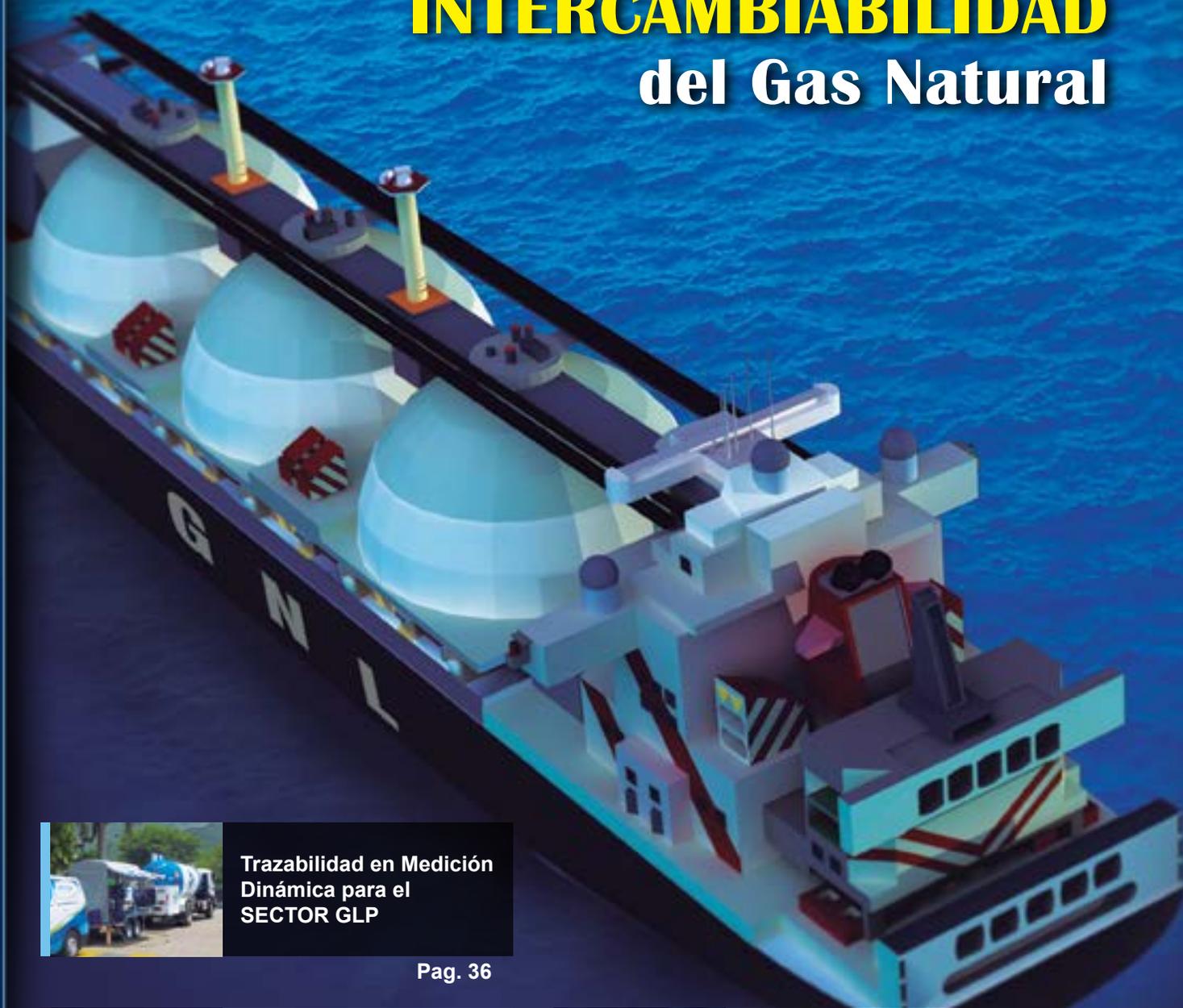


# MET & FLU

ciencia - tecnología - innovación

## Fundamentos de la **INTERCAMBIABILIDAD** del Gas Natural



**Trazabilidad en Medición Dinámica para el SECTOR GLP**

Pag. 36



**TUNEL DE VIENTO:** Una nueva solución de Trazabilidad de Velocidad de Gases (anemometría) en Colombia

Pag. 54



**¿Debería existir un margen de tolerancia en los dispositivos electrónicos de detección de velocidad?**

Pag. 63

Primer  
**TUNEL DE VIENTO**  
Para Aplicación Metrológica  
en Colombia.



"La medición de velocidad de gases tanto para aplicaciones industriales como de investigación, ahora cuenta con una opción de trazabilidad en el país."



Corporación CDT de GAS  
Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS



Pag. 6

## FUNDAMENTOS DE LA INTERCAMBIABILIDAD Del Gas Natural.



Pag. 16

## HACIA EL ESTABLECIMIENTO De una Cadena de Trazabilidad para las Mediciones de Calidad de Aire. Emisiones de fuentes fijas, y emisiones de fuentes móviles en Colombia.



Pag. 28

## CIENCIA BÁSICA DE LOS EFECTOS DEL METANO Sobre el cambio climático, estado del arte y escenario de reducción.



Pag. 36

## TRAZABILIDAD EN MEDICIÓN DINÁMICA Para el SECTOR GLP.



Pag. 44

## VALIDACIÓN DEL DESEMPEÑO METROLÓGICO Medidor Volumétrico Portátil para verificar "in situ" a los medidores de gas tipo diafragma de uso domiciliario.



Pag. 54

## TÚNEL DE VIENTO: Una nueva solución de trazabilidad para las mediciones de velocidad de gases (Anemometría) en Colombia.



Pag. 63

## ¿DEBERÍA EXISTIR UN MARGEN De tolerancia en los dispositivos electrónicos de DETECCIÓN DE VELOCIDAD?

# 15 Años Innovando para el Sector Gas en Colombia

Una nueva Edición de nuestra Revista Semestral especializada en la Aplicación de la Metrología de los Fluidos, es puesta una vez más, en manos de nuestros asiduos lectores... ésta representa una Edición Especial.

En Colombia tenemos una tradición de más de 40 años en materia de gas natural y en la última década, en investigación, desarrollo, innovación y transferencia tecnológica, una gran parte de la historia del sector, ha sido forjada y escrita por el CDT de GAS.

El CDT de GAS de Colombia, como Centro de Desarrollo Tecnológico nació en diciembre de 1999, y hoy 15 años después, forma parte del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, está ubicado estratégicamente en el departamento de Santander, tiene su sede administrativa en la ciudad de Bucaramanga y su Centro de Metrología de Fluidos en el Parque Tecnológico de Guatiguará, ubicado en la Universidad Industrial de Santander - UIS.

En estos 15 años hemos logrado convertir “Sueños en Realidades” gracias a nuestro Talento Humano altamente capacitado, que ha logrado desarrollar la Infraestructura que hoy brinda soporte a los procesos de la cadena del gas, al máximo nivel científico y tecnológico del país. Gracias también al excelente apoyo que hemos recibido de los profesionales que representan a las instituciones que conforman nuestro Consejo Directivo, y por supuesto a todos los Miembros Honorarios que siempre nos acompañan con sus valiosos aportes y decisiones.

En estos 15 años hemos logrado apoyar, entre otras, a las empresas productoras, transportadoras y distribuidoras de gas natural soportando los resultados a partir de nuestros laboratorios de calibración y ensayos, que estando acreditados

## Director/

Henry Abril Blanco

## Editor/

Corporación CDT de GAS

## Comité Editorial/

José A. Fuentes Osorio  
Luis E. García Sánchez  
Arlex Chaves Guerrero  
Alfredo Acevedo Picón  
Juan Manuel Ortiz Afanador

## Comité Científico/

Kazuto Kawakita – Director  
Centro de Metrología de Fluidos  
del IPT – Brasil  
Dionisio Laverde – Profesor  
Universidad Industrial de  
Santander – Colombia

## Diseño/

María Inés Varela Peña



por el Organismo Nacional de Acreditación (ONAC) atienden de forma imparcial y transparente los procesos de “transferencia de custodia del gas” elemento clave para la liquidación de regalías, el cobro de servicios y el control de los balances.

Como Responsabilidad Social atendemos proyectos de uso racional y eficiente de la energía, y aunque el gas natural es un combustible amigable con el medio ambiente, el CDT de GAS ha generado las fortalezas necesarias en estos 15 años, para convertirse en pionero en el desarrollo de programas de gestión de emisiones de gases de efecto invernadero contando con tecnología de punta para la detección de emisiones a través de métodos ópticos de absorción infrarroja y de cuantificación de emisiones, que le permiten realizar diagnósticos avanzados y contar con experiencia en el desarrollo de indicadores reales y en la formulación de soluciones y planes de mitigación.

Y hoy, ante los retos crecientes de nuestra industria colombiana, estamos preparados para continuar -en la siguiente década- aportando Ciencia, Tecnología e Innovación a la ya iniciada “Revolución del Gas” en Colombia, obteniendo impactos desde el CDT de GAS

para nuestra sociedad, no obstante los cambios recurrentes en la política de sostenibilidad de los Centros de Investigación y de Desarrollo Tecnológico, y el difícil y casi imposible acceso a los recursos de regalías. Sin embargo, aspectos importantes como los cambios estructurales en COLCIENCIAS y las inmensas oportunidades para internacionalizar nuestros procesos, nos hacen ver un futuro promisorio...

Mantendremos entonces, nuestros principios éticos y el máximo compromiso con la Industria y con el Estado, manteniendo el reconocimiento de la importancia del gas natural como energía segura, limpia y económica, pero también emprendiendo nuevos rumbos como se muestra en esta Edición Especial, para Aplicar los Conocimientos Apropriados a otros sectores relacionados: nos referimos a dos en especial: los hidrocarburos líquidos -donde se destaca el petróleo, pero también el Gas Licuado del Petróleo y los biocombustibles- y el más especial: el apoyo tecnológico a Entidades que requieren aplicar metrología (la ciencia de las mediciones) al Aire Atmosférico que respiramos.

Disfrutemos de nuevo de esta Edición preparada con pasión para todos Ustedes...

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

*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 está 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.

## Fundamentos de la INTERCAMBIABILIDAD del Gas Natural

Juan Manuel Ortíz ([juan.ortiz@polygon.com.co](mailto:juan.ortiz@polygon.com.co))

Polygon Energy  
Bucaramanga - Santander - Colombia



### Resumen:

*En el presente artículo se presentan de manera breve los fundamentos de la intercambiabilidad de gas natural. Además de mencionar los problemas más comunes se analizan en detalle tres metodologías diferentes para la evaluación de la intercambiabilidad como son: el índice de Wobbe (metodología de índice simple), los índices de Weaver (metodología de índices múltiples) y el método de Dutton (metodología gráfica).*

*Se han incorporado a su vez elementos dentro del contexto del gas en Colombia para comprender mejor la relevancia de este tema a nivel nacional. Finalmente se explora el marco regulatorio colombiano, el cual es escaso, para por último cerrar con las respectivas conclusiones del artículo.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El gas natural es un término genérico, se suele denominar “gas natural” a cualquier mezcla compleja de hidrocarburos en fase gaseosa, compuesta de forma predominante por el metano (CH<sub>4</sub>).

Por tratarse de una mezcla de varios componentes (incluidos inertes y contaminantes) que es extraída de diferentes fuentes, procesada en plantas de variadas tecnologías y desempeños, y transportada de diversas maneras, el gas natural puede variar su composición y por ende sus propiedades físico-químicas. Debido a que el principal uso del gas natural es como combustible, la variación en las propiedades del gas, representa un enorme reto desde el punto de vista de poder asegurar su combustión segura y eficiente.

Todos los equipos de combustión a gas están diseñados para operar con un intervalo particular de especificaciones de gas. Si las propiedades del gas se salen de dicho intervalo esto puede representar problemas de combustión incompleta, daños en los equipos y una operación riesgosa, entre otros.

Es así como en la industria del gas surgió la necesidad de desarrollar el concepto de “intercambiabilidad”. En términos generales, la intercambiabilidad es la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro en un equipo de combustión, de manera que sin realizarle ningún ajuste, no se presenten diferencias desde el punto de vista de la seguridad operacional, la eficiencia, el desempeño o las principales características de las emisiones al medio ambiente.

En el sector del gas en Colombia es común que técnicos e ingenieros solamente contemplen el poder calorífico como el parámetro determinante o exclusivo en materia de sustitución de combustibles gaseosos en equipos de combustión. Sin embargo, en el presente artículo se pretende ilustrar que no necesariamente el poder calorífico es el único aspecto a considerar para evaluar la intercambiabilidad, y que se requiere contemplar aspectos técnicos y de calidad de gas adicionales para una evaluación rigurosa de la intercambiabilidad.

Paradójicamente, las bases de la intercambiabilidad de gases fueron desarrolladas hace casi 90 años, alrededor de 1927, por el ingeniero de gas e inventor Goffredo Wobbe, quien llegó a ocupar el cargo de director de la Oficina de Gas de Bolonia en Italia. Los estudios de Wobbe le permitieron desarrollar una nueva propuesta para la definición de la calidad del gas natural sobre una nueva base, apoyándose en un parámetro que se denominó “índice de Wobbe”.

No obstante, con el avance de la ciencia y la tecnología se han estudiado mejor los fenómenos del flujo de gas, así como su combustión, generándose propuestas complementarias o alternativas para evaluar la intercambiabilidad de los gases combustibles. Debido a la diversidad de metodologías (simples, múltiples y gráficas) para evaluación de la intercambiabilidad, en este artículo nos referiremos al índice de Wobbe como ejemplo de índice simple, a los índices de Weaver como representantes de los índices múltiples y al diagrama de Dutton en lo que respecta a los métodos gráficos.

## 2. MARCO DE REFERENCIA NACIONAL

Las principales fuentes de gas natural en Colombia (Guajira y Llanos) poseen grandes diferencias en cuanto a sus especificaciones, principalmente derivadas de las características de los fluidos en los yacimientos y del tipo de procesos para tratar el gas. El gas de la Guajira, obtenido a partir de un yacimiento de gas libre, es un gas pobre con un contenido de metano del orden de 98% al cual solamente se le realiza un proceso de deshidratación para remover el vapor de agua; por su parte, el gas de los Llanos (Cusiana y Cupiagua), proveniente de yacimientos de gas asociado, es un gas rico con un importante contenido de etano, propano, butanos y CO<sub>2</sub> al cual se le realiza, además del proceso de deshidratación, procesos para remoción de hidrocarburos pesados y endulzamiento (captura de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S).

Como resultado de las diversas características de los fluidos de yacimiento y de los procesos para la adecuación de su calidad se derivan propiedades variadas de los gases, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Parámetro	Guajira	Cusiana - Cupiagua -
Densidad relativa	0,5644	0,6797
Poder calorífico superior	37,138 MJ/m <sup>3</sup> 996,8 Btu(IT)/ft <sup>3</sup>	42,673 MJ/m <sup>3</sup> 1145,3 Btu(IT)/ft <sup>3</sup>
Poder calorífico inferior	33,443 MJ/m <sup>3</sup> 897,6 Btu(IT)/ft <sup>3</sup>	38,620 MJ/m <sup>3</sup> 1036,5 Btu(IT)/ft <sup>3</sup>
Índice de Wobbe	49,436 MJ/m <sup>3</sup> 1326,8 Btu(IT)/ft <sup>3</sup>	51,76 MJ/m <sup>3</sup> 1389,2 Btu(IT)/ft <sup>3</sup>
Contenido de CO <sub>2</sub>	0,0501% molar	1,8184% molar
Contenido de N <sub>2</sub>	1,5576% molar	0,7429% molar
Temperatura de punto de rocío de hidrocarburos	7,2°C 45°F	- 6,7°C 20°F

**Nota:** Todas las propiedades con base volumétrica están expresadas a unas condiciones de referencia de 14,65 psia y 60 °F.

**Tabla 1.** Propiedades estimadas para los principales gases producidos, transportados y consumidos en Colombia.

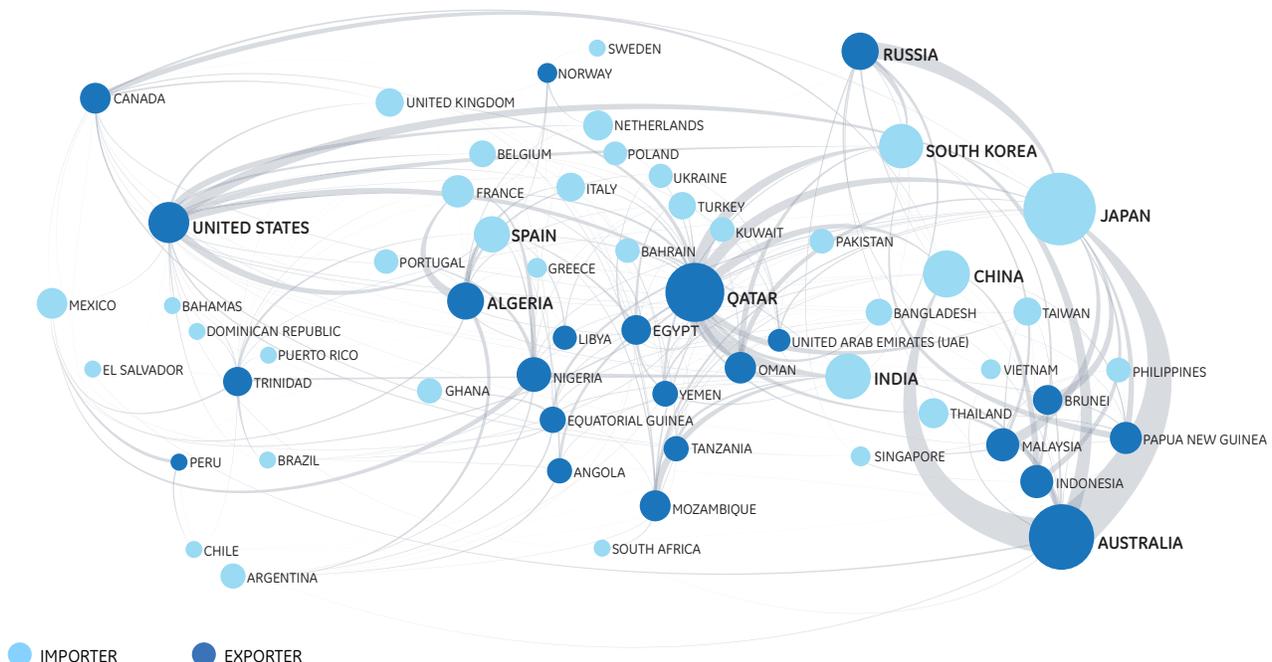
Actualmente, en Colombia, los gases de la Tabla 1 representan los extremos opuestos en cuanto a sus características, y corresponden a los mayores volúmenes producidos, procesados, transportados y consumidos a nivel nacional. A pesar de sus propiedades significativamente diferentes, hasta el momento la combustión de estos gases (y sus mezclas) se ha desarrollado exitosamente a diferentes altitudes y latitudes cubriendo todo el territorio nacional servido por la red nacional de transporte de gas.

No obstante, en Colombia hasta hace muy poco se ha dado inicio a los proyectos de consolidación de infraestructura que permita la importa-

ción de gas natural licuado (GNL). Una vez materializados estos importantes proyectos, será posible en el corto plazo importar gas en estado líquido al mejor postor, para que luego de ser transportado en buques tanqueros hasta las costas colombianas, sea devuelto a su estado gaseoso y posteriormente transportado a los centros de consumo apoyándose en las mismas redes de transporte y distribución existentes en la actualidad.

En la Figura 1 se puede apreciar una proyección del mercado del GNL al año 2020, aunque Colombia no figura todavía, seguramente debido a que los proyectos de GNL se encuentran aún en sus fases tempranas, lo que si se observa es que el mercado será muy intrincado y diversificado. Si se incluye a Colombia dentro del mapa como un punto de importación y se considera su ubicación estratégica (2 océanos) y la vecindad al canal de Panamá, es claro que dependiendo de la oferta estará en capacidad de acceder tanto a los mercados del Atlántico como los del Pacífico.

Si bien una oferta diversificada trae el beneficio de acceder a mejores precios del gas como consecuencia de la libre competencia entre exportadores, también representa retos técnicos importantes pues la calidad de los gases tendrá una variabilidad mayor en el tiempo, exigiendo un mayor control por parte de Productores, Transportadores y Distribuidores, así como del sector



**Figura 1.** Proyección de la red de GNL a 2020 (Fuente: [1])

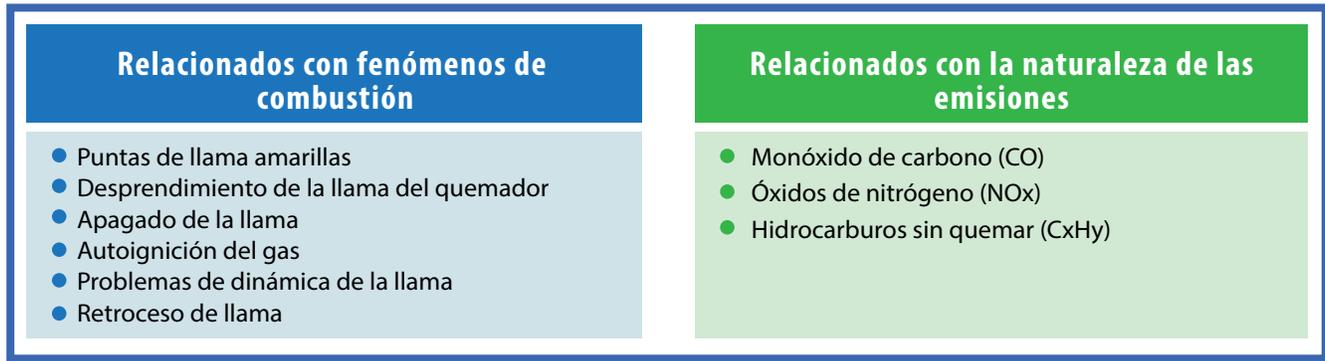


Figura 2. Problemas de intercambiabilidad

de generación eléctrico, clientes industriales y estaciones de GNV. Estos aspectos no pueden descuidarse pues involucran condiciones de seguridad que impactan directamente sobre los usuarios finales y que por ende son altamente críticos.

### 3. PROBLEMAS DE INTERCAMBIABILIDAD

Los problemas con la intercambiabilidad se van a traducir en fenómenos de combustión que van a afectar el desempeño de los equipos de combustión y las emisiones que se generan como producto de la combustión.

En cualquier caso, lo que se desea es que los equipos operen siempre dentro del intervalo óptimo para el cual fueron diseñados y ensayados. Los principales inconvenientes derivados de los problemas de intercambiabilidad se presentan en la Figura 2.

Cuando existen inconvenientes de intercambiabilidad se generan simultáneamente varios de los problemas citados en la Figura 2. No obstante, los problemas que se presenten no solo van a depender del gas sino también de la tecnología del equipo de combustión. Entre los equipos sensibles de sufrir problemas de desempeño, eficiencia e inconvenientes de seguridad, como consecuencia de problemas de intercambiabilidad, están: los gasodomésticos (estufas, calentadores, secadoras, chimeneas, calefactores, etc.), calderas, hornos, intercambiadores de calor de llama directa e indirecta, motores reciprocantes (P. Ej. GNV y plantas) y turbinas de combustión empleadas en generación térmica (Ver Figura 3).

### 4. ÍNDICE DE WOBBE

A pesar de haber sido desarrollado en 1927, el índice de Wobbe es el parámetro simple de mayor importancia en la intercambiabilidad de gases.

Este parámetro sigue siendo vigente en la actualidad, y seguirá siéndolo pues fue conceptualizado a partir de los fundamentos básicos de operación de los quemadores. El índice de Wobbe



Figura 3. Falla de turbina a gas debido a retroceso de llama (Fuente: [2])

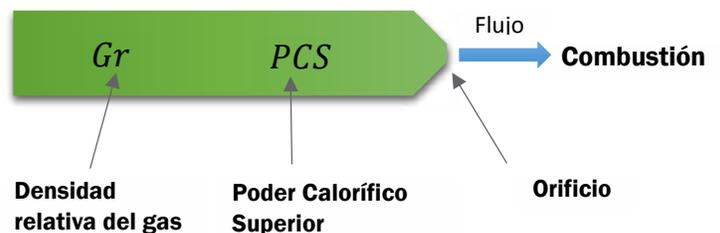


Figura 4. Fundamentación del índice de Wobbe (Fuente: [3])

se basa en la descripción física del fenómeno de flujo de gas a través de un orificio de área constante que funciona como inyector o puerto de entrada de energía a un quemador (Ver Figura 4).

El flujo de gas en términos de la entrada de energía al quemador ( $Q_{energía}$ ) es equivalente al producto entre el poder calorífico superior del gas ( $PCS$ ) y el caudal volumétrico ( $Q_v$ ).

$$Q_{energía} = PCS \times Q_v$$

A presión constante, el caudal volumétrico a través de un orificio fijo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad relativa ( $Gr$ ), siendo la densidad relativa el cociente entre la densidad del gas y la densidad del aire a las mismas condiciones de presión y temperatura.

$$Q_v \propto \frac{1}{\sqrt{Gr}}$$

De esta manera, Wobbe estableció una proporcionalidad que combinaba las ecuaciones de flujo de entrada de energía al quemador y de la hidráulica asociada al flujo de gas.

$$Q_{energía} \propto \frac{PCS}{\sqrt{Gr}} = \text{Índice de Wobbe (IW)}$$

El IW representa entonces la energía del gas que es inyectado a un quemador. A partir de este planteamiento Wobbe formuló las siguientes observaciones:

- La energía que suministra un quemador es directamente proporcional al caudal volumétrico de gas que ingresa al quemador (considerando que el diámetro y la presión en el inyector son constantes).
- La velocidad del flujo a través de un orificio dado, a presión constante es inversamente proporcional a la densidad relativa del gas.
- El poder calorífico de un gas es directamente proporcional a su gravedad específica.

Cuanto mayor sea el IW, mayor será la energía asociada al flujo de gas que pasa a través de un orificio o inyector de determinado tamaño para alimentar un quemador. Dado que en la mayoría de aparatos de combustión, el flujo de gas se regula haciendo pasar el gas a través de un orificio, la gran utilidad del IW consiste en que para cualquier

orificio, todos los gases que tengan el mismo IW van a suministrar la misma cantidad de energía. De esta manera, el IW es un indicador sencillo, fácil de usar y que brinda una buena descripción genérica de la intercambiabilidad.

En la práctica, actualmente la mayoría de equipos de combustión de carácter doméstico o industrial soportan variaciones del IW de hasta  $\pm 5\%$ . Sin embargo, la debilidad del IW consiste en su incapacidad para predecir la ocurrencia de fenómenos de combustión indeseados como aquellos que se mencionaron en la Figura 2. Si bien se considera que el IW es un parámetro clave de intercambiabilidad, comúnmente se le debe usar en asocio con otros parámetros límites complementarios como por ejemplo el poder calorífico, el contenido total de inertes y el contenido de hidrocarburos pesados (C4+), entre otros (Ver Figura 5).

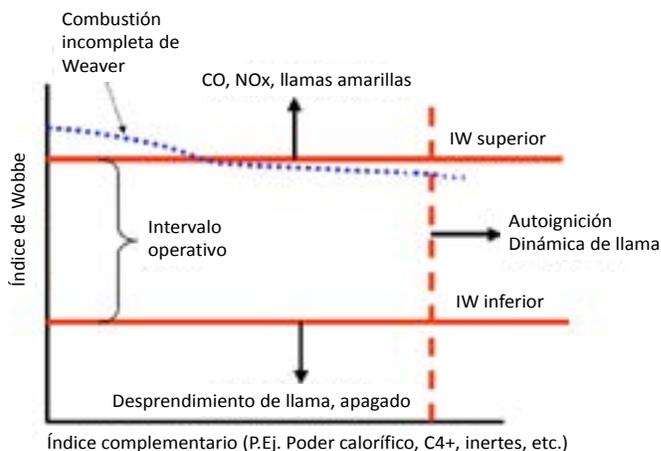


Figura 5. Análisis de intercambiabilidad usando el Wobbe y un índice complementario (Fuente: [4])

Es así como surgió la necesidad de estudiar experimentalmente el desempeño de diversas mezclas de gases operando sobre quemadores de diferentes diseños para establecer una base de conocimiento que permitiera una mejor predicción de los problemas específicos de intercambiabilidad. A partir de los estudios se desarrollaron factores adicionales que servían para complementar el IW, entre los que vale la pena destacar los índices de AGA y los índices de Weaver, los cuales fueron desarrollados en los Estados Unidos.

En la siguiente sección vamos a analizar el índice de Weaver como ejemplo de índice múltiple.

## 5. ÍNDICES DE WEAVER

En los Estados Unidos, en el período comprendido entre 1927 y 1948, se llevaron a cabo casi 280000 ensayos de combustión empleando alrededor de 500 mezclas de gases diferentes (desde gases manufacturados con un poder calorífico muy bajo y alto contenido de hidrógeno hasta gases licuados de petróleo). Estos ensayos se orientaban al estudio de problemas específicos de combustión que podían presentarse como consecuencia de la intercambiabilidad. Este gran esfuerzo fue necesario debido a que la industria del gas natural inició su desarrollo a partir de los yacimientos que empezaron a ser descubiertos y que iban a ser aprovechados para complementar o sustituir el gas manufacturado que era empleado comúnmente.

A partir del formidable conjunto de datos obtenidos experimentalmente, se apoyaron diversos estudios para la formulación de índices de intercambiabilidad orientados a la descripción de problemas de combustión particulares como por ejemplo las puntas de llama amarillas, el retroceso de llama, la combustión incompleta, etc. Sin embargo, la mayoría de los datos obtenidos correspondían a gases de composiciones muy diferentes al gas natural, tan solo un pequeño subconjunto de datos reflejaba las mezclas de gas natural.

Apoiado en estos datos y en los trabajos desarrollados por AGA, Frank Knoy y J.F. Anthes, entre otros, Elmer R. Weaver desarrolló un conjunto de 6 índices (4 de ellos nuevos con respecto a los trabajos realizados anteriormente), consistentes

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	CRITERIO
$J_H = \frac{H\sqrt{D_a}}{H_a\sqrt{D}}$	Índice de intercambiabilidad con respecto a la tasa a la cual se genera el calor. $H$ es el poder calorífico (Btu/ft <sup>3</sup> ) y $D$ es la densidad relativa del gas.	Para gases exactamente intercambiables en este aspecto $J_H=1$ . Muestra cuantitativamente el efecto de un cambio en la composición del gas con respecto al consumo de calor en el artefacto.
$J_A = \frac{A\sqrt{D_a}}{A_a\sqrt{D}}$	Índice de intercambiabilidad con respecto al suministro de aire para combustión. $A$ es el volumen de aire (expresado pies cúbicos) requerido para la combustión completa de 1 pie cúbico de gas.	Cuando $J_A=1$ , la cantidad total de aire requerido para quemar los gases es la misma, la fracción del aire que corresponde a aire primario es la misma, y a menos que se presenten fenómenos convectivos inusuales, el exceso de oxígeno en los productos de combustión es el mismo. De esta manera, es un indicador relativo del riesgo de combustión incompleta (generación de monóxido).
$J_L = J_A \frac{S}{S_a} \frac{100 - Q}{100 - Q_a}$	Índice de intercambiabilidad con respecto al desprendimiento de llama. $S$ es la máxima velocidad de propagación de la llama en una mezcla gas-aire, expresada como una fracción de la velocidad de la llama para el hidrógeno; $Q$ es el porcentaje de contenido de oxígeno en el gas.	Para gases que son exactamente intercambiables con respecto al desprendimiento de la llama $J_L=1$ . Muestra la tendencia relativa de las llamas de los dos gases a separarse de los puertos del quemador.
$J_F = \frac{S}{S_a} - 1,4J_A + 0,4$	Índice de retroceso de llama.	Muestra la tendencia relativa de las llamas de los dos gases a retroceder al interior de los quemadores. Cuando $J_F=0$ , no hay diferencia entre los dos gases en este aspecto.
$J_Y = J_A + \frac{N - N_a}{110} - 1$	Índice de intercambiabilidad con respecto a la formación de llamas amarillas. $N$ es el número de átomos de carbono liberados fácilmente por cada cien moléculas de gas.	$J_Y$ es una medida de la tendencia relativa de los dos gases a producir llamas amarillas y liberar hollín. Cuando $J_Y=0$ no hay diferencia entre los gases en este aspecto
$J_I = J_A - 0,366 \frac{R}{R_a} - 0,634$	Índice de combustión incompleta. $R$ es la relación entre el número de átomos de hidrógeno en todas las formas de combinación presentes en el gas combustible con y el número de átomos de carbono en los hidrocarburos.	Para gases exactamente intercambiables en este aspecto, $J_I=0$ . Es una expresión general para las tendencias relativas de los dos gases para liberar monóxido de carbono.

*Nota 1: El subíndice  $a$  representa la condición de ajuste original del artefacto, es decir para la cual estaba originalmente reglado.*

Tabla 2. Índices de Weaver

en expresiones matemáticas que muestran aproximadamente las tendencias relativas entre un gas de ajuste original y un gas sustituto para generar resultados satisfactorios (o insatisfactorios) de intercambiabilidad sin modificar el ajuste original del equipo de combustión.

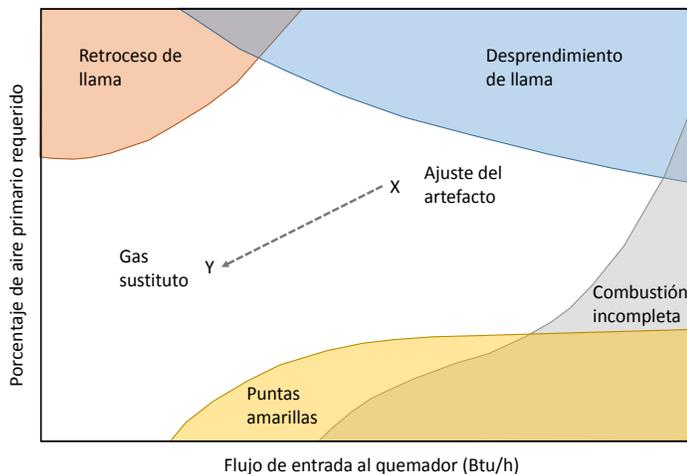


Figura 6. Marco de referencia para intercambiabilidad según los índices de AGA y de Weaver (Fuente: [7])

Los índices de Weaver se presentan en la Tabla 2. Con estos 6 índices es posible entonces conformar un marco de referencia para la intercambiabilidad mucho más completo que el uso del IW simple o combinado con otra propiedad o característica del gas (Ver Figura 6).

Si bien el método de Weaver (y el de AGA) brindan una descripción más completa de los fenómenos de combustión, están limitados en cuanto al tipo de quemadores y de mezclas que fueron probados experimentalmente para obtener los índices, estos se adecúan de forma aceptable para quemadores tradicionales tipo Bunsen con premezcla de aire parcial, quedando por fuera los diseños de quemadores modernos. En lo que respecta a los tipos de gas, como se mencionó anteriormente, en la fecha en que se llevaron a cabo los experimentos apenas estaba madurando la industria del gas y todavía existía una fuerte dependencia del gas manufacturado, con contenidos de hidrógeno importantes, un compuesto prácticamente ajeno al gas natural actual por lo que las mezclas usadas en los experimentos no fueron muy representativas para las necesidades actuales.

Por último, la aplicación del método es compleja y todos los índices parten de una base relativa al

gas de reglaje o ajuste original. A continuación se describirá de manera general el método gráfico de Dutton, el cual refleja claramente lo que ha sido la perspectiva europea en materia de intercambiabilidad.

## 6. MÉTODO GRÁFICO DE DUTTON

En Europa también hubo un desarrollo importante de índices de intercambiabilidad, predominantemente basados en soluciones de carácter gráfico y modificaciones del IW original, entre los métodos desarrollados se destacan los de Delbourg, Gilbert & Prigg y Dutton.

El método de Dutton fue desarrollado en el Reino Unido durante las décadas de 1970 y 1980, aplica específicamente para gas natural, así como para gases que contienen hidrógeno y sus respectivas mezclas. El diagrama de Dutton es una representación gráfica (bidimensional para el gas natural y tridimensional para las mezclas que contienen hidrógeno, como el caso de los gases manufacturados) de las características de intercambiabilidad, en el cual el IW se grafica contra la concentración de propano y nitrógeno, componentes planteados para formular una equivalencia con respecto a los hidrocarburos pesados y los compuestos inertes, respectivamente.

En su investigación Dutton se apoyó en los fenómenos de combustión asociados a la llama del quemador, en particular la temperatura de llama y la velocidad de la combustión, a lo cual agregó los efectos sobre los artefactos de combustión.

Si bien Dutton tenía claro que el contenido de hidrocarburos e inertes eran claves para definir con exactitud las características de la llama, la apuesta de Dutton era poder desarrollar un método sencillo que pudiera ser fácilmente usado por las empresas vinculadas a la cadena del gas en su país. Para esto propuso el concepto de “mezclas equivalentes” en las cuales los hidrocarburos se representan por medio de una mezcla de metano y propano que contiene el mismo número promedio de átomos de carbono por molécula y el mismo número total de átomos de hidrógeno y carbono con respecto al gas real, por su parte, en lo que respecta a los inertes Dutton propuso el contenido de nitrógeno para representar todos los compuestos inertes presentes en el gas (incluido el oxígeno), todos los inertes tienen un nivel de nitrógeno equivalente de forma que las cantidades de gas inerte cuando se mez-

clan con los otros componentes no-inertes generan una mezcla con el mismo IW que la mezcla real.

El abordaje del método de Dutton fue exitoso técnicamente debido a que la velocidad de la combustión de diferentes hidrocarburos lineales (alcanos) es similar, lo mismo sucede con el impacto de los inertes. Usando el concepto de mezclas equiva-

lentes, cualquier mezcla de gas puede representarse como un punto en un tetraedro en el cual cada vértice corresponde a uno de los 4 componentes de la mezcla equivalente (metano, propano, nitrógeno e hidrógeno). Así mismo, dentro del tetraedro se grafican conjuntos de superficies relacionadas con las propiedades fenómenos de la combustión y el desempeño de los artefactos, generadas a partir de los datos experimentales. En la Figura 7 se puede apreciar un ejemplo.

El tetraedro intersectado por las diversas superficies va a corresponder entonces a un “volumen de intercambiabilidad”, no obstante, puesto que la enorme mayoría de los gases naturales no contiene hidrógeno, el diagrama se simplifica pasando a ser bidimensional. Para el desarrollo del diagrama bidimensional, se toma el IW como el eje vertical y se realizan las gráficas en función del porcentaje de propano y nitrógeno (un factor comúnmente conocido como la componente de no-metanos o número propano-nitrógeno).

En la Figura 8 se puede ver un ejemplo de un diagrama de Dutton sobre el cual se han dibujado los límites empleados en el Reino Unido. Como se puede apreciar, las líneas límite de la izquierda corresponden a las líneas propano/metano y nitrógeno/metano, no hay gases naturales que caigan a

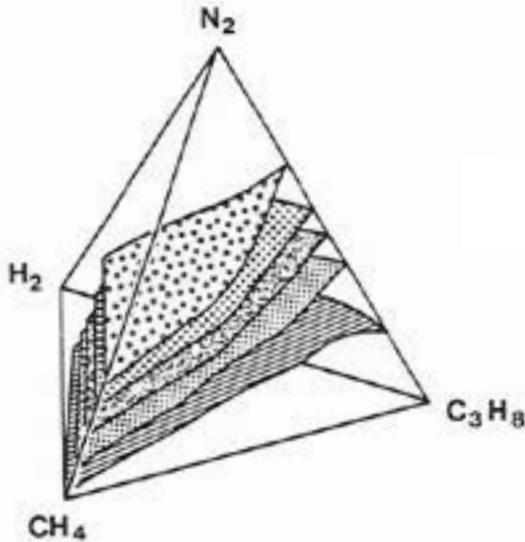


Figura 7. Tetraedro de Dutton para evaluación de intercambiabilidad mediante mezclas equivalentes (Fuente: [8])

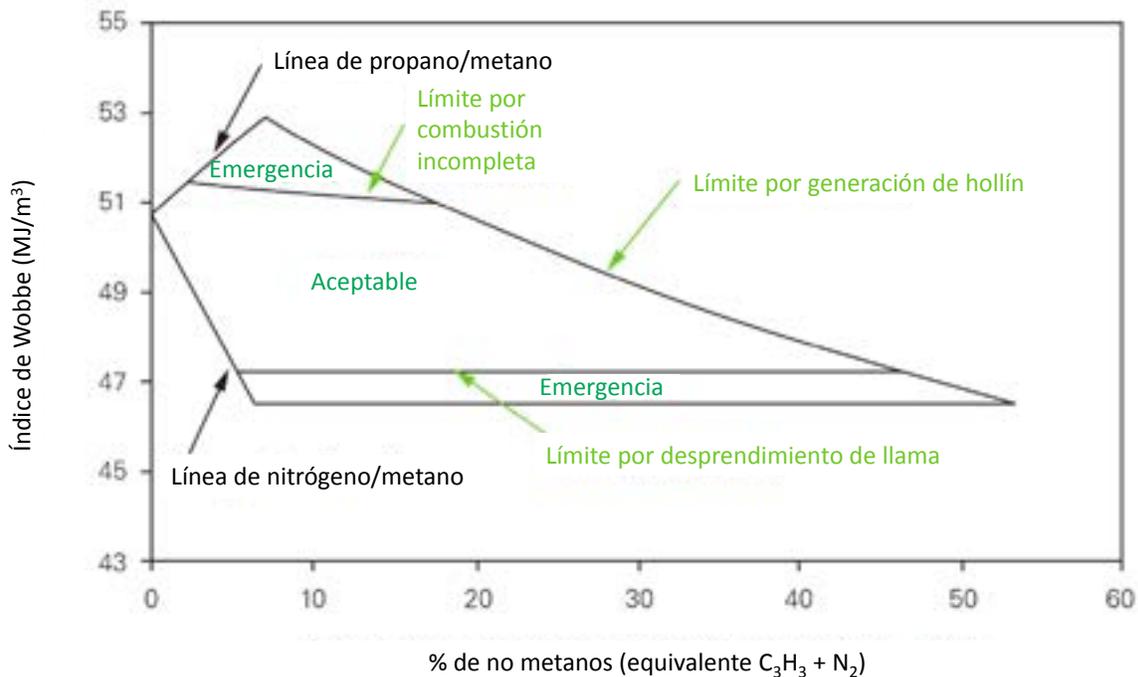


Figura 8. Tetraedro de Dutton para evaluación de intercambiabilidad mediante mezclas equivalentes (Fuente: [8])

la izquierda de dichas líneas. Así mismo, es claro que las mezclas de gas natural no pueden cubrir niveles de propano/nitrógeno de hasta 100% pues equivaldrían a un GLP o a una mezcla por fuera de los límites normales de inflamabilidad. Sobre la gráfica se incluyen los límites de combustión incompleta (frontera superior), generación de hollín (frontera derecha) y desprendimiento de llama (frontera inferior).

## 7. MARCO REGULATORIO COLOMBIANO

Antes de finalizar el artículo resulta conveniente mencionar que en Colombia el concepto de la intercambiabilidad de gases es un tema que si bien es conocido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), por el Ministerio de Minas y Energía (Minminas) y por el Consejo Nacional de Operación de Gas (CNO-Gas), en la práctica puede afirmarse que regulatoriamente la intercambiabilidad de gas es un tópico inexistente, aún a pesar de la perspectiva del abastecimiento del gas y sus impactos ante una apertura del mercado a gases de fuentes diversas como es el caso de la entrada del GNL.

Aunque la regulación vigente no trata el tema de la intercambiabilidad, se resalta que en 2008 la CREG desarrolló un acercamiento a la materia mediante la publicación del documento CREG-062 titulado “Especificaciones de Calidad del Gas Natural en el Punto de Entrada del Sistema Nacional de Transporte de Gas - Número de Wobbe”, el cual incluía un proyecto de resolución (CREG 084 de 2008) que pretendía complementar las especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases en el Sistema Nacional de Transporte de Gas (SNT). Al interior del CNO-Gas, sus miembros también han discutido la importancia de abordar el estudio y la proyección de propuestas que aborden la intercambiabilidad de gas de manera concreta para la realidad colombiana.

En el caso de la Resolución CREG 084 de 2008, las propuestas que se realizaban en su momento eran las siguientes:

1. Adoptar el índice de Wobbe (IW) como parámetro para verificar la intercambiabilidad de gases.
2. Adoptar el rango del IW de 47,7 MJ/m<sup>3</sup> a 52,7 MJ/m<sup>3</sup>, para el gas natural inyectado al SNT y comercializado en Colombia (Grupo H de la Segunda Familia), en el poder calorífico superior a condiciones estándar.

3. Asignar al Productor-Comercializador la responsabilidad de inyectar el gas al sistema de transporte dentro del rango de IW establecido.

## 8. CONCLUSIONES

1. La intercambiabilidad de gases es un aspecto de crucial importancia para la seguridad en el consumo del gas natural, en especial ante la futura apertura de Colombia a las importaciones de gas natural licuado, situación que traerá una gran diversidad en las composiciones del gas que entran a la red.
2. El Índice de Wobbe es un parámetro sencillo para evaluar intercambiabilidad de gases y es usado ampliamente en todo el mundo, sin embargo no es capaz de predecir por sí solo aspectos tales como fenómenos de combustión indeseados y variación en las emisiones, por lo cual debe ser usado en combinación con otras propiedades o parámetros de intercambiabilidad.
3. Los índices múltiples de AGA y Weaver fueron desarrollados en los Estados Unidos durante el período comprendido entre las décadas de 1920 y 1950, en estos se incluyeron los fenómenos de combustión y de dinámica de la llama como índices complementarios para definir mejor el desempeño de un gas sustituto con respecto al gas de ajuste con el cual está configurado el artefacto de combustión para operar. Sin embargo, su aplicación es compleja y además, la mayoría de los gases y los quemadores usados en los experimentos de dicha época no son un buen reflejo de la actualidad de la industria del gas natural.
4. El método gráfico de Dutton es un método poderoso para evaluar fácilmente situaciones de intercambiabilidad, este método fue desarrollado en el Reino Unido entre las décadas de 1970 y 1980. Aplica para todos los gases naturales, así como para gases manufacturados que presenten contenidos representativos de hidrógeno y las respectivas mezclas de estos. El modelo de Dutton se basa en el principio de “mezclas equivalentes”, a su vez este método considera diversos límites que corresponden a problemas de combustión y de dinámica de la llama.
5. En Colombia la regulación en materia de intercambiabilidad es prácticamente nula desde la perspectiva del correcto aprovisionamiento de

gas y de los medios para asegurar su consumo seguro. No obstante, la CREG y el CNO-Gas han tenido iniciativas enfocadas hacia la consolidación de aspectos de intercambiabilidad en las regulaciones y normas que todavía no se han visto materializadas de manera efectiva pero que alude a un tema altamente complejo que incluso ha sido difícil de abordar para los países industrializados.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Evans, Peter; Farina, Michael. "The age of gas & the power of networks" GE 2013.
- [2] International Gas Union; BP; GL Noble Denton. "Guidebook to gas interchangeability and gas quality". IGU-BP-GL 2011.
- [3] Kuipers, Edgar. "Interchangeability". Shell NA LNG. 2007
- [4] Natural Gas Council Plus. "White paper on natural gas interchangeability and non-combustion end use". NGC+ Interchangeability Work Group 2005.
- [5] American Gas Association. "Interchangeability of other fuel gases with natural gases - Research bulletin 36". AGA 1946.
- [6] Weaver, Elmer. "Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases". Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 46, No.3, March 1951 Research Paper 2193.
- [7] Halchuk-Harrington, Rosemarie; Wilson, Robert. "AGA Bulletin #36 and Weaver interchangeability methods: Yesterday's research and today's challenges" Xcel Energy & Keyspan Energy, 2006.
- [8] Dutton, B.C. "A new dimension to gas interchangeability". British Gas Corporation, Communication 1246, The Institution of Gas Engineers, 1984.
- [9] Comisión de Regulación de Energía y Gas. "Documento CREG-062: Especificaciones de calidad de gas natural en el punto de entrada del Sistema Nacional de Transporte de Gas - Número de Wobbe". CREG, 2008.
- [10] Comisión de Regulación de Energía y Gas. "Resolución No. 084 de 2008". CREG, 2008.
- [11] American Gas Association. "Natural Gas Quality Management Manual". First Edition. 2013.
- [12] Juan M. Ortiz A., Pedro A. Mojica G. "Bancos para Ensayos de Gasodomésticos". Tesis de Grado Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander. 2001.

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.

## Hacia el establecimiento de una **Cadena de trazabilidad** para las **Mediciones de Calidad de Aire**, Emisiones de fuentes fijas, y emisiones de fuentes móviles en Colombia.

Victor Manrique ([vmanrique@cdtdegas.com](mailto:vmanrique@cdtdegas.com))  
Diana Castillo ([dcastillo@cdtdegas.com](mailto:dcastillo@cdtdegas.com))

Corporación CDT de GAS  
Piedecuesta - Santander - Colombia



### Resumen

*La necesidad de contar con mediciones confiables de los parámetros que definen la calidad del aire es de vital importancia, ya que esto permite tener indicaciones precisas de los niveles de contaminación, con lo cual se puede hacer un control adecuado y eficiente de las emisiones de los compuestos contaminantes. Sin embargo, y a pesar de la importancia que representa para la salud este tema, en Colombia la aplicación del concepto de trazabilidad al SI, para las mediciones de contaminantes, es aún incipiente y requiere de un fuerte desarrollo en el área de Metrología Química. Por tanto, para lograr una confiabilidad aceptable en las mediciones es necesario en primera instancia identificar las sustancias que son medidas y reguladas con prioridad, y a partir de esto definir una posible estrategia de trazabilidad que sea aplicada a las mediciones de calidad de aire en Colombia.*

## 1. INTRODUCCIÓN.

La Corporación CDT de GAS tiene dentro de sus objetivos institucionales la misión de contribuir a la preservación del medio ambiente a través de la oferta de servicios especializados de metrología de flujo y calidad de gases. Es por esto que se ha planteado con el apoyo de Colciencias, el objetivo de formular un programa estratégico para brindar trazabilidad a las mediciones de calidad del aire atmosférico, que le permita al país contar con herramientas para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó un estudio y un análisis de los distintos aspectos que cubre la calidad del aire, con el fin de tener un panorama claro acerca de los métodos de referencia que permiten dar trazabilidad a los distintos parámetros, y orientar de forma adecuada la formulación del programa estratégico.

Este documento incluye en primera instancia, un análisis de la problemática actual relacionada con las emisiones de contaminantes y continúa con una breve descripción de las principales sustancias que afectan la calidad del aire. Posteriormente, se muestra la normatividad ambiental que aplica en Colombia, donde se observan las sustancias reguladas y los límites de emisión de cada una de ellas.

Finalmente, se expone una propuesta de trazabilidad planteada a partir de los estudios y análisis realizados y las conclusiones y recomendaciones generadas, las cuales pretenden ser el inicio de un programa serio que con el apoyo de instituciones que trabajen estos temas puedan brindarle a Colombia en un mediano plazo la posibilidad de contar con mediciones confiables de los contaminantes del aire, a partir de las cuales se garantice una disminución de los niveles de contaminación ambiental en nuestro país.

## 2. ALCANCE

El Alcance del Plan involucra las mediciones asociadas a “Calidad de Aire Urbano”, “Emisiones de Fuentes Fijas”, y “Emisiones de Fuentes Móviles (vehiculares)”. No se han considerado los requerimientos de Calidad de Aire en ambientes interiores, en zonas clasificadas (atmósferas peligrosas por sustancias tóxicas, corrosivas, o inflamables),

ni para las mediciones de agentes microbiológicos o de patógenos en el aire. Tampoco se incluye la medición de parámetros físicos asociados al confort, como humedad relativa, temperatura, o velocidad de viento, ni las mediciones de emisión, o de concentración de Gases de Efecto Invernadero -GEI en la atmósfera.

Esto en consideración a la relevancia de la contaminación urbana por sus mayores impactos sociales y ambientales; y que algunas de las otras aplicaciones cuentan con rigurosos protocolos de Control y Aseguramiento de Calidad, debido a la criticidad de sus aplicaciones industriales. Sin embargo, la metodología aplicada en el presente plan fácilmente puede replicarse para generar los requerimientos para otras aplicaciones.

## 3. PANORAMA ACTUAL DE CALIDAD DE AIRE

El aire está compuesto principalmente por Oxígeno ( $O_2$ ) y Nitrógeno ( $N_2$ ), y adicionalmente contiene pequeñas cantidades de otras sustancias como Vapor de Agua, Ozono, Dióxido de Carbono e Hidrógeno. Sin embargo, emisiones provenientes tanto de procesos naturales (como la erupción de volcanes), así como de actividades industriales y de otras asociadas al desarrollo y la supervivencia de los seres humanos han originado la presencia de contaminantes en la atmósfera, deteriorando así la *calidad del aire* y por ende afectando la salud de los seres vivos. El aire constituye la atmósfera terrestre: a nivel troposférico es fundamental para la respiración y la fotosíntesis y en donde ocurren los fenómenos que originan el clima. A nivel estratosférico se encuentra la *capa de ozono*, que protege a la Tierra de los rayos ultravioleta del Sol.

En ambientes exteriores, la calidad del aire se ve afectada principalmente por las emisiones de vehículos (Figura 1) y por aquellas provenientes de la industria como la extracción y procesamiento de combustibles fósiles. Esta situación se evidencia con las altas tasas de morbilidad y mortalidad relacionadas con la mala calidad del aire. Por ejemplo la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) señala que anualmente mueren más de dos millones de personas por la exposición a sustancias contaminantes en el aire, como el material particulado  $PM_{2.5}$ . Por su parte, la Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer publicó en 2013 un Informe que considera “*comprobado que la con-*

taminación atmosférica causa cáncer”, teniendo en cuenta que en 2010 se produjeron 223000 muertes por cáncer de pulmón en todo el mundo relacionadas por la contaminación del aire (IARC, 2013).



Figura 1. Emisiones vehiculares del transporte público - Bucaramanga<sup>1</sup>

En Colombia, cada año ocurren aproximadamente 6000 muertes prematuras relacionadas con la contaminación del aire ambiente, de las cuales cerca de 1100 muertes están relacionadas con la contaminación al interior de los hogares por el uso de leña y carbón para cocinar. De acuerdo con el estudio “Colombia: Strengthening environmental and natural resources Institutions” realizado por el Banco Mundial en 2012, se estima que los costos en salud que representa este tipo de contaminación ascendieron al 1,1% del PIB en 2009. (IDEAM, 2012).

### Contaminantes prioritarios en la medición de la calidad de aire:

Teniendo en cuenta el grado de afectación que tienen los contaminantes en el aire y la frecuencia de sus emisiones, se tienen ciertas sustancias que son consideradas como prioritarias para la medición y control. A continuación, se hace una breve descripción de los principales contaminantes.

- **Material Particulado (PM):**

Es el término usado para denominar una mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire, entre las cuales se encuentra el polvo, la suciedad, el hollín, el humo y pequeñas gotas de líquido. Estas partículas pueden estar suspendidas en el aire por largos periodos de tiempo. Algunas partículas son lo sufi-

cientemente grandes u oscuras para ser vistas en forma de hollín o humo, otras son tan pequeñas que individualmente solo pueden ser detectadas con un microscopio electrónico. El material particulado puede ser un contaminante primario o secundario; las partículas “primarias”, tales como el humo o el hollín se emiten directamente al aire y son generados desde una variedad de fuentes tales como carros, camiones, autobuses, fábricas, sitios de construcción, carreteras sin pavimentar, trituración de piedras y quema de madera. Las partículas “secundarias” son formadas en el aire a partir del cambio químico de emisiones gaseosas primarias, éstas se forman indirectamente cuando los gases provenientes de la quema de combustibles reaccionan con la luz del sol y el vapor de agua. El material particulado denominado como PM<sub>2.5</sub> describe las finas partículas que tienen un diámetro menor o igual a 2,5 µm, por su parte el PM<sub>10</sub> se refiere a todas las partículas que son menores o iguales a 10 µm de diámetro.

- **Óxidos de Azufre (SO<sub>2</sub> y SO):**

Son gases incoloros, que se forman cuando se queman combustibles que contienen azufre, tales como el carbón y el petróleo. El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es el contaminante criterio indicador de las concentraciones de óxidos de azufre en el aire del ambiente. El SO<sub>2</sub> se disuelve en el vapor de agua para formar ácido e interactúa con otros gases y partículas en el aire para formar sulfatos y otros productos que pueden ser perjudiciales para las personas y su ambiente. La mayoría de las emisiones de SO<sub>2</sub> provienen de centrales eléctricas, especialmente en las que se utiliza carbón. Otras fuentes de SO<sub>2</sub> son las industrias que derivan sus productos de materias primas como minerales metálicos, carbón y petróleo crudo, o que queman carbón o petróleo para generar calor. Un ejemplo son las refinerías de petróleo, las cementeras y las empresas de procesamiento de metales.

- **Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>):**

Es el término usado para describir la familia de otros compuestos formados por oxígeno y nitrógeno, específicamente al NO, NO<sub>2</sub>. Los NO<sub>x</sub> son un grupo de gases altamente reactivos que juegan un papel importante en la formación de ozono. La mayoría de los óxidos de nitrógeno son incoloros e inodoros, sin embargo el NO<sub>2</sub> junto con partículas en el aire puede frecuentemente ser visto como una capa de color marrón rojizo sobre muchas áreas urbanas.

<sup>1</sup> Fuente: Vanguardia.com

Los óxidos de nitrógeno se forman cuando un combustible es quemado a altas temperaturas, como en un proceso de combustión, es por esto que las fuentes primarias de NO<sub>x</sub> son los motores de los vehículos, las centrales eléctricas y otras fuentes industriales, comerciales y residenciales que queman combustibles.

- **Monóxido de Carbono (CO):**

Es un gas incoloro e inodoro formado cuando el carbón en un combustible no se quema completamente. Los motores de los vehículos contribuyen con aproximadamente 60% de las emisiones globales de CO, por lo que los más altos niveles de este compuesto se encuentran en las ciudades que presentan altos flujos vehiculares. Otras fuentes de emisión de CO incluyen procesos industriales, quema de madera y fuentes naturales como los incendios forestales. Estufas de leña y de gas, humo de cigarrillos y calentadores de gas y keroseno sin ventilación son fuentes de CO en ambientes interiores.

- **Hidrocarburos:**

Los gases hidrocarburos son conocidos como Compuestos Orgánicos Totales (COT). Este concepto incluye a todos los compuestos carbonados excepto los carbonatos, carburos metálicos, y los óxidos de carbono (monóxido de carbono y dióxido de carbono). En el contexto de la gestión de la

calidad del aire, los COT también son referidos como Hidrocarburos Totales (HCT o HC). Algunos de los COT emitidos a la atmósfera tienen una reactividad fotoquímica muy baja, o bien, carecen de ella. Por otra parte, los compuestos considerados fotoquímicamente reactivos son denominados Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). Entonces, por definición, los COV son un subconjunto de los hidrocarburos totales, y son gases fotoquímicamente reactivos que pueden participar en la formación del ozono. Algunos de los compuestos en esta categoría de contaminantes incluyen aldehídos tales como el formaldehído y acetaldehído, además de compuestos aromáticos como el benceno.

#### 4. LEGISLACIÓN AMBIENTAL VIGENTE EN CALIDAD DE AIRE Y EMISIONES CONTAMINANTES

Con la Constitución de 1991, en Colombia se elevó a norma constitucional la “*consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, en particular el derecho a gozar de un ambiente sano*” (Art. 79). Posteriormente, se ha desarrollado la legislación pertinente con el fin de reglamentar los lineamientos para garantizar que la calidad del aire sea adecuada.

La Tabla 1 muestra un resumen de la legislación vigente en Colombia, que establece las normas de calidad de aire, y los límites permisibles de contaminación.

ALCANCE	RESOLUCIÓN	DESCRIPCIÓN
Calidad de aire	601 de 2006	Establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia
	610 de 2010	Modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006.
	650 de 2010	Adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire
	2154 de 2010	Ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire
Emisiones de Fuentes Fijas	909 de 2008	Establece las Normas y Estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por Fuentes Fijas
	760 de 2010	Adopta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas
	2153 de 2010	Ajusta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010
Emisiones de Fuentes Móviles	910 de 2008	Reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres

Tabla 1. Legislación ambiental colombiana en calidad de aire y emisiones contaminantes

#### 4.1 Norma de Calidad de Aire. Resolución 601 (2006), modificada por la Res. 610 (2010).

Esta resolución contiene los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia, así como las medidas generales para su mitigación, y es una norma aplicable a todo el territorio nacional.

La Resolución 601 de 2006 regula varios contaminantes criterio (PM10, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO) y no convencionales: Benceno, Plomo (Pb) y sus compuestos, Cadmio, Mercurio, Hidrocarburos Totales expresados como Metano (CH<sub>4</sub>), Tolueno (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>) y Vanadio (Vd).

#### 4.2 Emisiones por fuentes fijas. Resolución 909 (2008) modificada por la Res. 1309 (2010).

Esta resolución establece las normas y estándares de emisión admisibles para contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas (Figura 2), tiene como objeto adoptar los procedimientos de medición de emisiones para fuentes fijas y reglamenta los convenios de reconversión a tecnologías limpias. La resolución establece los estándares de emisión admisibles de emisiones de Material Particulado (MP), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), compuestos de Flúor inorgánico (HF), compuestos de Cloro inorgánico (HCl), Hidrocarburos Totales, Dioxinas y Furanos, Neblina Ácida (Trióxido de Azufre H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cobre (Cu) y sus compuestos para actividades industriales nuevas y existentes en diferentes sectores productivos.



Figura 2. Emisiones de Fuentes Fijas.

#### 4.3 Emisiones por fuentes móviles. Resolución 910 de 2008.

Esta resolución establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres (vehículos automotores). Además reglamenta los requisitos y certificaciones a las que están sujetos los vehículos y demás fuentes móviles, sean importadas o de fabricación nacional.

La resolución establece los límites de emisión de Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarburos Totales (HCT) permisibles para vehículos accionados con gasolina en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralenti o prueba estática, y las concentraciones de Oxígeno (O<sub>2</sub>) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) requerida para considerar válida la prueba.

### 5. ANÁLISIS DE LA OFERTA NACIONAL DE SERVICIOS DE MUESTREO Y/O ANÁLISIS DE CONTAMINANTES DEL AIRE (CALIDAD DE AIRE Y EMISIONES POR FUENTES FIJAS) EN LABORATORIOS ACREDITADOS.

#### 5.1 Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire - SVCA

Los Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA) (Figura 3) son estaciones equipadas con instrumentos para monitorear los niveles de contaminación del aire en ciudades y zonas de interés. Varios SVCA conforman una red de *vigilancia de la calidad de aire* en una ciudad o región determinada.

A diciembre de 2013, en el sistema de Información SISAIRE del IDEAM están registrados 131 SVCA



Figura 3. SVCA de la Corporación para la Defensa de la Mesa de Bucaramanga (CDMB)

instalados en todo el país. El 85% de estos SVCA monitorean PM10, el cual es el contaminante más monitoreado en todo el país. El 32% de los SVCA monitorean óxidos de Nitrógeno, el 28% monitorean dióxido de azufre, y el 26% monitorean monóxido de carbono (Ver Figura 4). El PM2.5 es el contaminante menos monitoreado, y solo cuenta con sistemas de muestreo instalados en el 13% de los SVCA registrados.

## 5.2 Laboratorios Acreditados

En Colombia, según lo estipulado en el Decreto 1600 de 1994 y la Resolución No. 0176 de 2003, es competencia del IDEAM la acreditación de los Laboratorios Ambientales, bajo los lineamientos de la Norma NTC-ISO/IEC 17025 “Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración”. A diciembre de 2013 había 63 Laboratorios acreditados por IDEAM, cuyo alcance incluye específicamente servicios de muestreo y/o análisis de calidad de aire, y de emisiones por fuentes fijas.

- **Calidad de Aire:** De estos 63 Laboratorios, 55 prestan servicios de análisis de calidad de aire. Las sustancias con mayor oferta de servicios de análisis son: PST y PM10 con cerca del 87%; SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> con el 73%; y CO y O<sub>3</sub> con oferta de servicios de análisis en el 18% de los Laboratorios acreditados para Calidad de Aire (Ver Figura 5).
- **Fuentes Fijas:** Se identificaron 48 laboratorios acreditados por IDEAM que prestan servicios de muestreo y/o análisis de emisiones de fuentes fijas. Las sustancias con mayor oferta de servicios son: los óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) con el 83% de los laboratorios, material particulado con el 77%, los compuestos de azufre, incluyendo SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> y niebla de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, con el 73% (Ver Figura 6).
- **Centros de Diagnóstico Automotor:** En Colombia, el *Organismo Nacional de Acreditación -ONAC* es la entidad encargada de acreditar los *Centros de Diagnóstico Automotor -CDA*, para la realización de procedimientos de *revisión técnico mecánica y de emisiones contaminantes* que permiten verificar las condiciones mecánicas, de seguridad y los niveles de emisión de gases contaminantes. El directorio de acreditación

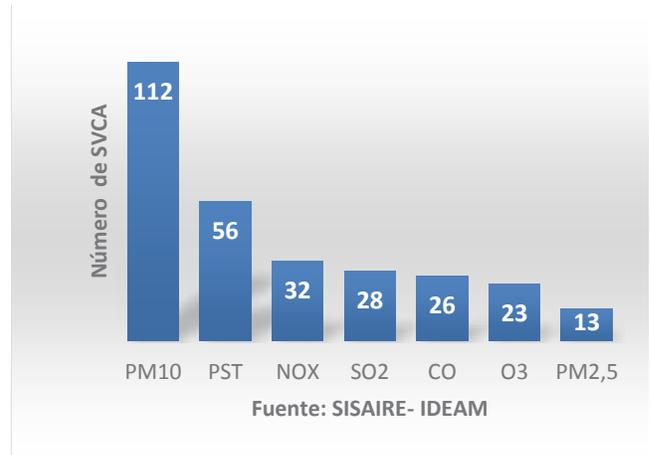


Figura 4. Contaminantes más monitoreados por los Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire SVCA en Colombia (Red SISAIRE)

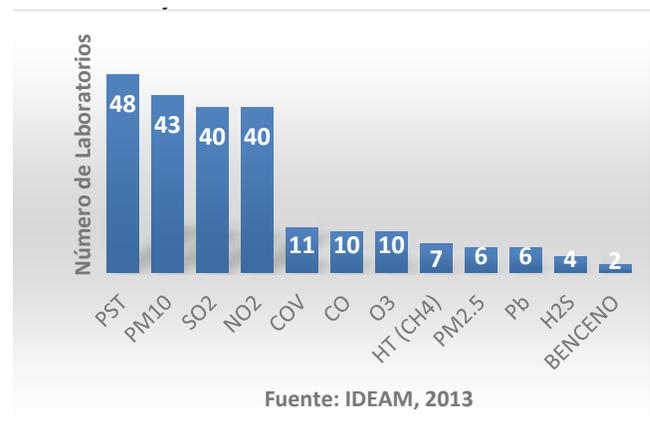


Figura 5. Oferta de servicios de muestreo y/o análisis de calidad de aire en Laboratorios Acreditados por IDEAM

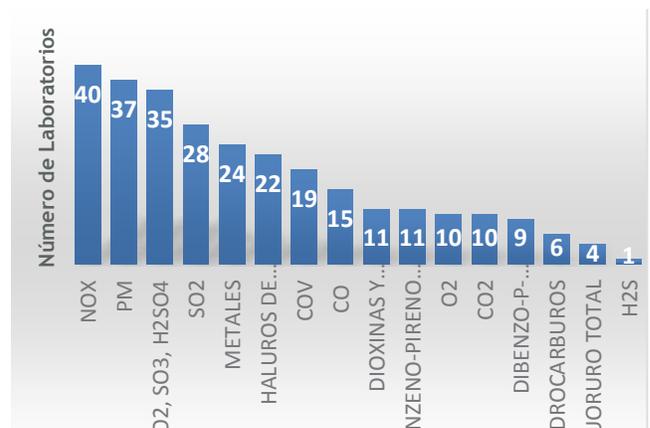


Figura 6. Oferta de servicios de muestreo y/o análisis de emisiones de Fuentes Fijas en Laboratorios Acreditados por IDEAM

de la ONAC registra 267 Centros de Diagnóstico Automotor acreditados a la fecha. En general, prácticamente todos los sistemas de análisis de gases de combustión vehicular utilizados en los CDA muestrean y analizan cuatro sustancias: Oxígeno (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), e hidrocarburos totales. Algunos analizadores incluyen el muestreo de otras sustancias y el cálculo de índices específicos como por ejemplo la relación aire/combustible.

### 5.3 Selección de las sustancias de interés y sus intervalos de concentración.

Para cada uno de los ámbitos de aplicación (Calidad de Aire, emisiones por Fuentes Fijas y emisiones por Fuentes Móviles) se seleccionan las sustancias de mayor relevancia dentro de la regulación ambiental vigente, tomando como criterio si la sustancia está incluida dentro de dos o más ámbitos de aplicación, y por otra parte la mayor oferta de servicios de muestreo y/o análisis por parte de laboratorios acreditados y sistemas de vigilancia de calidad de aire SVCA.

Como resultado del anterior ejercicio se seleccionan las sustancias incluidas en dos o más ámbitos de

la regulación ambiental vigente y que cuentan con una oferta representativa de servicios de muestreo y análisis (más de 20 laboratorios, CDA, o SVCA), priorizadas de acuerdo a la mayor oferta de servicios para cada sustancia (ver Tabla 2).

- Material Particulado (PST y PM<sub>10</sub>)
- Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)
- Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Hidrocarburos totales (HCT)

### 5.4 Intervalos de concentración

Los intervalos de concentración de cada sustancia relevantes para las diferentes aplicaciones se determinan de acuerdo a los límites permisibles en la regulación ambiental vigente tanto de calidad de aire como de emisiones (ver Tabla 3).

Estas concentraciones relativamente bajas se pueden obtener mediante la dilución de gases de referencia en concentraciones altas, y se puede realizar de manera estática o dinámica. El método de dilución seleccionado afecta directamente la incertidumbre de la mezcla de gas a obtener, que por supuesto será mayor que la incertidumbre del gas de referencia original.

				Calidad de Aire	Fuentes Fijas	Fuentes Móviles
				Res. 601/10 y 610/10	Res. 909/08 y 1309/10	Res. Res. 910/08
Contaminantes Convencionales	Contaminantes "Criterio"	Monóxido de carbono	CO	Si		Si
		Dióxidos de azufre	SO <sub>2</sub>	Si	Si	
		Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	Si	Si	Si
		Ozono	O <sub>3</sub>	Si		
		Plomo	Pb	Si	Si	
		Material Particulado	MP	Si	Si	Si
Contaminantes Convencionales	Compuestos Orgánicos	Hidrocarburos	CxHy	Si	Si	Si
		Tolueno		Si		
		Benceno		Si		
		Dioxinas y Furanos			Si	
	Compuestos Inorgánicos	Trióxido de Azufre	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		Si	
		Compuestos de Cloro	HCl		Si	
		Compuestos de Flúor	HF		Si	
	Metales	Cobre	Cu		Si	
		Cadmio	Cd	Si	Si	
		Mercurio	Hg	Si		
Vanadio		Vd	Si			

Tabla 2. Sustancias contaminantes y emisiones incluidas en la regulación ambiental vigente.

SUSTANCIAS	INTERVALOS DE CONCENTRACIÓN DE CANTIDAD DE SUSTANCIA, DE INTERÉS PARA CADA APLICACIÓN		
	CALIDAD DE AIRE <sup>1</sup>	EMISIONES FUENTES FIJAS <sup>2</sup>	EMISIONES FUENTES MÓVILES
PM	50 - 500 µg/m <sup>3</sup>	50 - 250 mg/m <sup>3</sup>	NA
SO <sub>2</sub>	30 - 600 nmol/mol	140 - 200 µmol/mol	NA
NO <sub>2</sub>	50 - 1000 nmol/mol	-	NA
NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> )	-	260 - 300 µmol/mol	
NO <sub>x</sub>	-	500 - 1800 mg/m <sup>3</sup>	
CO	8 - 40 µmol/mol	NA	1-5 cmol/mol (%)
HCT	NA	40 mg/m <sup>3</sup>	-
HCT (CH <sub>4</sub> )		56,6 µmol/mol	200-10000 µmol/mol

NOTA: Los intervalos de concentración de interés están expresados en unidades del SI para fracción de cantidad de sustancia: cmol/mol (%), µmol/mol (ppm) y nmol/mol (ppb) para las sustancias puras, y en µg/m<sup>3</sup> para las diluciones de mezclas de sustancias (material particulado y óxidos de nitrógeno).

Tabla 3. Intervalos de concentración para cada aplicación

### 5.5 Incertidumbres objetivo

La legislación ambiental colombiana no establece criterios de calidad de las mediciones de contaminantes de aire, en términos de los errores máximos permisibles, la incertidumbre de las mediciones reportadas por las entidades de control y vigilancia.

En ese sentido, la confiabilidad de las declaraciones de “cumplimiento” o “incumplimiento” de un límite de inmisión, puede verse comprometida cuando el valor reportado esta cercano a los límites, con una diferencia menor a la incertidumbre objetivo. La Directiva Europea 2008/50/CE establece objetivos de calidad de los datos de concentración de contaminantes en el aire, obtenidos por mediciones continuas, mediciones indicativas, modelaciones o por estimaciones. La Tabla 4 resume las incertidumbres objetivo de las mediciones de calidad de aire para los contaminantes definidos anteriormente.

Hay que considerar además que la estimación de la incertidumbre sobre una medición puntual de concentración de un contaminante en el aire, no involucra únicamente la incertidumbre del equipo de medición, o del gas de referencia utilizado para su calibración y ajuste. Otros factores que añaden incertidumbre a la medición, y que se deben controlar son:

- Las condiciones meteorológicas
- La selección del punto de monitoreo
- La topografía del lugar
- Las variaciones diarias de emisión
- Las características metrológicas del equipo
- El método de referencia utilizado

La incertidumbre debida a estos factores se puede reducir con una adecuada selección de los puntos de monitoreo, y la implementación de medidas de control y aseguramiento de la calidad (QA/QC) de la red de vigilancia de calidad de aire que involucre el aseguramiento metrológico de todas las

INCERTIDUMBRE OBJETIVO	CONTAMINANTE	
	NO <sub>x</sub> /NO <sub>2</sub> CO SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub> PM <sub>2,5</sub>
Mediciones continuas	15%	25%
Mediciones indicativas	25%	50%
Modelamiento (Diaria)	50%	-
Modelamiento (media anual)	30%	50%
Estimación	75%	100%

Tabla 4. Incertidumbres objetivos según el método de cuantificación para cada contaminante

<sup>1</sup> A condiciones de referencia 298,15 K y 101,325 kPa.

<sup>1</sup> A condiciones de referencia 298,15 K y 101,325 kPa con oxígeno de referencia del 11%.

<sup>1</sup> Límite superior (1800 mg/m<sup>3</sup>) establecido por la Res. 1309 de 2010 para motores nuevos o existentes de capacidad igual o superior a 1MW, medido a condiciones de referencia y con oxígeno de referencia de 15%.

magnitudes de influencia del proceso de medición de contaminantes.

## 6. PROPUESTA DE TRAZABILIDAD PLANTEADA

El estudio realizado por la Corporación CDT de GAS y descrito en los puntos anteriores, permitió realizar una evaluación cualitativa de la infraestructura, los recursos y la experiencia con que cuenta Colombia en el tema de trazabilidad de las mediciones de Calidad de Aire. La Figura 7 muestra un esquema de como se da la jerarquía de trazabilidad y su relación con los recursos disponibles actualmente en el país, lo que permite establecer una probable técnica de trazabilidad para ser implementada.

Por su parte, la Figura 8 muestra la diseminación de la trazabilidad en las mediciones de calidad de aire por medio de estándares para análisis de gas.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La trazabilidad de las mediciones es una condición necesaria para establecer de forma confiable las indicaciones de Calidad del Aire, y de emisiones contaminantes, y por lo tanto, para asegurar la calidad de las medidas de monitoreo y control, y la efectividad de las políticas en este sentido.

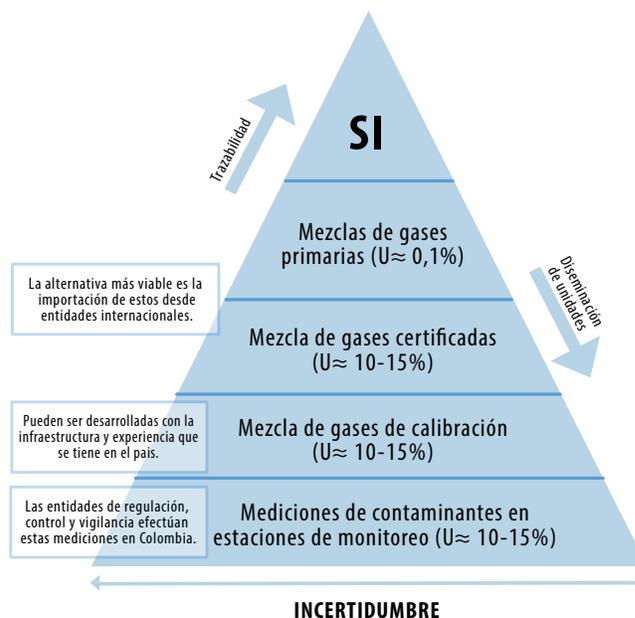
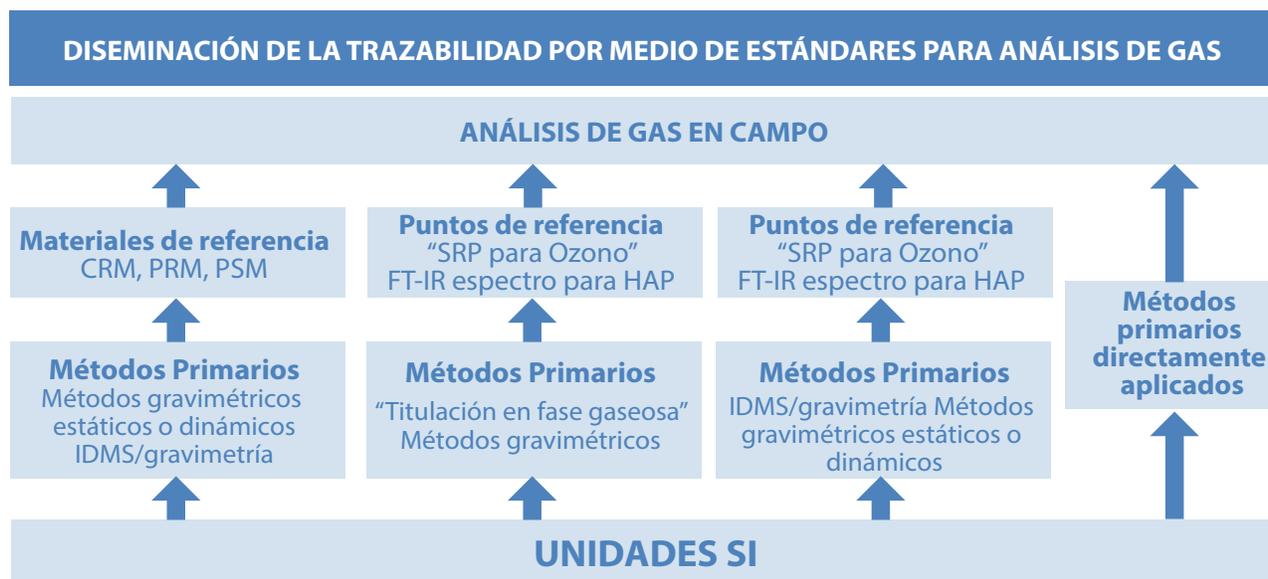


Figura 7. Jerarquía de trazabilidad y su relación con los recursos disponibles en Colombia

Actualmente, Colombia cuenta con una completa normatividad legal que establece los límites de calidad de aire (Res. 601 de 2006 y Res. 610 de 2010) y los límites permisibles de emisiones de fuentes fijas (Res. 909 de 2008 y Res. 1309 de 2010) y de fuentes móviles (Res. 910 de 2008), más una red de



CRM = Material de Referencia Certificado, PRM = Material de Referencia Primario, PSM = Mezcla Estándar Primaria  
IDMS = Espectroscopia de masas por dilución isotópica, SRP = Fotómetro de referencia estándar, HAP = Contaminante peligroso del aire

IRMM = Institute for Reference Materials and Measurements, BIPM = Bureau International des Poids et Mesures,  
FT-IR = Espectroscopia infraroja por transformada de Fourier

Figura 8. Diseminación de la trazabilidad por medio de estándares para análisis de gas

sistemas de vigilancia de la calidad de aire (SISAIRE), y una red de laboratorios y centros de diagnóstico automotor acreditados.

A pesar de los avances logrados por el Sistema Nacional de Metrología, el país no cuenta aún con las capacidades tecnológicas y científicas para brindar trazabilidad metrológica a las mediciones de estos contaminantes, en los intervalos de concentración e incertidumbres requeridas.

Como resultado del presente estudio, se recomienda a las entidades del SNCTI, laboratorios acreditados, Instituto Nacional de Metrología y entidades de Control y Monitoreo, emprender los estudios y esfuerzos de I+D+i necesarios, que le permitan al país en el corto plazo contar con trazabilidad en las mediciones de:

- Material Particulado (PM)
- Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)
- Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Monóxido de carbono (CO)
- Hidrocarburos totales (HCT)

Estos contaminantes registran las mayores excedencias en los sistemas de vigilancia de la calidad de aire (como el CO y el PM) en las ciudades, o son especialmente peligrosos (como el SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>), o son precursores de otros contaminantes (como los Hidrocarburos totales). Además, tienen la mayor oferta de servicios de muestreo y/o análisis, y por lo tanto, una mayor demanda de servicios de calibración.

Debido a que estos gases son monitoreados en diferentes aplicaciones, cada una de éstas establece requerimientos particulares en cuanto a concentración. Por ejemplo, el CO es monitoreado en los ámbitos de (1) control de calidad de aire, y (2) de control de emisiones de fuentes móviles. Sin embargo, las concentraciones requeridas varían notablemente, desde 8-40ppm para los SVCA, hasta 10000-50000ppm (1-5%) para los sistemas de diagnóstico de emisiones

vehiculares. Por lo tanto las tecnologías para la obtención (y verificación) de los gases de referencia, sus diluciones y su proceso de aseguramiento y control de calidad deben escogerse e implementarse cuidadosamente dependiendo de la aplicación.

La segunda parte de este informe presentará los métodos de referencia (y equivalentes) y tecnologías de medición aplicables en cada ámbito de aplicación, y la tercera parte presentará la propuesta de trazabilidad y sus requerimientos tecnológicos.

## 8. REFERENCIAS

- [1] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 909 de 2008. "Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones"*
- [2] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 910 de 2008. "Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones"*.
- [3] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 610 de 2010. "Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia."*
- [4] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 760 de 2008. "Por la cual se adopta el Proto-*

*colo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas”.*

- [5] REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 650 de 2010. *“Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”*
- [6] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES -IDEAM. Listado de Laboratorios acreditados por el IDEAM, bajo los lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025, y según lo estipulado en el Decreto 1600 de 1994 y la Resolución No. 0176 del 31 de octubre de 2003. [En línea] Disponible en <http://institucional.ideam.gov.co/>
- [7] ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA -ONAC. Directorio Ofical de Acreditaciones - Listado de Centros de Diagnóstico Automotor Acreditados. [En Internet] Disponible en <http://www.onac.org.co/>
- [8] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES -IDEAM. Sitio web del Subsistema de Información sobre Calidad de Aire - SISAIRE. Listado de Redes y Estaciones [En Internet] Disponible en <http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/redesEstaciones/redesEstaciones.jsp>
- [9] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS ICONTEC. NTC/ISO/IEC 17025 *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. 2005*
- [10] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. Estado de la Calidad del Aire en Colombia. 2007-2010 ISBN.978-958-8067-56-8. Bogotá, 2012. [En Internet] Disponible en <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/022433/CALIDADDELAI-REWEB.pdf>
- [11] INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER -IARC. Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Press release No. 221. Octubre de 2013. [En Internet]. Disponible en: [http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221\\_E.pdf](http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf)
- [12] WORLD HEALTH ORGANIZATION -WHO. Regional Office for Europe. Review of evidence on health aspects of air pollution -REVIHAAP Project. First Results. 2013. [En Internet] Disponible en: [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0020/182432/e96762-final.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/182432/e96762-final.pdf)
- [13] WORLD HEALTH ORGANIZATION -WHO. Nota descriptiva N° 313 Calidad del aire y salud. 2011. [En Internet] Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- [14] THE WORLD BANK. SUSTAINABLE DEVELOPMENT DEPARTMENT LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN REGION - COLOMBIA AND MEXICO COUNTRY MANAGEMENT UNIT. Colombia: Strengthening Environmental and Natural Resources Institutions. Study2: Environmental Health in Colombia: An Economic Assessment of Health Effects. 2012.
- [15] NATIONAL AIR QUALITY REFERENCE LABORATORIES AND THE EUROPEAN NETWORK-AQUILA. Roles and Requirements for Measurement Traceability, Accreditation, Quality Assurance/ Quality Control, and Measurement Comparisons, at National and European Levels.2009.

- [16] KOELLIKER Delgado, Jorge. La calidad del aire y su relación con la metrología. Centro Nacional de Metrología. CENAM 2011.
- [17] ISO 6145-1, Gas Analysis - Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods - Part 1: Methods of calibration.
- [18] NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-035-SEMARNAT-1993. Métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- [19] EEA Report No 4/2012. Air quality in Europe – 2012 Report. ISSN 1725-9177 Disponible en <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2012>.
- [20] ESPINOSA Rubio, Matilde. Manuales de monitoreo atmosférico. 2007.
- [21] BAYARRI Miró, José V. Gestión Integral de la Contaminación, “Gestión en la atmósfera”.
- [22] ISO 14111 - Guidelines to traceability in analysis
- [23] Ph. QUEVAUVILLER. O.F.X. Donard. Stated References for ensuring traceability of chemical measurements for long-term environmental monitoring. Francia 2001.
- [24] ISO GUIDE 35 - Reference Materials—General and statistical principles for certification.
- [25] Dr. DE BIÈVRE, Paul; Dr. Günzler Helmut. Traceability in Chemical Measurement. 2005
- [26] P. FISICARO, R. Champion, G. Labarraque, B. Lalere, T. Mace, C. Sutour. Strategies implemented at LNE to establish the traceability of environmental measurements.
- [27] RICHTER Wolfgang, Gettler Bernd. A national traceability system for chemical measurements. 2003.
- [28] KORC ME, Farías F, Cevala R. El proceso de fijación y revisión de normas de calidad del aire. Lima: CEPIS; 2000. (CEPIS)

## Ciencia básica de los **Efectos del Metano** sobre el cambio climático.

Estado del arte y escenario de reducción.

Víctor Manrique ([vmanrique@cdtdegas.com](mailto:vmanrique@cdtdegas.com))

Corporación CDT de GAS  
Piedecuesta - Santander - Colombia

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; continuamos en esta sección compartiendo 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 por qué y para qué estos esfuerzos están siendo realizados.

### Resumen:

*Dada la preocupación mundial sobre el Cambio Climático, científicos e ingenieros de todo el planeta trabajan permanentemente por encontrar soluciones que permitan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente las emisiones antropogénicas de metano, por su mayor potencial de calentamiento global, y por su valor como recurso energético. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático -IPCC, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos -EPA y la Iniciativa Global del Metano -GMI, la Agencia Internacional de la Energía -IEA, la Organización Environmental Defense Found -EDF, y consultores especializados como ICF International, son algunas de las entidades privadas o gubernamentales que en los últimos tres años han contribuido a mejorar significativamente el conocimiento sobre el papel que las emisiones antropogénicas de metano juegan dentro de la química atmosférica, y a proponer los escenarios para el desarrollo y despliegue de las alternativas tecnológicas para su reducción costo-efectiva, que se resumen en este artículo.*

Fotografía: Burbujas de metano congeladas

Cuando los suelos cubiertos de hielo (permafrost) se derriten, las antiguas tundras y bosques se convierten en humedales y lagos (thermokarst). El carbono almacenado en la tierra congelada y la nieve es consumida por microorganismos, los cuales liberan gas metano al ambiente. Cuando los lagos de hielo se congelan en invierno, las burbujas de metano quedan atrapadas en el hielo.

Ubicación: Alaska  
Creditos: Miriam Jones, USGS

## 1. INTRODUCCIÓN.

El metano es un gas hidrocarburo de la familia de los alcanos, de fórmula química  $\text{CH}_4$ , que se forma principalmente por la descomposición de materia orgánica. Es un gas incoloro, inodoro, insoluble en agua y de menor densidad que el aire. El metano está presente en la naturaleza, pues se produce por la descomposición de materia orgánica. También es el principal componente del gas natural, y por lo tanto, un valioso recurso energético.

El metano en la atmósfera es considerado como un gas de efecto invernadero -GEI- relativamente potente, y por lo tanto uno de los forzadores del fenómeno de Calentamiento Global. A pesar de que su vida media en la atmósfera es relativamente corta ( $12,4 \pm 3$  años), el metano tiene un efecto 28 a 32 veces mayor que el dióxido de carbono (en un horizonte de tiempo de 100 años).

El más reciente Informe **Climate Change 2013: The Physical Science Basis** del “Quinto Reporte de Evaluación” (Fifth Assessment Report - AR5) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático -IPCC-, reúne los recientes descubrimientos, resultados de investigaciones y escenarios del rol del metano frente al cambio climático. Este Informe -del cual se basa el presente Artículo- da cuenta de un impacto relativamente mayor que el previsto en los anteriores Informes, y señala que cerca del 16%

de las emisiones antropogénicas de GEI corresponden a metano, que para el año 2010, alcanzaron las  $7.8 \pm 1.6$  GtCO<sub>2</sub>e/año (50-65% de las emisiones totales de metano). Por estas razones, y sumado a su importancia como recurso energético, dentro de los escenarios de políticas energéticas y climáticas se considera que la reducción de las emisiones de metano antropogénicas es crucial para alcanzar los objetivos de mitigación del Calentamiento Global.

## 2. PRINCIPALES FUENTES DE EMISIONES DE METANO

Dentro del ciclo biogeoquímico del metano, existen tres tipos de orígenes de las emisiones de metano a la atmósfera: biogénico, pirogénico y termogénico, que además pueden darse como resultado de actividades humanas o de procesos naturales (Ver Figura 1).

- **Fuentes biogénicas.** Las fuentes biogénicas están relacionadas con la degradación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas (humedales, fermentación entérica, cultivos de arroz, rellenos sanitarios y termitas). Se estima que las emisiones de metano de origen biogénico durante la década 2000-2009 fueron de 177 a 284 TgCH<sub>4</sub>/año debidas a humedales y de 187 a 224 TgCH<sub>4</sub>/año para emisiones originadas por actividades agropecuarias y por residuos.

Dentro del término “humedales” se incluye una amplia variedad de ecosistemas, como pantanos, ciénagas y tierras inundadas. Debido a que las emisiones de los humedales varían sensiblemente con los cambios estacionales de temperatura y precipitación, se ha determinado con alta confiabilidad que estas emisiones son el principal promotor de las variaciones interanuales de las emisiones globales de metano.

Por otra parte, las emisiones de metano por cultivos de arroz alcanzan las 33-40 TgCH<sub>4</sub>/año de las cuales el 90% se emiten en la zona tropical de Asia, especialmente China e India, y las emisiones por ganadería (fermentación entérica y manejo de estiércol) se estiman entre 87-94 TgCH<sub>4</sub>/año, con la mayor contribución proveniente de China, India, Brasil y EEUU.

- **Fuentes pirogénicas.** Estas fuentes están relacionadas con la combustión incompleta de biomasa o de biocombustibles, y se estiman entre 32-39 TgCH<sub>4</sub>/año durante la década 2000-2009. La quema de biomasa de bosques tropicales y boreales (17-21 TgCH<sub>4</sub>/año) tiene un impacto menor que las emisiones por

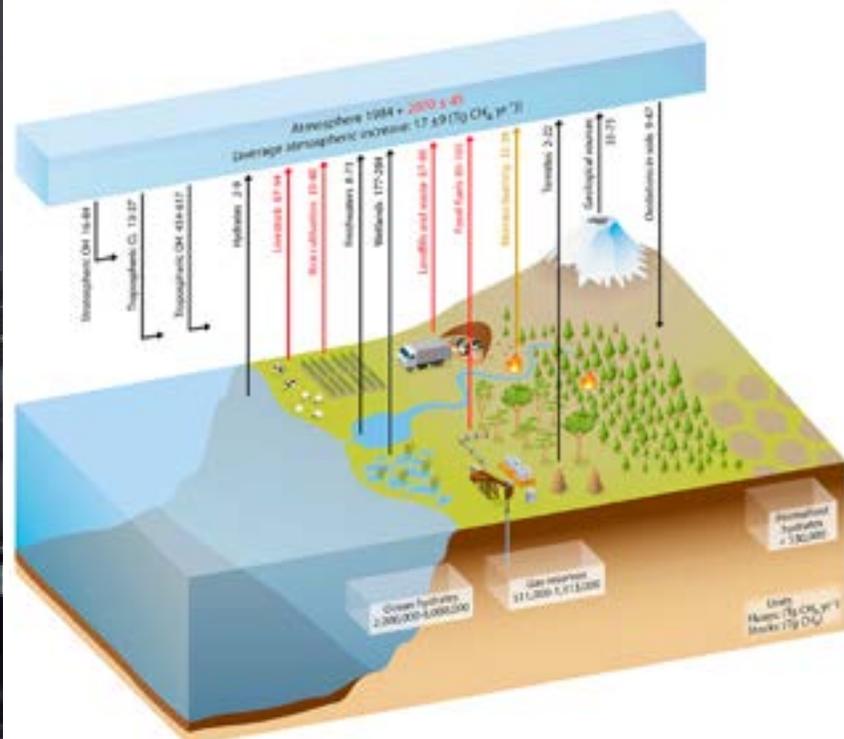


Figura 1. Ciclo biogeoquímico del metano (Fuente IPCC)

humedales sobre las variaciones interanuales de emisiones, excepto en los años con Fenómeno del Niño, donde se pueden presentar incendios más intensos y prolongados.

- **Fuentes termogénicas.** Se refiere al metano contenido en los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), formados a partir de la transformación de materia orgánica por procesos geológicos.

La producción de gas natural (compuesto por un 80-98% de metano) ha estado asociada a la producción de petróleo desde sus comienzos. Sin embargo, debido a la falta de infraestructura e incipientes mercados, durante mucho tiempo se consideró el gas natural como un subproducto sin valor económico que se venteara directamente a la atmósfera, se re-inyectaba a los pozos, o se quemaba sin propósitos energéticos. Actualmente esta situación ha cambiado, pero a pesar de que el gas natural se aprovecha en la mayoría de regiones productoras, se producen emisiones de metano debidas principalmente a fugas y venteos de gas natural. Solamente en los Estados Unidos estas emisiones alcanzan los 85-105 TgCH<sub>4</sub>/año, cerca de un 3% de la producción anual. ((EPA, 2006; Olivier and Janssens-Maenhout, 2012).

Por otra parte, también es importante considerar las emisiones geológicas de metano que incluyen filtraciones marinas y terrestres de metano, emisiones de volcanes, y emisiones de hidratos de metano, que todas juntas ascienden a 42-64 TgCH<sub>4</sub>/año. De esta forma, el componente de emisiones termogénicas se estima cercano al 30% de las emisiones totales de metano.

En la tabla 1 resume los inventarios de emisiones globales de metano, para las tres últimas décadas. Estos Inventarios fueron estimados por el IPCC en su Quinto Reporte de Evaluación (2013) a partir de un enfoque *Bottom-up* (de abajo hacia arriba) es decir, a partir de la disgregación de las fuentes principales y el uso de información disponible como estudios e inventarios de emisiones particulares para cada tipo de fuente puntual. (IPCC,2013)

### 3. CARACTERÍSTICAS DEL METANO COMO GAS DE EFECTO INVERNADERO

A continuación se presentan tres aspectos relevantes relacionados con las observaciones y mediciones del metano y su interacción en la química atmosférica: (1) sus niveles de concentración en la atmósfera, (2) su forzamiento radiativo y (3) su potencial de calentamiento global, que son las métricas utilizada para evaluar y comparar cuantitativamente el impacto del metano respecto a otros gases de efecto invernadero.

#### 3.1 Niveles de concentración.

De acuerdo con el IPCC, las concentraciones actuales de CH<sub>4</sub> exceden las concentraciones más altas registradas en núcleos de hielo durante los últimos 800.000 años. Así, la concentración de metano en la atmósfera se ha incrementado notablemente desde 722±25 ppb en 1750, hasta alcanzar 1803±4 ppb<sup>1</sup> en 2011, la cual es un 150% mayor respecto a los niveles de la era pre-industrial.

Sin embargo, como se observa en la Figura 2, entre 1999 y 2006 la tasa de crecimiento se redujo hasta prácticamente cero, y la concentración de metano en la atmósfera se mantuvo relativamente estable. Esto sugiere un equilibrio aparente entre

FUENTE	1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2009
<b>Fuentes Naturales</b>	<b>355 [244-466]</b>	<b>336 [230-465]</b>	<b>347 [238-484]</b>
Humedales naturales	225 [183-266]	206 [169-265]	217 [177-284]
Otras fuentes	130 [61-200]	130 [61-200]	130 [61-200]
<b>Fuentes Antropogénicas</b>	<b>308 [292-323]</b>	<b>313 [281-347]</b>	<b>331 [304-368]</b>
Agricultura y residuos	185 [172-197]	187 [177-196]	200 [187-224]
Quema de biomasa y biocombustibles	34 [31-37]	187 [177-196]	200 [187-224]
Combustibles fósiles	89 [89-89]	84 [66-96]	96 [85-105]
<b>TOTAL</b>	<b>663 [536-789]</b>	<b>649 [511-812]</b>	<b>678 [542-852]</b>

*Nota:* Valores en TgCH<sub>4</sub>/año. Los valores entre corchetes indican los límites superior e inferior alrededor del valor central representativo.

Tabla 1. Inventario de emisiones de metano de las tres últimas décadas.

<sup>1</sup> ppb: part per billion (1/1000 millones)

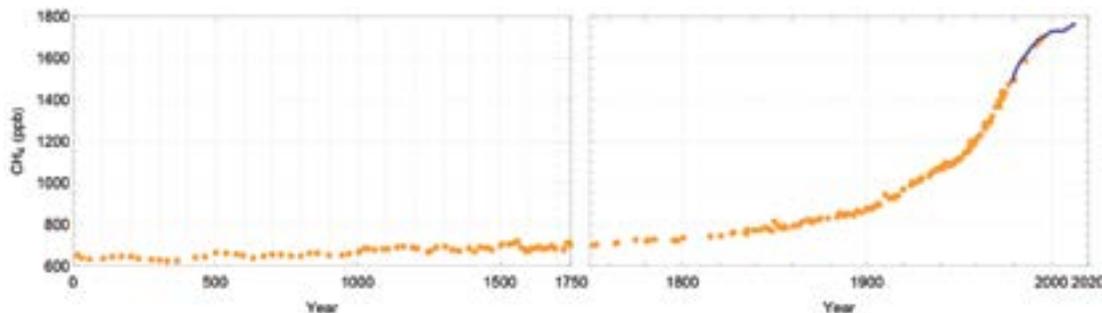


Figura 2. Aumento de la concentración de metano en la atmósfera desde la era pre-industrial (Fuente IPCC).

las fuentes y sumideros, cuyas razones no han sido totalmente establecidas. Sin embargo, a partir de 2007 la concentración de metano en la atmósfera ha vuelto a incrementar, con tasas de crecimiento anómalas, de 21TgCH<sub>4</sub>/año y 18 TgCH<sub>4</sub>/año para los años 2007 y 2008. La razón de estos incrementos se asocia al aumento de humedales por causa del Fenómeno del Niña ocurrido durante estos años, sin embargo aún no se ha podido establecer si este aumento corresponde a la variabilidad interanual, o a una tendencia de crecimiento sostenida.

### 3.2 Forzamiento Radiativo.

El concepto de Forzamiento Radiativo - FR se utiliza para evaluar y comparar la potencia de los mecanismos que afectan el balance de radiación de la Tierra y que causan el Cambio Climático. El FR se define como el cambio neto en el balance de energía de la Tierra, debida a las perturbaciones dadas, y se expresa en unidades de watts por metro cuadrado (W/m<sub>2</sub>) con referencia a un período de tiempo.

El FR total entre 1750 y 2011 debido a causas antropogénicas es de +2,29 [1,13-3,33] W/m<sub>2</sub> y se ha incrementado más rápido desde 1970 que durante las décadas anteriores. El FR de las emisiones de gases de efecto invernadero bien mezcladas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, y halocarbonos) para 2011 con respecto a 1750 es de 3,00 [2,22-3,78] W/m<sup>2</sup>.

Las emisiones de CH<sub>4</sub> han causado un FR de 0,97 [0,74-1,20] W/m<sup>2</sup>, lo cual es significativamente mayor que la anterior estimación de 0,48 [0,38-0,58] W/m<sup>2</sup> reportada por el IPCC en su Informe

AR4 (2007), y se debe a los cambios en la concentración de ozono y vapor de agua estratosférico promovidos por las emisiones de CH<sub>4</sub>.

### 3.2 Potencial de calentamiento Global -GWP

El GWP es un indicador de la energía total añadida a un sistema por un determinado componente, tomando como referencia la energía añadida por el CO<sub>2</sub>. Es una de las métricas más importantes y comúnmente utilizadas para cuantificar las contribuciones de diferentes sustancias al Calentamiento Global, comparar las emisiones de diferentes regiones, sectores y fuentes y establecer políticas de mitigación.

El GWP se utiliza como un parámetro para comparar las emisiones de diferentes gases en una misma escala, llamada “emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente”, sobre diferentes escalas de tiempo (convencionalmente 20, 100, y 500 años). La Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático -CMNUCM ha adoptado el GWP en un horizonte de 100 años, como la métrica utilizada para establecer los objetivos de reducción de emisiones de GEI con un enfoque reducción de múltiples gases, implementado en el Protocolo de Kyoto de 1997.

En la tabla 2 resume los cambios en la estimación del GWP del metano, publicados en diferentes reportes del IPCC desde 2001.

Diferentes factores contribuyen a la incertidumbre del GWP del CH<sub>4</sub>, incluyendo su tiempo de vida en la atmósfera y la eficiencia radiativa. En general, para el GWP con horizonte a 100 años se ha estima-

Informe IPCC	Tiempo de vida (años)	GWP (20 años)	GWP (100 años)	GWP (500 años)
Fifth Assessment Report AR5 (2013)	12,4	84-86	28-34	
Fourth Assessment Report AR4 (2007)	12	72	25	7,6
Third Assessment Report TAR (2001)	12	62	23	7

Tabla 2. Potencial de Calentamiento Global del Metano.

do una incertidumbre de -30%/+40% (90% de cobertura) (Reisinger, 2011) y mediante simulaciones de Monte Carlo, del orden de ±20% (90% de cobertura) (Boucher, 2012).

#### 4. OPORTUNIDADES DE MITIGACIÓN - ESCENARIO “4 PARA 2 °C”

La Agencia Internacional de la Energía - IEA ha publicado recientemente un informe llamado “Redrawing the Energy-Climate Map” (2013) que propone un escenario que permitiría reducir hasta 3,1GtCO<sub>2</sub>e de emisiones para el año 2020, es decir, el 80% de la reducción de emisiones necesaria para mantener abierta la puerta, hasta 2020, al objetivo de limitar el calentamiento global a 2 °C sin coste económico neto.

El escenario -llamado 4 para °2C - incluye cuatro políticas que podrían contribuir a reducir significativamente las emisiones del sector energético hasta 2020, mientras avanzan las negociaciones internacionales sobre el Clima en la Conferencia de las Partes en París en 2015 que conduzcan a la implementación de nuevas políticas a partir de 2020, como parte de un Acuerdo Internacional. Además, estas políticas se basan en tecnologías existentes, y probadas, y en general su implementación no perjudicaría ni limitaría el crecimiento económico de ningún país. (IEA, 2013)

Estas cuatro políticas propuestas por la IEA son:

- Adoptar medidas concretas en materia de eficiencia energética (contribuiría al 49% de la reducción de emisiones).
- Limitar la construcción y el uso de las centrales de carbón menos eficientes (21%).
- Minimizar las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) derivadas de la producción de petróleo y gas natural (18%).
- Acelerar la eliminación progresiva (aunque parcial) de las subvenciones al consumo de combustibles fósiles (12%)

En particular, la Política de reducción de emisiones de metano derivadas de la producción de petróleo y gas natural, propone reducir a un 50% estas emisiones, respecto al escenario *business as usual* (sin la implementación de medidas de reducción) que se alcanzaría en 2020. Esta reducción contribuirá a lograr un 18% del objetivo total de las 3,1GtCO<sub>2</sub>e, y se alcanzaría mediante la implementación de tecnologías disponibles y de mejores prácticas operativas, que ya están siendo utilizadas, y que además permitirían a las empresas del Sector Oil&Gas obtener beneficios operativos y económicos adicionales, como lo señala la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) a través de su programa Natural Gas STAR.

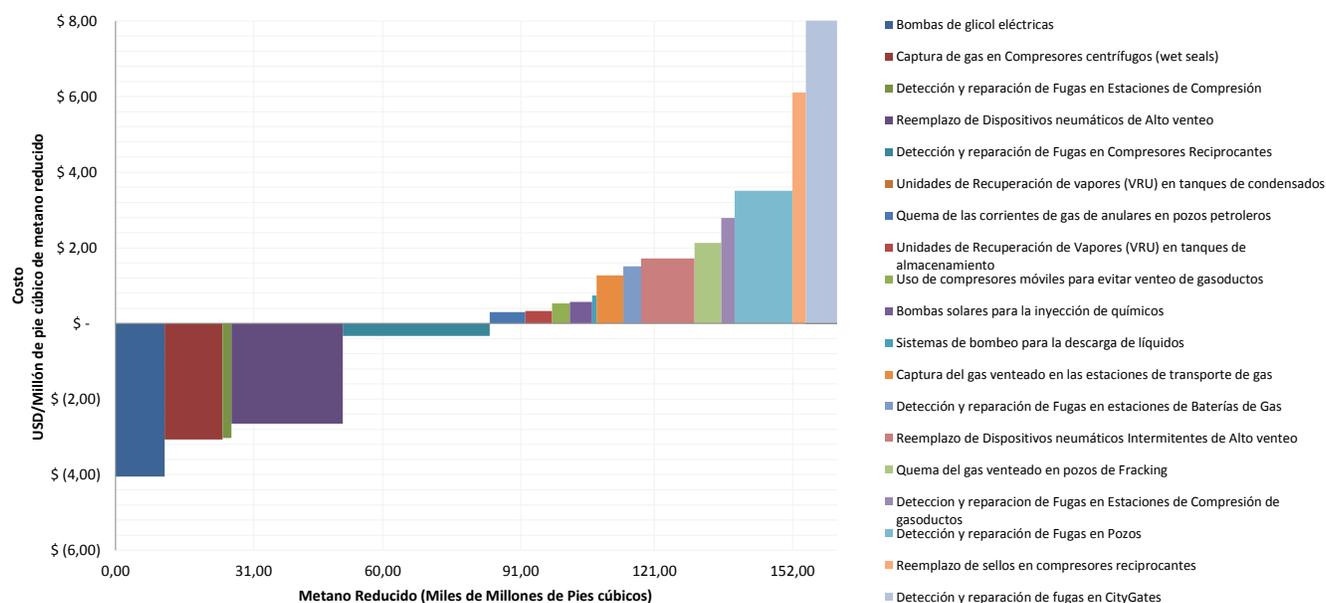


Figura 3. Curvas de abatimiento de costo marginal para la reducción de emisiones de metano. (fuente EDF)

En este sentido, en abril de 2014, el presidente Obama anunció un ambicioso Plan Multisectorial de Reducción de Emisiones de Metano para Estados Unidos, - que involucra al sector Oil&Gas - y que busca reducir hasta 90 millones de tonCO<sub>2</sub>e y así contribuir al objetivo de lograr en 2020 una reducción total del 17% por debajo de los niveles de emisiones de 2005. (U.S White House, 2014)

De acuerdo con un estudio de Environmental Defense Found (EDF) e ICF International, ya están disponibles las tecnologías y mejores prácticas que permitirán reducir, entre 2011-2018, hasta 163 billones de pies cúbicos (Bscf) de metano emitidos en los sistemas Oil&Gas de Estados Unidos, Esto corresponde a una reducción del 40% de las emisiones *business as usual* que se alcanzarían en 2018, con un costo neto de USD108 millones por año o USD0,66 por millon de pie cubico de gas (Mscf) dejado de emitir.

La Figura 3, presenta la curva de costo de abatimiento de emisiones de metano para el sector petróleo y gas, con las tecnologías y medidas aplicables actualmente. Como se observa, existen medidas de abatimiento con costo negativo (que generarán ahorros anuales de hasta \$164 millones de dólares por año, por el aprovechamiento del gas recuperado), y medidas de costo positivo (costo de USD 272 millones de dólares anuales). (EDF, 2014)

Por ejemplo: el reemplazo de las bombas neumáticas Kimray (impulsadas por gas) por bombas de glycol eléctricas en las plantas de deshidratación de gas natural, tienen un costo negativo de USD 4/Mscf de metano reducido, mientras que la implementación de programas de detección y reparación de fugas (LDAR) en las compañías de distribución de gas natural, tiene un costo positivo de USD19,75Mscf de metano reducido (con un precio de referencia de USD4/Mscf del gas natural.)

## 5. REFERENCIAS:

[1] Ciais, P., et al. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[2] Myhre, G., et al. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution

of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[4] United States Environmental Protection Agency. Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases: 2010-2030. Informe: EPA-430-R-13-011. Washington, 2013

[5] United States Environmental Protection Agency. Global Anthropogenic Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions: 1990 - 2030. Informe EPA 430-S-12-002. Washington, 2012

[6] Global Methane Initiative. Emisiones Mundiales de Metano y Oportunidades de Atenuación. 2011.

[7] International Energy Agency. Redrawing the Energy-Climate Map. World Energy Outlook Special Report. Francia, 2013.

[8] Dlugokencky, E. J., et al., 2009: Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH<sub>4</sub> burden. Geophys. Res. Lett., 36, L18803.

[9] Reisinger, A., M. Meinshausen, and M. Manning, 2011: Future changes in global warming potentials under representative concentration pathways. Environ. Res. Lett., 6, 024020.

[10] Reisinger, A., M. Meinshausen, M. Manning, and G. Bodeker, 2010: Uncertainties of global warming metrics: CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. Geophys. Res. Lett., 37, L14707.

[11] Boucher, O., 2012: Comparison of physically- and economically-based CO<sub>2</sub>-equivalences for methane. Earth Syst. Dyn., 3, 49-61.

[12] US White House. Climate Action Plan - Strategy to reduce methane emissions. 2014 Disponible en [http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/strategy\\_to\\_reduce\\_methane\\_emissions\\_2014-03-28\\_final.pdf](http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/strategy_to_reduce_methane_emissions_2014-03-28_final.pdf)

[13] Environmental Defense Fund & ICF International. Economic Analysis of Methane Emission Reduction Opportunities in the U.S. Onshore Oil and Natural Gas Industries. 2014

# CONFERENCIA SURAMERICANA DE MEDICIÓN EN TRANSFERENCIA DE CUSTODIA 2014

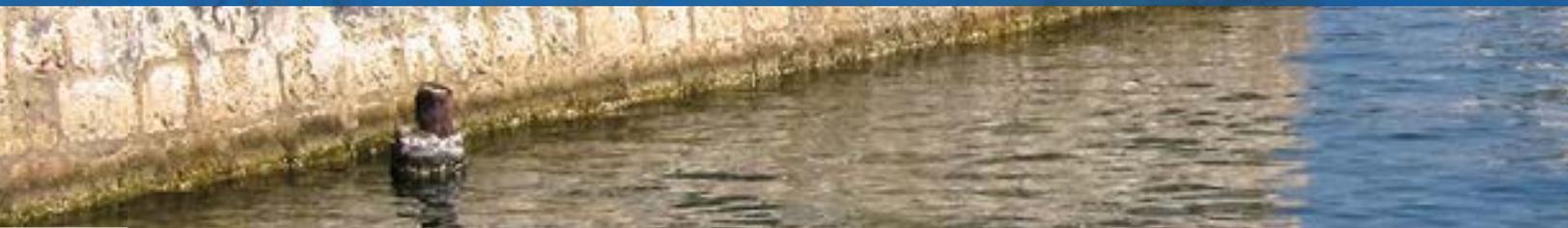
Centro de Convenciones de Cartagena, noviembre del 5 al 7

**Por primera vez en Colombia se realizará este evento para la industria de medición de hidrocarburos, con la participación de expositores y conferencistas internacionales expertos en medición.**

**Este año el evento incluirá todo tipo de medidores en la transferencia de custodia y se ofrecerán presentaciones sobre temas como:**

- Medidores de prueba con bajos niveles de incertidumbre
- Estaciones de medición para evaluaciones de campo
- Acondicionamiento de flujo en líquidos
- Efectos de la viscosidad en medidores tipo Coriolis
- Medición de transferencia de custodia en aplicaciones de Gas Natural Licuado (LNG por sus siglas en inglés).
- Diagnósticos en medidores ultrasónicos
- Diagnóstico y adecuado ajuste de cero en medidores Coriolis.
- Intervalos de recalibración para medidores de transferencia de custodia.
- Actualizaciones de los estándares de AGA y API.

**Inscripción: US \$500, incluye cóctel de bienvenida, refrigerios y almuerzos.**





## CAPACITACIÓN ASOCIADA

Cursos impartidos por instructores de Colorado Engineering Experiment Station Inc. (CEESI)

- **Medición de Hidrocarburos (Gas Natural y Líquidos) - Avanzado**  
Octubre 27-30, 2014 - Barranquilla, Colombia.  
**Inscripción:** US \$1.500, incluye asistencia gratuita a la Conferencia.
- **Medición Ultrasónica para Gas Natural**  
Octubre 31, 2014 - Barranquilla, Colombia  
**Inscripción:** US \$750, incluye asistencia gratuita a la Conferencia.
- **Medición Ultrasónica para Líquidos**  
Noviembre 4, 2014 - Cartagena, Colombia  
**Inscripción:** US \$ 750, incluye asistencia gratuita a la Conferencia.

Para mayor información comunicarse con:

MÓNICA PATIÑO JÁCOME | [monica.patino@promigas.com](mailto:monica.patino@promigas.com) | Teléfono (57-5) 3713220

JOHN C. TRUQUE | [jtruque@ceesi.com](mailto:jtruque@ceesi.com) | Teléfono: (506) 8841-2047

## Trazabilidad en Medición Dinámica para el SECTOR GLP

Cesar Sierra ([csierra@cdtdegas.com](mailto:csierra@cdtdegas.com))  
German Covelli ([gcovelli@cdtdegas.com](mailto:gcovelli@cdtdegas.com))

Corporación CDT de GAS  
Piedecuesta - Santander - Colombia

*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 ser-  
vicios de utilidad económica, social,  
y política.

En esta sección, cada semestre,  
expertos nacionales y/o extranje-  
ros, ofrecerán artículos técnicos  
que buscan sensibilizar a nuestros  
lectores, acercándolos con conoci-  
miento, a la aplicación de la metro-  
logía en las diferentes actividades  
de nuestra sociedad.

### Resumen

*En el presente artículo se abordan las alternativas de trazabilidad para las mediciones dinámicas de cantidad de GLP. Inicialmente se presenta una breve descripción del panorama de la industria de este hidrocarburo a nivel nacional, y se discuten las diferentes tecnologías usadas en la medición dinámica a través de la cadena de valor del GLP. A continuación se hace una revisión de los requerimientos metrologicos a los que están sometidos los sistemas de medición, así como de las jerarquías en la cadena de trazabilidad de las mediciones obtenidas con los mismos.*

*Finalmente se presentan los diferentes sistemas para brindar trazabilidad mediante la calibración de los medidores de flujo, discutiendo para cada uno de estos las ventajas y desventajas inherentes y los niveles de incertidumbre esperados, factores decisivos al momento de escoger uno u otro sistema de calibración.*

## 1. INTRODUCCIÓN.

Según el API<sup>1</sup>, el gas licuado del petróleo - GLP - es cualquier material en estado líquido compuesto predominantemente por cualquiera de los siguientes hidrocarburos, o por una mezcla de estos: Propano, propileno, butanos y butilenos [1]. Se obtiene en refinerías mediante el proceso de refinación del petróleo, o mediante el procesamiento de los líquidos del gas natural, siendo esta primera la principal fuente de suministro a nivel nacional.

La producción de GLP en Colombia recientemente se ha venido incrementando, impulsada por la reactivación de las actividades de exploración y producción de hidrocarburos en el país [2]. Esto ha hecho que se incremente la oferta de GLP, mientras que la demanda, limitada antes al consumo residencial y comercial, se intenta complementar con las nuevas aplicaciones de este combustible. Estas últimas incluyen el uso del GLP como combustible automotriz, en las plantas de generación de energía y como materia prima en la industria petroquímica.

El GLP puede ser transportado a través de miles de kilómetros y puede cambiar de propietario a lo largo de su cadena de valor, desde la refinería o la planta de procesamiento, hasta el usuario final. Durante este proceso pasa por las manos de diferentes agentes, encargados de la producción, la importación, la exportación, la comercialización, el transporte y la distribución.

Cada vez que el producto cambia de propietario hay una "transferencia de custodia". Desde luego tanto quien entrega como quien recibe está interesado en saber la cantidad de GLP comercializado con gran exactitud. Es por esto que los dispositivos de medición utilizados para cuantificar la masa o volumen de GLP, deben contar con trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades, y deben estar sujetos a control metrológico mediante un programa de calibraciones periódicas.

Actualmente existen diferentes métodos y sistemas para calibrar los dispositivos utilizados en medición dinámica de hidrocarburos líquidos; la selección del método y patrón depende básicamente del tipo de medidor a calibrar, los requerimientos legales, normativos y económicos, y de las facilidades de instalación de los propios patrones.

<sup>1</sup> API. American Petroleum Institute.

## 2. TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE GLP

La industria nacional del GLP utiliza diferentes métodos y tecnologías para la cuantificación del combustible, tanto en los puntos de transferencia de custodia como dentro de los diferentes procesos, para control de inventarios. Estas tecnologías se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Sistemas de medición estática, mediante medidores de nivel en tanques aforados.
- Sistemas de medición dinámica, mediante medidores de flujo másico o volumétrico instalados en tubería.

El API actualmente cubre el uso de cuatro tipos de dispositivos de medición dinámica de flujo.

- Medidores de desplazamiento positivo
- Medidores de turbina
- Medidores de flujo másico tipo Coriolis
- Medidores ultrasónicos

Las principales tecnologías de medición dinámica, utilizadas a lo largo de la cadena del GLP en Colombia son presentadas en la Tabla 1. [3]

Producción Importación	Transporte	Comercialización	Distribución
Medidores tipo coriolis	Medidores tipo turbina	Medidores tipo turbina	Medidores tipo coriolis
Medidores tipo turbina		Medidores tipo coriolis	

Tabla 1. Tecnologías de medición para GLP

Los medidores de flujo tipo Coriolis son ampliamente utilizados y tienen dos ventajas principales en la medición de GLP en comparación con las demás tecnologías.

- El volumen de GLP se ve influenciado por las condiciones de presión y temperatura. Dado que estas modifican la densidad del líquido, es necesario realizar una corrección para obtener una medición con la exactitud adecuada.

Los medidores Coriolis son prácticamente insensibles a estos parámetros, de forma que pueden proporcionar una medición exacta sobre un intervalo de medición más amplio. Además, si la transferencia de custodia se da en unidades de masa, que es lo común para el GLP, la exactitud de la medición aumenta debido a que la densidad no tiene que ser determinada para convertir la salida en unidades de volumen.

- Debido a que los medidores Coriolis no tienen partes internas que sufran desgaste, tienen una vida útil mayor.

En la Figura 1 se muestra un medidor tipo coriolis para medición de GLP en poliducto.



Figura 1. Medidor másico tipo Coriolis para recibo de GLP por poliducto<sup>2</sup>

### 3. REQUISITOS METROLÓGICOS PARA LA MEDICIÓN DE GLP SEGÚN LA OIML

En el panorama nacional, actualmente los precios y las condiciones de venta del GLP se encuentran regulados por la CREG<sup>3</sup>. Sin embargo, no existe una regulación claramente definida sobre las mediciones de cantidad de GLP a lo largo de la cadena de valor, en los diferentes puntos de transferencia de custodia [3].

A nivel internacional, para los diferentes instrumentos utilizados en la medición de líquidos, la OIML<sup>4</sup> establece ciertos requerimientos en cuanto al desempeño metrológico de los medidores, y respecto al aseguramiento metrológico de los mismos. Específicamente, la OIML ha publicado la recomendación OIML R 117 - Sistemas de medición dinámica para líquidos diferentes al agua [4].

En esta última, la OIML establece la exactitud requerida en los sistemas de medición mediante una asignación por clases; para GLP, las clases aplicables son presentadas en la Tabla 2 [4].

Clase	Tipo de sistema de medición
0.3	o Sistemas de medición en transferencia de custodia
1.0	o Sistemas de medición para gases licuados a presión, medidos a temperatura igual o superior a -10°C o Dispensadores de GLP automotriz

Tabla 2. Clases de exactitud para sistemas de medición de GLP.

El error máximo permisible - MPE<sup>5</sup> - tanto para el sistema de medición como para el medidor en particular, es presentado en la Tabla 3 [4].

Clase	Sistema de medición *	Medidor de flujo **
0.3	0.3 %	0.2 %
1.0	1.0 %	0.6 %

\* Aplica para verificación inicial y calibraciones posteriores

\*\* Aplica para verificación inicial del medidor antes de la verificación inicial de sistema de medición.

Tabla 3. MPE para sistemas de medición de GLP.

Para la calibración periódica, la incertidumbre expandida en la determinación del error de indicación de volumen o masa debe ser menor que un tercio del MPE aplicable.

### 4. NIVELES DE JERARQUÍA EN LA MEDICIÓN DE LÍQUIDOS SEGÚN EL API

Los sistemas de medición de líquidos utilizados en transferencia de custodia, o en otras actividades desarrolladas según el *Manual de Estándares para Medición de Petróleo* del API, tienen al menos en su cadena de trazabilidad los niveles de jerarquía mostrados en la Tabla 4 [5]. La incertidumbre de medición aumenta desde el nivel 1 hasta el nivel 7, siendo los patrones primarios los que tienen una menor incertidumbre.

<sup>2</sup> Fuente: Corporación CDT de GAS.

<sup>3</sup> CREG. Comisión de Regulación de Energía y Gas.

<sup>4</sup> OIML. Organización Internacional de Metrología Legal.

<sup>5</sup> MPE. Maximum Permissible Error.

Niveles	Descripción del nivel de jerarquía
1	Patrones primarios
2	Patrones secundarios
3	Patrones de transferencia
4	Sistemas probadores
5	Medidor de flujo
6	Correcciones por calidad/cantidad
7	Ticket de transferencia de custodia

Tabla 4. Jerarquías en la medición de líquidos.

En el *Nivel 1* se tienen los patrones de masa, volumen o densidad desarrollados y/o mantenidos por el NIST<sup>6</sup> en el caso de Estados Unidos, u otros laboratorios nacionales de metrología en los demás países, para calibrar patrones secundarios.

En el *Nivel 2* se tienen patrones de masa, volumen o densidad y sistemas de pesado mantenidos por los laboratorios nacionales, para calibrar patrones de transferencia.

El *Nivel 3* incluye los patrones de transferencia utilizados para calibrar los sistemas probadores, descritos en el siguiente numeral.

En el *Nivel 4* se encuentran los probadores, utilizados para determinar el factor de corrección para el volumen indicado por un medidor.

Los *Niveles 5, 6 y 7* incluyen las correcciones hechas en la cantidad indicada por el medidor para determinar el volumen neto estándar medido para propósitos de transferencia de custodia.

## 5. CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE LÍQUIDOS USADOS EN MEDICIÓN DE GLP

La calibración es una operación que, bajo condiciones específicas, establece en primera instancia una relación entre los valores de una magnitud con su incertidumbre de medición, obtenidos por medio de patrones de medición, y la indicación del instrumento con su incertidumbre asociada; y en segunda instancia usa esta información para obtener un resultado de medición a partir de la indicación [6].

El objetivo de calibrar un medidor es determinar un Factor de Medidor - MF<sup>7</sup> - el cual es un número que multiplica el resultado de una medición para compensar el valor de un error sistemático

(o sesgo). Se obtiene para cada caudal calibración dividiendo la medida del patrón (en masa o volumen), entre la medida del medidor en prueba [5]. El MF es un indicador del desempeño del medidor.

Por cuestiones fiscales, comerciales y de calidad, los medidores de flujo de líquidos empleados por la industria nacional deben ser, siempre que sea posible, caracterizados y calibrados en sitio bajo las condiciones reales de operación. De lo contrario, se deben tener en cuenta los efectos de la calibración a condiciones de flujo diferentes.

La medición de hidrocarburos está normalizada por el API mediante el *Manual de Estándares para la Medición de Petróleo*. En cuanto a sistemas para calibración de medidores, cubiertos por el capítulo cuatro del manual, se aceptan los siguientes patrones:

- Probadores de desplazamiento.
- Probadores de tanque.
- Probador de medidor maestro.

Los probadores de desplazamiento y de tanque son métodos directos, ya que la calibración se hace contra una medida volumétrica representada en el probador. Los probadores de medidor maestro se consideran un método indirecto, ya que la calibración se hace contra la indicación de un medidor patrón, el cual ha sido calibrado previamente mediante un método directo.

### 5.1 PROBADORES VOLUMÉTRICOS.

Los métodos volumétricos básicamente consisten en la comparación del volumen registrado por el medidor bajo calibración contra el volumen contenido en un recipiente calibrado a una temperatura de referencia establecida. En razón a lo anterior, las indicaciones del patrón y el medidor deben ser corregidas a unas condiciones de referencia, mediante factores que consideran la temperatura y la presión del líquido a su paso por el medidor y el patrón, contemplados en el capítulo 11 del *Manual de Estándares para Medición de Petróleo* del API. Teniendo en cuenta lo anterior, el factor del medidor se puede determinar como:

$$MF_v = \frac{V \times CTS_p \times CPS_p}{IV_m} \times \frac{CTL_p \times CPL_p}{CTL_m \times CPL_m}$$

<sup>6</sup> NIST. National Institute of Standards and Technology.

<sup>7</sup> MF. Meter Factor.

Donde:

**V:** Volumen indicado por el patrón volumétrico.

**CTSp:** Factor de corrección por expansión térmica del patrón volumétrico.

**CPSp:** Factor de corrección por expansión, por presión en el patrón volumétrico.

**IVm:** Indicación del medidor bajo calibración.

**CTLp:** Factor de corrección por expansión térmica del fluido en el patrón volumétrico.

**CPLp:** Factor de corrección por presión del fluido en el patrón volumétrico.

**CTLm:** Factor de corrección por expansión térmica en el medidor bajo calibración.

**CPLm:** Factor de corrección por presión del fluido en el medidor bajo calibración.

### 5.1.1 PROBADORES DE DESPLAZAMIENTO MECÁNICO

Su principio se basa en el desplazamiento de un volumen conocido de líquido por una sección calibrada de tubería entre dos detectores. Un volumen equivalente es medido simultáneamente por el medidor bajo prueba, y su indicación es comparada con el volumen calibrado del probador [7]. En la Figura 2 se presenta un sistema probador de tipo esfera.



Figura 2. Probador de desplazamiento mecánico<sup>8</sup>

Generalmente se encuentran en tamaños entre 4" y 30" con capacidad de manejar flujos desde 30 BPH a 11.000 BPH con una rangeabilidad de 10:1.

#### Ventajas:

- Estos probadores son dinámicos. Por tanto, pueden ser utilizados para calibrar medidores bajo condiciones operativas reales de flujo, presión y temperatura.
- El margen de incertidumbre es del orden de  $\pm 0,04\%$  del volumen calibrado (incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k=2$ ), siempre y cuando se respeten los límites de velocidad de la esfera (entre 0,5 pies/s y 5 pies/s).

#### Desventajas:

- Su gran tamaño dificulta su movilidad, por lo que se suelen instalar fijos en campo, asociados permanentemente al mismo sistema de medición.
- Para la calibración de medidores másicos requieren de la medición de densidad, ya sea con densímetros en línea o mediante muestreo y análisis de laboratorio.

### 5.1.2 PROBADORES DE PISTÓN O COMPACTOS.

Son un tipo particular de probadores de desplazamiento. El volumen calibrado es menor, y para dar exactitud a los cálculos se usan técnicas de interpolación de pulsos [7]. En la Figura 3 se muestra un sistema probador de pistón instalado en campo.



Figura 3. Probador compacto de pistón<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Fuente: <http://dynamicflow.net/probador.html>

<sup>9</sup> Fuente: <http://www.calfflow.com/>

Los probadores compactos se pueden encontrar en tamaños de pistón entre 8" y 24" (bridados entre 2" a 12") y capacidad de manejar flujos desde 0,36 BPH a 10.000 BPH con una rangeabilidad típica de 1000:1.

#### Ventajas:

- Estos probadores son dinámicos. Por tanto, pueden ser utilizados para calibrar medidores bajo condiciones operativas reales de flujo, presión y temperatura.
- El margen de incertidumbre es del orden de  $\pm 0,05\%$  del volumen calibrado (incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$ ).
- Su tamaño compacto permite su movilización para calibración de múltiples medidores en diferentes puntos geográficos.

#### Desventajas:

- Debido a que el volumen calibrado es menor, son más susceptibles a la estabilidad del flujo, y por ende, a la estabilidad de la señal emitida por el medidor.
- Para la calibración de medidores másicos requieren de la medición de densidad, ya sea con densímetros en línea o mediante muestreo y análisis de laboratorio.

### 5.1.3 PROBADORES DE TANQUE

Considerados como una medida volumétrica que generalmente tiene un cuello superior graduado y una válvula de bloqueo inferior, entre los cuales se define un volumen calibrado, con el cual se calibra un medidor en campo [8]. Un ejemplo de este sistema se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Probador de tanque<sup>10</sup>

Los probadores de tanque comercialmente usados manejan tamaños desde 1 galón hasta 15.000 galones.

#### Ventajas:

- Es un método de prueba directo, por lo que su incertidumbre es baja comparada con la de los métodos indirectos.
- Su tamaño compacto permite su movilización para calibración de múltiples medidores en diferentes puntos geográficos.
- El margen de incertidumbre es del orden de  $\pm 0,06\%$  del volumen calibrado (incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$ ).

#### Desventajas:

- Estos probadores son estáticos. No permiten la calibración a condiciones reales de presión y temperatura.
- No permiten el uso de GLP como fluido de calibración.
- Para la calibración de medidores másicos requieren de la medición de densidad, ya sea con densímetros en línea o mediante muestreo y análisis de laboratorio.
- No son recomendados para medidores de gran caudal, puesto que el caudal se encuentra limitado por el volumen del tanque.

### 5.2 PROBADORES DE MEDIDOR MAESTRO

En este método un medidor de buen desempeño metrológico es seleccionado, mantenido y operado para servir como dispositivo de referencia para la calibración de un medidor en campo. La base de este método es la comparación de las señales de salida de ambos medidores [9]. Esta comparación se hace a las mismas condiciones de referencia, por lo que se requiere corregir el volumen por presión y temperatura. El factor del medidor se determina mediante el siguiente modelo:

$$MF = \frac{IV_{mm} \times CTL_{mm} \times CPL_{mm} \times MMF}{IV_m \times CTL_m \times CPL_m}$$

<sup>10</sup> Fuente: <http://www.fujisansurvey.com/>

Donde:

**IVmm:** volumen indicado por el medidor maestro.

**IVm:** volumen indicado por el medidor a calibrar.

**CTLmm:** factor de corrección por temperatura en el medidor maestro.

**CPLmm:** factor de corrección por presión en el medidor maestro.

**CTLm:** factor de corrección por temperatura en el medidor a calibrar.

**CPLm:** factor de corrección por presión en el medidor a calibrar.

**MMF:** factor de medición - MF - del medidor maestro, obtenido en su calibración.

#### Ventajas:

- El método de calibración es dinámico. Por tanto, puede ser utilizado para calibrar medidores bajo condiciones operativas reales de flujo, presión y temperatura.
- Su tamaño compacto permite su movilización para calibración de múltiples medidores en diferentes puntos geográficos.
- La incertidumbre obtenida con este método es del orden de 0,1% relativa al factor del medidor (incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k=2$ ), la cual puede variar en función del tipo de patrón utilizado.
- El uso de medidores másicos tipo Coriolis como maestro (patrón) permite tener una indicación simultánea de la densidad del fluido. A partir de esto, se pueden calibrar medidores másicos y volumétricos.

#### Desventajas:

- Es un método de prueba indirecto. Por tanto los niveles de incertidumbre son mayores que en los métodos directos.
- Para disminuir la incertidumbre, el medidor maestro debe ser calibrado a las mismas condiciones de operación de los medidores a calibrar, lo cual no siempre es posible.

En la Figura 5 se muestra un probador con medidores maestro tipo coriolis.



Figura 5. Probador con Medidor Maestro tipo Coriolis de la Corporación CDT de GAS<sup>11</sup>

### 5.3 MÉTODO GRAVIMÉTRICO.

Los métodos de calibración presentados anteriormente son aplicables para la calibración en campo. Sin embargo, para la calibración de medidores que por ciertas condiciones requieren menores incertidumbres de medida, un método aceptado es el gravimétrico, realizado en laboratorio bajo condiciones controladas, utilizando agua como fluido de trabajo. La ISO<sup>12</sup> normaliza este método mediante la norma ISO 4185:1980 [10]. El método consiste básicamente en el pesaje de cierta cantidad de masa de fluido, que ha pasado previamente por el medidor bajo prueba. La comparación directa de la cantidad registrada por el medidor y la indicada por el sistema de pesaje permite determinar el error de medición y por tanto el factor del medidor.

La Figura 6 ilustra un sistema de calibración por método gravimétrico.



Figura 6. Sistema patrón gravimétrico de la Corporación CDT de GAS<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Fuente: Corporación CDT de GAS.

<sup>12</sup> ISO. International Organization for Standardization.

<sup>13</sup> Fuente: Corporación CDT de GAS.

**Ventajas:**

- El método gravimétrico es directo, por lo que su incertidumbre es baja comparada con la de los métodos indirectos.
- Las condiciones de flujo, presión y temperatura son estables y controladas en el laboratorio.
- La incertidumbre de calibración obtenida por este método es del orden de 0,05% al 0,1% (incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$ ).

**Desventajas:**

- El uso de fluidos de calibración diferentes al fluido normal de operación, a condiciones de presión y temperatura diferentes de las reales, afecta la exactitud y representa un impacto adverso sobre la incertidumbre de medición.

**6. CONCLUSIONES**

- Las actividades de transferencia de custodia a lo largo de la cadena de valor de GLP, requieren de sistemas de medición de óptimo desempeño y con un programa de calibraciones que brinde trazabilidad verificable a las mediciones realizadas.
- Los requerimientos normativos, legales, comerciales y técnicos del proceso de medición deben ser tenidos en cuenta al momento de seleccionar uno u otro método de calibración, tanto en campo como en laboratorio.
- El uso de tecnologías de medición diferentes entre quien recibe y quien entrega GLP en una actividad comercial, hace necesario que las mediciones sean exactas y su trazabilidad verificable, para lograr el mutuo acuerdo entre las partes involucradas.

**7. REFERENCIAS**

- [1] American Petroleum Institute. Design and Construction of LPG Installations. API Standard 2510. Eighth Edition. 2001.
- [2] Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. Cadena del Gas Licuado del Petróleo 2013. Bogotá, D.C.: UPME, 2013.

- [3] Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Estándares de los Sistemas de Medición en las Actividades de la Cadena de Prestación del Servicio Público Domiciliario de Gas Licuado del Petróleo -GLP - Informe Final. UTP, 2012.
- [4] International Organization of Legal Metrology. Dynamic Measuring Systems for Liquids other than Water. OIML R 117-1. OIML, 2007.
- [5] American Petroleum Institute. Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4 - Proving Systems, Section 1 - Introduction. API MPMS 4.1. Third Edition. API, 2005.
- [6] BIPM Joint Committee for Guides in Metrology. International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). JCGM 200. Third Edition. BIPM, 2012.
- [7] American Petroleum Institute. Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4 - Proving Systems, Section 2 - Displacement Provers. API MPMS 4.2. Third Edition. API, 2003.
- [8] American Petroleum Institute. Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4 - Proving Systems, Section 4 - Tank Provers. API MPMS 4.4. Second Edition. API, 1998.
- [9] American Petroleum Institute. Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4 - Proving Systems, Section 5 - Master-Meter Provers. API MPMS 4.5. Third Edition. API, 2011.
- [10] International Organization for Standardization. Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits -- Weighing Method. ISO 4185. Edition 1. ISO, 1980.

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.

## Validación del desempeño metrológico

### Medidor Volumétrico Portátil para verificar "in situ" a los medidores de gas tipo diafragma de uso domiciliario.

Ing. Alberto J. Díaz Tey, M.Sc.  
([teyalb@ice.co.cr](mailto:teyalb@ice.co.cr))  
Director Técnico CIM Global Metric.  
Grupo Zambrano S.A.S.

Ing. Rafael H. Rojas Millán,  
([mantenimiento@globalmetric.org](mailto:mantenimiento@globalmetric.org))  
Máster en Diseño de Proyectos (c)  
Coordinador Técnico MANT - CIM  
Global Metric.



#### Resumen:

En el artículo se presentan las herramientas estadísticas para validar el desempeño metrológico de un medidor volumétrico portátil desarrollado para medir un volumen de prueba igual a 21 L, en el rango desde 4,3 L/min hasta 7,3 L/min, cuando el gas de operación se encuentra entre 20,5 °C y 31,5 °C. Este sistema de medición mide indirectamente el volumen de gas a condiciones reales de operación, a partir del tiempo de prueba y del flujo volumétrico de gas, ajustado por regresión lineal a la presión manométrica "aguas arriba" de la restricción en el rango desde 6 hasta 10 inH<sub>2</sub>O(60°F). (desde 995,36 Pa hasta 2 488,4 Pa).

Se exponen los modelos matemáticos de la caracterización y calibración del equipo de medición, utilizando como referencia un patrón volumétrico de cámara húmeda, y los resultados de la evaluación de la precisión, considerando, cuando aplica, los lineamientos GUM. A partir de un diseño experimental, se estimó la reproducibilidad del error relativo en volumen del prototipo B14, que fue: 0,605 % (gas natural), 0,528 % (aire) y  $\pm 0,385$  % (nitrógeno). Los resultados obtenidos avalan el uso del sistema de medición para funcionar como patrón de trabajo en la verificación "in situ" de los medidores volumétricos de diafragma de gas natural de uso doméstico, según los requisitos de la norma técnica colombiana NTC 5730:2009 y de la recomendación internacional OIML R137-1&2:2012.

## 1. INTRODUCCIÓN.

A mediados del 2009 se le solicitó a la Dirección Técnica del CIM Global Metric su colaboración para desarrollar un procedimiento alternativo de verificación "in situ" de la exactitud de los medidores de gas tipo diafragma de uso domiciliario.

Y es que durante la revisión periódica de las instalaciones para suministro de gas natural destinadas a uso residencial, se verifica la exactitud del medidor de gas considerando los requisitos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5730:2009 [1].

La solución incluiría el desarrollo de un patrón volumétrico portátil que se utilizaría en campo como patrón de trabajo [ver 5.7-2], para establecer el volumen de referencia de gas.

Desde el punto de vista reglamentario, el Código de Distribución de Gas Combustible por Redes [3], es el documento colombiano de carácter obligatorio, adoptado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas como autoridad competente, que establece los requisitos técnicos directamente o referidos, por ejemplo, a una norma.

El Código de Distribución de Gas Combustible por Redes [3], establece con respecto a los medidores volumétricos de gas que su exactitud será verificada a intervalos razonables y como máximo cada cinco años [5.29-3].

Los detalles de las operaciones de control metrológico [4], relacionadas con la aprobación de modelos y la verificación inicial y subsecuente de los medidores volumétricos de gas de uso doméstico, los transfiere a la norma técnica colombiana NTC 2728. Medidores de gas tipo diafragma [5].

En ese contexto, la NTC 5730:2009 [1] recomienda utilizar un banco de pruebas para la verificación posterior de los medidores de gas tipo diafragma [5.6.3 d)- 1], que es sin dudas, el procedimiento de referencia, sin embargo, propone un procedimiento alternativo: la utilización de una "boquilla" calibrada como patrón de trabajo [5.6.3 b)- 1], siempre que el aporte de su inexactitud en la incertidumbre expandida de la comprobación del medidor de gas tipo diafragma no afecte el cumplimiento de la siguiente desigualdad [B1.4.5- 5], aplicable a verificaciones posteriores (en servicio):

$$\frac{U_p(er_{vc})}{EMP_s} \leq \frac{1}{3} \quad (1)$$

Donde:

$U_p(er_{vc})$ : Incertidumbre expandida ( $\alpha \approx 5\%$ ) del error relativo en volumen del medidor de gas tipo diafragma verificado, en %.

$EMP_s$ : Error máximo permitido en servicio del medidor de gas tipo diafragma, en %.

Sin embargo, la recomendación internacional OIML R137-1&2:2012 [6] establece que si no se cumple la desigualdad anterior, una alternativa para la evaluación puede consistir en reducir los errores máximos permitidos con el exceso de las incertidumbres:

$$EMP_s = \frac{4}{3} \times EMP_s - U_p(er_{vc}) \quad (2)$$

Esta expresión aplica a verificaciones posteriores (en servicio), siempre que:

$$U_p(er_{vc}) \leq EMP_s \quad (3)$$

En el presente artículo se muestran los resultados de la validación [2] de la calibración de un medidor volumétrico de gas portátil, que permiten confirmar su desempeño metrológico como patrón de trabajo en la verificación de la exactitud de los medidores de gas tipo diafragma para uso domiciliario en su revisión periódica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 2.1. Medidor volumétrico de gas portátil.

El medidor volumétrico de gas (MVG) portátil desarrollado es un sistema de medición diseñado para la medición "in situ" del volumen de un fluido compresible que fluye a través de una restricción en un tiempo determinado.

El esquema simplificado del medidor volumétrico de gas portátil desarrollado se muestra en la Figura 1.

Para definir el estado termodinámico del fluido y realizar, cuando aplique, las correspondientes correcciones, se miden simultáneamente su presión manométrica estática y temperatura "aguas arriba" de la restricción (5), antes que el fluido descargue libremente a la atmósfera, utilizando un

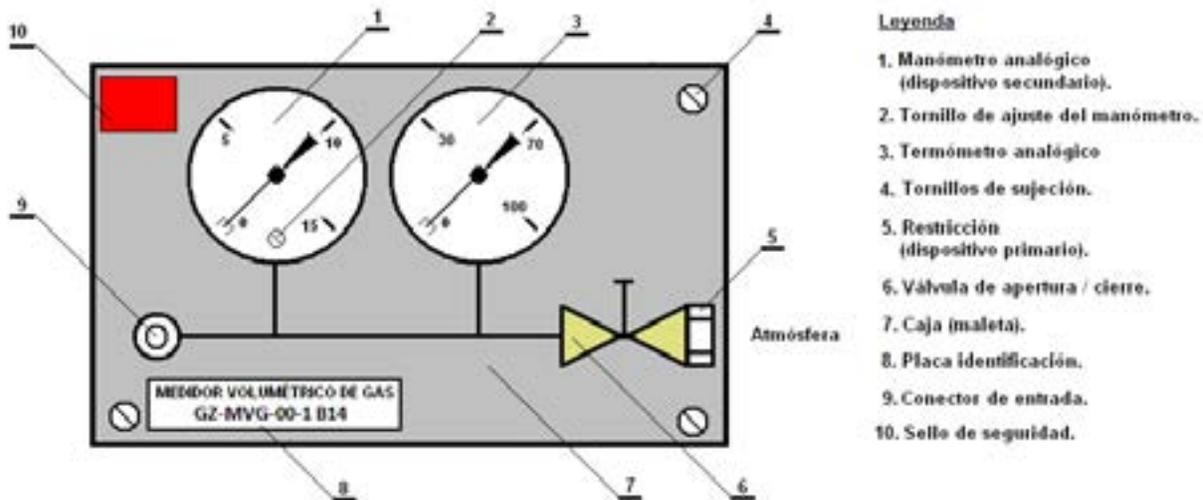


Figura 1. Esquema simplificado del medidor volumétrico portátil desarrollado.

manómetro de diafragma (1) y un termómetro bimetálico (3) y respectivamente.

En el caso de las mediciones de presión manométrica, y considerando que el suministro de gas natural es en ocasiones intermitente, el manómetro posee un dispositivo para su compensación.

Las características de ambos instrumentos de medición están referidas en la Tabla 1.

Instrumento de medición	Valor de división	Rango: hasta	Error máximo permitido (EMP)
Manómetro diafragma	0,2 inH <sub>2</sub> O	15 inH <sub>2</sub> O	± 1 %
Termómetro bimetálico	1 °C	100 °C	± 1 %

Tabla 1. Características metrológicas del manómetro y termómetro instalados.

Nota 1. Es usual en el presente campo de aplicación que la unidad de medida de la presión manométrica se refiera en el sistema anglo-norteamericano. Su equivalencia en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es 1 inH<sub>2</sub>O(60°F) = 248,84 Pa [7].

El manómetro analógico (1) se calibra por comparación directa con una balanza patrón de presión neumática, y si es necesario, se ajusta mediante el tornillo de ajuste (2). Por la importancia de sus mediciones en el cálculo del volumen de gas, el diseño del GZ-MVG-00-1 permite que la calibración y ajuste se realice sin desmontarlo: solo es necesario cerrar la válvula de apertura / cierre (6) y acoplar una fuente regulable de presión y el patrón de trabajo mediante una manguera al conector de entrada (9), para que el sistema se comporte como un medio isobárico.

El termómetro bimetálico (3) se calibra en un comparador isotérmico con control automático de temperatura, por comparación directa con un termómetro patrón de

resistencia de platino (R<sub>0</sub>=100 Ω), graduado según ITS-90 (α ≥ 0,003 925 °C<sup>-1</sup>) [8].

La restricción (5) es un tapón monohoradado instalado al final del sistema de medición, con diámetro de orificio de salida menor que el de entrada, y está en el interior de una maleta (7), protegida de cualquier golpe o contaminación por partículas externas que afecten su geometría.

La integridad física del sistema de medición, se asegura con cuatro tornillos de sujeción (4), uno de los cuales esta sellado con un sello de seguridad (10), que demuestra con su rotura, el acceso no autorizado al interior del equipo de medición.

## 2.2 Caracterización del MVG portátil.

La caracterización del medidor volumétrico de gas portátil es el proceso de estimación de los coeficientes del polinomio que relaciona las variables influyentes (variables de entrada) y el flujo volumétrico del gas (variable de salida), utilizando los correspondientes resultados experimentales y las técnicas de regresión lineal [9].

Inicialmente se consideró el siguiente modelo matemático del proceso:

$$q_v = \sum_{l=0}^n a_l \times (p_1)^l + a_4 \times t_1 + a_5 \times \Delta p \quad (4)$$

Donde:

a<sub>l</sub>: Coeficientes del polinomio.

p<sub>1</sub> y t<sub>1</sub>: Presión manométrica y temperatura del gas “aguas arriba” de la restricción, en inH<sub>2</sub>O y °C respectivamente.

$\Delta p$ : Diferencia de presiones entre la manométrica "aguas arriba" de la restricción y la atmosférica a su descarga, en inH<sub>2</sub>O. Se calcula según:

$$\Delta p = p_1 - P_{at} \quad (5)$$

Donde:

$P_{at}$ : Presión atmosférica durante las mediciones, en hPa.

Al resultado del ajuste mínimo cuadrático se le aplicó la prueba F-secuencial [9], para evaluar el significado estadístico de los coeficientes del polinomio, demostrándose que no son significativas estadísticamente las variables  $t_l$  y  $\Delta p$ , mientras que  $p_l$  si lo es en grado 2 ( $p = 2$ ), por lo tanto, el polinomio (ecuación 4) se redujo a la siguiente ecuación:

$$q_v = \sum_{l=0}^2 a_l \times (p_1)^l \quad (6)$$

La presión manométrica (variable de entrada) es medida directamente por el manómetro analógico, mientras que el flujo volumétrico del gas (variable de salida) que fluye por la restricción, es medido indirectamente a partir de las mediciones del volumen corregido de un MVG patrón de referencia y del tiempo invertido en alcanzarlo, utilizando un cronómetro.

Los coeficientes del polinomio son estimados por métodos de regresión lineal [9] según la ecuación matricial (7):

$$\hat{a} = (p_1^T \times p_1)^{-1} \times p_1^T \times Vp_{c0} \quad (7)$$

Donde:

$\hat{a}$ : Vector columna de los coeficientes ajustados.

$Vp_{c0}$ : Matriz del volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia a sus condiciones de operación  $P_0$  y  $T_0$ .

$p_l$ : Matriz de la presión manométrica "aguas arriba" de la restricción.

El volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia se calcula según la ecuación 8.

$$Vp_{c0} = \frac{Vp_m}{1 + 0,01 \times (er_p + \Delta er_{der})} \quad (8)$$

Donde:

$er_p$ : Error relativo de la medición del volumen, en %. Depende del flujo volumétrico de operación y se refieren en el certificado de calibración del MVG patrón de referencia.

$\Delta er_{der}$ : Corrección por deriva del error relativo del MVG patrón de referencia, en %. Su esperanza matemática es cero pero aporta incertidumbre a la medición [10].

$Vp_m$ : Volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia, a partir de los volúmenes final e inicial de prueba, en L.

Considerando que el tiempo de prueba es el mismo, el volumen de gas medido por el MVG portátil se calcula según la ecuación 9:

$$\hat{V}_c = \tau_p \times \hat{q}_v = \tau_p \times \sum_{l=0}^2 \hat{a}_l \times (p_1)^l \quad (9)$$

Donde:

$\tau_p$ : Matriz del tiempo de prueba medido por el cronómetro, en min.

### 2.3 Sistema de caracterización del MVG portátil.

Para caracterizar el MVG portátil desarrollado se construyó un banco que permite su conexión en serie con el MVG patrón de referencia (ver la Figura 2).

La caracterización se realiza en 21 puntos de presión ( $j = 1; 2; \dots; J = 21$ ), desde 6 hasta 10 inH<sub>2</sub>O (desde 1 493,04 hasta 2 488,4 Pa), y en cada uno se realizan tres corridas ( $i = 1; 2; n = 3$ ), calculándose el promedio de cada parámetro medido.

El total de mediciones en la caracterización del MVG portátil es  $N = 21 \times 3 = 63$ .

Las funciones y principales características de los componentes del sistema de caracterización, se describen a continuación de la Figura 2.

#### Fuente de suministro del fluido de operación.

Según la naturaleza del fluido de operación se utilizan tres fuentes de suministro:

- Aire: comprimido por un compresor y suministrado desde un balasto para mantener el flujo de operación requerido. El aire antes de entrar al sistema de caracterización es filtrado y secado.

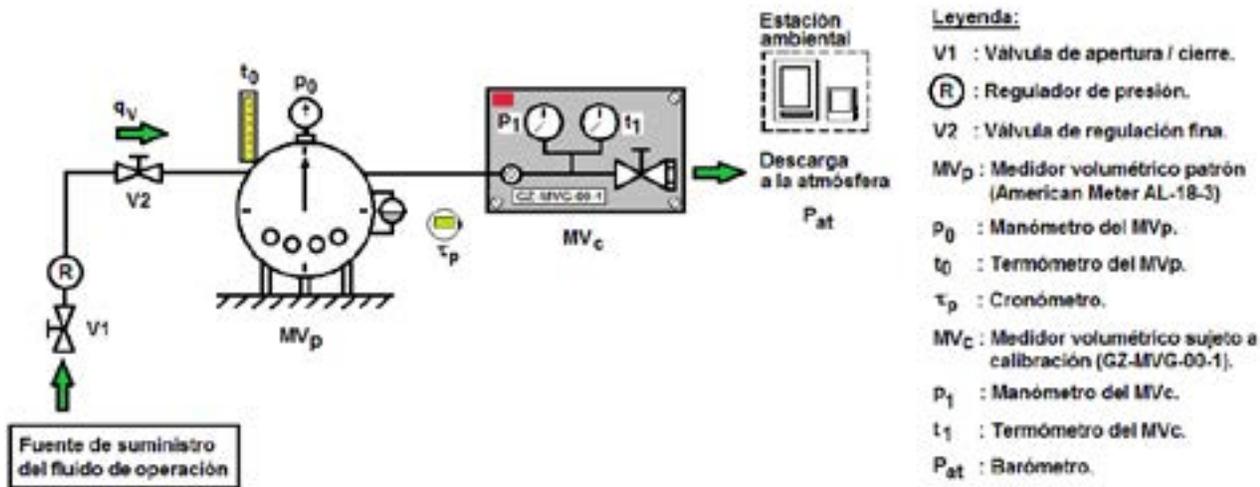


Figura 2. Esquema simplificado del sistema de caracterización del medidor volumétrico de gas.

- b) Nitrógeno: de pureza industrial (> 97 %), está contenido en un cilindro y su extracción se regula con un regulador de alta presión.
- c) Gas natural: suministrado desde las redes de la ciudad. Se considera que la concentración de sus componentes fundamentales se mantiene constante a efectos del presente estudio.

Válvula de apertura / cierre (V1).

Como lo indica su denominación, su función es conectar el sistema de caracterización a la fuente de suministro del fluido de operación, y una vez concluido el proceso o si es necesario por alguna emergencia, desconectarlo.

Regulador de presión.

Las funciones del regulador de presión son:

- a) Reducir la presión de entrada al sistema, considerando la resistencia neumática del MVG patrón de referencia, para reproducir las presiones de entrada al MVG portátil en su rango de operación. Sin embargo, este valor no debe sobrepasar la presión de entrada máxima de operación del MVG patrón de referencia, según su Fabricante.
- b) Mantener constante la presión de entrada al sistema cuando existan fluctuaciones de presión en la fuente de suministro del fluido de operación.

Válvula de regulación fina (V2).

Su función es establecer el flujo volumétrico del

gas de operación ajustando la presión manométrica “aguas arriba” de la restricción del MVG portátil. Su capacidad de regulación debe ser tal que permita colocar la aguja indicadora del manómetro analógico en la posición media del trazo de su escala.

MVG patrón de referencia.

Para la medición del volumen de gas se utilizó como patrón de referencia [ver 5.6-2] un medidor volumétrico de gas de cámara húmeda. Sus principales características metrológicas se refieren en la Tabla 2.

Valor de división/ apreciación	Rango de medición, (L/min)		Error máximo permitido
10 mL 1/2	0,2	< 2	± 1%
	≥ 2	≤ 6	± 0,5 %
	> 6	≤ 8	± 1 %

Tabla 2. Características metrológicas del MVG patrón de referencia.

El MVG patrón de referencia se ha calibrado en dos ocasiones en el Laboratorio Carl Poe Co., Inc., utilizando como patrón de referencia una campana volumétrica American Bell Prover n/s 277. La deriva máxima asociada se reporta en la Tabla 3.

Fecha de Calibración	Trazabilidad	Deriva máxima ( $\Delta_{der}^{MAX}$ )
2011-05-10	NIST 12169734	0,071 % / año
2014-03-06	NIST 11200311	

Tabla 3. Deriva máxima del error relativo en volumen del MVG patrón de referencia.

Actualmente el período asignado entre calibraciones externas es de dos años.

### Cronómetro.

Para medir el tiempo de prueba se utilizó un cronómetro digital. Sus principales características metrológicas se refieren en la Tabla 4.

Rango de medición: hasta	Resolución	Error máximo permitido
9h 59min 59s 99cs	1 cs	± 0,002 %

Tabla 4. Características metrológicas del cronómetro digital.

El cronómetro digital se calibra anualmente por comparación con un contador de pulsos de una señal sinusoidal generada por una fuente regulable de alta exactitud.

### 2.4. Evaluación de la exactitud del MVG portátil.

Una vez caracterizado, se evalúa su exactitud por comparación con el MVG patrón de referencia según la ecuación (10):

$$er_v = 100 \times \left( \frac{\hat{V}_c}{V_{pc1}} - 1 \right) \quad (10)$$

Donde:

$er_v$ : Error relativo en volumen, en %.

$\hat{V}_c$ : Volumen de gas medido por el MVG portátil calibrado según la ecuación 9, en L.

$V_{pc1}$ : Volumen de gas medido por el MVG patrón de referencia pero corregido a las condiciones de operación del MVG portátil calibrado ( $P_1$  y  $T_1$ ).

Como la sobrepresión del gas de operación es muy baja ( $\Delta p_{max} = 12,0 \text{ inH}_2\text{O}$ ), la calibración ocurre prácticamente a presión atmosférica, por lo tanto, puede considerarse como aceptable que el efecto del factor de compresibilidad en el comportamiento del gas es despreciable, es decir,  $Z=1,000$  [11].

Bajo estas circunstancias, el gas puede ser tratado como ideal, y para comparar los volúmenes de gas medidos en diferentes estados termodinámicos, se utiliza la ecuación de Clapeyron [11]:

Donde:

$$V_{pc1} = V_{pc0} \times FCP \times FCT \quad (11)$$

$FCT$  y  $FCP$ : Factores de corrección por temperatura y presión respectivamente, adimensionales.

El factor de corrección por presión se calcula según la ecuación (12):

$$FCP = \frac{P_0}{P_1} = \frac{p_0 + P_{at}}{p_1 + P_{at}} \quad (12)$$

Donde:

$P_0$  y  $P_1$ : Presiones manométricas del gas medidas por los manómetros de los MV patrón de referencia y calibrado respectivamente, en inH<sub>2</sub>O.

$P_{at}$ : Presión atmosférica en el momento de la medición, en inH<sub>2</sub>O.

$P_0$  y  $P_1$ : Presiones absolutas del gas, en inH<sub>2</sub>O. El factor de corrección por temperatura se calcula según la ecuación (13):

$$FCT = \frac{T_1}{T_0} = \frac{273,15 + t_1}{273,15 + t_0} \quad (13)$$

Donde:

$t_0$  y  $t_1$ : Temperaturas del gas medidas por los termómetros de los MV patrón de referencia y calibrado respectivamente, en °C.

$T_0$  y  $T_1$ : Temperaturas absolutas, en K.

### 2.5 Estimación de la precisión del procedimiento de calibración.

Para evaluar la precisión de la calibración del MVG portátil en diferentes gases, se construyó el prototipo GZ-MVG-00-1 B14, y se diseñó un experimento anidado compensado en tres niveles para cada gas de operación [12]:

Nivel 1. Presión manométrica "aguas arriba" de la restricción ( $i = 1; 2; \dots; p = 9$ ).

Nivel 2. Temperatura del gas "aguas arriba" de la restricción ( $j = 1; 2; q = 3$ ).

Nivel 3. Resultados de las mediciones del error relativo en volumen ( $k = 1; 2; n = 3$ ).

La variable aleatoria continua analizada es representada como  $(er_v)_{ijk}$

En el caso del gas natural, como no se controló su temperatura, el nivel 2 corresponde al factor "estabilidad de la composición del gas natural".

## 2.6 Procesamiento de las mediciones.

Las mediciones de la variable de salida (error relativo en volumen) se organizan en forma matricial y se evalúa el cumplimiento de los siguientes supuestos teóricos:

- La concordancia de la distribución experimental de la variable medida ( $er_V$ ) con la distribución de probabilidades normal propuesta.
- La homogeneidad de varianzas de las series de mediciones de ( $er_V$ ) (homocedasticidad) según Bartlett [13].

Si se cumplen los supuestos anteriores, se evalúan estadísticamente los valores incompatibles (en inglés outliers) aplicando consecutivamente las pruebas de Cochran y Grubbs [12].

Si se confirma la presencia de un “outlier”, se analizan las causas que lo originan y se toman las acciones correctivas y/o preventivas, según sea el caso.

Para evaluar el efecto de cada uno de los factores referidos así como su interacción estadística, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) [12].

En función de los resultados del ANOVA se estiman el gran promedio ( $\bar{er}_V$ ) y sus desviaciones estándares por repetibilidad [ $s_r(er_V)$ ], por interacción con los factores analizados [ $s_{I(t_1)}(er_V)$ ] y por reproducibilidad [ $s_R(er_V)$ ] [12].

## 3. RESULTADOS.

Las mediciones se realizaron en la ciudad de Barranquilla, Colombia, en el período desde el 3 de abril hasta el 27 de mayo del 2014. El comportamiento promedio ambiental en ese período se refiere en la Tabla 5.

Demostrada la concordancia del comportamiento experimental de los residuos con el normal esperado, solo se detectó un valor estadísticamente incompatible en la matriz correspondiente al fluido de

	$t_a \pm \Delta t_a$	$HR \pm \Delta HR$	$P_{at} \pm \Delta P_{at}$
Gas	°C	%	hPa
Aire	23,8 ± 3,1	48,9 ± 6,5	1 012 ± 2
Nitrógeno	23,9 ± 3,0	48,1 ± 6,8	1 012 ± 2
Gas natural	30,8 ± 0,7	48,1 ± 6,8	1 016 ± 0,0

Tabla 5. Variables ambientales durante la ejecución de los experimentos.

operación aire: ( $er_V$ )<sub>522</sub> = -0,867%. La causa fue un error de digitación en el valor de la medición de temperatura: ( $t_1$ )<sub>522</sub> = 23,0 °C por ( $t_1$ )<sub>522</sub> = 23,3 °C; al corregirse, la medición fue aceptada ( $er_V$ )<sub>522</sub> = -0,768%.

Demostrada la homocedasticidad de las series de mediciones del error relativo en volumen ( $\alpha = 5\%$ ), en la Tabla 6 se refieren los resultados del ANOVA en función de la naturaleza del fluido de operación ( $\alpha = 5\%$ ).

Los parámetros mancomunados que definen la precisión de la calibración del MVG portátil desarrollado se muestran en la Tabla 7.

Fluido	$\bar{er}_V$	$s_r(er_V)$	$s_{I(t_1)}(er_V)$	$s_R(er_V)$
Aire	-0,476%	0,016%	0,488%	0,528%
Nitrógeno	-0,445%	0,023%	0,352%	0,385%
Gas natural	-0,151%	0,015%	0,448%	0,605%

Tabla 7. Resultados de la evaluación de la precisión de la calibración del MVG portátil.

En la Figura 3 se muestra a través de una carta de control Sheward [14], el desempeño metrológico mancomunado del prototipo GZ-MVG-00-1 B14 según el gas de operación, en los diferentes niveles de presión manométrica y temperatura “aguas arriba” de la restricción a los que se evaluó.

Para establecer los criterios de control estadístico de la calibración del MVG portátil, se definieron los siguientes límites:

Límites de Advertencia (LA), dentro de los cuales se considera que la variable evaluada ( $er_V$ ) se encuentra muy probablemente cuando el proceso está bajo control estadístico.

	Aire	Nitrógeno	Gas natural	Grados de libertad		Estadística Crítica
Fuente de variación	$F_c$	$F_c$	$F_c$	$u_1 = p - 1$	$u_2 = p$	$F_{(1-\alpha)}(u_1, u_2)$
Factor 0 ( $p_1$ )	159,1	43,2	777,6	8	9	2,51
Factor 1 ( $t_1$ )	930,9	225,4	949,2			2,46

Tabla 6. Resultados del ANOVA ( $\alpha = 5\%$ ) en función del fluido de operación.

Se estiman según la ecuación (14):

$$LA = \pm 2 \times s_R(er_V) \quad (14)$$

Límites de Acción (LC), definen la franja en la que, si la variable evaluada ( $er_V$ ) se encuentra, deben tomarse acciones correctivas o preventivas, para retornar el proceso al estado de control estadístico. Se estiman según la ecuación (15):

$$LC = \pm 3 \times s_R(er_V) \quad (15)$$

**Nota 2.** Con fines ilustrativos, los valores de los límites referidos en la Figura 3 corresponden al gas natural, que son las máximos.

Entre los límites de Advertencia Superior (LAS) e Inferior (LAI) [14] se espera que se encuentran los resultados de cualquier calibración futura del MVG portátil desarrollado, siempre que se realice en el período asignado entre calibraciones externas del MVG patrón de referencia utilizado (ver Tablas 2 y 3).

Si la deriva del MVG patrón de referencia es mayor que la esperada, es probable que los nuevos resultados de las calibraciones se encuentren en la franja comprendida entre los límites de advertencia (LA) y de acción (LC) [14]; en este caso, el Laboratorio de calibración debe revisar el período asignado entre calibraciones externas del MV patrón utilizado.

#### 4. DISCUSIÓN.

Para los diferentes gases de operación, los resultados del ANOVA (ver Tabla 6) confirman que el efecto de la presión manométrica y la temperatura del gas "aguas arriba" de la restricción del instrumento de medición es significativo estadísticamente en su calibración para  $\alpha = 5\%$ .

La Tabla 8 muestra la comparación del rango promedio del error relativo en volumen, obtenida experimentalmente en cada j-ésima serie de medición con respecto a la repetibilidad obtenida.

Gas de Operación	$er_V$	$W(er_V)$	$S_r(er_V)$
Aire	-0,476%	0,014%	0,016%
Nitrógeno	-0,445%	0,019%	0,023%
Gas Natural	-0,151%	0,013%	0,015%

Tabla 8. Comparación entre el rango promedio y la repetibilidad del  $er_V$

En general, el rango promedio de las j-ésimas series de mediciones subestima la repetibilidad de la calibración, que es de naturaleza mancomunada, y la razón es el número pequeño de repeticiones ( $n = 3$ ) en comparación con el gran número de mediciones involucradas en el diseño experimental ( $9 \times 3 = 27$ ).

Los valores de la repetibilidad del error relativo en volumen no dependen prácticamente de la naturaleza del fluido, y la razón está en la destreza y habilidad del Metrólogo en la ejecución de los

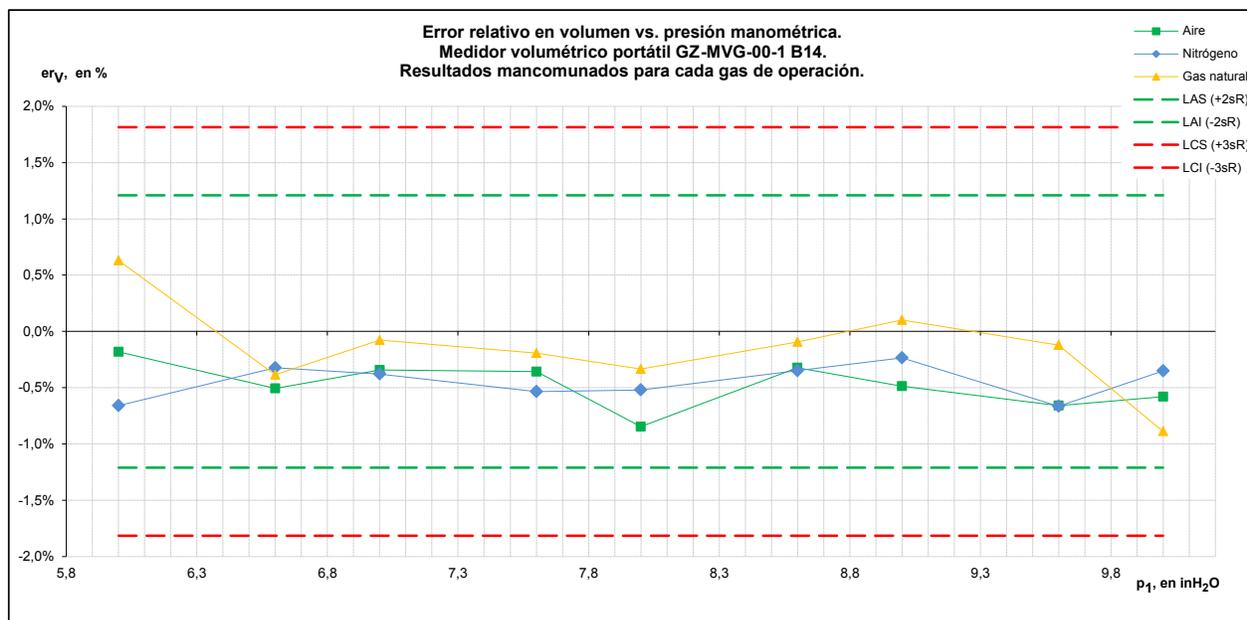


Figura 3. Desempeño metrológico del MVG portátil desarrollado según el gas de operación.

procesos asociados a la caracterización del MVG portátil desarrollado, especialmente la sincronización de acción entre su válvula y el cronómetro.

Sin embargo, su reproducibilidad si depende de la naturaleza del fluido, siendo los casos extremos el nitrógeno, de composición constante y seco, y el gas natural, de composición variable. Por esta razón los resultados son referidos para cada tipo de gas.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Considerando el efecto de la temperatura del gas de operación (ver Tabla 6. ANOVA), el Laboratorio de calibración debe controlar no tanto el valor de la temperatura del aire ambiental sino su estabilidad durante la caracterización del MVG portátil.

El rango estadístico del error relativo en volumen  $[w(er_V)]$  constituye un buen indicador para aceptar o rechazar una serie de mediciones antes de su procesamiento, contribuyendo a la eficiencia de la proceso de caracterización.

Si la repetibilidad de las j-ésimas series corridas experimentales, estimadas a partir del rango estadístico, es menor que la repetibilidad mancomunada, es decir:

$$w(er_V j) \leq s_r(er_V) \quad (16)$$

Entonces la reproducibilidad mancomunada podría sustituir la estimación de la incertidumbre estándar combinada del error relativo en volumen según GUM [10], es decir:

$$u_c(er_V) = [s_R^2(er_V) + u^2(\Delta er_{der})]^{0,5} \quad (17)$$

Donde:

$u(\Delta er_p)$ : Incertidumbre estándar por la deriva de los resultados de la calibración del MVG patrón de referencia, en %.

**Nota 3.** Si no se cumple la desigualdad (16), el proceso de caracterización debe repetirse, después de analizar las posibles causas del incumplimiento y tomar las correspondientes acciones correctivas o preventivas.

Considerando la reciente calibración del MVG patrón de referencia y el período breve de ejecución del experimento, el efecto de la deriva puede ser despreciada actualmente, por lo tanto:

$$u_c(er_V) = s_R(er_V) \quad (18)$$

Sin embargo, es un hecho que su efecto hará que la reproducibilidad aumente en el futuro, y esa es la razón de su presencia en la ecuación (17).

Considerando que la distribución de probabilidades de la corrección por deriva del MV patrón de referencia [ver ecuación (8)] es rectangular simétrica [10, 15], entonces su incertidumbre estándar máxima en el período asignado entre calibraciones externas (dos años) se calcula según la ecuación (19) [15]:

$$u_{der}^{MAX}(er_p) = \frac{2 \times \Delta er_{der}^{MAX}}{\sqrt{3}} = 0,082 \% \quad (19)$$

Los resultados de la validación utilizando el prototipo GZ-MVG-00-1 B14, permiten avalar la utilización del MVG portátil desarrollado como patrón de trabajo, considerando que su aporte máximo en la incertidumbre estándar combinada del error relativo en volumen del medidor de gas de diafragma verificado “in situ” no sobrepasará los valores establecidos en la Tabla 9.

Fluido	$S_R(er_V)$	$u_{DER}^{MAX}(er_p)$	$u_c^{MAX}(er_V)$
Aire	0,528%	0,082%	0,534%
Nitrógeno	0,385%	0,082%	0,394%
Gas natural	0,605%	0,082%	0,611%

Tabla 9. Aporte máximo en incertidumbre estándar del MVG portátil desarrollado.

Si una vez evaluadas las otras fuentes de incertidumbre, la incertidumbre expandida de la calibración del medidor de gas tipo diafragma verificado en campo es mayor que  $\pm 1\%$ , entonces debe reducirse su error máximo permitido según la ecuación 2, observando el cumplimiento de la desigualdad 3, como establece OIML 137-1&2:2012 [6].

Conscientes de los costos asociados, es recomendable:

**1R.** Utilizar una fuente de suministro del gas de operación que no sea el gas natural. El uso del nitrógeno es muy recomendable por las siguientes ventajas:

- La fuente portátil de suministro es más sencilla: un cilindro con un regulador de alta presión es suficiente.
- Su alta pureza y estabilidad de composición es asegurada por el Proveedor.
- No es tóxico ni inflamable, y su impacto ambiental es despreciable.

- Genera la mejor reproducibilidad en el desempeño metrológico del MVG portátil (ver Tabla 7).

Si bien el uso del gas natural en la comprobación "in situ" de los medidores de gas tipo diafragma es tentador por ser la opción aparentemente más económica (a corto plazo), no es recomendable porque:

- El MV desarrollado muestra su peor desempeño metrológico en términos de reproducibilidad (ver Tabla 7).
- Su impacto ambiental, especialmente por el efecto invernadero del metano, su principal constituyente, es indeseable.
- Es inflamable.

**2R.** Automatizar el banco neumático donde se caracterizan y calibra el medidor volumétrico portátil desarrollado.

**3R.** Continuar los procesos de medición con el prototipo GZ-MVG-00-1 B14, "alimentando" las matrices de los datos de entrada hasta demostrar la tendencia asintótica de la desviación estándar por reproducibilidad.

En este sentido, debe considerarse que la estimación de la deriva del patrón volumétrico de referencia es complicado [16], y el riesgo de sobrestimación de su incertidumbre estándar es alta, pero es posible realizar una estimación realista si a la matriz de datos se le adicionan periódicamente nuevos resultados experimentales, por ejemplo, cada tres meses, hasta alcanzar el período asignado de calibraciones externas del MV patrón de referencia (dos años).

Esta estrategia recomendada es costosa y requiere del Laboratorio de calibración una gran disciplina en la gestión de la calidad de los procesos de confirmación metrológica y validación de la calibración del MV de gas desarrollado.

**4R.** Extender el estudio hacia otras regiones del país, por ejemplo, más altas o más frías que Barranquilla.

### Agradecimientos.

Los Autores agradecen la valiosa colaboración prestada por los Ingenieros de Gases del Caribe en la solución metrológica presentada.

## 6. REFERENCIAS.

[1] NTC 5730:2009. Revisión periódica de instalaciones para suministro de gas natural

destinadas a usos residenciales y comerciales y sus correspondientes artefactos a gas. 2009-12-16.

- [2] OIML V 2-200. Edition 2012 (E/F) (JCGM 200:2012). International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition 2008 version with minor corrections. (<http://www.oiml.org/publications/V/V002-200-e12.pdf>)
- [3] CRG67-95. Código de Distribución de Gas Combustible por Redes. Comisión de Regulación de Energía y Gas. 1995-12-21.
- [4] IML. International Vocabulary of Terms in Legal Metrology. Edition 2000. (<http://www.oiml.org/publications/V/V001-ef00.pdf>)
- [5] NTC 2728. Medidores de gas tipo diafragma. Primera actualización. 2005.
- [6] OIML R137-1&2. Gas meter. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests. Edition 2012 (E).
- [7] NIST Special Publication 811. Guide for the Use of the International System of Units (SI). 2008 Edition (<http://www.bipm.org/en/si/conversions.html>)
- [8] Preston-Thomas, H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia* 27, 3-10 (1990).
- [9] Draper, N. R.; Smith, H. Applied Regression analysis. Second edition. John Wiley & Sons. 1981.
- [10] OIML G1-100 Edition 2008 (E) (JCGM 100:2008). GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition September 2008. 134 pages (<http://www.oiml.org/publications>).
- [11] Dietrich, Harald, "et al". Measuring instruments for gas. Gas Meter Testing of Gas Volume Meters with Air at Atmospheric Pressure. PTB Testing Instructions. Volume 29. 2003.
- [12] ISO 5725-3:1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method.
- [13] Engineering Statistics Handbook (<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook.htm>)
- [14] ISO 3534-2: 1993 (E/F). Statistics - Vocabulary and symbols. Part 2: Statistical quality control. First edition. 1993-06-01.
- [15] ME-015. Procedimiento para la calibración de caudalímetros de gases. Centro Español de Metrología (CEM). Edición digital 1. (<http://www.cem.es/divulgacion?page=7>)
16. ILAC-G24: 2007 / OIML D 10: 2007 (E). Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments (<http://www.oiml.org/publications>).

## TUNEL DE VIENTO:

### Una nueva solución de Trazabilidad para las Mediciones de Velocidad de Gases (Anemometría) en Colombia

Jhon Freddy Alfonso ([jalfonso@cdtdegas.com](mailto:jalfonso@cdtdegas.com))  
Luis Eduardo García ([lgarcia@cdtdegas.com](mailto:lgarcia@cdtdegas.com))

Corporación CDT de GAS  
Piedecuesta - Santander - Colombia



El desarrollo tecnológico de un país está directamente relacionado con la disponibilidad y la calidad de la infraestructura utilizable, por ello conscientes de que Colombia aún se encuentra en etapa de fortalecimiento de su infraestructura tecnológica alineada con estándares internacionales, continuamos en esta sección presentando infraestructuras disponibles a nivel nacional así como a nivel internacional que merezcan destacarse para apoyar el desarrollo productivo en Colombia.

#### **Resumen:**

*El CDT de GAS, conociendo la importancia de la medición de velocidad de gases en diversos sectores de la industria y la sociedad, ha desarrollado una nueva solución que permite proveer trazabilidad en la medición de velocidad de gases: una facilidad tipo túnel de viento denominada WSL20, la cual se encuentra en proceso de acreditación y cuyos detalles son descritos en el presente artículo.*

## 1. ANTECEDENTES.

Desde su creación en 1999, el Centro de Metrología de Fluidos (CMF) de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) ha contribuido al establecimiento de cadenas de trazabilidad en la medición de flujo de fluidos mediante el desarrollo, implementación y acreditación de infraestructura metroológica, y de procedimientos de calibración y medición, acordes con los niveles de incertidumbre requeridos en procesos industriales y de investigación, en regulación y control, y en transferencia de custodia de fluidos, entre otros.

Producto del proceso de vigilancia tecnológica que mantiene el CDT de GAS, se identificó en 2009 la necesidad de ofrecer trazabilidad y aseguramiento metroológico para la magnitud velocidad de gases. Esto condujo a que la Corporación hiciera el primer prototipo Túnel de Viento para aplicaciones metroológicas desarrollado en Colombia [1].

El mencionado prototipo operó en conjunto con el Banco de Alto Caudal (BAC) previamente desarrollado por el CDT [2] para generar la velocidad en la sección de prueba, en forma similar a como lo realizó en su momento el *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* [3] (PTB - Instituto Nacional de Metrología [INM] de Alemania). Sin embargo, la alta ocupación de tiempo en el BAC y el alto consumo energético del *blower* centrífugo del BAC motivaron el desarrollo de mejoras para el prototipo de Túnel de Viento, las cuales iniciaron en 2013, y dieron como resultado una nueva facilidad denominada WSL20, que corresponde a la abreviación de “*Wind Speed Laboratory 20 m/s*”.

El WSL20 se encuentra actualmente disponible para la calibración de instrumentos para la medición de velocidad de gases, contribuyendo a la diseminación de la trazabilidad, y en próximos meses será objeto de evaluación por parte del ONAC como parte del proceso de acreditación, según requisitos de la norma NTC-ISO/IEC 17025 [4] que se adelanta con el apoyo de Colciencias.

En Colombia existe un considerable número de túneles de viento, pero enfocados en el estudio de la aerodinámica, así que el WSL20 será el primer túnel de viento para metrología, del país, acreditado en medición de velocidad de gases. En la Tabla 1 se presenta el listado de túneles existentes, tanto académicos como empresariales. En las siguientes

Aplicación Aerodinámica	Aplicación Metroológica
<ul style="list-style-type: none"> <li>● UNAL Bogotá</li> <li>● UPB Medellín</li> <li>● UniAndes</li> <li>● Uni-Libertadores</li> <li>● Aerocivil</li> <li>● Fuerza Aérea Colombiana</li> <li>● Escuela de Aviación INEC - Pereira</li> <li>● Centro de Estudios Aeronáuticos - CEA</li> <li>● Eolus Aviation Limitada - Medellín</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● CDT de GAS</li> </ul>

Tabla 1. Túneles de viento en Colombia

secciones se describen los detalles técnicos del WSL20, y las capacidades de medición y calibración que estarán disponibles próximamente para atender las necesidades del país en esta magnitud.

## 2. APLICACIONES, TIPOS DE MEDIDORES Y ALCANCE OBJETIVO

La medición de velocidad de gases es de gran utilidad en diversas aplicaciones, incluyendo la meteorología, la investigación y desarrollo en áreas como la construcción, la dispersión de contaminantes, y los procesos industriales, debido a que en ciertas condiciones es posible inferir el caudal del fluido a partir de la medición de velocidad. Tomando como base este panorama de requerimientos de trazabilidad y la revisión del estado del arte previamente desarrollado para el diseño del primer prototipo de Túnel de Viento [5], se seleccionó el alcance de medición del WSL20 adaptándolo a los intervalos de velocidad de mayor interés para nuestro país. Un resumen de las aplicaciones e intervalos de velocidad típicos es presentado en la Figura 1, donde el área sombreada de color verde corresponde al intervalo cubierto por el nuevo WSL20.

En cuanto a los instrumentos de medición, actualmente para velocidad de gases se encuentra disponible una amplia oferta tecnológica de instrumentos, que varían en intervalos, condiciones de medición, y en niveles de precisión [5]. En cualquier caso, los instrumentos de medición comúnmente utilizados para bajas velocidades se pueden clasificar en tres categorías: 1) tubos de Pitot (basados en la ecuación de Bernoulli), 2) anemómetros rotativos (registran la velocidad por medio de la rotación de partes móviles), y 3) anemóme-

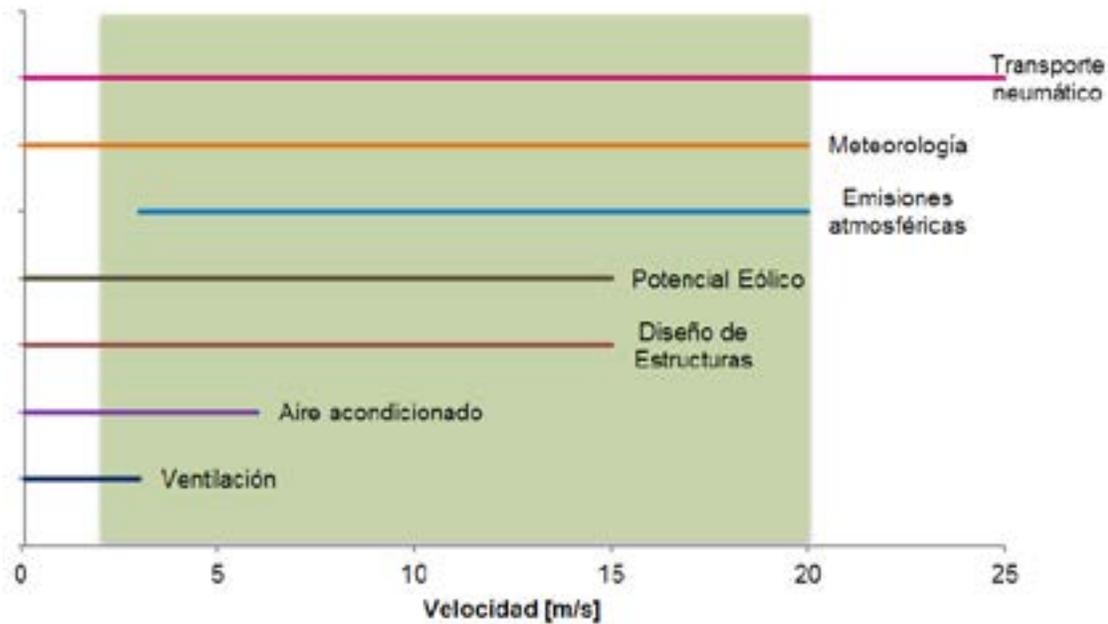


Figura 1. Aplicación e Intervalos de medición de velocidad.

tros térmicos (miden la velocidad a través de la rapidez de enfriamiento de una sección calentada eléctricamente). Estos tres tipos de instrumento fueron considerados en la determinación del alcance operativo del nuevo WSL20.

### 3. PRINCIPIO, MÉTODO DE CALIBRACIÓN Y MENSURANDO

La calibración de instrumentos de velocidad de gas se hace comúnmente por comparación, donde el *Master Meter* (MM - el instrumento de referencia) y el *Meter Under Test* (MUT - el instrumento que se está calibrando) son expuestos a un mismo flujo de aire, con velocidad estable y homogénea sobre el área efectiva en que los instrumentos sensan la velocidad. Como la velocidad es una magnitud dinámica, necesita un medio para su reproducción y por eso se utiliza un túnel de viento, el cual puede ser de diversas formas, dimensiones, y modos de operación; la Tabla 2 presenta los esquemas de operación de los túneles subsónicos, de los que hace parte el WSL20.

A nivel mundial se han desarrollado otras alternativas para la reproducción de la velocidad de gases a bajas velocidades.

Por ejemplo, el NMIJ (INM de Japón) posee un túnel subterráneo de gran longitud [6], con aire calmo, en cuyo espacio se desplaza el MUT hasta 1,5 m/s, y el INRIM (INM de Italia) desarrolló un *Rotating Arm* (brazo rotativo) sobre el cual se monta el MUT [7] (ver figura 2).

Entre las alternativas existentes para desarrollar y caracterizar el WSL20, se seleccionó el esquema 2 de la Tabla 2, con las ventajas de exponer al MUT y al MM a la misma velocidad de aire (limitado a la homogeneidad en la sección anular) y de reducir la influencia de la estabilidad en la generación de velocidad (porque las mediciones se efectúan simultáneamente). Como referencia técnica se seleccionó y aplicó el *NIST Handbook 150-2G (Calibration Laboratories. Technical Guide for Mechanical Measurements. 2.4 Air Speed Calibrations)*, que posee un enfoque orientado a la reproducción controlada de las calibraciones de velocidad, al especificar la identificación y cuantificación las fuentes de incertidumbre asociadas al proceso de medición, acorde con los niveles de incertidumbre requeridos.

#### 3.1 El mensurando “velocidad”:

En velocidad de gases, el mensurando de medición corresponde generalmente a la velocidad promedio sobre una base de tiempo, debido a que la variabilidad en la velocidad es inherente al fenómeno físico y no es factible realizar la comparación (calibración del instrumento) con base en una sola medición instantánea. Por tal motivo, las indicaciones de velocidad del MM y el MUT se estiman a partir del promedio aritmético de  $n$  mediciones registradas a una frecuencia de 1 Hz.



Figura 2. Principios de medición de velocidad en el NMIJ[6] (izquierda) y en el INRIM [7] (derecha)

A partir de estos estimados, se tiene la opción de emitir resultados expresados como un Error en términos absolutos (ecuación 1) o un Factor del medidor (ecuación 2), los cuales deben ser utilizados por el usuario del instrumento para efectuar la respectiva corrección a la indicación. (Ver tabla 3)

Variable	Ecuación	
Error del Medidor	$E_{MUT} = V_{MUT-f} - V_{MM-f}$	Ecuación 1
Factor del Medidor	$MF_{MUT} = \frac{V_{MM-f}}{V_{MUT-f}}$	Ecuación 2

Tabla 3. Variables de calibración de medidores de velocidad.

En la calibración, el registro de la velocidad del instrumento puede realizarse de diversas maneras según la configuración del instrumento, dependiendo de si éste posee salida eléctrica proporcional (lineal o de raíz cuadrada) a su indicación de velocidad [8], si no posee salida

eléctrica, pero tiene capacidad de registro periódico en memoria y posterior descarga a PC, o si el instrumento sólo posee indicación a display analógico o digital (en este caso, se realiza el registro manual de la indicación máxima y mínima).

	ESQUEMA 1	ESQUEMA 2	ESQUEMA 3
<b>CARACTERÍSTICA</b>	 <b>Túnel Cerrado de sección semi-abierta con MM tipo LDA</b>	 <b>Túnel Abierto de sección cerrada con MM tipo pitot</b>	 <b>Túnel Abierto de sección cerrada con MM tipo placa de orificio</b>
<b>Posición del MM y el MUT</b>	El MM no intrusivo se instala en una sección aguas arriba del MUT, sobre la misma línea de corriente de flujo.	El MM intrusivo y el MUT se insertan en el área anular, aprovechando la axisimetría del perfil de velocidad.	MM intrusivo que se inserta y luego se realiza la medición con el MUT para medir la velocidad.
<b>Reproducción de velocidad (Área de Prueba)</b>	En una sección del túnel con velocidad caracterizada, generalmente la sección media del túnel donde $V_t = V_{max}$	En un área anular ubicada entre la capa límite perimetral y el área central.	En la sección media del túnel donde $V_t = V_{max}$
<b>Tecnología del MM</b>	Anemómetro Laser Doppler (LDA)	Tubo de Pitot Anemómetro de Temperatura Constante (CTA) Ultrasónico (USM)	Tubo de Pitot Placa de orificio Venturi
<b>Dimensión Sección de prueba</b>	Desde pequeñas áreas con diámetros equivalente de 250 mm hasta grandes secciones con diámetros equivalentes a 1 m	Desde pequeñas áreas con diámetros equivalente de 250 mm hasta grandes secciones con diámetros equivalentes a 1 m	Pequeña, con diámetros equivalentes generalmente $\leq 300$ mm

Tabla 2. Configuración y características típicas de túneles de viento para bajas velocidades (menores a 30 m/s)

#### 4. NUEVO TÚNEL DE VIENTO WSL20

Tal como se describió anteriormente, se independizó el Túnel de Viento del Banco de Alto Caudal para flexibilizar la operación del laboratorio para la calibración de medidores de velocidad. Para ello, fue necesario trabajar en los siguientes aspectos:

- Desarrollo y adecuación de un sistema de generación de flujo de aire que integrado a la infraestructura existente permitiera generar velocidades con una estabilidad adecuada dentro del intervalo de operación previsto.
- Adquisición y adecuación de un patrón de referencia en velocidad, un patrón de verificación y de un dispositivo de transferencia para la ejecución de procesos de confirmación intralaboratorial y comparaciones interlaboratoriales.

##### 4.1 Desarrollo del túnel de viento:

Inicialmente, mediante análisis teóricos apoyados en herramientas de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), se consideraron varias alternativas de diseño para el sistema de generación de flujo del WSL20 y el mejoramiento de la sección rectificadora de flujo. Se tuvieron en cuenta factores como la influencia de elementos rectificadores en la adecuación del perfil de velocidad y en la

caída de presión generada, la inclusión de un difusor para la recuperación de presión y la generación de flujo por uno o múltiples ventiladores a partir de la curva de carga del sistema; la Figura 3 presenta un ejemplo de estos análisis. Como resultado, un conjunto de ventiladores axiales de alto caudal y alta eficiencia, sumados a un difusor para recuperación de presión y una sección de adecuación mejorada, permitieron generar flujos de aire en régimen turbulento con velocidades estables hasta los 25 m/s en la sección de pruebas.

##### 4.2 Cadena de trazabilidad y patrón de referencia:

Actualmente como estado del arte, es posible reproducir y medir velocidades en túneles de viento con incertidumbres comprendidas entre 0,1% y 10%, dependiendo principalmente del patrón de referencia y el intervalo de medición. Los anemómetros láser Doppler (LDA) se imponen como patrones de referencia a nivel mundial, debido a su baja incertidumbre, la ventaja de ser una tecnología no intrusiva y la posibilidad de medir la velocidad en los tres ejes coordenados. Para su calibración se utiliza el método del disco en rotación, que consiste en determinar la velocidad tangencial de un elemento ubicado sobre el disco, a un radio conocido, y el cual gira a una velocidad angular conocida [9].

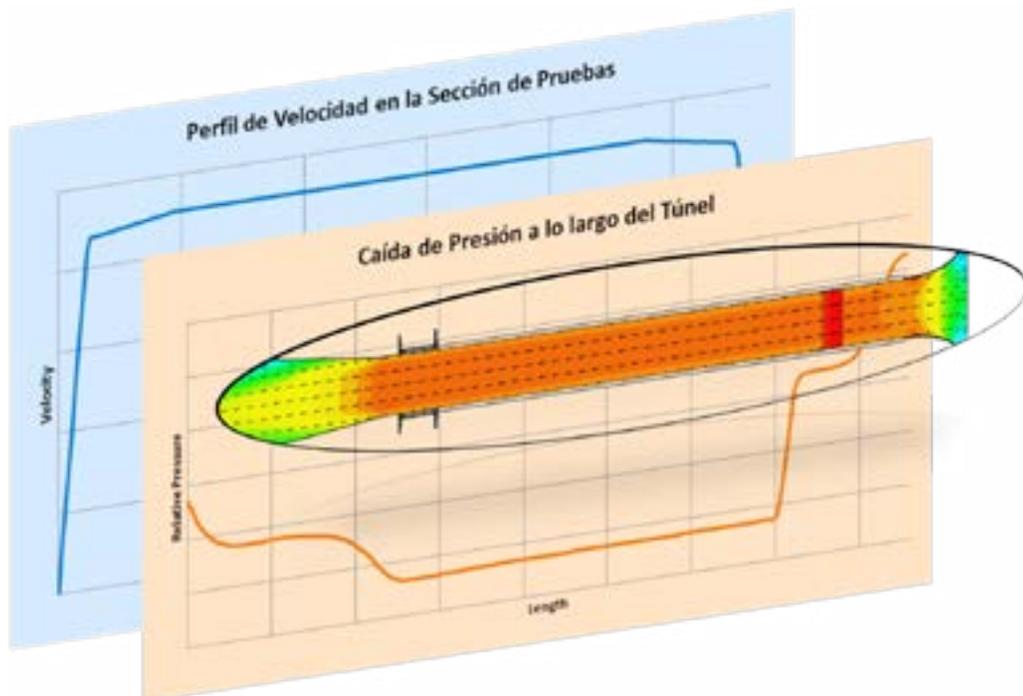


Figura 3. Desarrollo del WSL20 apoyado en herramientas CFD.

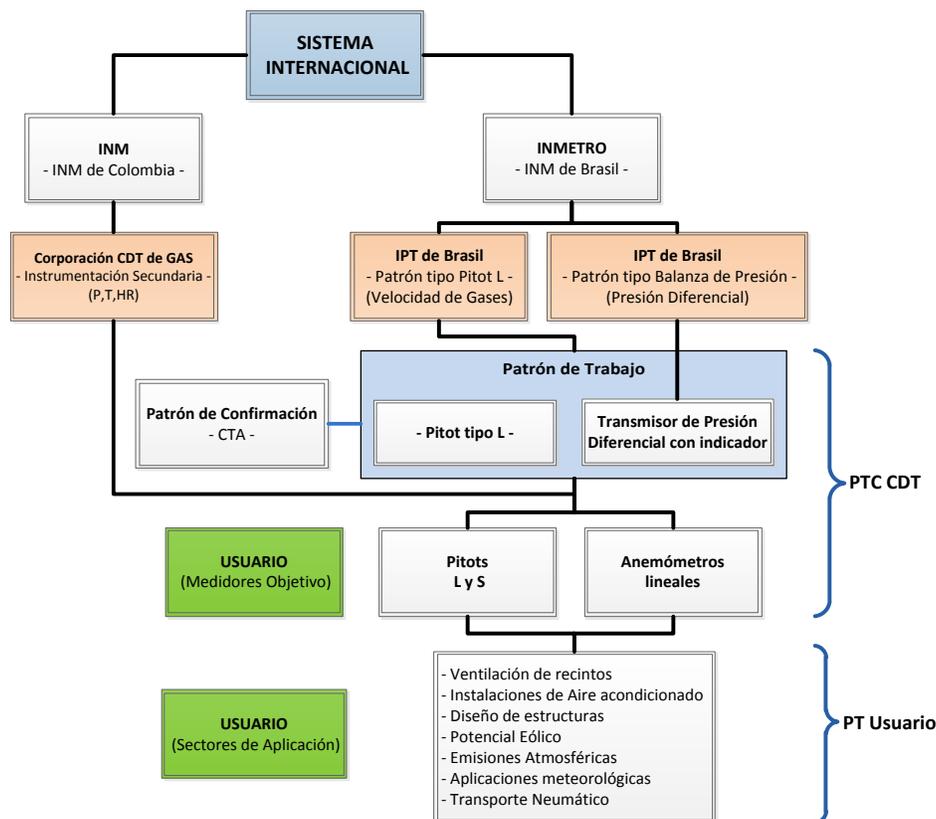


Figura 4. Cadena de trazabilidad del CDT de GAS en medición de velocidad (proyectada).

Aun cuando en entidades como el PTB o el *National Institute of Standards and Technology* (NIST - INM de Estados Unidos) el patrón de referencia es un LDA, siguen empleándose anemómetros de temperatura constante (CTA) o tubos de Pitot asociados a micromanómetros electrónicos como patrones de verificación [9]. Este tipo de patrones poseen desventajas como su mayor incertidumbre, sobre todo a bajas velocidades, debido a la dificultad de medir muy bajas presiones diferenciales (Pitots) y la no linealidad respecto a la velocidad (CTA). A pesar de ello, continúan siendo patrones económicos y fiables para proveer trazabilidad, siendo usados como patrones de trabajo en INMs como los de Turquía o Lituania [10]. Incluso, en la reciente comparación Euromet.M.FF-K3, fueron utilizados como patrones de transferencia un tubo Pitot con amplificador (desarrollado por NMI-VSL) y un anemómetro térmico, para velocidades entre 0,2 m/s y 4,5 m/s [11].

En este contexto, con el fin de disponer de un patrón de trabajo y/o referencia trazable al SI, y luego del análisis de los requerimientos y de realizar comparaciones a partir de las tecnolo-

gías disponibles, se concluyó que tanto los pitots asociados a micromanómetros como los CTA se constituyen en la mejor solución técnico-económica para su implementación como patrones en el CDT de GAS, considerando el nivel tecnológico de nuestro país en relación con la magnitud velocidad, y los niveles de incertidumbre requeridos por los usuarios finales (5% a 20% con  $k=2^1$ ). EL patrón de trabajo seleccionado corresponde a un Pitot L con punta elipsoidal asociado a un transmisor de presión diferencial de Clase 0,25% L.<sup>2</sup>. (Error máximo permisible) con salida analógica, y que permitirá brindar trazabilidad a mediciones de velocidad entre 2 m/s y 20 m/s.

Como patrón de verificación se adquirió un CTA para el mismo intervalo de medición. Un CTA adicional contribuye como dispositivo de transferencia que se usará para procesos de comparación posteriores. El patrón de trabajo será trazable a patrones del IPT de Brasil para finales del 2014. La Figura 4 presenta la cadena de trazabilidad para los resultados de calibración.

<sup>1</sup> Factor de cobertura para un nivel de confianza del 95%.

<sup>2</sup> Lectura indicada.

### 4.3 Caracterización y validación del WSL20

Durante el primer semestre de 2014 se llevaron a cabo diversas pruebas técnicas de desempeño, con el fin de validar el diseño del túnel de viento y el método de medición. Con base en criterios típicos referenciados en las normas técnicas para la calibración de medidores de velocidad y validación de métodos, se ejecutaron seis pruebas cuyos resultados se resumen en la Tabla 4. Los efectos combinados de los desarrollos implementados permitieron generar flujos en la sección de pruebas con una estabilidad mejor al 1%, un nivel de turbulencia menor al 0,7%. Gradientes de velocidad transversal menores al 1% en todo el intervalo, y con adecuados niveles de repetibilidad y reproducibilidad.

La Tabla 5 presenta las características del nuevo Túnel de Viento WSL20, que estará disponible para la prestación de servicios de calibración a partir del segundo semestre de 2014, y con acreditación bajo los requisitos de la NTC-ISO/IEC 17025 prevista para inicios del 2015.

### 5. ACTIVIDADES EN CURSO

Tras culminar el ciclo de desarrollo y caracterización del WSL20, se adelanta un proceso de Comparación Internacional que contará con la participación del laboratorio del CDT de GAS, y dos laboratorios de Brasil (IPT y SKILLTECH), dos entidades acreditadas bajo lineamientos de la ISO/IEC 17025 por la Coordinación General de Acreditación (CGCRE) de INMETRO (INM de Brasil) y con experiencia en programas de comparación en velocidad liderados por la Comisión Técnica de Flujo (CT-13), una de las 12 comisiones que integran la CGCRE.

Para la comparación fue desarrollado un dispositivo de transferencia con sensor CTA, y fueron generados un plan de comparación y el correspondiente protocolo de medición. Cabe aclarar, que aunque este ejercicio de comparación no es considerado válido por el ONAC, para efectos de cumplir con su política CEA-04 [16] de participación en Ensayos de Aptitud (EA), esta comparación se

Objetivo de la Prueba	Referencia Técnica	Criterio típico referenciado	Desempeño Obtenido
<b>Generación de Velocidad</b> (Establecer el alcance operativo del Túnel mediante control de velocidad).	ASTM D5096-02 [12] IEC 61400-12-1 [13] ASTM D3796-09 [14]	0-50% V <sub>máx</sub> de MUTs objetivo, típicamente 20 m/s	El intervalo objetivo (2 m/s a 20 m/s) está dentro del Intervalo operativo (0,5 m/s a 25 m/s).
<b>Estabilidad de la velocidad</b> (Establecer la capacidad del control de velocidad para un período de tiempo, en todo el intervalo objetivo).	ASTM D5096-02 IEC 61400-12-1	± 0,2 m/s	Se analizaron 5 puntos de velocidad dentro del intervalo objetivo durante 10 min. Estabilidad de ±0,02m/s a ±0,2m/s (Aprox. 1% de la velocidad generada). Estabilidad evaluada a partir de 2 min.
<b>Uniformidad del flujo</b> (Determinar la uniformidad de los perfiles de velocidad dentro de la franja de calibración, en todo el intervalo objetivo).	ASTM D5096-02 IEC 61400-12-1	< 1%	Se analizaron 5 puntos de velocidad dentro del intervalo objetivo Uniformidad entre 0,6% y 1%, sobre la franja de calibración.
<b>Nivel de Turbulencia</b> (Determinar la relación entre la desviación estándar y el promedio de velocidad para un período de tiempo, en todo el intervalo objetivo).	ASTM D5096-02 IEC 61400-12-1	< 2%	Se analizaron 5 puntos de velocidad dentro del intervalo objetivo durante 10 min. Nivel de turbulencia entre 0,3% y 0,7%.
<b>Alineación</b> (Evaluar la respuesta de los medidores ante desviaciones respecto a la dirección del flujo).	IEC 61400-12-1 ASTM D5096-02	Debería ser < 1°	Se analizó la respuesta al desalineamiento dentro de ±20°, con intervalos de 5° a una velocidad de 5 m/s. Desviación en velocidad de 0,2% para MM y de 0,4% con pitot como MUT.
<b>Precisión</b> (Analizar la repetibilidad (r) y la reproducibilidad (R) de las mediciones de velocidad).	ASTM E691-13 [15]	Valores críticos h=1,15 y k=1,61 (para p=3 y n=4)	Se ejecutaron 3 calibraciones (p) de un medidor tipo pitot, por 3 profesionales, y tomando 4 repeticiones (n) por punto. Los valores obtenidos fueron h=1,15 y k=1,22, que están dentro de los límites permisibles.

Tabla 4. Pruebas de caracterización y validación del WSL20.

ejecuta como parte de los procesos de aseguramiento metrológico del CMF del CDT de GAS debido a la imposibilidad de participar en EA, por la no disponibilidad de programas ofertados por Proveedores acreditados según criterios de la NTC-ISO/IEC 17043 [17].

Como etapa final del proyecto que pretende generar la primera oferta de servicios de calibración acreditado para la magnitud velocidad, según requisitos de la norma NTC-ISO/IEC 17025, en Colombia, se preparó y remitió la documentación al ente acreditador ONAC, el cual programó la visita de evaluación en laboratorio para el mes de septiembre de 2014. Así pues, se tiene proyectado cumplir cabalmente con los requisitos de acreditación, lograr el reconocimiento mediante el Certificado de Acreditación en 2014 e iniciar la prestación de servicios acreditados desde el mismo instante en que sea emitido.

Por el momento, se continuarán prestando servicios con garantía de trazabilidad pero fuera del actual alcance de acreditación del CMF<sup>4</sup>.

## 6. CONCLUSIONES

- El CDT de GAS logró desarrollar un túnel de viento para calibración de medidores de velocidad de gas, denominado WSL20. El control necesario y los requisitos metrológicos de calidad exigieron un minucioso proceso de diseño, integración y caracterización, realizado concienzudamente por el personal de la Corporación, adelantando incluso una comparación internacional con laboratorios metrológicos de Brasil. Las capacidades de calibración del WSL20 se encuentran en proceso de acreditación ante la ONAC.
- El presente desarrollo tecnológico confirma las ventajas de invertir en actividades de investigación y desarrollo como soporte a procesos de medición con escasa o nula oferta de servicios técnicamente válidos, para soportar los procesos de mejora y calidad en diversos sectores productivos.
- La amplia gama de tecnologías, intervalos de medición, dimensiones y configuraciones de los instrumentos de velocidad que actualmente se encuentran disponibles en el mercado, impone la necesidad de ampliar, a

<b>Tipo de Túnel</b>	Abierto de Sección Cerrada
<b>Sección de pruebas</b>	Circular, $\varnothing = 0,3$ m y L = 1 m
<b>Generación de flujo</b>	Ventiladores axiales a succión controlados por voltaje
<b>Alcance operativo del Túnel</b>	0,5 m/s a 25 m/s
<b>Objetivo de Acreditación</b>	2 m/s a 20 m/s
<b>Norma de referencia</b>	NIST Handbook 150-2G
<b>Patrón de referencia/trabajo</b>	Pitot tipo L asociado a micromanómetro electrónico
<b>Patrón de verificación</b>	Anemómetro térmico tipo CTA
<b>Dispositivos de Transferencia</b>	Anemómetro térmico tipo CTA con indicador
<b>CMC proyectada</b>	U = 0,1 m/s a 0,5 m/s (k=1,98), entre 2 m/s y 20 m/s
<b>Instrumentos a Calibrar</b>	Pitot L y S, Anemómetros térmicos y Anemómetros rotativos <sup>3</sup>

Tabla 5. Resumen de Características del WSL20 del CDT de GAS.

futuro, las capacidades de medición y calibración y las facilidades para reproducir la magnitud, mediante túneles de viento con secciones de prueba de mayor dimensión e intervalo de operación.

- En la calibración de instrumentos de velocidad no existe un acuerdo único en relación con el método y procedimiento de calibración más apropiado, lo cual ha motivado el desarrollo de normas o referencias técnicas delimitadas para una tecnología de medición o un sector particular de aplicación, dificultando los procesos de desarrollo e implementación de servicios acreditados para la magnitud velocidad.
- El desarrollo y caracterización del nuevo túnel de viento WSL20 ha permitido la apropiación de nuevos conocimientos sobre la velocidad en fluidos y los fenómenos de flujo relacionados, lo cual permitirá apoyar el desarrollo de estudios y aplicaciones tales como; el desempeño metrológico de instrumentos, la eficiencia en ventiladores axiales y centrífugos y la aplicación de la similaridad dinámica para la calibración de tubos pitot que operan con otros fluidos (líquido y vapor).

## 7. REFERENCIAS

- [1] J. F. Angarita, J. Rugeles, Director, and L. E. García, Codirector, "Diseño y Construcción de una Instalación para la Calibración de Medidores de Velocidad de Aire utilizando como Patrón el Banco de Alto Caudal del CDT de Gas.," Proyecto de Grado, Universidad Industrial de Santander -UIS, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2010.

<sup>3</sup> Limitado por la relación de bloqueo del medidor bajo prueba (15% máximo) y el alcance del Túnel de Viento.

<sup>4</sup> Código de Acreditación: 10-LAB-013 (2010). [En línea]: < <http://www.onac.org.co/directorios/anexos/archivos/obj011/ALCANCES-LABCALIBRA/archivocertificado-818-525.pdf> >

- [2] L. E. García and G. Covelli, "Desarrollo del Banco de Calibración para Medidores de Gas a Alto Caudal de la Corporación CDT de GAS," presented at the Simposio de Metrología 2010, CENAM, México, 2010, pp. 1-10.
- [3] "Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB): Reconstruction of PTB wind tunnel with 320 mm nozzle completed." [Online]. Available: [http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt1/nachrichten1/news-from-division-1.html?tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=1656&tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=10977&cHash=891e0ce69ea7a8a1e38841372e1afb5a](http://www.ptb.de/cms/en/fachabteilungen/abt1/nachrichten1/news-from-division-1.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=1656&tx_ttnews%5BbackPid%5D=10977&cHash=891e0ce69ea7a8a1e38841372e1afb5a). [Accessed: 21-Jun-2014].
- [4] ICONTEC, "NTC-ISO/IEC 17025. Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración.," Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2005.
- [5] Luis E. García S., Jair F. Angarita D., and Omar A. Naranjo, "La Velocidad En Gases: Aspectos Metrológicos," *MET&FLU CIENCIA - TECNOLOGÍA - INNOVACIÓN*, vol. 3, pp. 14-23, Dec-2010.
- [6] "NMIJ - Fluid Flow Division." [Online]. Available: <https://www.nmij.jp/english/info/lab/fluid-flow/>. [Accessed: 21-Jun-2014].
- [7] A. Piccato, R. Malvano, and P. G. Spazzini, "Metrological features of the rotating low-speed anemometer calibration facility at INRIM," *Metrologia*, vol. 47, no. 1, pp. 47-57, Feb. 2010.
- [8] J. M. Cimbala, "Linear Velocity Measurement." Penn State University, 19-Nov-2013.
- [9] T. T. Yeh and J. M. Hall, "Airspeed Calibration Service," *NIST Spec. Publ.*, vol. 250, 2007.
- [10] A. Pedivsuis, V. Januvsas, and A. Bertalvsienė, "Low air velocity measurement characteristics' variation due to flow regime," *Int. J. Fluid Therm. Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 25, 2008.
- [11] EURAMET, "Euromet Key Comparison for Airspeed Measurements," European Association of National Metrology Institutes, NMI-Van Swinden Laboratorium, Draft B, Feb. 2008.
- [12] D22 Committee, "Standard Test Method for Determining the Performance of a Cup Anemometer or Propeller Anemometer," ASTM International, 2011.
- [13] TC/SC 88 - Wind Turbines, "IEC 61400-12-1: Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. Annex H: Power performance testing of small wind turbines," IEC, Dec. 2005.
- [14] D22 Committee, "ASTM D3796 - 09: Standard Practice for Calibration of Type S Pitot Tubes," ASTM International, 2009.
- [15] E11 Committee, "ASTM E691 - 14 : Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method," ASTM International, 2014.
- [16] Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC, "Política para la participación en Ensayos de Aptitud / Comparaciones Interlaboratorios. CEA-04. Versión 02." Abril-2012.
- [17] ICONTEC, "NTC-ISO/IEC 17043:2010. Evaluación de la conformidad – Requisitos generales para los ensayos de aptitud," 2010.

# ¿Debería existir un margen de tolerancia en los dispositivos electrónicos de **DETECCIÓN DE VELOCIDAD?**

Germán Covelli ([gcovelli@cdtdegas.com](mailto:gcovelli@cdtdegas.com))

Corporación CDT de GAS  
Piedecuesta - Santander - Colombia



## **Resumen:**

*En esta sección se brinda respuesta a la pregunta formulada por un lector de MET&FLU sobre si debería existir, o no, un margen de tolerancia en la medición realizada por los dispositivos electrónicos de detección de velocidad, más comúnmente conocidos como Cinemómetros. Se da respuesta a la pregunta con base en la aplicación de los conceptos de EMP (Error Máximo Permisible) e Incertidumbre de medida.*

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)

## 1. INTRODUCCIÓN.

La seguridad vial involucra el desarrollo de estrategias que permitan reducir los altos índices de siniestralidad, como por ejemplo la implementación de regulaciones y campañas que tienen como finalidad aumentar el grado de responsabilidad de los usuarios de la vía pública. Según el BID (Banco Interamericano de Desarrollo), “más de 1,2 millones de personas mueren cada año en las carreteras de todo el mundo y, aproximadamente 50 millones de personas sufren lesiones no mortales” [1]. Así mismo, se ha identificado que “el exceso de velocidad es uno de los mayores problemas de seguridad vial y un factor determinante en alrededor del 30% de los accidentes mortales de tráfico” [2].

En Colombia, según lo establece la Ley 1383 de 2010 [3], al igual que en países de la Unión Europea como España, y de América como Estados Unidos, Argentina, Brasil y Perú, se ha implementado el uso de aparatos para el control de velocidad de circulación de vehículos a motor, conocidos como cinemómetros. Sin embargo desde su implementación, se ha generado algún tipo de controversia asociado a la diferencia en los resultados de la medición realizada por el cinemómetro, cuando se compara contra la indicación del tacómetro que utiliza el conductor del vehículo como referencia de velocidad.

Lo anterior se debe, a que los cinemómetros y los tacómetros, como todo instrumento de medición, tienen asociado un error (sistemático y aleatorio) en la indicación de la velocidad medida. Precisamente en metrología legal los criterios de conformidad para el uso de los cinemómetros, corresponden a la aprobación de modelo y a la evaluación del EMP (Error Máximo Permissible), según sea el tipo de cinemómetro, el tipo de instalación y el método de calibración (móvil simulado o real). Para explicar el concepto se dividirá el análisis en dos partes: la primera asociada a la Evaluación de la Conformidad del Cinemómetro, y en segundo lugar, al Uso que se le dé al Resultado de sus Mediciones.

## 2. EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LOS CINEMÓMETROS

Como se mencionó en la introducción, un cinemómetro es clasificado como conforme, y puede ser utilizado confiablemente por los usuarios finales, cuando cumple con la aprobación de modelo y con el control metrológico.

La “aprobación de modelo” de un instrumento de medición “es un procedimiento mediante el cual, a través de pruebas técnicas y ensayos, se verifica

que las condiciones mecánicas, de construcción, de uso y funcionamiento de un instrumento, garantizan la -exactitud- de las mediciones, y además que esa -exactitud- se va a conservar razonablemente en el tiempo de uso del instrumento, de acuerdo con requisitos específicos establecidos en las normas correspondientes. Esta aprobación de modelo constituye una autorización de comercialización por parte de la autoridad, de los instrumentos de medición controlados en el país, tanto de fabricación nacional como importados” [4]

En el control metrológico se verifica el EMP. En general, el EMP de un instrumento de medición es el valor extremo del error permitido para el instrumento dado, establecido en especificaciones, reglamentos, etc. En Colombia, la SIC (Superintendencia de Industria y Comercio) “(...) es la entidad competente para expedir reglamentos técnicos metrológicos para instrumentos de medición sujetos a control metrológico” [5].

### ¿En qué consiste la Verificación de un Cinemómetro?



Figura 1. INTI verificando cinemómetros en autódromo  
(Fuente: <http://www.inti.gob.ar/noticiero/2013/noticiero376.htm>).

La verificación es un paso posterior a la calibración. Sin calibración no es posible la verificación. Para realizar la verificación se requiere un criterio (EMP) a evaluar y una información objetiva sobre la cual basarse (calibración) para decidir si el criterio se cumple o no se cumple.

La SIC y los organismos de control enmarcados en labores de metrología legal no necesariamente son los mismos que calibran pues esta labor puede estar en manos de los laboratorios acreditados y los INM. La actividad que si es exclusiva de los entes de control o de quienes éstos designen es la verificación del cumplimiento de los requisitos estipulados basándose en los resultados de los laboratorios.

Entonces, la calibración de un cinemómetro consiste “(...) en determinar la curva de error en función de la velocidad, en condiciones de velocidad simulada o de tráfico real, comenzando en la velocidad mínima, en el alcance establecido,

hasta la velocidad máxima permitida en el lugar de instalación o verificación(...)” [6]. Según los reglamentos técnicos consultados, “los cinemómetros deberán calibrarse en lapsos no superiores a un año, debiéndose conservar sus registros. Dicha calibración se realiza de acuerdo con las características del cinemómetro, tanto en laboratorio como en campo” [7].

**¿Cuál deber ser el Error Máximo Permissible (EMP) en los cinemómetros?**

Para entrar en contexto, en la Tabla 1, se presenta información referente a reglamentos técnicos establecidos en algunos países tomados como referencia para este estudio, y el EMP establecido en dichos reglamentos. Para efectos del presente artículo, solo se muestra el EMP aplicado en procesos de verificación periódica.

En la información que se encuentra disponible en la página WEB de la SIC [10] consultada para este estudio en agosto de 2014, no se encontró una referencia técnica en donde se especifiquen límites que apliquen para Colombia con el fin de llevar a cabo esta actividad.

País	España	Argentina	Perú	Brasil
Reglamento	Orden ITC/3123/2010 [8].	Resolución 753/98 [7].	NMP013:2010 [6].	Portaria n.º 115/98 [9].
EMP en Laboratorio (Simulación)	± 2,0 km/h para V≤200 km/h. ±3,0 km/h para V>200 km/h	± 3,0 km/h para V≤100 km/h. ±3,0 % para V>100 km/h	± 5,0 km/h para V≤100 km/h. ±5,0 % para V>100 km/h	± 5,0 km/h para V≤100 km/h. ±5,0 % para V>100 km/h
EMP en sitio (trafico real)	Fijo o estático: ± 5,0 km/h para V≤100 km/h. ±5,0 % para V>100 km/h Móvil: ± 7,0 km/h para V≤100 km/h. ±7,0 % para V>100 km/h	± 3,0 km/h para V≤100 km/h. ±3,0 % para V>100 km/h	± 7,0 km/h para V≤100 km/h. ±7,0 % para V>100 km/h	± 7,0 km/h para V≤100 km/h. ±7,0 % para V>100 km/h

Tabla 1. Reglamentación metrológica de cinemómetros y EMP en países referentes para este estudio.

Al analizar el contenido de la Tabla 1, es claro que en dichos países, para obtener el EMP de cada cinemómetro, éste debe ser calibrado y las diferencias encontradas entre las velocidades medidas por el cinemómetro y las del sistema de referencia (patrón), corresponderán a los errores de indicación del instrumento, como se muestra en la Ecuación 1.

$$Error = I_{instrumento} - I_{patrón} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

**I<sub>instrumento</sub>**: Indicación del cinemómetro en calibración [km/h].

**I<sub>patrón</sub>**: Indicación del cinemómetro patrón [km/h].

En este sentido, y desde la óptica metrológica, la evaluación de conformidad de cada cinemómetro se deberá realizar teniendo en cuenta que los errores obtenidos en la calibración del equipo, sean verificados con respecto a los criterios propuestos en la Ecuación 2 y 3, los cuales deberán satisfacer los EMP y las incertidumbres, tal como se explicará a continuación en el numeral 3.

Límite inferior	$EMP(-) < y - U$	Ecuación 2
Límite superior	$EMP(+) > y + U$	Ecuación 3

Tabla 2. Criterio de Evaluación de Conformidad [11].

Dónde:

**EMP (-)**: Límite inferior del EMP.

**EMP (+)**: Límite superior del EMP.

**U**: Incertidumbre global expandida.

**y**: Error del instrumento a la indicación dada.

**3. APOORTE DE LA INCERTIDUMBRE DE LA CALIBRACIÓN EN EL USO DE CINEMÓMETROS**

De acuerdo con la interpretación que puede darse del artículo escrito por JOS G.M. VAN DER GRITEN, del NMI de Holanda [12], cuando se utilizan los resultados de la medición de un cinemómetro para determinar -por parte de la autoridad competente- si se violan los límites de velocidad establecidos, existe un riesgo asociado sobre tal decisión, en razón a que los equipos poseen errores inherentes a su propia naturaleza tecnológica. Para explicar su impacto Van Der Griten recomienda aplicar el concepto de la Incertidumbre de la calibración del cinemómetro para mitigar tal efecto.

**¿En qué consiste la Incertidumbre de la Calibración de un Instrumento de Medición?**

Según el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) la incertidumbre se define como el “(...) parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando (...)” [13]. En otras palabras, es la duda que existe respecto al resultado medido, la cual puede ser asociada a “(...) componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociados a correcciones y a valores asignados a patrones (...)” [13].

**¿Cómo se aplica la Incertidumbre de la Calibración?**

Basado en la información del EMP, “(...) la incertidumbre del instrumento de control de velocidad se obtiene suponiendo una distribución rectangular. La relación entre el EMP y la incertidumbre estándar se obtiene de la GUM” [12].

Entonces:

$$u_s = MPE / \sqrt{3} \quad \text{Ecuación 4}$$

Y la incertidumbre expandida (k=2) es:

$$U_{k=2} = 2 \cdot MPE / \sqrt{3} \quad \text{Ecuación 5}$$

De acuerdo con la referencia [12], en la Tabla 3 se muestra la relación entre el EMP y la aplicación de la incertidumbre de medición. Este concepto se aplica, a manera de explicación, para los límites establecidos en la reglamentación metrológica de los países tomados como referencia de este estudio, y que se mostraron en la Tabla 1.

#### 4. ENTONCES... ¿DEBERIA EXISTIR UN MARGEN DE TOLERANCIA EN LA VELOCIDAD MEDIDA POR LOS CINEMOMETROS?

Sí, y por supuesto esta respuesta se constituye en la base del inicio de una discusión tecnológica, ya que la decisión de emitir una multa por exceso de velocidad, debería realizarse con el mayor grado de confianza y con la menor posibilidad de riesgo en aras de mantener la transparencia institucional.

Para brindar mayor claridad a nuestros lectores, nos apoyaremos en la Figura 2, en la cual se presentan cuatro casos de control de velocidad medidos con un cinemómetro. En el eje x se muestra la velocidad relativa correspondiente al exceso de velocidad medido. Para cada uno de los casos se observa la velocidad y la incertidumbre expandida (k=2).

Para el caso 1, de acuerdo con la indicación del cinemómetro el vehículo se desplaza a una velocidad menor a la indicada por el límite de velocidad. Sin embargo, debido a la incertidumbre, existe una pequeña probabilidad de que el vehículo sea detectado como infractor. Para el caso 2, esta probabilidad es de aproximadamente el 50%. Para el caso 3, a pesar de que la indicación del cinemómetro muestre que el vehículo excede el límite de velocidad, todavía existe una probabilidad estadística de que no lo esté excediendo. Para el caso 4, según la indicación del cinemómetro el vehículo está excediendo el límite de velocidad, inclusive considerando su incertidumbre asociada (generalmente contemplando un nivel de cobertura del 95%), es decir que en este último caso se puede establecer que el vehículo, es infractor con un nivel de confianza alto, permitiendo la toma de decisiones prácticamente inapelables en términos estadísticos.

Alcance	MPE	Incertidumbre estándar $U_s$	Incertidumbre expandida $U(k=2)$
0-100 km/h	±3,0 km/h	1,73 km/h	3,46 km/h
	±5,0 km/h	2,89 km/h	5,77 km/h
	±7,0 km/h	4,04 km/h	8,08 km/h
>100 km/h	±3,0%	1,73%	3,46%
	±5,0%	2,89%	5,77%
	±7,0%	4,04%	8,08%

Tabla 3. Relación entre MPE y la incertidumbre de medición. (Fuente: tabla 1 tomada de la referencia [12] y editada por el autor).

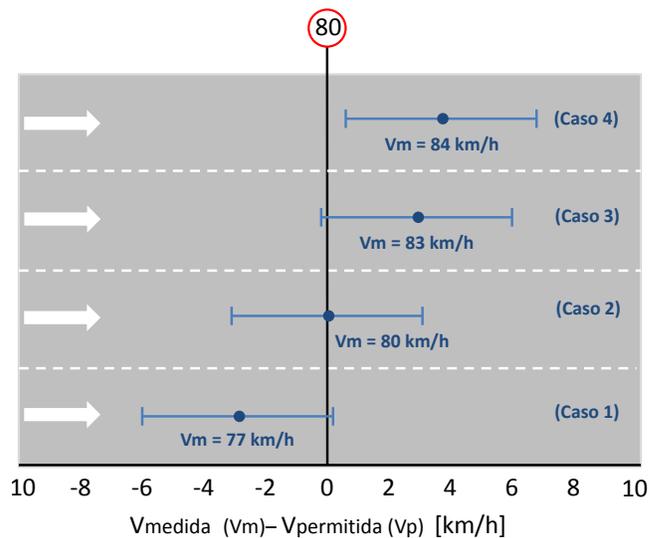


Figura 2. Cuatro casos de ejemplo de exceso de velocidad e incertidumbre (k=2) - (Fuente: imagen tomada de la referencia [12] y editada por el autor).

#### 5. GRADO DE PROBABILIDAD Y RIESGO EN LA DETERMINACIÓN DE VEHICULOS INFRACTORES

Como se explicó anteriormente el riesgo que se asume, al aplicar una multa por exceso de velocidad se basa en los conceptos de EMP y estimación de incertidumbre presentados en la referencia [12]. Suponiendo que el límite de velocidad establecido para el tramo es de 80 km/h y que el EMP reglamentado es de ± 3,0 km/h, la Tabla 4 presenta la evaluación de la probabilidad de que el vehículo este excediendo el límite de velocidad y el riesgo que se asume en la decisión de imponer la infracción.

En donde:

**Vobs:** velocidad observada por el cinemómetro [km/h]

**Vrel:** velocidad relativa de exceso de velocidad expresada como múltiplo de la incertidumbre estándar.

**P:** Probabilidad de que el conductor está excediendo el límite de velocidad.

**R:** Riesgo de una decisión errónea si se da al conductor una infracción por exceso de velocidad.

Vobs	Vrel	P	R
80,63	0,36	83,2%	16,8%
81,73	1,00	84,1%	15,9%
82,84	1,64	95,0%	5,0%
83,39	1,96	97,5%	2,5%
83,46	2,00	97,7%	2,3%
84,03	2,33	99,0%	1,0%
85,19	3,00	99,9%	0,1%

Tabla 4. Grado de confianza y riesgo para los casos presentados en la Figura 2. (Fuente: tabla 2 tomada de la referencia [11] y editada por el autor).

## 6. CONCLUSIONES

- Se puede concluir, que la aplicación del análisis de incertidumbre de medición, corresponde a la práctica recomendada y aplicada internacionalmente para brindar alto grado de confianza, y mínimo riesgo, cuando se utilizan cinemómetros para el control de velocidad en carretera. A partir de la incertidumbre se deriva el margen de tolerancia preguntado por el lector de MET&FLU, dependiendo del nivel riesgo tolerable en la toma de decisiones erróneas (falsos positivos) acerca de una posible infracción.
- Se observa que cuanto mayor sea el EMP reglamentado en cada país para el control metrológico de cinemómetros, mayor será la incertidumbre en la medida realizada por dichos cinemómetros, y por ende sería necesario usar un mayor margen de tolerancia para evitar la toma de decisiones erróneas (falsos positivos) en cuanto a las posibles infracciones.
- Es necesario que a la mayor brevedad posible se establezcan en Colombia la estrategia para brindar trazabilidad a los cinemómetros, los EMP para estos instrumentos y el margen o márgenes de tolerancia para que las autoridades tomen decisiones con bajo riesgo de incurrir en errores.
- Por último, mientras en el país no se logre consolidar lo que hemos mencionado en la conclusión “c”, la mejor opción para evitar ser multado, es conducir al menos de 5 km/h a 7 km/h por debajo del límite de velocidad establecido.

## 7. REFERENCIAS

[1] BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. [Fecha de consulta: 12 agosto 2014]. Disponible en: <http://www.iadb.org/es/temas/transporte/acerca-de-la-estrategia,6726.html>.

[2] COMISIÓN EUROPEA. [Fecha de consulta: 12 agosto 2014]. Disponible en: [http://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/topics/behaviour/speeding/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/transport/road_safety/topics/behaviour/speeding/index_es.htm)

3. REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Ley 1383 de 2010, “Por la cual se reforma la Ley 769 de 2002 - Código Nacional de Tránsito, y se dictan otras disposiciones”.

4. Superintendencia de Industria y Comercio - SIC. [Fecha de consulta: 26 de agosto 2014]. Disponible en: <http://www.sic.gov.co/drupal/metrologia-legal>

5. REPUBLICA DE COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. Decreto 1471 de 2014, “Por el cual se reorganiza el Subsistema de la Calidad y se modifica el Decreto 2269 de 1993”.

6. SERVICIO NACIONAL DE METROLOGIA - INDECOPI. Norma Metrológica Peruana NMP 013:2010 “Instrumentos destinados a medir velocidad de circulación de vehículos a motor. Cinemómetros” 1era Edición. 2010-08-08.

7. REPUBLICA DE ARGENTINA. SECRETARIA DE INDUSTRIA, COMERCIO Y MINERIA. Resolución 753/98. “Establécese la reglamentación Metrológica y Técnica de cinemómetros”.

8. GOBIERNO DE ESPAÑA. MINISTERIO DE INDUSTRIA Y COMERCIO. Orden ITC/3123/2010, de 26 de noviembre. “Por la cual se regula el control metrológico del Estado de los instrumentos destinados a medir la velocidad de circulación de vehículos a motor”.

9. MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, DO COMÉRCIO E DO TURISMO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. Portaria n.º 115, de 29 de junho de 1998. “estabelecer as condições mínimas a quedevem satisfazer os medidores de velocidade para veículos automotivos utilizados nas medições”

10. Superintendencia de Industria y Comercio - SIC. [Fecha de consulta: 26 de agosto 2014]. Disponible en: <http://www.sic.gov.co/drupal/normatividad>

11. UNE-EN ISO 14253-1, (1999): “Especificación geométrica de productos (GPS). Inspección mediante medición de piezas y equipos de medida. Parte 1: Reglas de decisión para probar la conformidad o no conformidad con las especificaciones”.

12. JOS G.M. VAN DER GRITEN, NMi Certin B.V., Dordrecht, The Netherlands: “Confidence levels of the measurement-based decisions”. OIML Bulletin. Volume XLIV, Number 3. July 2003.

13. BIPM. “International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)”. JCGM 200:2008.

**HECHO EN  
COLOMBIA**  
Corporación CDT de GAS

**15** AÑOS  
Corporación CDT de GAS

Aportando  
**Ciencia, Tecnología e Innovación**  
Para ser aplicada en el sector del  
**gas natural en Colombia.**

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