

IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE QUE AFECTAN EL PROCESO DE MEDICIÓN DEL PUNTO DE ROCÍO DE HIDROCARBURO Y EL PODER CALORÍFICO DEL GAS NATURAL

Adriana Alexandra Aparicio Ariza*, Elizabeth Ayala Blanco¹

¹Grupo de investigación en Fluidos y Energía GIFE. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía El Refugio. Piedecuesta. Santander. Colombia.

Resumen: El poder calorífico y el punto de rocío son parámetros que determinan la calidad del gas natural. Una adecuada determinación de sus valores disminuye la posibilidad de causar ineficiencias en los procesos de transporte y distribución del gas. En el presente artículo se presenta un análisis de la identificación y cuantificación de las fuentes de incertidumbre que afectan el proceso de medición indirecta del punto de rocío de hidrocarburo y el poder calorífico del gas natural.

Además se presenta los tipos de incertidumbre y las distribuciones de probabilidad asociada a cada una de las magnitudes de entrada de los modelos de medición de los parámetros evaluados para generar información que permita obtener resultados con alta confiabilidad metrológica.

Palabras clave: fuentes de incertidumbre, Poder calorífico, Punto de rocío de hidrocarburo, Gas Natural, incertidumbre.

Abstract: Heating value and hydrocarbon dew point are parameters that determine the quality of the natural gas. A proper determination of their values reduces the possibility of causing inefficiencies in the processes of transport and distribution of gas. This article is an analysis of the identification and quantification of the uncertainty sources that affect the indirect measurement of the heating value of natural gas and hydrocarbon dew point.

It also presents the types of uncertainty and the probability distributions associated with input quantities of each measurement models of the evaluated parameters to generate information that will allow getting results with high metrological reliability.

INTRODUCCIÓN

El gas natural (GN) actualmente es considerado como una de las principales fuentes de energía y está constituido principalmente por una mezcla de hidrocarburos que dependen del yacimiento del cual se extrae. El desarrollo de un amplio número de tecnologías adaptadas a cada uso, ya sea de tipo doméstico, comercial o industrial, se ha visto favorecido debido a su gran versatilidad. Sin embargo, dada a la variabilidad de la composición del GN, es necesario contar con ciertas condiciones de seguridad a través de los sistemas de distribución y transporte del combustible, para evitar accidentes fatales debido a su combustión incompleta y/o a su condensación. Para esto el GN debe contar con condiciones de calidad y seguridad, que en Colombia

son reguladas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) [1].

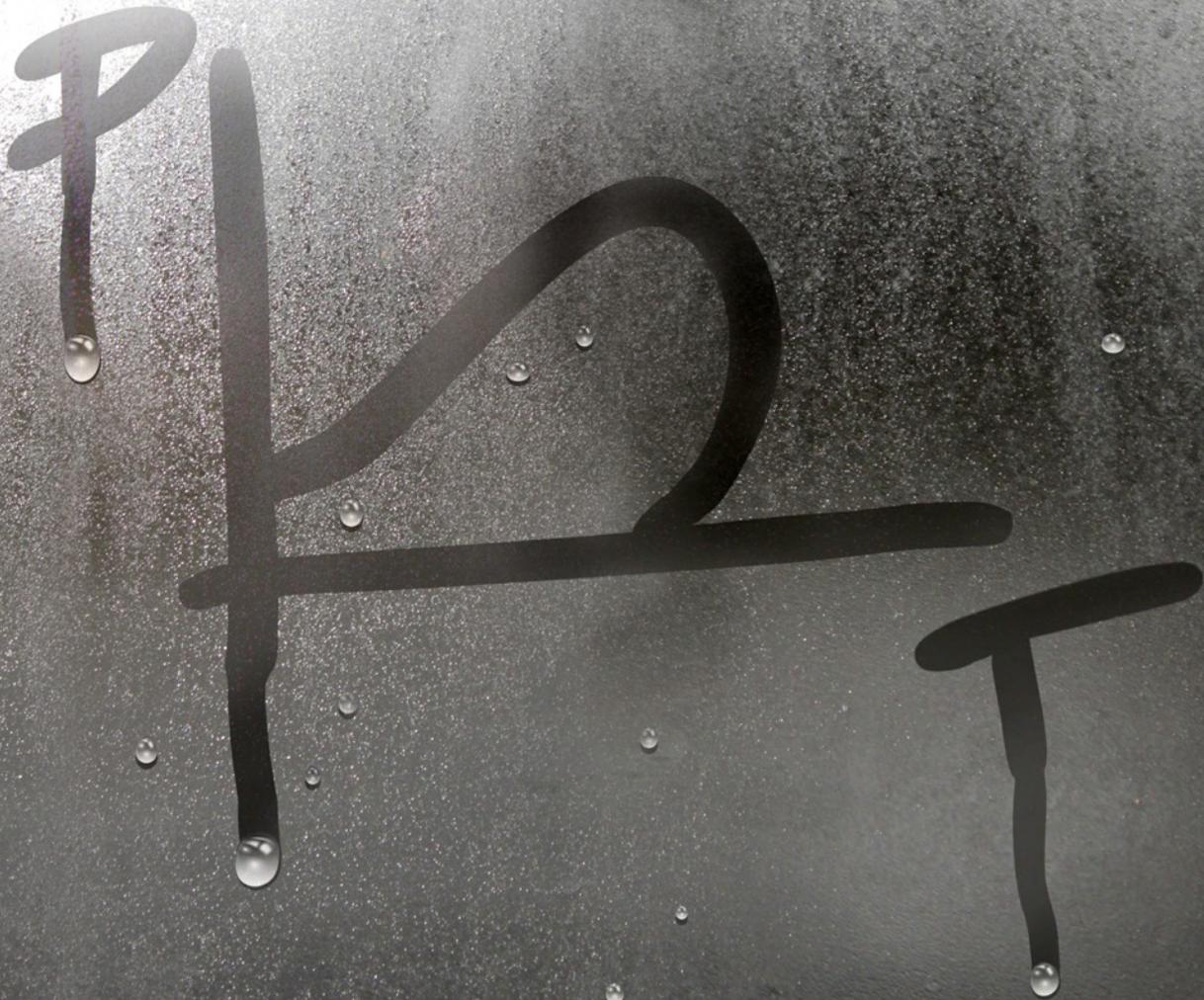
Dos de los parámetros de calidad de gas de mayor interés a nivel industrial son el poder calorífico (PC) y el punto de rocío de hidrocarburo (PRHC). El PC del gas corresponde a la cantidad de calor producido por la combustión completa, a condiciones estándares establecidas por cada país de una cantidad específica de gas, que puede ser medido en volumen o en masa. Dependiendo del estado en que se encuentre el agua originada en el proceso de combustión se puede clasificar en poder calorífico superior (líquido-condensado) o poder calorífico inferior (vapor de agua). Su determinación indirecta se basa en la identificación de la composición obtenida por diferentes técnicas analíticas, la más

*aaparicio@cdtdegas.com

utilizada es la cromatografía de gases [2]. El PRHC es uno de los parámetros más críticos en el GN, debido a que está altamente influenciado por la composición de los hidrocarburos pesados presentes en el gas y los problemas que se pueden derivar por sus mediciones inexactas. Tanto la norma ISO 14532:2014 [3] como el estándar API 14.1 [4] concuerdan en que el PRHC es la temperatura a una presión dada a la cual el hidrocarburo en estado vapor comienza a condensarse. A pesar de esto, aún existen discrepancias entre el tamaño de gota que debe

considerarse como condensado, razón por la cual esta medición involucra una alta incertidumbre.

Una incorrecta determinación de estos parámetros puede generar sobrecostos, disputas en los puntos de transferencia de custodia, condensados, pérdida de eficiencia en los sistemas de combustión por taponamiento, entre otros. Por lo tanto, la medición de estos parámetros y el seguimiento estricto de estos procesos, son necesarios para garantizar el suministro de una fuente de energía limpia a sus usuarios finales.



En la determinación de la composición del GN, el PC y el PRHC es indispensable mantener y asegurar la validez de sus mediciones, garantizando la calidad del proceso de medición. La identificación y cuantificación de las diferentes fuentes de incertidumbre asociadas con las magnitudes de entrada que contribuyen al valor del mensurando de cada uno de estos parámetros, permiten obtener resultados confiables, debido a que de estos depende, en gran parte, la toma de decisiones para la resolución de problemas que se puedan presentar en la distribución y transporte del GN. Por lo tanto es importante brindar trazabilidad y una adecuada estimación de incertidumbre atribuida a cada uno de los procesos de medición.

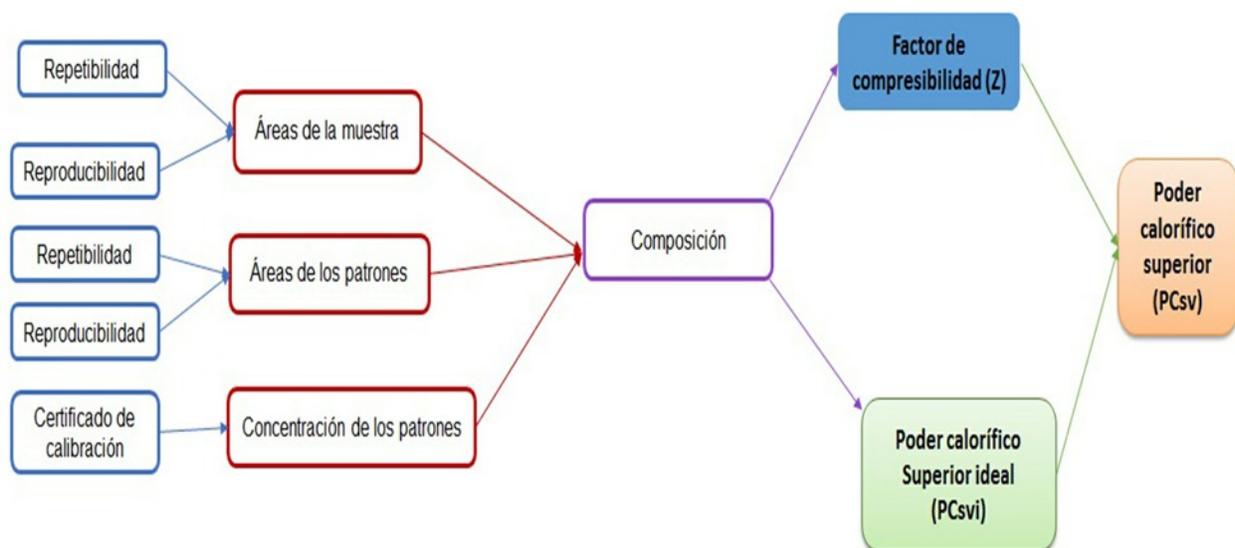
METODOLOGÍA

El poder calorífico superior en base volumétrica (PC_{Sv}) es obtenido de forma indirecta a condiciones estándar a partir del modelo matemático descrito en la ecuación A6 de la norma GPA 2172 [5] y los valores de los poderes caloríficos superiores ideales en base volumétrica de cada uno de los componentes (PC_{Siv}) se tomaron del Anexo B3 de la presente norma. El factor de compresibilidad (Z) se calculó a partir del modelo matemático del método detallado descrito en reporte de la American Gas Association (AGA) N°8 [6], debido a que este método presenta

una menor desviación con respecto a resultados experimentales.

La medición indirecta del PRHC se realiza comúnmente a partir de la cromatografía de gases y mediante ecuaciones de estado termodinámicas [7], de las cuales, las de mayor aplicación en la industria del petróleo y gas son: la ecuación de Peng Robinson (PR) y la ecuación de Soave Redlich Kwong (SRK), ya que a pesar de su sencillez, logran una buena aproximación a las mediciones experimentales [8]. La cromatografía de gases se emplea para conocer la composición del GN la cual es fundamental, no sólo para la determinación del PRHC sino también para el cálculo del PC_{Sv}, entre otras propiedades importantes del combustible. La composición se obtiene por regresión lineal a partir de la relación entre las concentraciones de los materiales de referencia gaseosos (MRG) con las respectivas respuestas del equipo (área de cada pico).

De acuerdo con la Guía para la expresión de la incertidumbre de medición (GUM) [9], el primer paso para una buena estimación de incertidumbre es la correcta definición del modelo de medición, seguido por la identificación de las fuentes que perturban a las variables involucradas en dicho modelo. Para la cuantificación de las fuentes de incertidumbre involucradas en la medición del PC_{Sv}



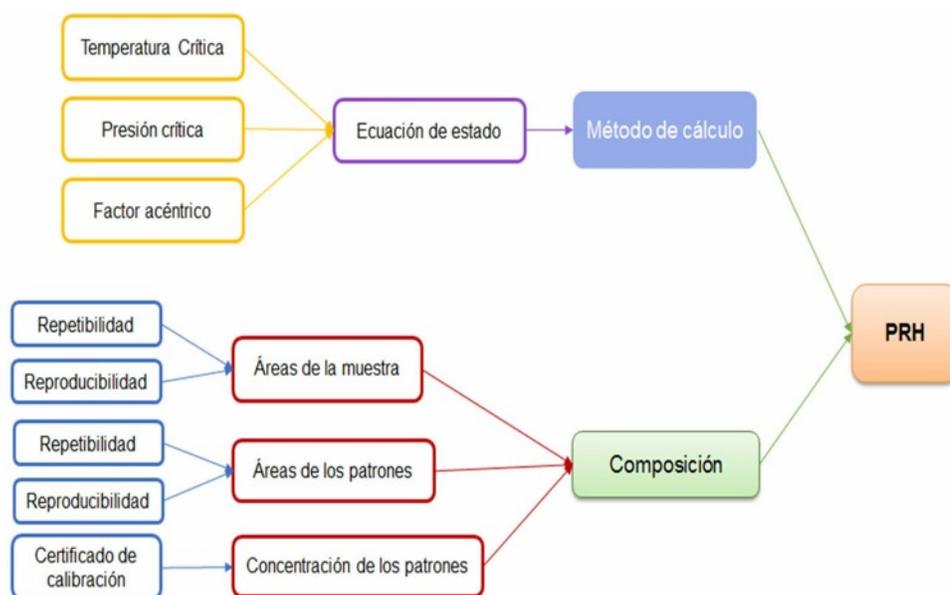


Figura 2. Árbol de fuentes de incertidumbre para la determinación del PRH

y el PRHC, se identificó la función de probabilidad que seguía cada una de las magnitudes de entrada para realizar su respectiva propagación por el método Monte Carlo (MC) [10] y para la cuantificación por el método de GUM se identificaron cada uno de los coeficientes de sensibilidad derivando la variable de salida con respecto a cada una de las variables de entrada [9]. La herramienta computacional, utilizada para llevar a cabo la cuantificación de la incertidumbre de medición, fue el lenguaje de programación PYTHON bajo la interfaz de usuario WinPython, que ha sido desarrollado bajo la licencia de código abierto [11], lo cual hace más fácil su uso en diversas áreas, incluyendo las de tipo comercial; Python además cuenta con bibliotecas (tales como math., numpy., scipy., entre otras), las cuales permiten la utilización de comandos específicos, que, en este caso, facilitaron la cuantificación de los mensurandos (PCSV y PRHC) y sus respectivas incertidumbres, especialmente cuando se aplicó el método MC que demandó la simulación de un gran número de ensayos.

De esta forma, teniendo claridad en cuanto al modelo de medición, habiendo identificado las fuentes de incertidumbre que son cuantificables, y

habiendo seleccionado una buena herramienta matemática, se facilita la estimación de la incertidumbre que complementa la medición de los parámetros de calidad de gas, contribuyendo a una acertada toma de decisiones en los puntos de transferencia de custodia.

RESULTADOS

A partir del modelo matemático para el cálculo del PCSv a condiciones estándar en Colombia (60°F y 14.65 psi) se identificaron las fuentes de incertidumbre asociadas a su proceso de medición y representadas en la figura 1.

Para las incertidumbres asignadas al Z y al PCSiv se le atribuyó una distribución normal, debido a que los valores asignados fueron tomados de documentos de referencia (AGA 8 y GPA 2172), en los cuales generalmente los valores reportados son obtenidos a partir de una serie de repeticiones realizadas.

En la figura 2 se muestra el árbol de las fuentes de incertidumbre asociadas a la medición indirecta del PRHC. Se consideró que la información de las constantes críticas puede influenciar el cálculo del PRHC, ya que estas se encuentran reportadas en la

PUNTO DE ROCÍO DE HIDROCARBURO

Magnitud de entrada	Tipo de incertidumbre	
Composición	Concentración Patrón (Xp)	B
	Área Patrón (Yp)	A
	Área Muestra (Y0)	A
Propiedades críticas	Temperatura crítica	B
	Presión crítica	B
Factor acéntrico	B	

Tabla 1. Tipo de incertidumbre de acuerdo a la magnitud de entrada del modelo de medición del PRH

PODER CALORÍFICO

Magnitud de entrada	Tipo de incertidumbre	
Composición	Concentración Patrón (Xp)	B
	Área Patrón (Yp)	A
	Área Muestra (Y0)	A
Factor de compresibilidad	B	
Poder calorífico ideal	B	

Tabla 2. Tipo de incertidumbre de acuerdo a la magnitud de entrada del modelo de medición del PC

literatura por varios autores y han sido estimadas a partir de datos experimentales.

Después de la identificación de las fuentes de incertidumbres asociadas a la medición PCSv y PRHC, se realizó la cuantificación de cada una de las incertidumbres que provienen de las fuentes identificadas. Los componentes de la incertidumbre fueron clasificados de acuerdo a la forma de evaluación en tipo A y tipo B, cuya información es agrupada en las tablas 1 y 2 en donde se registran cada una de las magnitudes de entrada y el tipo de incertidumbre atribuida.

$$u_c^2(\text{PCsv}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \text{PCsv}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \text{PCsv}}{\partial Z_{\text{base}}} \right)^2 u^2(Z_{\text{base}}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \text{PCsv}}{\partial \text{PCSi}} \right)^2 u^2(\text{PCSi}) \quad (1)$$

$$u_c^2(\text{PRH}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \text{PRH}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \text{PRH}}{\partial T_{c_i}} \right)^2 u^2(T_{c_i}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \text{PRH}}{\partial P_{c_i}} \right)^2 u^2(P_{c_i}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \text{PRH}}{\partial w_i} \right)^2 u^2(w_i) \quad (2)$$

La evaluación cuantitativa de la incertidumbre combinada siguiendo los lineamientos establecidos en GUM se expresa en la ecuación 1 para PCSv y en la ecuación 2 para el PRHC.

A partir de la ecuación (1) se determina la incertidumbre combinada para el PCSv, en donde

$\frac{\partial \text{PCsv}}{\partial x_i}$, $\frac{\partial \text{PCsv}}{\partial Z_{\text{base}}}$, $\frac{\partial \text{PCsv}}{\partial \text{PCSi}}$ representan los coeficientes de sensibilidad y $u(x_i)$, $u(Z_{\text{base}})$, $u(\text{PCSi})$

las contribuciones de su incertidumbre. Así mismo, mediante la ecuación (2) se estima la incertidumbre combinada del PRHC, siendo $\frac{\partial \text{PRH}}{\partial x_i}$, $\frac{\partial \text{PRH}}{\partial T_{c_i}}$, $\frac{\partial \text{PRH}}{\partial P_{c_i}}$, $\frac{\partial \text{PRH}}{\partial w_i}$

los coeficientes de sensibilidad y

$u(x_i)$, $u(T_{c_i})$, $u(P_{c_i})$, $u(w_i)$ las contribuciones de su incertidumbre.

En la estimación de la incertidumbre combinada por el método de MC se relaciona la función de probabilidad de cada contribuyente para obtener la incertidumbre por la generación de números aleatorios con la distribución de probabilidad atribuida, permitiendo simular los valores de cada variable aleatoria del modelo. En la figura 3 se detallan las ecuaciones utilizadas para la determinación del PCSv y se recopilan las distribuciones de probabilidad de cada una de sus magnitudes de entrada.

Las distribuciones de probabilidad asignadas para las variables del modelo de medición del PRHC se consignan en la Figura 4. Se enuncia de forma general "ecuaciones de estado" donde se involucra tanto las ecuaciones cúbicas de estado como las reglas de mezclado aplicadas en el proceso de medición.

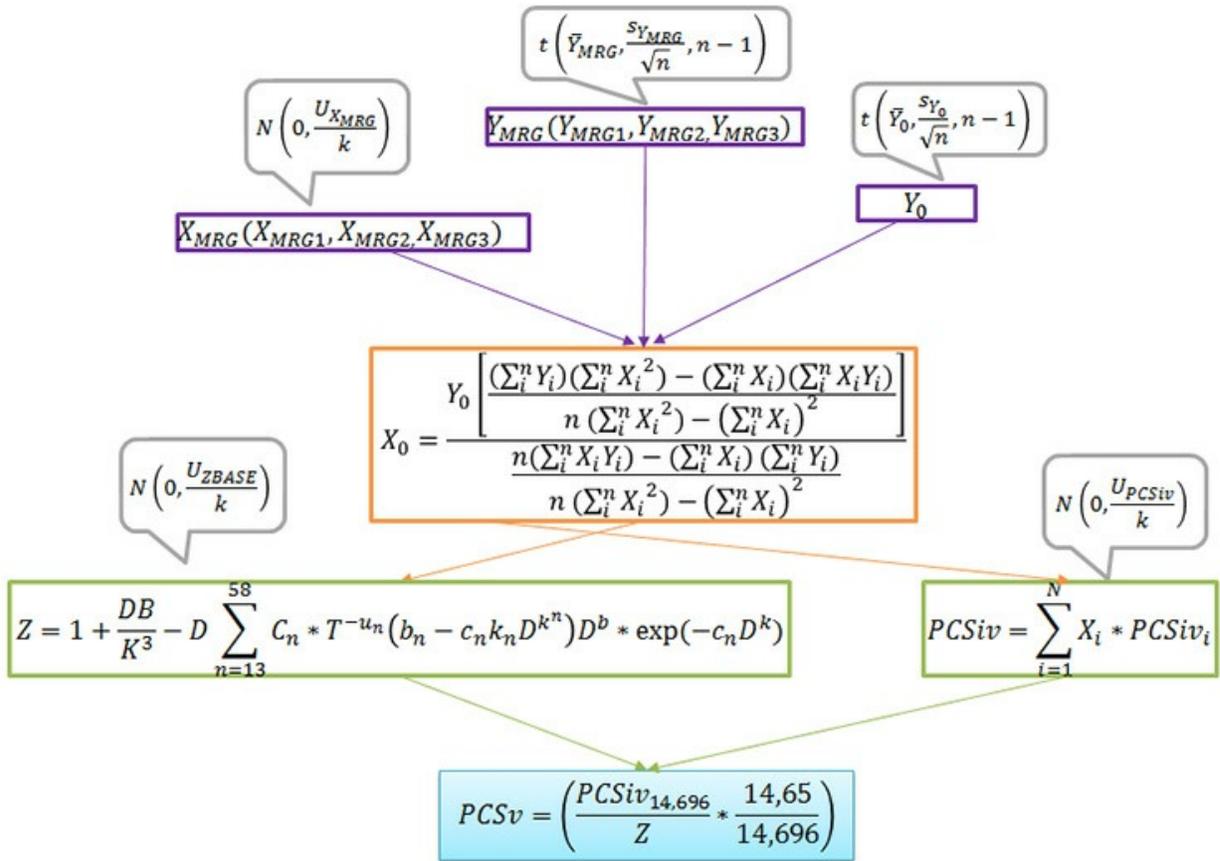


Figura 3. Distribuciones de probabilidad de las magnitudes de entrada para la estimación de incertidumbre del PCSv.

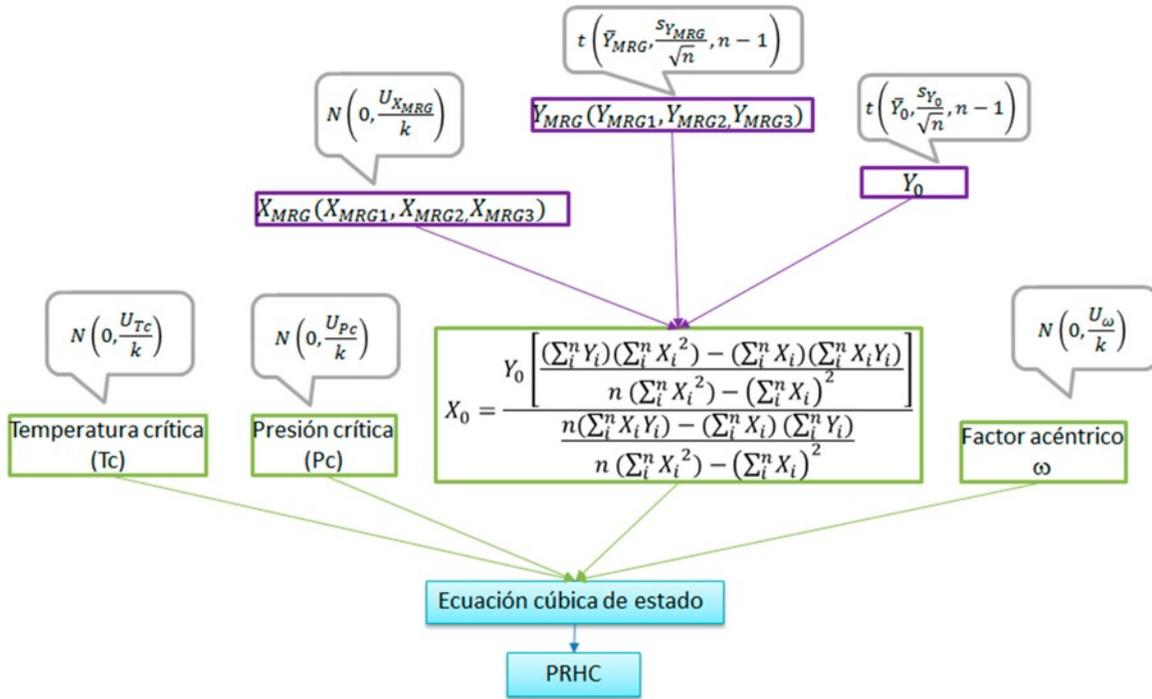


Figura 4. Distribuciones de probabilidad de las magnitudes de entrada para la estimación de incertidumbre del PRH.

En la tabla 3 se presenta los valores obtenidos en la determinación del PCSv y PRHC y su incertidumbre asociada utilizando los métodos GUM y MC. Se reporta la incertidumbre expandida de cada uno de los parámetros de calidad de gas evaluado con un nivel de confianza del 95 %.

La envolvente de fases corresponde a un diagrama de presión versus temperatura, delimitada por las condiciones de burbuja (comienzo de ebullición de la mezcla) y las condiciones de rocío (principio de la condensación) [12]. La figura 5 muestra las envolventes calculadas por dos herramientas computacionales diferentes. Utilizando el software

de simulación Aspen Hysys®, se obtiene la información necesaria para construir las envolventes de fases mostradas en la figura 5a), las cuales corresponden a las ecuaciones de estado PR y SRK. En la figura 5b) se muestran las envolventes de fases obtenidas a través de la programación realizada con Python, aplicando las mismas ecuaciones de estado, cuando se utilizan dos reglas de mezclado diferentes: la regla clásica y la regla de Huron Vidal (denotada como 'hv'). Uno de los puntos más importantes de la envolvente de fases, es el punto máximo de temperatura a la cual puede ocurrir condensación, mejor conocido como cricondenterma.

Sustancia	Monte Carlo (M=1000000)		GUM	
	Composición [fracción molar]	Incertidumbre	Composición [fracción molar]	Incertidumbre
CH4	0.9535	0.0093	0.9535	0.0012
N2	0.01317	0.00027	0.01317	0.00012
CO2	0.01656	0.00024	0.016566	0.000109
C2H6	0.013252	0.00016	0.013251	0.000056
C3H8	0.001674	0.00014	0.001674	0.000081
i-C4H10	0.000612	0.000024	0.000612	0.000014
n-C4H10	0.000449	0.000025	0.000449	0.000014
i-C5H12	0.000362	0.000009	0.000362	0.000004
n-C5H12	0.000049	0.000005	0.000049	0.000003
n-C6H14	0.000073	0.000009	0.000073	0.000005
n-C7H16	0.000121	0.000020	0.000121	0.000011
n-C8H18	0.000032	0.00980	0.000074	0.000076
n-C9H20	0.000033	0.000052	0.000033	0.000003
n-C10H22	0.000026	0.000008	0.000026	0.000002
Parámetro	Usando composición por MC		Usando composición por GUM	
	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
PC	997.25 Btu/ft ³	3.04	996.67 Btu/ft ³	3.85
Cricondent. PR	274.29 K	2.82	275.43 K	4.88
Cricondent. PR-HV	274.63 K	4.33	276.13 K	4.88
Cricondent. SRK-HV	277.41 K	4.04	278.61 K	4.69
Cricondent. SRK-HV	277.89 K	3.50	278.61 K	4.88

Tabla 3. Determinación del PC y PRHC y su estimación de Incertidumbre de una muestra de GN.

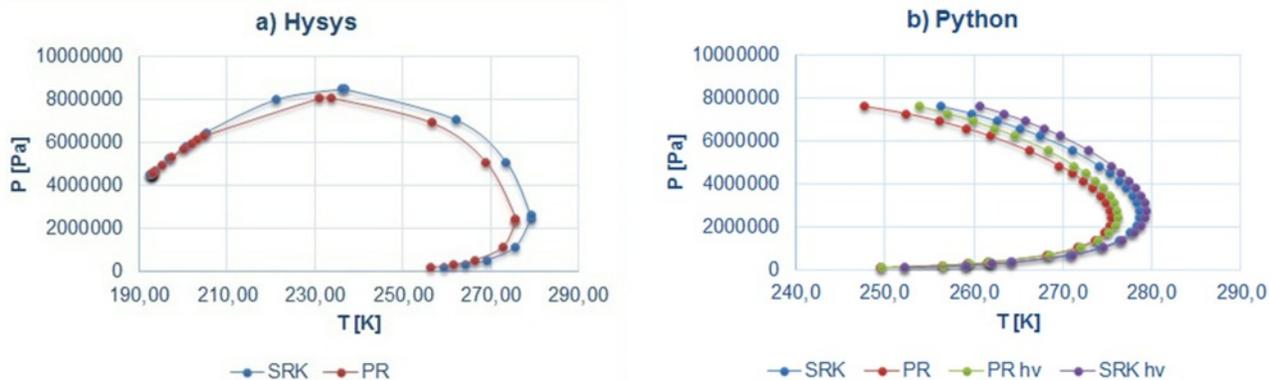


Figura 3. Distribuciones de probabilidad de las magnitudes de entrada para la estimación de incertidumbre del PCSv.

La propagación de distribuciones realizada por el método MC consiste en que la función de probabilidad de cada variable de entrada influye de manera directa en la distribución de la variable de salida. En la figura 6 se observa la distribución de probabilidad para el PC y el PRHC, obtenidos de acuerdo al modelo de medición utilizado.

DISCUSIÓN

En las figuras 1 y 2 se identificaron las principales fuentes de incertidumbre para la determinación del PCSv y PRHC del GN es la determinación de la

composición a partir de las magnitudes de entrada atribuidas a cada proceso de medición. Evidenciando que una de las principales contribuciones para la estimación de su incertidumbre es la composición, haciendo necesario realizar la evaluación de las áreas y las concentraciones de los MRG y las áreas obtenidas para el gas de análisis. En la determinación del PC se identificaron que a pesar de que los PCSiv se hayan tomado directamente de la literatura, estos presentan una incertidumbre asociada a su proceso de estimación.

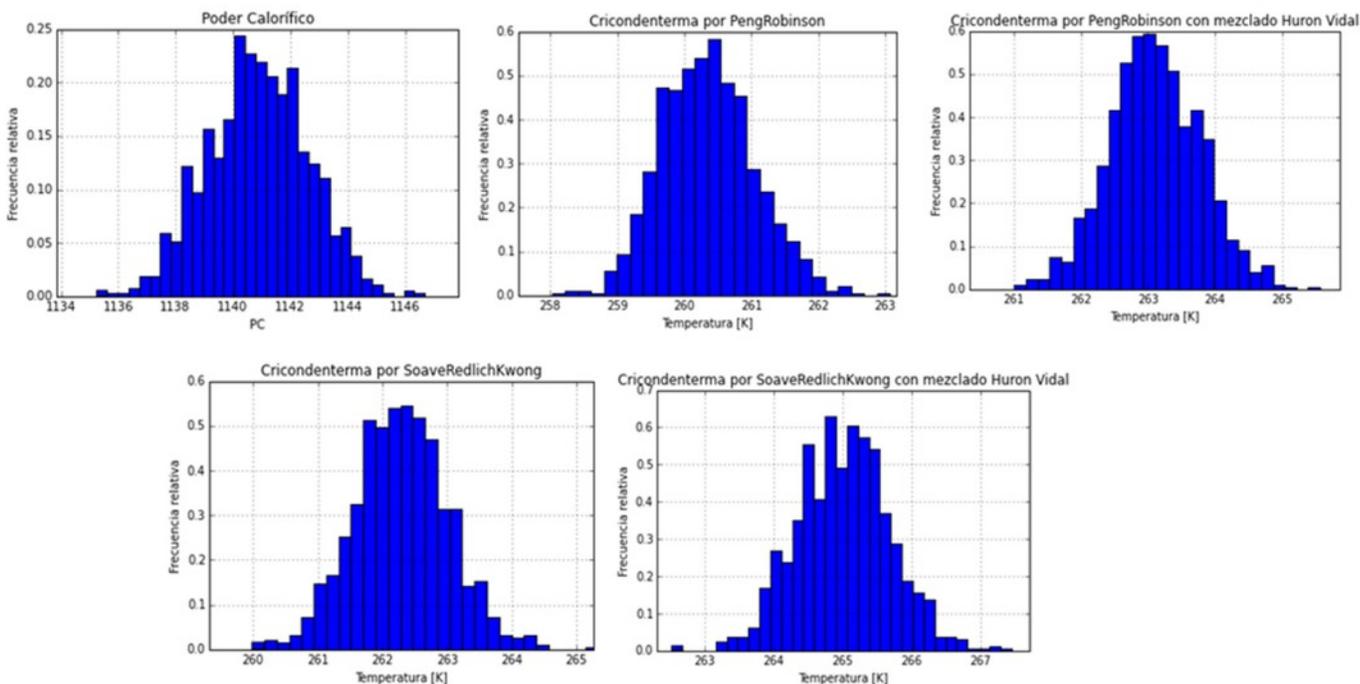


Figura 4. Distribuciones de probabilidad de las magnitudes de entrada para la estimación de incertidumbre del PRH.

De acuerdo al modelo matemático seleccionado para el cálculo del Z, se seleccionó el método detallado de AGA N°8, dada su capacidad para calcular con precisión las propiedades de una mezcla de GN. Su ecuación hace uso de híbridos en reglas de mezcla que proporcionan un práctico método para describir el comportamiento de los fluidos y combina las características de la ecuación del teorema de estado virial. Por lo tanto la contribución de este factor en la determinación del PCSv es determinada a partir de la incertidumbre reportada en la norma por el método de cálculo.

El análisis de fuentes de incertidumbre presentado para la medición del PRHC se basó en la disponibilidad de la información. El cálculo del PRHC por el método indirecto permitió la construcción de la envolvente de fases, que es una gráfica que muestra el equilibrio entre la fase líquida y la fase vapor, construida a partir de una serie de parejas de presión y temperatura, que corresponden a las condiciones en las cuales es muy probable la condensación (en este caso) del combustible gaseoso. En ese orden de ideas, las fuentes de incertidumbre consideradas en las figura 2 para el PRHC son aquellas que pueden cuantificarse y que están involucradas particularmente con la ecuación cúbica de estado seleccionada. La incertidumbre por repetibilidad y reproducibilidad solo se tiene en cuenta en el caso de la composición dada la naturaleza de su determinación, caso contrario a los parámetros críticos de las sustancias que han sido tomados de la literatura.

Para la cuantificación de las contribuciones de cada una de las fuentes de incertidumbre utilizando la metodología GUM, se derivó cada una de las magnitudes de entrada con respecto al PCSv, determinando cada uno de los coeficientes de sensibilidad. Por lo tanto debido a que el PCSv depende de la composición, el Z y el PCSiv de cada uno de los componentes presentes en el GN, se deriva con respecto a estos. Para la determinación de la contribución del Z se evaluó su variabilidad con

respecto al PCSv, la incertidumbre atribuida a este factor es del 1%. De igual manera, los coeficientes de sensibilidad asociados a la estimación de incertidumbre del PRH se obtienen calculando la variación del valor del PRHC con respecto a la composición, las propiedades críticas y el factor acéntrico; las propiedades críticas corresponden a la presión y temperatura que describen el punto crítico y fueron tomadas del NIST Chemistry WebBook [13] en donde se encuentran tabuladas con su respectiva incertidumbre de medición; los factores acéntricos, que representan la no esfericidad de una molécula [14], fueron tomados del programa NIST REFPROP 8.0; en dicho programa no se reporta una incertidumbre asociada a su medición, razón por la cual se le atribuye una incertidumbre del 1% que es un valor conservativo y aproximado de la incertidumbre de magnitudes físicas.

Cada una de las fuentes de incertidumbre anteriormente mencionadas se distribuye estadísticamente bajo una función de probabilidad, que permitió suponer el mejor estimador de la dispersión de los valores obtenidos. Por lo tanto, con base a la clasificación de cada una de las contribuciones especificadas en la tabla 1 y 2, se asignaron las distribuciones de probabilidad para cada una de las magnitudes en el cálculo del PCSv y el PRHC, como se muestra en la figura 3 y 4, respectivamente. Lo anterior con el objetivo de realizar posteriormente el análisis de la propagación de la incertidumbre mediante la técnica de simulación de MC.

A partir de GUM y MC se obtuvieron valores similares de PCSv de 996.67 Btu/ft³ y 997.25 Btu/ft³ respectivamente. Pero para las incertidumbres expandidas estimadas con un nivel de confianza del 95 % se evidencian incertidumbres más altas por GUM en comparación con MC. El cálculo de las cricondentermas por la herramienta de simulación Hysys?, dio como resultado 279,07 K y 275,66 K a partir de las ecuaciones de estado SRK y PR, respectivamente. Los valores obtenidos a través de la

herramienta construida en Python, comparados con los obtenidos por Hysys?, presentan errores de 0,5% y 0,4% para PR y de 0,6% y 0,4% para SRK. Estos errores se pueden considerar bajos, lo que permite interpretar la consistencia matemática que fundamenta ambas herramientas. Por otro lado, la estimación de incertidumbre asociada a la medición del PRHC por el método GUM dio resultados más homogéneos y más altos (entre 3,85 K y 4,88 K) que el método MC (2,82 K y 4,33 K), como sucedió para el PC. Esto se presenta debido a que la metodología GUM aplicada en este caso no considero términos de orden superior que permitan una mayor precisión de la estimación.

CONCLUSIONES

- La identificación de las fuentes de incertidumbre y cuantificación de su contribución son necesarios para estimar la incertidumbre asociada a los procesos de medición del PC y PRHC. Una buena identificación de estas fuentes para cualquier medición contribuirá a una mayor precisión en la toma de decisiones. En el caso de los parámetros de calidad de gas, esta identificación y su posterior cuantificación, permitirá reducir las discrepancias presentadas en los puntos de transferencia de custodia.
- La cuantificación de las fuentes de incertidumbre por medio de GUM o MC, permiten determinar cómo los coeficientes o la variación aleatoria en cada una de las magnitudes de entrada afectan el rendimiento, la sensibilidad o la confiabilidad de los resultados obtenidos al determinar el PCSv y el PRHC en el GN
- El método de MC se consideró como el método de referencia para la estimación de incertidumbre, debido a que es un enfoque más robusto ya que utiliza las funciones de probabilidad de cada magnitud de entrada para obtener la distribución correspondiente a la magnitud de salida; además, este método permite obtener estimaciones de incertidumbres más precisas, considerándose

como una alternativa práctica al enfoque clásico de la GUM para modelos de alta complejidad.

Agradecimientos

A la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e innovación COLCIENCIAS. (Joven Investigador 617-2013) .

REFERENCIAS

- [1] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Resolución No 071 de 1999.
Reglamento único de transporte de gas natural.
- [2] Ulbig P, Hoburg D. Determination of the calorific value of natural gas by different methods. *Thermochim. Acta* 2002; 382:27-35.
- [3] International Organization for Standardization. 2014. *Natural gas - Vocabulary. ISO 14532. Geneva, Switzerland.*
- [4] American Petroleum Institute. 2006. *Collecting and Handling of Natural Gas Samples for Custody Transfer. API MPMS Chapter 14.1. Washington.*
- [5] Gas Processors Association. 2009. *Calculation of Gross Heating Value, Relative Density and Compressibility Factor for Natural Gas Mixtures from Compositional Analysis. GPA 2172. USA.*
- [6] American Gas Association. 1992. *Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases. AGA Report N°8 - 203.*
- [7] Skylogianni E. *Measurements and Modelling of Hydrocarbon Dew Points for Natural Gases. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology. Norway. 2012.*
- [8] Louli V, Pappa G, Boukouvalas C, Skouras S, Solbraa E, Christensen KO, Voutsas E. *Measurement and prediction of dew point curves of natural gas mixtures. Fluid Phase Equilib.* 2012; 334:1-9.
- [9] International Bureau of Weights and Measures, International Organization for Standardization. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 1st ed. 1993. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization*
- [10] International Bureau of Weights and Measures, International Organization for Standardization. *Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" - Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization; 2008.*
- [11] PYTHON™. Disponible en: <https://www.python.org/about/>. Consultado: 22 de Abril de 2015
- [12] Pedersen KS, Christensen PL, Shaikh JA. *Phase behavior of petroleum reservoir fluids. CRC Press. 2015*
- [13] NIST Chemistry WebBook. Disponible en: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>. Consultado: 6 de Abril de 2015.
- [14] Chen DH, Dinivahi MV, Jeng CY. *New acentric factor correlation based on the Antoine equation. Ind. Eng. Chem. Res.* 1993;32(1):241-244.