colombia

En sus 10 años, el CDT de GAS coloca a disposición del país una estructura dinámica con altas potencialidades en la aplicación de la metrología y en continuo proceso de aprendizaje, en especial formando a alto nivel (a ritmo lento pero seguro, en razón a la necesidad de sostenibilidad económica), a aquellos profesionales que han ayudado a consolidar el proceso organizacional (actualmente especialistas y magíster y en el corto y mediano plazo doctorados).

Tres (3) áreas claves han sido consolidadas:

I. La de METROLOGÍA APLICADA, que se encuentra dividida en dos secciones: en primer lugar la ejecución de proyectos de ciencia y tecnología con enfoque claro, en la optimización de los procesos industriales, en la atención de problemas operacionales y en el desarrollo, selección, ingeniería de procesos de compra y/o en la optimización de equipos utilizados para la medición de los fluidos. En esta sección vale la pena destacar el desarrollo y actualización tecnológica de Sistemas de Control, Adquisición y Análisis de

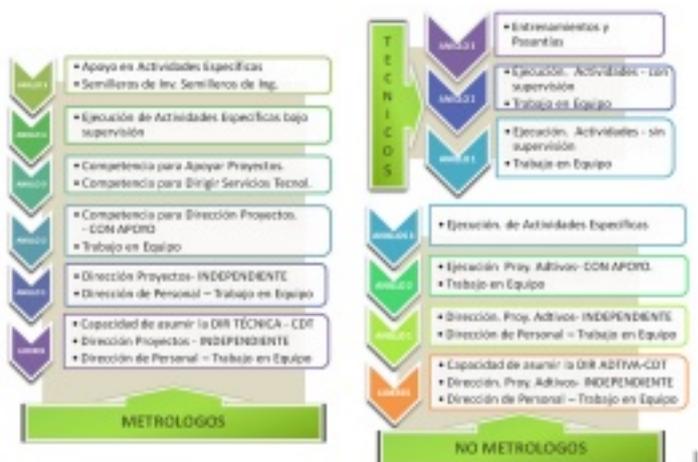


Fig 5. Anillos de formación del talento humano

Datos (Instrumentación, Hardware y Software) y el desarrollo de Herramientas Computacionales para Estimación de

Incertidumbre, Cálculo de las Propiedades de los Fluidos, y Sistemas de Información para la Gestión y el Aseguramiento Metrológico de los Sistemas de Medición; éstas Soluciones Tecnológicas son generadas en la corporación para que las industrias colombianas aprovechen la ciencia y la tecnología para el control y mejoramiento de sus procesos productivos.

MAGNITUD	CAPACIDAD INSTALADA DISPONIBLE
BAJOS CAUDALES	Patrón Primario Tipo Pistón con sello de mercurio
	Patrón secundario Tipo Bureta Dispositivos de transferencia tipo boquillas sónicas
MEDIOS CAUDALES	Patrón Primario Tipo Campana Gasométrica
	Patrones Secundarios Tipo Cámara Húmeda Dispositivos de transferencia tipo boquillas sónicas
ALTOS CAUDALES	Banco de Alto Caudal de gas acondicionado con patrones secundarios tipo rotativo, turbinas y ultrasónico de acople a baja presión (3,2 a 6000 m <sup>3</sup> /h)
GAS NATURAL VEHICULAR	Patrón Másico Tipo Coriolis Sistema para Calibración por Método Gravimétrico
TEMPERATURA	RTD's Patrón de 4 hilos (-20 a 120 °C)
	Generadores de Temperatura tipo bloque seco (-20 a 120 °C)
	Generador de temperatura tipo Baño Refrigerado (-20 a 110 °C)
MAGNITUDES ELECTRICAS	Multicalibrador (4 a 20 mA); (0 a 10 Vc); (-100 a 1200 °C) (TC tipo J y K); (-100 a 800 °C RTD); (0 a 10 kHz)
PRESION	Manómetros Digitales clase 0,05%, (2,5 mbar a 3000 psi)
	Sistema de Medición de presión tipo peso muerto (50 psi a 10000 psi)
MASAS	Juego de masas patrón clase F1 (1 mg a 5 kg)
	Juego de masas patrón clase M1 (1 kg a 20 kg)
	Balanza electrónica, exactitud II (50 g a 60 kg)
	Balanza electrónica, exactitud II (0,5 kg a 150 kg)
DIMENSIONAL	Rugosidad de superficies (0 a 500 µm), Diámetros de Tuberías (0 a 12 in), Longitud de tuberías (0 a 5 m); Espesores (0,8 a 300 mm)
TIEMPO	Cronómetro Digital (9 h, 59', 59,99'')
CROMATOGRAFIA	Cromatógrafo: Hidrocarburos Livianos del CH <sub>4</sub> a C <sub>6</sub> +; Hidrocarburos Pesados del C <sub>5</sub> al C <sub>15</sub> + Gases Inertes N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
VELOCIDAD DE LOS FLUIDOS	Mediciones de aire en túnel de viento (de 2 a 20 m/s)

Tabla 2 Infraestructura Disponible CDT de GAS

**¡LA CORRECTA MEDICIÓN DE LOS FLUIDOS REPRESENTA PARA CADA INSTITUCIÓN, UN FLUJO DE CAJA CONFIABLE!!!**

Por su parte en el Centro de Metrología que hace parte de la segunda sección, se destaca la infraestructura tecnológica (ver tabla 2), diseñada, construida, comparada y validada con profesionales formados al interior de la organización, todo sí, apoyado por expertos que impulsan nuestro proceso desde el entorno internacional. Como una herramienta para hacer de las mediciones una ventaja competitiva se adoptó el Sistema de Gestión de la Calidad basado en la ISO/IEC 17025 para todos nuestros laboratorios.

De la misma forma, las dos secciones mencionadas, generan de forma permanente conocimiento que es difundido a la sociedad a través de jornadas de capacitación, pasantías y seminarios especializados.

II. La EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD es la segunda área desarrollada y corresponde a un proceso estratégico que permite evidenciar las oportunidades de mejora que están latentes en los procesos, productos y servicios que conforman nuestra sociedad. De momento se encuentra consolidada la sección de Inspección de Sistemas de Medición de Gas y en la actualidad se realizan acciones para permear el sector de los hidrocarburos líquidos y el de la gestión medio ambiental. El CDT de GAS ejecuta las inspecciones a través del Organismo de Inspección, el cual está acreditado bajo los lineamientos de la norma ISO/IEC 17020. Es fundamental resaltar el carácter institucional del Organismo de Inspección del CDT de GAS, dado que corresponde a una entidad inmersa dentro de la corporación, pero que actúa con imparcialidad e independencia, tanto interna como externamente, generando la máxima credibilidad en razón a la competencia técnica y al papel desempeñado, como un tercero de alta confiabilidad.

III. Finalmente y quizás la de mayor importancia institucional, tal como lo muestra la figura 7, es la de INVESTIGACIÓN APLICADA. Más detalles se muestran en el numeral 4.

Para mayor información acerca de nuestra infraestructura los invitamos a revisar [www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com) o escribanos a [revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)

**4 EL CDT de GAS DEL FUTURO**

**4.1 La Visión: Generación de Impacto hacia la Sociedad**

Al parecer, ya para nadie es un secreto, que en Colombia los CDT lograron aprovechar el conocimiento de punta, generalmente creado por la academia y los grupos de

investigación (nacionales y/o internacionales), y aplicarlo oportunamente para dar solución a las necesidades reales de la industria; ha sido un trabajo arduo apoyado desde COLCIENCIAS y en muchos casos, como el del CDT de GAS, con la participación de entidades internacionales. En otros casos inclusive, con conocimiento generado desde los mismos centros de desarrollo tecnológico. A este nuevo esfuerzo le llamamos Investigación Tecnológica en donde el factor humano resulta preponderante: en medio de la libertad ejercida, cada profesional, que llega a la condición de líder, emprende nuevos retos, esta vez consistentes en el proceso de apropiación y acumulación del conocimiento en el tema de su preferencia (que tenga relación con las líneas claves del CDT de GAS ó que demuestre la conveniencia corporativa), pero con el firme propósito de transmitirlo inicialmente a todas las áreas productivas de la corporación; de esta forma, se ratifica que el conocimiento es la base fundamental del proceso de consolidación del CDT de GAS en Colombia y que éste debe llegar, sin excusas, a nuestra sociedad.

#### 4.1.1 El peldaño inmediato...

Una vez consolidado este CDT del sector gas en Colombia, ahora resultará preponderante, clave y estratégico que se gesten "alianzas tecnológicas", entre la academia y los centros de desarrollo para atender a la industria (lógicamente con necesario "gana-gana"), y como se referencia en el «Triángulo de Sábado», con el Estado como diseñador y ejecutor de las políticas, para que cada quien aporte lo que puede y debe aportar: ciencia y mucho más desde la academia, capacidad de convertir ciencia en tecnología desde los CDT y necesidades y recursos económicos desde el sector empresarial; solo de esta manera, creemos que la investigación realizada actualmente en Colombia, generará innovación y desarrollo tecnológico con alto impacto sobre el producto interno bruto nacional, sobre la calidad de vida de la población y sobre la reducción y el mayor control en el impacto ambiental. La invitación es a que abramos las compuertas de cada institución, para que podamos avanzar al ritmo que el país y nuestra sociedad nos lo exige.

#### 4.2 La Metrología: Área Transversal Que Se Requiere Potencializar En Colombia Para Beneficio De Nuestra Sociedad.

Este tema merece ser tratado y discutido seriamente en espacios abiertos del entorno nacional, sin embargo aprovecho este documento para ratificar su importancia. Los invito a recordar que la internacionalización de la economía, el libre mercado e inclusive la crisis mediática con nuestros vecinos (anteriores socios comerciales) vienen obligando a las empresas nacionales a buscar nuevos mercados: se habla desde el gobierno nacional que debemos hacer esfuerzos para penetrar en Canadá, Estados Unidos, China, Japón, y sin duda en la comunidad económica europea.

Al respecto, la cosa no resulta tan fácil como parece, se deben trazar estrategias para que nuestros procesos, productos y servicios, ahora cumplan verdaderos estándares

internacionales, los cuales no tienen la misma dimensión que aquellos que exigimos en nuestra región andina... son mucho más exigentes y es acá donde la metrología resulta fundamental para impulsar la competitividad.

La metrología es una actividad transversal que impacta a todos los sectores de nuestra sociedad... en realidad todo se mide y para mejorar la calidad y la competitividad, es necesario "medir bien" y con los resultados confiables y comparables, tomar acción para poder mejorar; de lo contrario todos los esfuerzos realizados serán insuficientes y nos sumergiremos aún más, en nuestro subdesarrollo.



Fig. 6. Transversalidad de la metrología en la sociedad colombiana

#### 4.3 CDT de GAS: Laboratorio Designado para Brindar Trazabilidad a las Mediciones de Gas en Colombia.

En 1996, desde el ICP de ECOPETROL se identificó la necesidad apremiante que tenía la industria nacional, de contar con un laboratorio de referencia para la medición de los fluidos; desde ese entonces, en el ICP y posteriormente desde el CDT de GAS se realizaron los esfuerzos necesarios y hoy Colombia cuenta con infraestructura para metrología de gas, comparable con la existente en Brasil y Argentina. Ahora el reto que sigue, se fundamenta en presentar a consideración de la Superintendencia de Industria y Comercio la infraestructura disponible, *la cual es operada, mantenida y administrada por el CDT de GAS, estrategia que garantiza competencia técnica y la absoluta independencia, imparcialidad e integridad, que se requiere para apoyar tecnológicamente al Centro Nacional de Metrología de Colombia*; posteriormente se realizará la sensibilización y se buscaría el acuerdo, para integrar las facilidades de Calibración de Medidores de Gas a Media Presión que PROMIGAS S.A. ESP construyó con éxito en la ciudad de Barranquilla. De esta forma, Colombia se colocaría en infraestructura técnica y humana, a la cabeza de los países Latinoamericanos, en este campo de acción.

#### 4.4 La Investigación Tecnológica Propia, Como Herramienta Clave Para Continuar Aportándole a la Sociedad

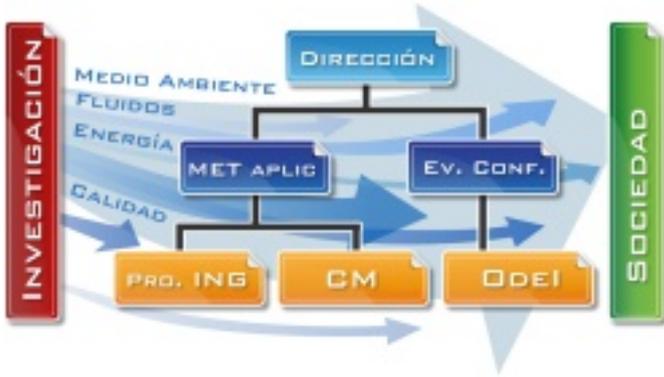


Fig 7. Estructura inmediata del CDT de GAS

Como se mencionó en el aparte III del numeral 3.2.6 y como se hace evidente en la figura 7, la estrategia para permear a nuestra sociedad, se centra en la potencialización del Área de Investigación, ojala con la sinergia Universidad-CDT, haciendo énfasis en las líneas claves identificadas hasta el momento: Fluidos, Energía, Medio Ambiente y Calidad dirigida hacia la cuantificación “real” del contenido energético de los hidrocarburos y de los contaminantes que los afectan.

#### 5 CONCLUSIONES

##### **¡APOSTARLE A LA CIENCIA Y A LA TECNOLOGÍA, SI PAGA...!!!**

Para finalizar es importante ratificar que aún en el CDT de GAS tenemos mucho por hacer pero también, que muy importantes logros hemos alcanzado:

- Confiar y aprovechar positivamente, en el alto potencial del talento joven colombiano.
- Colocar a nuestro país en una buena clasificación dentro de los “centros de metrología de fluidos suramericanos”, no solamente en cuanto a equipos, instrumentos y facilidades, sino también en formación de recurso humano competente, creando una nueva cultura en torno a la importancia de la aplicación de la metrología.
- Crear en su radio de influencia, una cultura de “Calidad Total” como ventaja competitiva para el desarrollo del país; se requiere continuar trabajando en torno a la sinergia entre “certificación y metrología”... Una Nueva Cultura Metrología para Colombia.
- Romper paradigmas relacionados con el hecho de que, sólo los extranjeros pueden aportar en temas complejos como la medición de los fluidos o de que la metrología es un “gasto” y no una “muy interesante y valiosa inversión”.
- Gestar un primer avance en la conformación de una red de metrología latinoamericana de fluidos.
- Inducir en la temática a más de 250 estudiantes de pregrado de nuestra región y haberlos fortalecido

para atender las necesidades de la industria nacional. (Contribuimos con la creación de fuentes de trabajo calificado)

- Generar un proceso sostenible, hasta el momento, en torno a la gestión del conocimiento y a una muy fuerte dedicación de nuestros profesionales.
- Capacitar en temas afines a más de 1.000 personas de la industria, en donde se incluyen profesionales del Perú.
- Establecer y mantener un convenio tecnológico con una empresa nacional que después de 4 años continuos de trabajo deja muy buenos avances tecnológicos para las dos (2) partes y en especial para Colombia; es de resaltar que en todo momento las dos instituciones han generado actitudes de confianza y de sinergia, en donde el “gana-gana” ha sido fundamental.
- Y quizás la de mayor relevancia es el continuar creciendo, sin perder de vista nuestra misión y nuestra visión, como entidad del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología.

#### 6 REFLEXIONES

Este documento ha sido desarrollado después de haber estudiado con gran atención, varios textos que tratan temas realmente innovadores y en especial el libro “De la Autoridad Controlada al liderazgo Colaborador” [5] el cual hace referencia a lo que pueden ser las empresas del futuro, y también al haber corroborado que sus enseñanzas aplican y son muy importantes, para continuar con la realidad viva del CDT de GAS en Colombia; sin duda estoy convencido que tal como lo expresa el autor: *“Las comunidades basadas en el mérito y la pasión son raras, y las personas que han estado en ellas nunca las olvidan.”*

Por ello, después de hacer meditación interna con varios profesionales del hoy, e inclusive de los que nos acompañan desde la distancia, concluimos que el CDT de GAS no es una “cuna de metrólogos” sino de “hackers de la metrología”. La diferencia radica en entender que si se forjan metrólogos se está aludiendo a la metrología como un oficio o profesión remunerada, en el contexto de la ética capitalista, mientras que el “hacker de la metrología” (apropiándonos del término del argot informático) es una persona que no distingue entre trabajo y pasión pues al desenvolverse en su vocación se asemeja más a un artista que a un ingeniero “cuadrado” que se preocupa por entender las ecuaciones de Navier-Stokes [6], en lugar de dar una interpretación de las mismas que contribuya a la generación de nuevos conocimientos aplicables a la solución de problemas tecnológicos.

La Metrología no es como la hemos querido ver en nuestro país... la Metrología no se aprende con un curso de capacitación, la Metrología es una pasión indescriptible con la cual podemos apalancar la transformación productiva nacional, por lo tanto, estoy seguro que requiere ser apoyada y desarrollada seriamente en Colombia, de forma inmediata.

## 6.1 Metrología A Su Alcance:

Considerando que el desarrollo tecnológico de un país está directamente relacionado con la disponibilidad y la calidad de la infraestructura utilizable, y que Colombia aún se encuentra en etapa de fortalecimiento de su infraestructura tecnológica (alineada con estándares internacionales), hemos puesto, con el presente artículo a disposición de los del Estado, de la Academia y en general de todos los sectores productivos, la infraestructura humana y técnica disponible en el CDT de GAS, la cual corresponde a la primera entrega prevista.

En próximas ediciones haremos conocer otras muy interesantes infraestructuras del orden nacional y/o del orden internacional a las cuales podamos acceder, cuando tengamos necesidades tecnológicas.

Es importante que los lectores nos hagan conocer sus necesidades escribiendo a [revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com) para que, a través de nuestra vigilancia tecnológica, sea posible contribuir al desarrollo nacional.

## 7. AGRADECIMIENTOS

En nombre de todos los que conformamos el equipo del CDT de GAS, quiero manifestar nuestro más sincero agradecimiento a COLCIENCIAS por el apoyo recibido para hacer realidad este proceso y de manera muy especial a la doctora Claudia Celina Marin Ariza, directora del SENA seccional Girón, Santander, y a los doctores Fabio Tobón Londoño, director del ICONTEC, Jaime Alberto Camacho Pico, Rector de la Universidad Industrial de Santander, Néstor Fernando Saavedra, director del Instituto Colombiano del Petróleo de ECOPELROL S.A. y Luis Enrique Sanabria Grajales, director ejecutivo de CORASFALTOS, quienes de forma armoniosa han aceptado el reto de apoyar, desde nuestro Consejo Directivo, el proceso que en diciembre de 2009 ha logrado consolidarse, después de 10 años de trabajo arduo y continuo.

## REFERENCIAS

- [1] Ley 29 de febrero de 1990 [1], Ley marco de Ciencia y tecnología.
- [2] Estudio Prospectivo sector Gas - 2003
- [3]<http://www.sim-metrologia.org.br/infosim.php>.
- [4] CONPES 3582 de abril de 2009.
- [5] De la autoridad controlada al liderazgo colaborador. Warren Benis.
- [6] Conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, que describen el movimiento de un fluido.



Nuestra más Reciente  
Solución Tecnológica



Soluciones  
Tecnológicas

Corporación CDT de GAS



**B-SONIC**

Integrando Metrología y TIC's, para calibrar hasta 25.000 medidores por año.

Diseñado para operar y ser auditado bajo ISO/IEC - 17025

Flexible, Escalable y Simple, con el nivel de Incertidumbre que su laboratorio Necesita.

[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

# Conocimientos **FLUIDOS**

Esta Sección ha sido ideada para atender con responsabilidad social, las inquietudes de nuestros asiduos lectores; esperamos dar respuesta, en cada una de nuestros volúmenes, a aquellas personas que nos escriban a [revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)

**Escribanos**

Si desea publicar un artículo,  
escriba al correo  
[revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)  
o visite nuestra página web  
[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)

# Respuestas Tecnológicas

## a Preguntas Puntuales de los Lectores

Jose Augusto Fuentes Osorio  
Coordinador de Proyectos – Corporación CDT de GAS

Actualmente, la metrología de fluidos va adquiriendo mayor importancia en las empresas, debido al incremento del costo asociado a los fluidos medidos. Es por este motivo que la industria ha comenzado a darle relevancia a este tema, invirtiendo cantidades considerables de dinero, en la adquisición de tecnologías y procesos de medición de punta, pero sin la adecuada apropiación del conocimiento técnico-científico relacionado con la operación, instalación y aseguramiento metrológico de estas tecnologías. Por este motivo el CDT de GAS ha creado un espacio en esta revista especializada, que permita suministrar a nuestros lectores, **respuestas a preguntas frecuentes** relacionadas con la metrología de los fluidos y con los fenómenos que afectan las diferentes tecnologías de medición, suministrando elementos para llevar a cabo acciones de mejoramiento de sus procesos.

En esta primera edición, la sección presenta las respuestas a una serie de preguntas frecuentes recibidas en el CDT de GAS, relacionadas con medición de gas natural en transferencia de custodia, **cabe aclarar, que esta sección no esta limitada a este tema de forma exclusiva; nuestra competencia técnica y el apoyo internacional permanente, nos permite brindar apoyo tecnológico para la metrología aplicada, a cualquier fluido.**

### RELACIONADAS CON SISTEMAS DE MEDICIÓN CON TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA.

*Porqué se menciona que los medidores ultrasónicos deberían operar a condiciones de flujo con bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> en el gas a medir? Cual es el efecto del CO<sub>2</sub> en la correcta medición del USM y cual es el máximo valor de CO<sub>2</sub> permitido para medición ultrasónica?*

En sistemas de medición de gas con medidores tipo ultrasónico, la presencia de concentraciones considerables de CO<sub>2</sub>, afecta la medición de gas, debido a que este componente, presenta típicamente una significativa **atenuación** sobre las ondas ultrasónicas generadas por cualquier sistema o equipo.

Cuando se habla de **atenuación** de las ondas ultrasónicas, se refiere a un debilitamiento de la onda ultrasónica asociado a dos efectos: la dispersión y la absorción. La dispersión es la reflexión del sonido en direcciones distintas de la dirección original de propagación. La absorción es la conversión de la energía del sonido a otras formas de energía. El efecto combinado de la dispersión y absorción genera la denominada **atenuación**. Este fenómeno es cuantificado mediante el **coeficiente de atenuación propuesto en la ley de Lambert-Beer**.

Frecuencia de Operación	Aire Seco		Metano		Dióxido de carbono	
	$\alpha$ (1/m)	P (dB/cm)	$\alpha$ (1/m)	P (dB/cm)	$\alpha$ (1/m)	P (dB/cm)
80	0,09	0	5,3	-10,4	33,5	-25,3
135	0,26	0	9,9	-13,5	39,9	-31
208	0,62	0	12,3	-15,2	42,6	-33,3

Tabla 1. Comparación coeficientes de atenuación

En la tabla 1 se muestra una comparación entre los coeficientes de atenuación ( ) para el aire seco, metano y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), donde se evidencia claramente que los mayores coeficientes están asociados al dióxido de carbono, por lo tanto este componente tiende a debilitar la onda ultrasónica, motivo por el cual, es una de las sustancias mas difíciles de cuantificar con medidores gas ultrasónicos.

Ahora bien, el nivel máximo permitido de concentración de dióxido de carbono depende del diseño del ultrasónico y cada fabricante en su manual de operación reporta el limite permisible, sin embargo, en términos generales un valor típico máximo es del orden de 5% molar, el cual podría generar una pérdida del potencial total de la señal, de 15 a 20%. Es importante aclarar que recientemente se han desarrollado transductores con una alta eficiencia de energía acústica que permitirían operar a mayores concentraciones de CO<sub>2</sub>.

## RELACIONADAS CON SISTEMAS CROMATOGRÁFICOS DE GASES.

*El gas de referencia (comercializado en Colombia), utilizado para la calibración de los cromatógrafos en línea, posee una fecha de vencimiento que oscila normalmente entre uno y dos años. ¿Qué es lo que realmente pasa con esta mezcla con el tiempo? ¿Hay forma de recuperar y homogenizar de nuevo esa mezcla, con algún tipo de técnica, debido a que son muy costosos?*

La fecha de vencimiento de un gas de referencia es establecida por el fabricante y corresponde al tiempo en el cual se garantiza la homogeneidad y estabilidad de la composición del gas. Estas características se ven afectadas por ciertos factores que se describen a continuación:

1. Cada uno de los hidrocarburos puros presentes en el gas de referencia, posee diferente densidad. Esta diferencia genera a través del tiempo una separación denominada **estratificación**, en la cual se presenta la tendencia de los gases mas livianos a ubicarse en la zona más alta del contenedor y gradualmente los hidrocarburos pesados se van ubicando en zonas mas bajas, a medida que aumenta su cadena carbonada. Ahora bien, entre mayor sea la diferencia de densidades entre los hidrocarburos que componen el gas de referencia, con mayor rapidez se presentará el proceso de **estratificación** del gas y por tanto menor es el tiempo de estabilidad.
2. Otro parámetro importante, es el tipo de material de fabricación del cilindro, debido a que se presenta el fenómeno de adsorción de los hidrocarburos mas pesados que conforman el gas de referencia, el cual se adhiere a la superficie del cilindro que lo contiene, variando la composición inicial del gas.
3. Las condiciones adversas que se presentan en campo pueden generar una mayor o menor estabilidad y homogeneidad de la composición del gas de referencia. A altas temperaturas las moléculas poseen una mayor energía cinética y beneficia la homogenización del gas; caso contrario se presenta en locaciones con temperatura relativamente bajas.

Estos factores limitan el tiempo de estabilización y homogenización del gas de referencia y por consecuente, su uso en la industria.

Según el reporte API MPMS Chapter 14.1, cuando un gas de referencia supera su fecha de vencimiento, es posible realizar un proceso de **recertificación del gas** que permita su recuperación, homogenización y estabilización por un tiempo determinado. En consecuencia, este gas puede ser reutilizado como referencia en los diferentes procesos

industriales. Sin embargo, en Colombia aún no existe una entidad que realice los procesos de recertificación de gases y para llevar a cabo tal actividad es necesario realizar un estudio previo que permita evaluar el comportamiento de los gases de referencia frente a los factores antes mencionados. El CDT de GAS está realizando investigaciones preliminares en relación con este fenómeno, de manera que se logre entregar a la industria una solución tecnológica que aumente su productividad.

## RELACIONADAS CON SISTEMAS DE MEDICIÓN QUE POSEEN MEDIDORES TIPO TURBINA.

*¿Que sucede si un medidor de flujo de gas tipo turbina tiene sus alabes sucios, por ejemplo, si posee adherida grasa para lubricación de equipos utilizados aguas arriba?*

La presencia de depósitos adheridos al rotor de un medidor tipo turbina podría generar un cantidad considerable de efectos negativos y a su vez errores no despreciables en la medición. A continuación se enuncian los dos efectos más representativos que se podrían presentar:

1. La adhesión de depósitos al rotor, aumenta su masa y por tanto su inercia. Debido a esta condición, la cantidad de momentum necesaria para girar el rotor es mayor y su restricción al movimiento es mayor, generando errores negativos adicionales en caudales cercanos al valor mínimo; caso contrario para los caudales altos, debido a que ante una reducción brusca del caudal, no se presenta fielmente en el rotor esta disminución de la velocidad, generando un error positivo adicional, en la medición.
2. La adhesión de estos depósitos no homogénea en el rotor, genera un desbalanceo en el mismo, y por tanto un mayor contacto con el eje, lo cual genera mayor torque resistivo de fricción y este a su vez un error negativo adicional en la medición.

**Invitamos a las personas o entidades que deseen recibir nuestro apoyo tecnológico, a que nos escriban al correo [revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com). En razón al tamaño de esta sección, las preguntas serán seleccionadas para su publicación.**

**Esta página ha sido reservada para aquellas personas naturales o entidades públicas y/o privadas, que deseen apoyar con recursos económicos la edición de cada tiraje de MET&FLU: "Ciencia, Tecnología e Innovación". Inicialmente será reservado para un único patrocinador, por cada número emitido.**



**Nuestro representante próximamente se colocará en contacto con usted... o escribanos a [revistamyf@cdtdegas.com](mailto:revistamyf@cdtdegas.com)**

**Recordamos que MET&FLU: "Ciencia, Tecnología e Innovación", estará disponible en versión digital en [www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)**

**Hay un poderoso motor dentro de cada  
ser humano que, una vez liberado,  
puede hacer realidad cualquier visión,  
sueño o deseo...**

Anthony Robbins: buscador incansable de fórmulas para  
aplicar la filosofía a la "Mejora Constante y para Siempre"



**Corporación CDT de GAS**  
Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS

**10 años**  
1999-2009

[www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com)