

**MET&FLU**

Ciencia - Tecnología - Innovación

## Dispositivo Generador de Trazas (DGT2000)



# COMPROMETIDOS CON LA FORMACIÓN, LA APLICACIÓN DE CONOCIMIENTO, EL DESARROLLO TECNOLÓGICO Y LA INNOVACIÓN



Para mayor información acerca de cualquiera de nuestras actividades y servicios, lo invitamos a visitar [www.cdtdegas.com](http://www.cdtdegas.com), o comunicarse al correo [administrador@cdtdegas.com](mailto:administrador@cdtdegas.com)



15 años  
Corporación CDT de GAS  
Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS

# Contenido

## Editorial 04

---

### Ciencia

**Identificación de la Causa de Errores Gruesos: Por Falla en el Sistema de Medición O Por Fuga, en Una Red de Transporte de Fluidos** 06  
Ana Maria González Mantilla / Royer Arley Mateus Galindo

---

**Estudio de Modelos de Crecimiento de Gota de Hidrocarburos Condensados en Gas Natural** 16  
Silvia Daniela Torres Carvajal / José Augusto Fuentes Osorio

---

### Tecnología

**Generación de Microcaudales Méricos Para la Preparación de Materiales de Calibración Gaseosos** 26  
Wilmer Alonso Pedraza / Luis Eduardo García Sánchez

---

### Innovación

**Diseño e Implementación de un SCADA Web Para Un Probador Portable de Medidores de Gas** 36  
Yésica Zárate García / Christian Rovira Quijano / Oscar Salah García

---

### Conocimientos Fluidos

**Desarrollo Tecnológico e Innovación en Marmitas Autogeneradoras de Vapor Como Alternativa Para Promover Sistemas de Calentamiento Descentralizado en Aplicaciones de Procesamiento de Alimentos** 50  
Victor José Manrique Moreno

---

**Biometano: Alternativa Sostenible del Gas Natural** 60  
Adriana Alexandra Aparicio Ariza

---



## EDITOR GENERAL /

**Carlos Eduardo García Sánchez, Ph.D.**  
Líder Área de Innovación - CDT de Gas

## COMITÉ EDITORIAL /

**Henry Abril Blanco**  
Director - CDT de Gas

**Jose Augusto Fuentes Osorio**  
Líder Centro de Metrología de Fluidos - CDT de Gas

**Luis Eduardo García Sánchez**  
Gerente - Inline Fluid Systems

**Arlex Chaves Guerrero, Ph.D.**  
Docente e Investigador - Universidad Industrial de Santander

**Juan Manuel Ortiz Afanador**  
Gerente - Polygon Energy

**Dionisio Antonio Laverde Cataño, Ph. D.**  
Docente e Investigador - Universidad Industrial de Santander

## DISEÑO /

**Leonardo Manzano Paredes**  
Gerente - Aldea Tecnológica Ltda.

Met&Flu (ISSN: 2145-5716) es una revista con periodicidad semestral editada por la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas), que presenta resultados de trabajos investigativos originales, escritos de revisión y artículos de reflexión relacionados con ciencia, tecnología, innovación, regulación y normatividad, y está orientada tanto a los sectores académico y científico como al sector industrial.

**Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.**  
Sede Administrativa: Carrera 23 # 106-08, Bucaramanga, (57) +7 6915244 / 6915493. Laboratorios: Parque Tecnológico UIS Guatigará, Piedecuesta, (57) +7 6543800 / 6542266. <http://www.cdtdegas.com>

**Descargo de responsabilidad:** Las afirmaciones y opiniones que aparecen en Met&Flu son exclusiva responsabilidad de los respectivos autores, y la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas no se hace responsable por ellas. Ni el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, ni el Comité Editorial, ni los Revisores, pueden ser responsabilizados por errores o cualquier consecuencia producto del uso de la información contenida en esta publicación. La presentación de publicidad en la revista no implica respaldo ni aprobación por parte del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas ni por parte del Comité Editorial.

Versión on-line:  
<http://www.cdtdegas.com/index.php/nuestrarevista>

# Editorial

El año 2015 ha estado marcado por tendencias económicas producto de la caída del precio del petróleo. El impacto de este hecho no se limita a la disminución de recursos de los países productores, entre los que se incluye Colombia; tiene además otra serie de consecuencias que transforman el panorama económico y tecnológico mundial. Vale la pena considerar por ejemplo la desestimulación de la producción de petróleo con ciertas técnicas no convencionales, que se convierten en inviables económicamente. Adicionalmente, en un mundo con una altísima conectividad, no solo entre países sino también entre cadenas productivas, y con un gran consumo energético, un bajo precio del petróleo impacta negativamente en el desarrollo de otras tecnologías de producción de energía como las energías renovables, que se hacen menos atractivas en comparación con los combustibles fósiles al disminuir éstos su costo.

Esta coyuntura, que es simplemente un ejemplo más de la volatilidad de la economía en el mundo actual y de los cambios abruptos que aquella puede ocasionar, no hace más que recordar la importancia del conocimiento y su aplicación para que las empresas sorteen los periodos difíciles, y para resolver los problemas de la sociedad. Los procesos de generación y apropiación de conocimiento deben ser continuos, para que las organizaciones tengan la capacidad de responder rápidamente a los

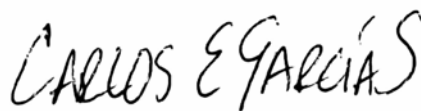


entornos cambiantes, y estén en una continua disposición de incrementar la eficiencia de sus procesos e innovar en sus productos y servicios. La adaptación a nuevos contextos requiere del conocimiento aplicado, y además es bien sabido que en las situaciones más complejas sale a relucir el potencial intelectual y creativo del ser humano.

El presente número de Met&Flu continúa impulsando la divulgación de conocimiento relevante para el sector hidrocarburos, e incluye artículos que van desde revisiones del estado del arte de temas de alta complejidad, que aún son un reto en el mundo académico, hasta artículos de desarrollo tecnológico que presentan soluciones ya materializadas. La sección Ciencia está compuesta por un escrito de investigación básica sobre detección de errores gruesos y reconciliación de mediciones, y una revisión del estado del arte del modelado del crecimiento de tamaño de gota en retiro de condensados de gas natural. La sección Tecnología presenta parte de la caracterización de un equipo creado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas), que hace posible calibrar analizadores en varios valores de concentración, manteniendo bajas incertidumbres en cada punto, a partir de un material de referencia certificado (que tiene una composición conocida y estable) y un gas matriz. En la sección Innovación se incluye otro desarrollo del CDT de Gas, esta vez en el área de las comunicaciones remotas, que consiste en un

sistema que da la posibilidad de monitorear en tiempo real y a distancia los resultados de un proceso de verificación de medidores de gas utilizando un probador portable. Por último, la sección Conocimientos Fluidos trae dos artículos: en el primero se presenta el panorama de las marmitas auto-generadoras de gas y el camino que el CDT de Gas ha recorrido en su desarrollo, y el segundo trata con las generalidades del bio-metano y de las posibilidades de inserción en redes de gas natural.

En nombre del Comité Editorial de Met&Flu, y del CDT de Gas como institución impulsora de la revista, espero que este nuevo número sea del agrado de los lectores. Agradezco también a los pares revisores confidenciales que nos apoyaron en este número. El CDT de Gas seguirá trabajando por su misión de contribuir al crecimiento de los sectores gas e hidrocarburos, con sus aportes en el desarrollo tecnológico, la formación de personal, el préstamo de servicios especializados, y la gestión y aplicación de conocimiento. Pero igualmente, el CDT de Gas continuará propendiendo por la divulgación del conocimiento del sector, no sólo desde la Corporación hacia el exterior sino también desde cualquier otro actor que desee informar de sus propios desarrollos, o realizar revisiones o reflexiones críticas de temas que resulten relevantes para el sector o la sociedad.



**Carlos Eduardo García Sánchez, Ph.D.**  
Editor General - Revista Met&Flu

# IDENTIFICACIÓN DE LA CAUSA DE ERRORES GRUESOS: POR FALLA EN EL SISTEMA DE MEDICIÓN O POR FUGA, EN UNA RED DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

Ana María González Mantilla\*, Royer Arley Mateus Galindo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Cl. 9 #27. Bucaramanga. Santander. Colombia.

**Resumen:** Es imperativo identificar la existencia de errores en cualquier tipo de proceso, incluyendo el transporte y distribución de fluidos. En este artículo, se presentan dos métodos para la Detección de Errores Gruesos (DEG) en operaciones en estado estacionario, que emplean los valores que resultan de la Reconciliación de Datos (RD); uno de los métodos es planteado por los autores. Se realiza una descripción detallada incluyendo estado del arte y justificación del problema. Adicionalmente, se propone una metodología para determinar la posible causa del error grueso, clasificándolo como "fuga" o como "falla en el sistema de medición".

Los resultados finales del caso de estudio muestran que la metodología con la red presentada tiene una selectividad de DEG del 100%, con la función objetivo Fair y el método A, un porcentaje de identificación global de la causa del error grueso de 58% y una selectividad de detección del 82% que tiene en cuenta los errores gruesos correctamente identificados y su causa, lo que lleva a concluir que es posible implementar esta metodología en un sistema de medición en tiempo real.

Palabras Clave: *detección de errores gruesos, reconciliación de datos, funciones objetivo, causa de los errores gruesos.*

**Abstract:** It is imperative to identify the existence of errors in any type of process, including the transportation and distribution of fluids. In this article, two methods are presented for the Detection of Gross Errors (DGE) in steady state operations, which use the resulting values from the Reconciliation Data (RD); one of them is proposed by the authors. It presents a detailed description including state of the art and justification of the problem. Additionally, a methodology is presented to determine the possible causes of the gross errors, classifying it as "leak" or "failure in the measurement system".

The final results of the study case showed that the methodology with the presented network has a DGE selectivity of 100%, with the objective function Fair and the A method, a global identification percentage of the gross error's cause of 58% and a detection selectivity of 82% which takes into account gross errors rightly identified and their cause, leads to conclude that this methodology can be implemented in a measurement system in real time.

Keywords: *gross error detection, data reconciliation, objective functions, gross error cause.*

\*[anamariagonzalezmantilla@gmail.com](mailto:anamariagonzalezmantilla@gmail.com)





## INTRODUCCIÓN

En los procesos, es de suma importancia contar con mediciones confiables para garantizar seguridad, calidad, control y buen funcionamiento de las operaciones. En la mayoría de los casos la información medida no cuenta con la misma precisión debido a que las medidas presentan errores aleatorios (incertidumbre), e incluso pueden presentarse errores sistemáticos en la medición; estos últimos se conocen como errores gruesos.

Los errores aleatorios se presentan con alta frecuencia y su magnitud usualmente es pequeña. Son causados por fluctuaciones en el suministro de energía, ruido en la transmisión de la red y conversión de señal, cambio en las condiciones ambientales, entre otros. Por otra parte, los errores gruesos son causados por eventos no aleatorios, como mal funcionamiento del instrumento de medida, mala calibración, instalación incorrecta del sistema de medición, desgaste o corrosión en los sensores, depósitos sólidos, sensores sucios, fugas, y demás. Se presentan con menos frecuencia, pero su magnitud típicamente es mayor que los errores aleatorios. En presencia de estos errores, la RD puede conducir a grandes ajustes que se realizan en los valores medidos y los resultados estimados son inexactos e incluso inviables (incoherentes) [1].

Es fundamental determinar si las diferencias en las ecuaciones de balances son debidas a errores aleatorios o errores gruesos, para lo cual se emplean técnicas como la RD y la DEG simultáneamente, como lo han realizado diferentes autores [2-7]. La RD es una técnica de pre-procesamiento de datos con el objetivo de reducir el efecto de errores sistemáticos, mediante la explotación de las relaciones que existen entre las variables de un proceso, como los balances de masa y energía [8]. La DEG tiene el objetivo de

identificar los valores atípicos o valores que se desvían en gran manera de su media. Al identificar un error grueso en una red de mediciones es necesario conocer la causa de este, para tomar los correctivos pertinentes. Las dos causas generales por las que se presenta un error grueso son: por fuga o por falla en el sistema de medición.

Pocos trabajos en la literatura han desarrollado su metodología en la identificación de la causa del error grueso. Algunos fundamentan sus metodologías en la detección de fugas o desviaciones en test de hipótesis o pruebas estadísticas, como [9-11]. Este trabajo realiza la RD y DEG, en conjunto con un análisis general de caudal y presión (rangos establecidos), para determinar la causa del error grueso, aprovechando lecturas de presión en puntos de medición.

## METODOLOGÍA

La metodología planteada requiere que se fijen las restricciones de la red de medición a analizar y los valores convencionalmente verdaderos. La evaluación de la aptitud de las funciones objetivo se hace mediante el método Monte Carlo, debido a la facilidad de generar errores aleatorios, dentro de un rango establecido, que representan los distintos escenarios que se aproximan a la realidad en las mediciones una red de transporte de fluidos. Para lo cual se determina el número de casos o simulaciones a realizar, se escoge aleatoriamente una variable agregándole un error que oscila entre el -10 % y 10 % de la variable, por iteración. Se asume que se simuló un error grueso si el valor absoluto del error excede el 1 % del valor real, y posteriormente se realiza la RD.

### *Reconciliación de Datos (RD)*

La RD ajusta las medidas redundantes, de modo que se obedezcan las leyes de conservación y cualquier otra restricción que incorpore el modelo matemático de una red de medición [12]. Los

FUNCION DE MINIMIZACIÓN	ECUACIÓN
Mínimos Cuadrados (MC)	$\rho = \varepsilon_i^2$
Cauchy	$\rho = \ln \left( 1 + \frac{\varepsilon_i^2}{2,3849^2} \right)$
Fair	$\rho = \left  \frac{\varepsilon_i^2}{1,3998} - \ln \left( 1 + \frac{\varepsilon_i^2}{1,3998} \right) \right $
Normal Contaminada (NC)	$\rho = -\ln \left[ 0,765e^{\left(-\frac{\varepsilon_i^2}{2}\right)} + 0,0235e^{\left(-\frac{\varepsilon_i^2}{200}\right)} \right]$
Lorentzian (Lor)	$\rho = -\frac{1}{1 + (\varepsilon_i^2/13,52)}$

**Tabla 1.** Funciones objetivo para la RD. Fuente: [7]

métodos más usados para la RD son: método de minimización de funciones, método de incertidumbre, y método matricial. El método de minimización de funciones se emplea en este trabajo.

Este método ajusta las mediciones de forma que los errores se reduzcan y que las leyes de conservación de la naturaleza sean obedecidas [3]. Consiste en la minimización de una función de la forma  $\sum W_i \rho(\varepsilon_i)$ , donde  $W_i$  es el factor de ponderación,  $\rho$  es una función objetivo que depende de  $\varepsilon_i$  que es el error estándar, que se calcula mediante  $\varepsilon_i = (y_i - x_i) / \sigma_i$ , siendo  $y_i$  el valor medido,  $x_i$  el valor reconciliado y  $\sigma_i$  la desviación estándar del medidor  $i$ .

Las funciones objetivo empleadas para RD en redes de medición se encuentran en la Tabla 1.

La herramienta computacional utilizada para realizar todo el presente trabajo, fue el lenguaje de programación Python bajo la interfaz de usuario Winpython, que ha sido desarrollada bajo la licencia de código abierto [13], lo que es un aporte significativo. Para la RD se emplea un factor de ponderación igual para cada medida y se utiliza el método SLSQ (*Sequential Least Squares*

*Programming*) de optimización, originalmente planteado por Kraft [14].

### **Detección de Errores Gruesos (DEG)**

Para la DEG se emplearon dos métodos: el método A consiste en una propuesta de los autores, y el método B es un método previamente descrito que emplea pruebas de hipótesis [15].

#### **Método A**

El método A para la DEG emplea dos criterios que de ser cumplidos, se declara error grueso detectado. Para lo anterior es necesario calcular dos variables, (1) la diferencia absoluta entre variable medida y reconciliada, representada por el error absoluto, y (2) el promedio o la media muestral del error, de la siguiente forma:

$$Dif_{p,i} = |Medida_{p,i} - Reconciliado_{p,i}|$$

$$\overline{Dif}_{p,i} = \frac{\sum_1^n |Medida_{p,i} - Reconciliado_{p,i}|}{n} = \frac{\sum_1^n Dif_{p,i}}{n}$$

Donde  $p$  es la posición de la variable,  $i$  la iteración y  $n$  el número de variables medidas. El criterio 1 para declarar DEG es  $Dif_{p,i} > 1\% Medida_{p,i}$ , y parte del Reglamento Único de Transporte de

Gas Natural (RUT), donde se mencionaba que la incertidumbre de las mediciones de un sistema de distribución de gas natural deber ser no mayor al 1%. Cuando se cumple el criterio 1, se demarca la variable como posible contenedora de error grueso y se procede a aplicar el criterio 2, que identifica si esta variable sufre un ajuste considerable en la RD; para ello se compara la diferencia absoluta con su media, si ésta es mayor ( $Dif_{p,i} > \overline{Dif}_{p,i}$ ) se confirma la presencia de error grueso.

### Método B

En el método B para la DEG, implementa test de hipótesis con ayuda de la suposición de que el error estándar sigue una distribución normal estándar, con lo cual los errores normalizados están dentro de un intervalo de confianza  $(1 - \alpha)$  con un nivel de significancia elegido  $\alpha$ . Cualquier valor del error normalizado que cae fuera de esa región de confianza, se declara un valor atípico o error grueso [1].

Se define la hipótesis nula  $H_0$ , como la ausencia de errores gruesos y la hipótesis alternativa  $H_1$ , como la contraria a la hipótesis nula. Bajo este criterio se desglosan varios test para la DEG entre los que se encuentran: Test Global, Test Nodal, Test de Medida, entre otros [16].

En este tipo de Test se pueden presentar dos tipos de errores: el Error Tipo I, que es rechazar

la hipótesis nula cuando ésta es cierta, y el Error Tipo II, que consiste en aceptar la hipótesis nula siendo ésta falsa. Con el fin de disminuir estos errores se utiliza un nivel de significancia modificado  $\beta$  (siendo  $\beta = 1 - (1 - \alpha)^n / 2$ ), donde  $n$  es el número de nodos o variables medidas dependiendo el Test al que se aplique [16], con el cual disminuye tanto la probabilidad de existencia del error tipo I como del tipo II.

El método B emplea dos test de hipótesis en conjunto, el Test Nodal y el Test de Medida [15]. Buscando una detección más selectiva, se evalúan todos los nodos o balances para determinar en cuales se sospecha que contienen error grueso. Para ello, con ayuda del vector de medidas  $Y$ , de la matriz de balances  $M$ , su respectiva transpuesta  $M^T$  y la matriz varianza-covarianza del error  $S_r$ , se calcula el criterio estadístico del Test Nodal  $Z_{Mj}$  y se compara con el valor crítico del Test  $Z_{Nc}$ , si el criterio estadístico supera el valor crítico se demarca el nodo con sospecha de error grueso.

Posteriormente, se procede a realizar el Test de Medida para determinar la ubicación de la variable donde se presenta el error grueso. Para el cálculo del criterio estadístico  $Z_{Mi}$  se usan las matrices  $M$ ,  $M^T$ ,  $S_r$ , su inversa  $S_r^{-1}$  como el vector  $Y$ , junto al vector de variables reconciliadas  $X$ . Si el valor del criterio estadístico  $Z_{Mi}$  supera su valor crítico  $Z_{Mc}$ , se confirma la existencia de un error grueso en la medida  $i$ .

CRITERIOS DE EVALUACION	
OP	$\frac{\text{Número de errores gruesos correctamente detectados}}{\text{Número de errores gruesos simulados}}$
AVTI	$\frac{\text{Número de errores gruesos erroneamente identificados}}{\text{Número de simulaciones realizadas}}$
Selectividad	$\frac{\text{Número de errores gruesos correctamente identificados}}{\text{Número de errores gruesos detectados}}$

Tabla 2. Criterios de evaluación.



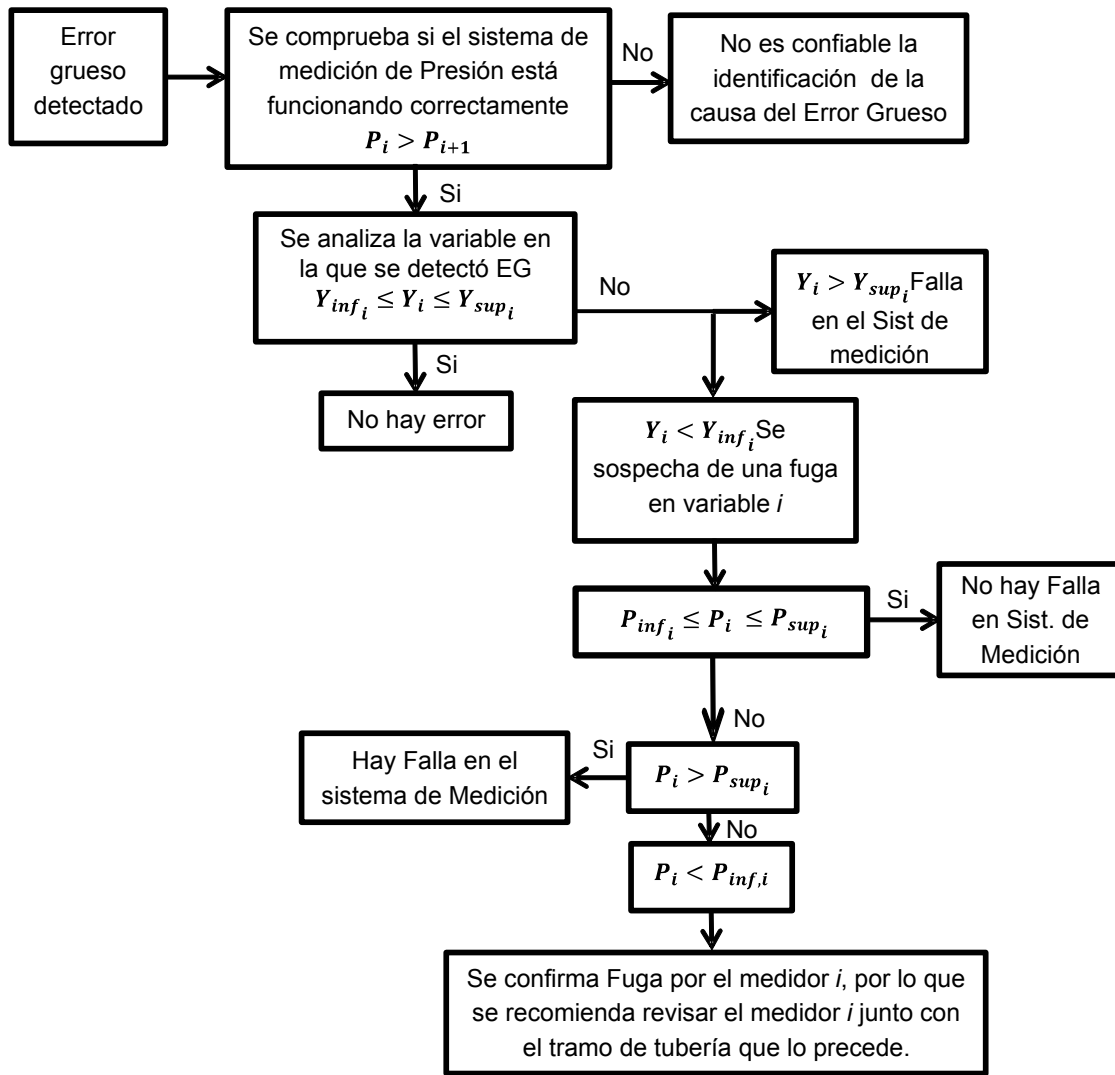


Figura 1. Procedimiento para hallar la posible causa del error grueso

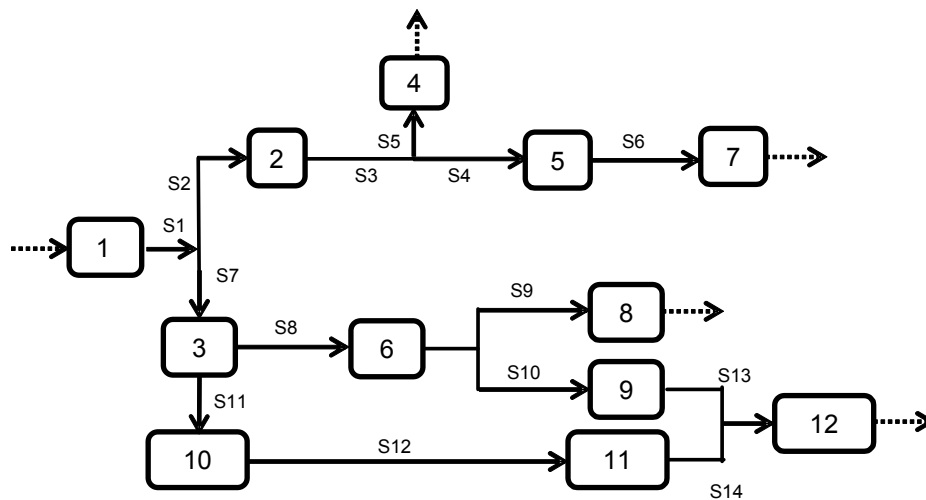


Figura 2. Diagrama red de medición de agua.

Después de realizar la DEG por los dos métodos, se comparan posición e iteración de los errores gruesos simulados y detectados. Para evaluar los métodos de DEG con las diferentes funciones objetivo se evalúan los criterios *Overall Power* (OP), *Average number of Type I Error* (AVTI) y Selectividad, que se aprecian en la Tabla 2.

La función objetivo que se elegiría para continuar con la metodología será la que presente valores de OP igual o cercano a 1, AVTI igual o cercano a 0 y Selectividad igual o cercano a 1; en la red de transporte de fluidos analizada, independiente que sea por el método A o B de DEG.

### ***Análisis general de rangos, para determinar la causa del error grueso.***

Después de detectar un error grueso con la función objetivo de mayor rendimiento, se procede a analizar rangos establecidos tanto de caudal como de presión, el procedimiento para este análisis se puede apreciar en la Figura 1.

En los casos específicos donde se presenta fuga, en los sistemas de medición se registrará tanto caída de caudal como de presión, por lo cual se confirma fuga cuando el caudal y la presión están por debajo del límite inferior preestablecido, en cierto punto de medición. Cuando hay falla negativa en el sistema de medición (no por fuga), se espera que la presión se mantenga en el rango

establecido. Para los casos donde se declara falla en el sistema de medición, se recomienda revisar el medidor y todo lo que compone el sistema de medición que presenta inconvenientes, para una posterior calibración o reemplazo del mismo.

## **RESULTADOS**

Se aplicó la metodología a una red de transporte de agua simulada en Aspen Hysys. En la Figura 2 se muestra el diagrama de la red de medición.

Las consideraciones tomadas al diseñar la red fueron: agua pura que entra a 296,15 K y a 1241 kPa (180 psi), con diámetro de 0,102 m (4 in, Schedule 40), sin cambio de altura. En la Tabla 3 se encuentran los valores convencionalmente verdaderos de caudal y los valores estimados de presión por el simulador. En la Tabla 4 las distancias de los segmentos de tubería.

Los resultados de la DEG empleando la RD mediante los 2 métodos mencionados se presentan en la Tabla 5. Para el método B se emplea un nivel de significancia  $\alpha$  de 5%, aplicado en [15]; el método A no necesita de este, al no realizarse como una prueba de hipótesis.

La función objetivo con mayor rendimiento para la red de agua es Fair mediante el método A de DEG, con OP de 0,970, AVTI de 0,000 y Selectividad de 1,000; por lo cual se empleará

VARIABLE	CAUDAL [m <sup>3</sup> /h]	PRESIÓN [kPa]	VARIABLE	CAUDAL [m <sup>3</sup> /h]	PRESIÓN [kPa]
1	7200	1241	7	2448	1053
2	3600	1067	8	1022,4	1079
3	3600	1082	9	849,6	1079
4	1152	1061	10	1728	1079
5	2448	1061	11	1728	1075
6	1872	1080	12	2577,6	1073

**Tabla 3.** Valores de caudal y presión

SEGMENTO	LONGITUD [m]	SEGMENTO	LONGITUD [m]
S1	900	S8	150
S2	300	S9	72
S3	120	S10	108
S4	12	S11	240
S5	60	S12	258
S6	300	S13	120
S7	6	S14	120

*Tabla 4. Distancia de tramos de tubería en la red.*

	MÉTODO A					MÉTODO B				
	MC	Cauchy	Fair	NC	Lor	MC	Cauchy	Fair	NC	Lor
Número de Simulaciones	1000					1000				
Número de Errores Simulados	884					906				
Errores Detectados	2349	890	879	2425	1861	2669	1551	1849	1285	1389
Correctamente Detectados	817	858	879	849	830	861	858	849	854	856
Detectados Incorrectamente	1532	32	0	1576	1031	1808	693	1000	431	533
OP	0,924	0,970	0,994	0,960	0,938	0,950	0,947	0,937	0,942	0,944
AVTI	1,532	0,032	0,000	1,576	1,031	1,808	0,693	1,000	0,431	0,533
Selectividad	0,347	0,964	1,000	0,350	0,446	0,326	0,553	0,459	0,664	0,616

*Tabla 5. Resultados de la DEG en la red de agua.*

tanto esa función como el método A de DEG para analizar casos donde se presentan tanto fugas como fallas en el sistema de medición en la red. Los tiempos de corrido para el método A fueron aproximadamente 310 s y para el método B de 616 s. Siendo el método A, dos veces más rápido que el B.

El rango establecido de caudal es 1 % tanto inferior como superior del valor convencionalmente verdadero, por la razón previamente expuesta, tomando como base el RUT. El rango establecido de presión es 0,5 % inferior y superior de los valores de presión estimados por el simulador Aspen Hysys, debido a que los medidores de presión convencionales

con una buena precisión tienen desviaciones estándar no mayores al 0,5 %

Mediante 72 casos, 36 casos de fugas y 36 casos de fallas de sistema de medición, se probó el algoritmo para determinar la causa del error grueso. Para lo anterior fue necesario simular 72 errores gruesos. En la **Figura 3** se presenta, el número de casos con su respectivo rango de porcentaje agregado, al valor convencionalmente verdadero. En el medio se encuentra la zona del error aleatorio, ya que se considera error grueso cuando el valor absoluto del porcentaje del error supera el 1 %, como se explica anteriormente. Para poder determinar la causa del error grueso, primero se comprueba si el sistema de medición



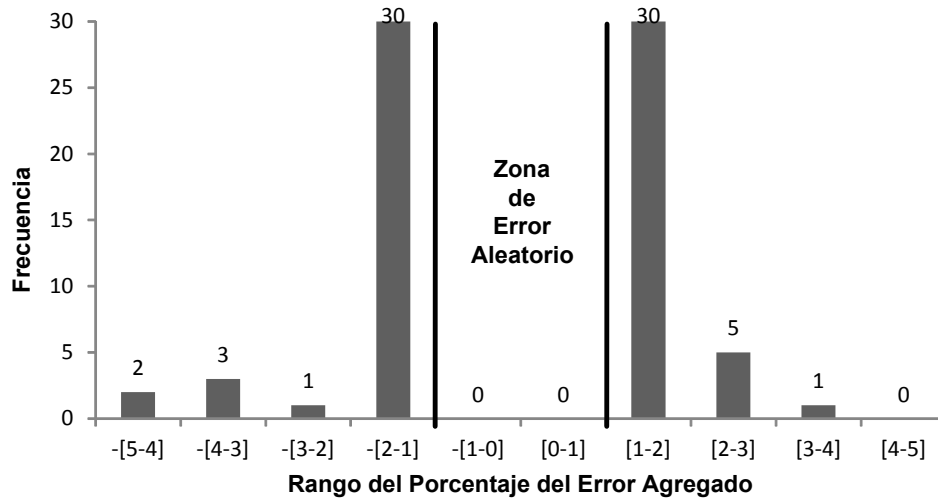


Figura 3. Histograma de frecuencia de los rangos del error agregado, de los 72 casos de errores gruesos simulados.

de presión está funcionando correctamente, de manera que  $P_i > P_{i+1}$ , siendo la presión aguas arriba mayor que aguas abajo. Cuando se comprueba que está funcionando correctamente, se pasa a determinar la causa del error grueso.

Como ya se mencionó, las fugas generan caída de caudal y presión, mientras que los errores gruesos causados por desviaciones tanto positivas como negativas respecto al valor real (en cuanto a caudal), no presentan variación de presión, por lo cual representan fallas en el sistema de medición. En la Tabla 6 se presentan los resultados del algoritmo para determinar la causa del error grueso.

Para determinar la eficiencia del algoritmo para detectar la causa del error grueso se calcularon dos selectividades, global y de detección, de la siguiente manera:

$$S_G = \frac{\# \text{fugas y fallas correctamente detectadas}}{\# \text{fugas y fallas o errores gruesos simulados}}$$

$$= \frac{18 + 24}{72} = 0.58$$

$$S_D = \frac{\# \text{fugas y fallas correctamente detectados}}{\# \text{total de errores gruesos detectados}}$$

$$= \frac{18 + 24}{24 + 27} = 0.82$$

## DISCUSIÓN

En la Tabla 5, se evidencia notoriamente que la función Fair en conjunto con el método A de DEG son los más adecuados para implementar en el algoritmo, de la red de agua, puesto que presenta los resultados más apropiados tanto para OP como en Selectividad, valores que priman en la selección de la función objetivo para la RD.

De los 72 errores simulados (fugas y fallas) solo se detectaron como errores gruesos a 51 de estos, de los cuales a solo 42 se puso identificar la causa, para un total de 18 fugas y 24 fallas en el sistema de medición. La eficiencia de la metodología se evaluó a través de 2 selectividades. La selectividad global muestra que es posible determinar la causa del error grueso en más de la mitad de las fugas y

	Fugas	Falla Sist. de Medición	Total
<b>Casos</b>	36	36	72
<b>Errores gruesos detectados</b>	24	27	51
<b>Detectadas</b>	18	24	42

Tabla 6. Resultados del algoritmo para determinar la causa del error grueso.

fallas simuladas en la red de agua, con un 58% puesto que tiene en cuenta la detección y la identificación del error grueso. Sin embargo, la selectividad de detección es mayor que la global, debido a que solo tiene en cuenta los errores gruesos detectados, por lo que el algoritmo tiene un alto potencial para determinar la causa del error grueso, cuando se detectan en la red de agua, con un 82%.

## CONCLUSIONES

La combinación de los Test estadísticos, nodal y de medida, son una buena forma para la DEG. Sin embargo, se comprueba que la metodología planteada por los autores genera mejores resultados en el ejemplo de la red de agua, presentando un método más sencillo con el que se disminuye el tiempo de corrida, además posee una manera menos compleja de ingresar los datos y las restricciones del sistema.

Con la metodología planteada a lo largo de este trabajo, es posible detectar y determinar la causa del error grueso, ya sea fuga o falla en el sistema de medición, en la mayoría de los casos, como se evidencia en la red de agua, por medio del análisis de rangos de caudal y presión.

Con lo anterior, se hace factible implementar esta metodología en un sistema de medición en tiempo real, lo que ayudaría a detectar los errores gruesos en el momento en que se presenten, sumando los beneficios económicos que traería el saber que medidores necesitan revisión o calibración inmediata y que tramos de tubería de una red necesitan inspección y/o reparación, por pérdidas de material.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas y al semillero del Grupo de Investigación en Fluidos y Energía por

sus aportes y contribuciones a lo largo de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Narasimhan S, Jordache C. *Data Reconciliation & Gross Error Detection. An intelligent use of process data.* Gulf Publishing Company; 2000.
- [2] Tiria S. & Vega S. *Desarrollo de un modelo de identificación de error grueso en sistemas complejos de balance de masa.* Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Colombia; 2007.
- [3] Castillo D. & Gamboa J. *Aplicación de BRAM como modelo para el análisis de una Red de Gas Natural mediante Reconciliación de Datos.* MET&FLU 2010; 3: 42-53
- [4] Sun S., Huang D. & Gong Y. *Gross Error Detection and Data Reconciliation using Historical Data.* *Procedia Eng* 2011; 15: 55-59.
- [5] Badillo J. *Desarrollo de una herramienta para la evaluación y control de los balances en las redes de distribución de gas natural, basada en la reconciliación de datos y la detección de errores gruesos.* Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Colombia; 2012.
- [6] Badillo J., Chaves A., & Fuentes J. *Computational tool for material balances control in natural gas distribution network.* *CT&F* 2013; 5: 31-46.
- [7] Jiang, X., Liu, P. & Li, Z. *Data reconciliation and gross error detection for operational data in power plants.* *Energy* 2014; 75: 14-23.
- [8] Martini A, Sorce A, Traverso A, Massardo A. *Data Reconciliation for power systems monitoring: Application to a microturbine-based test rig.* *Appl Energy* 2013; 111: 1152-1161.
- [9] Sanchez M, Romagnoli J, Jiang Q, Bagajewicz M. *Simultaneous estimation of biases and leaks in process plants.* *Comput Chem Eng* 1999; 23: 841-857.
- [10] Narasimhan S, Mah RHS. *Generalized likelihood ratio method for gross error identification.* *AICHE J* 1987; 33: 1514-1521.
- [11] Miao Y, Su H, Wang W, Chu J. *Simultaneous data reconciliation and joint bias and leak estimation based on support vector regression.* *Comput Chem Eng* 2011; 35: 2141-2151.
- [12] Lozano M, Remiro J. *Diagnóstico de calderas de vapor. Aplicación de la técnica de reconciliación de datos.* *Ing Quim* 2000; 372: 117-123
- [13] PYTHON™. Disponible en: <https://www.python.org/about/>. Consultado: 2 de Septiembre de 2015
- [14] Kraft D. *A software package for sequential quadratic programming.* DLR German Aerospace Center, Institute for flight mechanics 1988.
- [15] Mei C, Su H, Chu J. *An MT-NT Combined Method for Gross Error Detection and Data Reconciliation.* *Chinese J Chem Eng* 2006; 14: 592-596.
- [16] Bagajewicz M. *Smart Process Plants. Software and Hardware Solutions for Accurate Data and Profitable Operations.* McGraw-Hill Companies 2010.



# ESTUDIO DE MODELOS DE CRECIMIENTO DE GOTA DE HIDROCARBUROS CONDENSADOS EN GAS NATURAL

Silvia Daniela Torres Carvajal<sup>1</sup>\*, José Augusto Fuentes Osorio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Cl. 9 Cra. 27. Bucaramanga. Santander. Colombia.

<sup>2</sup> Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía el Refugio, Piedecuesta, Santander, Colombia

**Resumen:** Dentro de la red de distribución y producción de gas natural es importante el cumplimiento de parámetros de calidad de gas reglamentarios de la industria colombiana. Uno de los más importantes es el punto de rocío de hidrocarburos, el cual es controlado principalmente mediante la separación de los hidrocarburos pesados presentes en el gas. En la última década se han desarrollado diversas tecnologías de separación gas/líquido que operan a altas presiones con el fin de disminuir el costo asociado con la re-compresión requerida en procesos convencionales (expansión de gas con válvulas Joule-Thomson), así como también obtener un mayor rendimiento en los procesos de separación. Sin embargo para generar un uso adecuado de estas tecnologías se requiere un amplio conocimiento de fenómenos de condensación de hidrocarburos, y herramientas que permitan su predicción para mejorar dichos procesos. El diámetro de la gota es uno de los datos claves dentro del modelo de separación a alta presión, por lo tanto para la predicción de este parámetro se requiere realizar un estudio de los modelos de crecimiento de gotas condensadas en la corriente de entrada al separador, con el fin de optimizar la eficiencia del proceso. La revisión bibliográfica provee información de los modelos de predicción de tamaño de gota más importantes que se han desarrollado, teniendo en cuenta las propiedades del gas y sus condiciones de entrada, creando una ruta de entendimiento, interpretación e investigación acerca de este fenómeno poco estudiado en Colombia.

**Palabras clave:** gas natural, hidrocarburos, condensado, crecimiento de gota.

**Abstract:** Within distribution and production grid of natural gas, is important the fulfillment of certain Colombian industry regulatory requirements of the corresponding to the gas quality parameters. One of the most important requirement is the hydrocarbons dew point, which is mainly regulated through the separation systems of heavy hydrocarbons presents in natural gas. In the last decade has been developed different gas/liquid separation technologies operating at high pressure with the purpose of decrease the cost of the compression required in the conventional process (gas expansion with Joule-Thomson valves), as well as improve the efficiency in this process. However to generate a correct use of these technologies is required an extensive knowledge of hydrocarbons condensation phenomena, and tools that allow their prediction to enhance this process. The droplet diameter is one of the key dates in the high-pressure separation models, so for predict this parameter is necessary a study of droplet growth models on the separator's inlet flow, to improve the efficiency of this process. The literature review give droplet growth models information, given the gas property and the inlet stream conditions, creating a path for understanding, interpretation and research of this phenomenon, less studied in Colombia.

**Keywords:** natural gas, hydrocarbons, condensate, droplet growth.

\* Autor de contacto. E-mail: storres@cdtdegas.com



## INTRODUCCIÓN

El gas natural (GN) en Colombia contribuye un 25 % en la producción total de las fuentes energéticas, con un crecimiento promedio de la demanda entre 2009 y 2013 de 7,4 % [1], e inversiones significativas en exploración y explotación de diversas fuentes no convencionales de GN dadas sus ventajas dentro de los ámbitos ambiental y de costos. Sin embargo se ha demostrado en el desarrollo de fuentes energéticas alternativas, que poseen considerables diferencias en cuanto a su composición con respecto al gas natural actualmente comercializado. Marcogaz describe en sus estudios que la entrega sin precaución de

gases de otras fuentes, especialmente no convencionales o provenientes de campos menores en las redes de distribución y transporte, pueden ocasionar problemas técnicos y operativos (corrosión, rendimiento de aplicación y seguridad), así como también alteraciones en la salud de los consumidores debido a la presencia de algunos componentes como compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, microorganismos, altos puntos de rocío de hidrocarburos (PRHC), entre otros [2]. Sin embargo, las fuentes de gas no convencionales representan una gran alternativa de cambio en la fuente de producción de gas natural, lo cual conllevaría a la necesidad de implementar nuevos procesos que permitan realizar controles estrictos





de los contaminantes y la calidad del que será distribuido.

En Colombia los parámetros de calidad del gas natural se encuentran establecidos en la resolución de la CREG Número 071 de 1999 (Reglamento Único de Transporte de Gas Natural - RUT) [3]; específicamente el PRHC, poder calorífico del gas, dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno, cantidad de vapor de agua, sulfuro de hidrógeno y azufre total. Para dar cumplimiento con los parámetros requeridos, los productores adecúan sus plantas de procesamiento para disminuir la presencia de contaminantes dentro de las corrientes de gas por debajo de los límites establecidos por el RUT. Uno de los parámetros más importantes por su afectación en la tubería es el PRHC, ya que es el más controversial y complejo de controlar en la entrega del gas dentro de la cadena de producción (productor - transportador). El valor máximo permitido de PRHC en Colombia es de 7 °C (45 °F), ajustado industrialmente mediante la separación de hidrocarburos pesados del gas natural, empleando diversas técnicas, principalmente procesos de enfriamiento (típicamente expandiendo el gas) para condensación y posterior separación por gravedad (separadores gas/líquido). Sin embargo, este procedimiento tiene un alto costo debido a la necesidad de comprimir de nuevo el gas para el transporte adecuado por las tuberías, lo que conlleva altos gastos energéticos.

Como propuesta al mejoramiento de estos procesos de separación, se podría implementar un separador gas/líquido a alta presión teniendo en cuenta las restricciones planteadas por Brigadeu [4], basándose en nuevas investigaciones que han tenido como objetivo mejorar los sistemas de separación, mediante estudios enfocados al desarrollo de tecnologías de bajo costo, y principalmente algoritmos de cálculo que permitan predecir con mayor exactitud las

eficiencias de separación para mitigar errores en la toma de decisiones. Estos modelos de diseño omiten modelos matemáticos empíricos e implementan algoritmos, integrando análisis a nivel de meso-escala de los principales fenómenos que se presentan en los procesos de separación. Brigadeu afirma que uno de los parámetros más importantes dentro del cálculo de eficiencia de los separadores es el diámetro de las gotas de condensado (principalmente en separadores de alta presión), el cual está influenciado por diversos fenómenos como la coalescencia (propiedad de los líquidos que permite a partir de la unión de gotas pequeñas formar una gota mayor), ruptura, y salpicaduras que generan gotas secundarias [4]. Sin embargo, muchos de los modelos ya desarrollados implementan en sus procesos de simulación diseño y cálculo de eficiencia, un diámetro de gotas de condensado obtenido a partir de tablas empíricas desarrolladas con pruebas de mezclas de aire y agua a presiones cercanas a 1 bar, diferente a la realidad en campo (mezcla de hidrocarburos a presiones entre 20 bar y 50 bar), lo que genera errores en la estimación de este parámetro. Por lo tanto, algunos autores proponen incluir modelos de estimación correcto del tamaño de las gotas de condensado para mejorar los cálculos de eficiencias en los separadores.

De acuerdo a lo anterior, en este trabajo se realizó el estudio y análisis de los principales modelos que se han desarrollado para el cálculo de este parámetro, determinando las propiedades, variables y condiciones de entrada que se requieren para la obtención del radio máximo de gota.

## FORMACIÓN DE CONDENSADO EN EL GAS NATURAL

Cuando el gas natural es expandido o enfriado, puede ocurrir la condensación de hidrocarburos



que estaban en estado gaseoso, en forma de una gota microscópica. Para que se presente este fenómeno, es necesario que el gas esté en estado de supersaturación (o sobresaturación); es decir, un componente determinado en la mezcla gaseosa, contiene momentáneamente más moléculas por unidad de volumen de lo que es posible en el estado de equilibrio. Si este estado se mantiene durante un período de tiempo suficiente y el menor componente volátil está disponible para formar gotas estables, se presenta inicialmente un proceso denominado nucleación, el cual consiste en la aglomeración de una cantidad pequeña de moléculas que se les denomina *cluster* [8]. Las gotas continuarán teniendo un proceso de crecimiento hasta que finalmente se alcanza un nuevo estado de equilibrio. Estos procesos ocurren frecuentemente en producción, tratamiento y transporte de gas natural.

La formación de gotas en un vapor sobresaturado es un proceso de no-equilibrio muy complejo, incluso para componentes puros, y por lo tanto se han y se siguen realizando descripciones teóricas de nucleación y de crecimiento de gota sin tener un modelo general que permita abarcar todo el proceso independiente de los componentes de la mezcla. A continuación se discute con detalle sobre el fenómeno de supersaturación y crecimiento de la gota.

### Supersaturación

Según Kalimanov [6], la supersaturación puede definirse como una fase vapor coexistiendo en equilibrio con su fase líquida, ejerciendo una presión  $P_v$  determinada únicamente por la temperatura del sistema  $P_v = P_{\text{sat}}(T)$ . Sin embargo, si la temperatura disminuye (manteniendo  $P_v$  aproximadamente constante), el vapor contiene en ese instante más moléculas por unidad de volumen de lo que es posible en el nuevo estado de equilibrio a la temperatura  $T$ , y

se considera como sobresaturado o un vapor en estado de supersaturación. El grado de supersaturación ( $S$ ) se caracteriza por la diferencia de potencial químico entre el estado de no equilibrio existente y el equilibrio correspondiente. Según Muijten y Kalimanov, para que un componente de la mezcla se encuentre en estado de supersaturación y sea potencialmente condensable, el valor de  $S$  debe ser mayor a 1,2 [5]. La supersaturación a altas presiones se puede definir como

$$S = \exp \left[ \frac{\mu^v(p, T, y_v) - \mu^v(p, T, y_v^{eq})}{k_B T} \right] \quad (1)$$

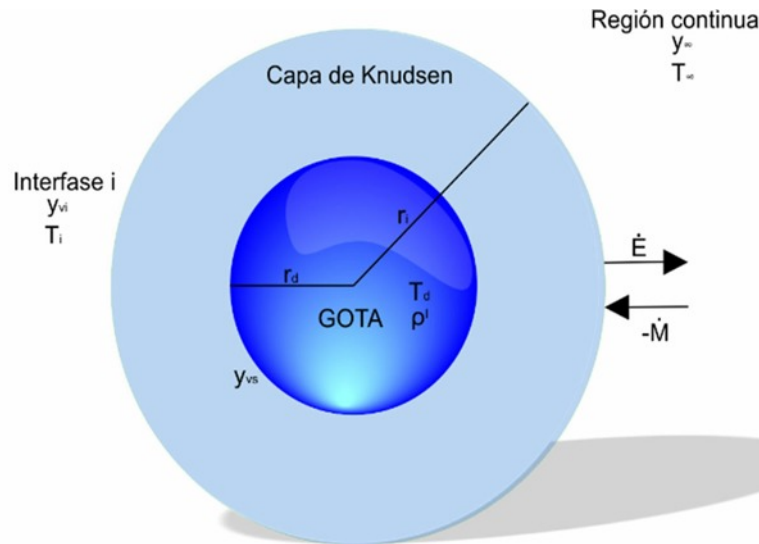
En esta expresión,  $y_v$  denota la fracción actual de vapor presente en la mezcla, que difiere de su valor de equilibrio  $y_v^{eq}$ . Introduciendo el factor de ensanchamiento ( $f_e$ ), el cual representa la no idealidad de la mezcla y teniendo en cuenta las condiciones de equilibrio, la ecuación de supersaturación (1), se puede describir para una mezcla de gas natural como:

$$S = \frac{\varphi_v y_v p}{\varphi_v^{eq} y_v^{eq} p} = \frac{y_v p}{p^s} \times \frac{1}{f_e} \times \frac{\varphi_v}{\varphi_v^{eq}} \quad (2)$$

Donde se puede determinar que  $S$  es la proporcionalidad de la fugacidad real en el estado de equilibrio. Los coeficientes de fugacidad  $\varphi_v$  y  $\varphi_v^{eq}$ , están relacionadas con las fuerzas intermoleculares que experimenta el vapor con su alrededores y generalmente a altas presiones son menores a uno. En condiciones de sistemas a altas presiones las fracciones de vapor en estado de supersaturación y de equilibrio comúnmente son muy pequeñas, por lo tanto los coeficientes de fugacidad pueden ser aproximados a uno y la ecuación (2) puede ser expresada como:

$$S \cong \frac{y_v}{y_v^{eq}} = \frac{y_v p}{f_e(p, T) p^s(T)} \quad (3)$$

Después de calcular la supersaturación de cada uno de los componentes de la mezcla de gas natural a partir de la Ecuación 3 y determinar los



**Figura 1.** Esquema modelo de crecimiento de gota propuesto por Young. Fuente: [8].

componentes potencialmente condensables, es necesario definir el modelo que representa el crecimiento de la gota a través del tiempo. Actualmente hay diferentes modelos que describen este fenómeno, sin embargo los dos modelos más utilizados y de mayor ajuste a la comparación con resultados experimentales en mezclas binarias y ternarias son el modelo de Young [8] y el modelo de Gyamathy [8]. Las descripciones teóricas de cada uno de los modelos de crecimiento de gotas están basadas en la suposición de cuasi-equilibrio. La presión es uniforme entre la gota y su entorno; y la gota es asumida totalmente esférica y en equilibrio termodinámico con su superficie.

### Modelo de Young

En el modelo de Young [7] el crecimiento de gota está dividido en tres regiones como se muestra en la Figura 1. La primera región de radio  $r_d$  representa la gota de condensados, la cual se asume está en equilibrio termodinámico con su superficie y tiene una temperatura uniforme  $T_d$ . La segunda región es llamada capa de Knudsen o capa de evaporación, la cual representa el paso libre de las moléculas y se encuentra directamente en los alrededores de la gota. Finalmente la tercera región, seguida de la capa de Knudsen, es

la región continua, las cuales se encuentran separadas por una interfase imaginaria  $i$  a una distancia  $r_i$  del centro de la gota.

En la **región continua** los flujos de masa y energía ( $\dot{M}$ ,  $\dot{E}$ ) están relacionadas a la diferencia de temperatura y las fracciones másicas ( $y_v$ ) entre la interfase  $i$  y las condiciones distantes de la gota. El flux másico puede obtenerse a partir de la expresión:

$$\frac{\dot{M}}{4\pi r_i^2 \rho D} = \ln \left( \frac{1 - \tilde{y}_{v\infty}}{1 - \tilde{y}_{vi}} \right) \quad (4)$$

Para pequeñas fracciones de vapor, la Ecuación 4 puede ser linealizada, obteniendo

$$\dot{M} = 4\pi r_i^2 \rho_m D_m (\tilde{y}_{vi} - \tilde{y}_{v\infty}) \quad (5)$$

Donde  $\rho_m$  y  $D_m$  representan la densidad y el coeficiente de difusividad de la mezcla gas-vapor respectivamente evaluados a la temperatura media  $T_m$ . (ver cálculo de parámetros de entrada). El flux de energía en esta sección se obtiene a partir de un balance de conservación de energía obteniendo así:

$$\ln \left( \frac{\dot{E} - \dot{M} C_{pv} T_i}{\dot{E} - \dot{M} C_{pv} T_\infty} \right) = \frac{-\dot{M} C_{pv}}{4\pi r_i k} \quad (6)$$

$C_{pv}$  Representa la capacidad calorífica del vapor  
 $T_i$  Temperatura de la interfase (límite externo de la capa de Knudsen)  
 $T_\infty$  Temperatura del gas de arrastre

En la Ecuación 6, el término  $\dot{M}C_{pv}T_i$  representa el flujo de energía por convección, mientras define el flujo de calor por conducción. En la región continua el flujo total de calor por conducción es dominante en el flux total de energía obteniendo  $\dot{M}C_{pv}T \ll \dot{E}$  por lo tanto la Ecuación 6 puede ser expandida a una serie de segundo orden de Taylor obteniendo:

$$\dot{E} = \frac{1}{2}(T_i - T_\infty)\dot{M}C_{pv} + 4\pi r_i k_m (T_i - T_\infty) \quad (7)$$

El primer término de la definición de transporte de energía representa el flujo energético resultado del transporte de masa, y el segundo término es la contribución del calor por conducción. El término  $k_m$  representa la conductividad térmica evaluada a la temperatura  $T_m$ .

En la **capa de Knudsen** se aplica teoría cinética de los gases, donde las moléculas de vapor que abandonan la superficie de la gota tienen una distribución de velocidad maxwelliana con temperatura  $T_d$  (las moléculas que no se condensan, no contribuyen al flujo total de energía) [18]. Young [8] argumentó dentro de su modelo que en la interfase de la capa Knudsen y la región continua la distribución de Maxwell de velocidad no es apropiada mientras exista una condición de no-equilibrio, por lo tanto, propuso el uso de la distribución de velocidad de Grad [19] que da una representación física más real de la difusión y el flujo convectivo de calor cerca de la interfase. Consecuentemente, se asume que las moléculas que viajan a través de la capa de Knudsen no colisionan entre sí, y todas las moléculas tienen una distribución de Grad de velocidad a temperatura  $T_i$ . Teniendo en cuenta la probabilidad de evaporación o condensación de las moléculas, según la distribución de Grad, el flujo másico y de energía en la capa de Knudsen

[9] están representados por las Ecuaciones 8 y 9, respectivamente:

$$\left(1 - \alpha_{con} \frac{r_d^2}{2r_i^2}\right) \dot{M} = 4\pi r_d^2 \left(\frac{\alpha_{ev} \rho_{vs} R_v T_d}{\sqrt{2\pi R_v T_d}} - \frac{\alpha_{con} \rho_{vi} R_v T_i}{\sqrt{2\pi R_v T_i}}\right) \quad (8)$$

$$\dot{E} = 4\pi r_d^2 \left[ \frac{\rho_{vi} R_v T_i \left(c_{pv} - \frac{R_v}{2}\right)}{\sqrt{2\pi R_v T_i}} + \frac{\rho_{gi} R_g T_i \left(c_{pg} - \frac{R_g}{2}\right)}{\sqrt{2\pi R_g T_i}} \right] (T_d - T_i) + \frac{r_d^2}{2r_i^2} \dot{Q}_{ci} + \dot{M} c_{pv} T_d - \dot{M} \frac{R_v}{2} T_d \left(1 - \frac{r_d^2}{2r_i^2}\right) - \frac{r_d^2}{2r_i^2} \dot{M} c_{pv} (T_d - T_i) \quad (9)$$

Cuando el número de Knudsen ( $Kn$ ) es muy grande, la interface se mueve al infinito.

En la ecuación (9)  $\dot{Q}_{ci} = \dot{Q}_{cvi} + \dot{Q}_{cgi}$ ; ya que el sistema es gobernado por transferencia de calor por decisión está dado por:

$$\dot{Q}_{ci} = 4\pi k r_i (T_i - T_\infty) \quad (10)$$

Donde  $R_v$ ,  $R_g$  representan las constantes específicas del gas y del vapor respectivamente,  $c_{pg}$ ,  $c_{pv}$  representan las capacidades caloríficas de cada una de las fases, y  $\alpha_{con}$ ,  $\alpha_{ev}$  denotan la probabilidad que una molécula se evapore o se condense con éxito. Normalmente se asume esta probabilidad igual a 1 para describir el sistema. El radio  $r_i$  de la interfase está definido como

$$\frac{r_i}{r_d} = 1 + 2\beta Kn \quad (11)$$

Donde  $\beta$  es el coeficiente experimental igual a 0,75 y el  $Kn$  se calcula con la longitud de camino libre molecular promedio  $\lambda$

$$Kn = \frac{\lambda}{2r_d} \quad (12)$$

El camino libre molecular promedio se puede calcular a partir de la relación con el diámetro de colisión  $\sigma$  [11]

$$\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P} \quad (13)$$

Como puede ser verificado del sistema de ecuaciones obtenido hay un total de seis variables desconocidas:  $\dot{M}$ ,  $\dot{E}$ ,  $\rho_{vi}$ ,  $\rho_{gi}$ ,  $T_d$ ,  $T_i$ . Sin embargo, solamente se han planteado cuatro ecuaciones (Ecuaciones 5, 7, 9 y 10), por lo que se hace necesario obtener al menos dos ecuaciones más para completar el sistema. Una de estas relaciones es obtenida de un balance de energía dentro de la gota que tiene en cuenta el calor que se produce debido a la condensación de los compuestos. La relación entre el flujo másico y el flujo de calor es:

$$\dot{E} = \frac{\delta}{\delta t}(M_d h_d) = \dot{M} h_d + M \dot{h}_d \quad (14)$$

Donde  $M_d$  es la masa total de la gota. Asumiendo pequeñas variaciones en las condiciones de la región lejana de la gota  $T_\infty$  y  $y_\infty$ , la temperatura de la gota  $T_d$  puede considerarse constante, por lo tanto el término de  $M \dot{h}_d$  puede ser despreciable.

$$\dot{E} = -\dot{M}(h_{vs} - h_d) + \dot{M} h_{vs} = -\dot{M}L + \dot{M} h_{vs} \quad (15)$$

Donde  $L$  es el calor latente de condensación. La suposición de cuasi-equilibrio entre la transferencia de masa y el calor latente de condensación es conocida como “aproximación de bulbo-húmedo”, la cual es válida si el flujo de calor dentro de la gota se desprecia. La relación de las densidades del gas y vapor en la interface representa la segunda ecuación adicional del modelo de Young y esta descrita por

$$\rho_{gi} + \rho_{vi} = \frac{P}{ZRT_i} \quad (16)$$

Donde  $Z \approx Z_g$  y se calcula a condiciones  $P$  y  $T_\infty$  y utilizando la ecuación de estado Soave-Redlich-Kwong (SRK) [12].

La última ecuación del sistema de modelo de Young es la tasa de crecimiento de gota obtenida por la ecuación de conservación de masa, a partir de la cual se relaciona el flujo másico y el radio de la gota a través del tiempo y representa el crecimiento de la gota en el modelo de Young.

$$\frac{\delta r_d}{\delta t} = -\frac{\dot{M}}{4\pi\rho_l r_d^2} \quad (17)$$

### Modelo de Gyamarthy

Gyamarthy [13] planteó un modelo de crecimiento de gota, teniendo en cuenta números de Knudsen grandes haciendo que la capa límite de moléculas libres tienda al infinito, ya que propone un flujo relativo entre la gota y la mezcla de gas relacionándolo según el número de Nusselt. El modelo de Gyamarthy está basado en modelos de comparación experimental de crecimiento de gota, y sugiere algunas modificaciones. Estas modificaciones son flujos de masa y energía reducidos a interpolaciones entre el límite de moléculas libres y el límite de la región continua representados como

$$\dot{M} = \frac{\dot{M}^{ct} \dot{M}^{fm}}{\dot{M}^{ct} + \dot{M}^{fm}} \quad (18)$$

$$\dot{E} = \frac{\dot{E}^{ct} \dot{E}^{fm}}{\dot{E}^{ct} + \dot{E}^{fm}} \quad (19)$$

Donde  $\dot{M}^{ct}$  y  $\dot{E}^{ct}$  representa el flujo másico y el flujo de energía en el régimen continuo respectivamente. Por otro lado  $\dot{M}^{fm}$  y  $\dot{E}^{fm}$  son calculados en la capa de Knudsen definida por Gyamarthy.

El flujo másico y de energía en el régimen continuo y en la capa límite de moléculas libres, son calculados igual que en el modelo de Young, cambiando las condiciones de frontera teniendo en cuenta el modelo de Gyamarthy. Por lo tanto para el régimen continuo se obtienen las Ecuaciones 20 y 21.

$$\dot{M}^{ct} = 4\pi r_d^2 \rho_m D_m (\tilde{y}_{vs} - \tilde{y}_{v\infty}) \quad (20)$$

$$\dot{E}^{ct} = \frac{1}{2} (T_d - T_\infty) \dot{M}^{ct} c_{pv} + 4\pi r_d k_m (T_d - T_\infty) \quad (21)$$

Y en la capa límite de moléculas libres se llega a la Ecuación 22.

$$\dot{M}^{fm} = 4\pi r_d^2 \left( \frac{\alpha_{ev} \rho_{vs} R_v T_d}{\sqrt{2\pi R_v T_d}} - \frac{\alpha_{con} \rho_{v\infty} R_v T_\infty}{\sqrt{2\pi R_v T_\infty}} \right) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}^{fm} = 4\pi r_d^2 & \left[ \frac{\rho_{v\infty} R_v T_\infty \left( c_{pv} - \frac{R_v}{2} \right)}{\sqrt{2\pi R_v T_\infty}} \right. \\ & \left. + \frac{\rho_{g\infty} R_g T_\infty \left( c_{pg} - \frac{R_g}{2} \right)}{\sqrt{2\pi R_g T_\infty}} \right] (T_d - T_\infty) \\ & + \left\{ \dot{M}^{fm} \left( c_{pv} - \frac{R_g}{2} \right) T_d \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

Se obtienen seis ecuaciones con siete incógnitas  $\dot{M}$ ,  $\dot{M}^{ct}$ ,  $\dot{M}^{fm}$ ,  $\dot{E}$ ,  $\dot{E}^{fm}$ ,  $\dot{E}^{ct}$ ,  $T_d$ , al igual que en el modelo de Young se debe relacionar la temperatura de la gota con el sistema de ecuaciones utilizando un balance de energía dentro de la gota (Ecuación 15).

Finalmente para obtener el crecimiento de gota a partir del modelo de Gyarmathy se utiliza la Ecuación 18 para determinar el comportamiento de la relación entre el flujo másico y el radio de la gota con respecto al tiempo. En conclusión, en este modelo se hace necesario resolver las Ecuaciones 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 15, con el fin de obtener la velocidad de crecimiento de la gota.

### Calculo de Variables de Entrada Para Los Modelos de Crecimiento

Como variables de entrada de los modelos de crecimiento de gota, se requiere una  $T_\infty$  y las

densidades del vapor en la superficie de la gota  $\rho_{vs}$ , y del vapor ( $\rho_{v\infty}$ ) y del gas lejos de la superficie ( $\rho_{g\infty}$ ).

$$\rho_{v\infty} = y_\infty^m(t) \frac{P}{Z_\infty R_v T_\infty} \quad (24)$$

$$\rho_{g\infty} = [1 - y_\infty^m(t)] \frac{P}{Z_\infty R_g T_\infty} \quad (25)$$

$$\rho_{vs} = \frac{f_e P_v^s}{Z_\infty R_v T_d} \exp\left(\frac{2\sigma}{\rho_l R_v T_d r_d}\right) \quad (26)$$

Donde  $P_{sv}$  es la presión de saturación del vapor,  $f_e(p, T)$  representa el factor de ensanchamiento calculado con la presión total del sistema, y  $\sigma$  es la tensión superficial de la gota. Para el cálculo de factor de ensanchamiento  $f_e$ , presión de vapor saturado  $P_{sv}$ , tensión superficial  $\sigma$ , densidad del líquido  $\rho_l$  y el calor latente  $L$  deben ser evaluados a temperatura  $T_d$ . Todas las otras propiedades físicas necesarias para el desarrollo de los modelos con calculadas a temperatura intermedia  $T_m$ . De acuerdo con Hubbard *et al.*, la regla de un tercio para el cálculo de esta es apropiada [15], por lo tanto se llega a la Ecuación 30.

$$T_m = \frac{1}{3} (2T_d + T_\infty) \quad (27)$$

## DISCUSION

A partir de la revisión del estado del arte se hace un análisis comparativo de los dos modelos de predicción de crecimiento de gota estudiados, teniendo en cuenta factores como la influencia de las propiedades termodinámicas, el régimen de comportamiento del fluido y algunas conclusiones obtenidas de resultados experimentales de diferentes autores:

- **Influencia del cálculo de propiedades macroscópicas (a partir de ecuaciones de**



*estado) en métodos de predicción de crecimiento de gota.* Las ecuaciones de estado predicen con un nivel de exactitud aceptable (entre 1 % y 8 %, dependiendo de la calidad de las mediciones de composición de gas [17]) las condiciones y propiedades en fase líquido-vapor de mezclas de hidrocarburos requeridas en la solución de los modelos de crecimiento de gota. Sin embargo, cuando los resultados obtenidos con las ecuaciones de estado brindan concentraciones bajas (del orden de “partes por billón”) en los estados vapor-líquido en equilibrio, la desviación aumenta en la predicción de crecimiento de gota con respecto a resultados experimentales debido a que la ponderación que se realiza en el cálculo de propiedades macroscópicas con la regla de mezclas, genera una distorsión de dichas propiedades por las diferencia de órdenes de magnitud entre los diferentes componentes [8]. Según Luitjen basado en resultados experimentales, las ecuaciones de estado que mejor predicen el comportamiento en equilibrio de una mezcla de hidrocarburos como lo es el gas natural son Peng-Robinson y Soave-Redlich-Kwong (SRK) siendo esta última la más adecuada para este tipo de sistemas [8].

Es importante que para futuros desarrollos de predicción de tamaño de gota se monitoree el cálculo de la temperatura de la gota, debido a que según Peeters la tasa de crecimiento de gota es inversamente proporcional a la temperatura de ésta por la dependencia directa de las propiedades termodinámicas calculadas a partir de las fracciones en equilibrio del vapor [16].

- ***La importancia del número de Knudsen en los modelos de crecimiento de gota.*** El número de Knudsen refleja si el fluido se encuentra en régimen cinético (número de Knudsen bajos  $Kn > 10$ ) donde los fenómenos de transporte de masa y energía son

governados por choques esporádicos entre moléculas, en régimen gobernado por difusión ( $Kn < 0,1$ ) o en régimen de transición ( $0,1 < Kn < 10$ ).

**Young** describe su modelo a dentro del régimen de difusión ( $0 Kn$  a  $0,1 Kn$ ), incluyendo una interfase cerca de la superficie de la gota denominada capa de Knudsen (ver Figura 1), que cuenta con la característica de aplicar teoría cinética (régimen cinético) debido al comportamiento disperso de las moléculas.

**Gyamarchy** describió su modelo dentro del régimen de transición ( $0,1 Kn$  a  $10 Kn$ ), aproximando sus ecuaciones de transferencia de masa a un modelo que asume una interacción directa entre la gota y el gas de arrastre. Si se realiza el cálculo del tamaño de gota dentro de este modelo sin que el número de Knudsen se encuentre en el rango estimado, los coeficientes de transferencia de masa y energía con considerablemente bajos, generando una alta incertidumbre en el valor de la temperatura y el radio máximo de la gota.

En las **condiciones a las cuales se transporta el gas natural**, se obtienen valores de Knudsen del orden de 0,002 o menores con presiones cercanas a 20 bar o mayores, ubicando así el fluido desarrollado en régimen de difusión. Teniendo en cuenta lo anterior se podría prever que el modelo de Young podría brindar resultados con mayor nivel de exactitud que Gyamarchy.

- ***Comparación resultados experimentales con los modelos evaluados.*** Algunos autores [8,16] han realizado la comparación de resultados experimentales con los modelo de Young en mezclas binarias (metano/nonano), donde se ha evidenciado una cercanía entre los resultados del orden  $10^{-3}$  los cuales se consideran adecuados para confirmar que el modelo de predicción es

apto para su uso con la composición descrita. Sin embargo, para mezclas multicomponentes no se ha evidenciado comparación entre modelos y resultados experimentales.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a la evaluación del estado del arte, se evidencia que el cálculo de propiedades macroscópicas con ecuaciones de estado y su uso en los modelos de crecimiento de gota es importante debido al apreciable efecto en el desarrollo de los modelos, por tanto es necesario la inclusión de un análisis de sensibilidad dentro de los algoritmos de cálculo y su influencia en el resultado final.

Debido a las condiciones de operación en las que se encuentra la red de distribución del gas natural en el gaseoducto colombiano se puede concluir que los balances de masa y energía en el sistema están dominados por el régimen de difusión ( $Kn$  cercanos a 0,002) por lo tanto de manera preliminar se puede considerar que el modelo de crecimiento de gota adecuado para el análisis de condensación en el gas natural es el planteado por Young.

Según resultados de simulaciones y análisis teóricos realizados por diferentes autores con los modelos de crecimiento de gota presentados y su comparación con resultados experimentales, se evidencia una buena aproximación. Sin embargo, estas comparaciones han sido efectuadas para mezclas binarias de metano/nonano y metano/agua, y muy limitado a mezclas de gas natural. Por lo tanto en futuros estudios se debería enfocar la investigación y evaluación a sistemas multicomponentes como lo es el gas natural.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Clavijo S. *Tendencias Energéticas Mundiales y de Colombia*. Centro de Estudios Económicos. 2014. Disponible en: <http://www.anif.co> accedido Abril 2015

[2] MARCOGAZ. *Towards a harmonized EU specification on gas Quality: Marcogaz contribution* Technical Association of The European Natural Gas Industry 2007.

[3] CREG. *Resolución CREG 071 de 1999- Reglamento Unico de Transporte*. Diario oficial. 1999.

[4] Brigaden, A. *Modeling and numerical investigation of high pressure gas liquid separation*. Norwegian University of science and Technology. Trondheim, Noruega. 2005

[5] Muijten M, Kalimanov V. *On mist formation in natural gas*. Revue de l'Institut Francais du petrole. Vol 49. No.1 Francia. 1994

[6] Kalimanov V. *Nucleation Theory- Lecture Notes in Physics 860*. Delf University Technology. Ed Springer. P 79-112. 2013

[7] Kalimanov V, Betting M. *New developments in nucleation theory and their impact on natural gas separation*. Delf University Technology. 2007

[8] Luitjen C, *Nucleation and Droplet Growth at High Pressure*. CIP-Data Library Technische Universiteit, Eindhoven. 1998

[9] Peeters P, *Transitional droplet growth and diffusion coefficients*. International Journals of heat and mass transfer. p. 181-193. 2001

[10] Vought, Van F. *Numerical Simulation of Condensation in Transonic Flows*. Tesis Doctoral. Universitet Twente. Twente. 2003

[11] *Teoría cinética de gases, colisiones Intermoleculares y recorrido libre medio*. Cap 3. Disponible en [http://ocw.uv.es/ciencias/3-2/1tema\\_3\\_tcg.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias/3-2/1tema_3_tcg.pdf) Accedido Mayo 2015

[12] *Ecuaciones de estado, Ingeniería Química, Universidad de Valladolid* Disponible en [http://iqtma.uva.es/termoap/2\\_ecuaciones\\_de\\_estado.pdf](http://iqtma.uva.es/termoap/2_ecuaciones_de_estado.pdf) Accedido Mayo 2015

[13] G. Gyamrthy, *The spherical droplet in gaseous carrier streams: Review and synthesis*, *Handbook of Chemistry and Physics. Multiphase Science and Technology*. McGraw-Hill, New York, p 99-279, 1982

[14] Ehrler F. *Spontane Kondensation*, VDI-Warmeatlas, VDI-Verlag, Auflage 1988

[15] G.L. Hubbard, V.E. Denny, and A.F. Mills, *Int J. "Heat Mass Transfer"*. 18. 1975.

[16] Peeters Paul. *Nucleation and condensation in Gas-Vapour mixtures of Alkanes and water*. CIP- Data Library Technische Universiteit, Eindhoven 2002.

[17] Nasrifar Kb, Bolland O. *Prediction of thermodynamic properties of natural gas mixtures using 10 equations of state including a new cubic two-constant equation of state*. Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU). 2006.

[18] *The Maxwell distribution*. University of Texas. Tomado de: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/sm1/lectures/node72.html> Visto: Agosto 2015

[19] Mathies K, Theil F. *A semigroup approach to the justification of kinetic theory*. *Siam Journal on mathematical analysis*. Vol 44. Pág 4345-4379. 2012.

# GENERACIÓN DE MICROCAUDALES MÁSICOS PARA LA PREPARACIÓN DE MATERIALES DE CALIBRACIÓN GASEOSOS

<sup>1</sup>Wilmer Alonso Pedraza\*; <sup>2</sup>Luis Eduardo García Sánchez

<sup>1</sup>Grupo 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

<sup>2</sup>INLINE Fluid Systems Calle 28 No 20-80 Bucaramanga, Santander, Colombia.

**Resumen:** En este trabajo se presenta la caracterización de los microflujos másicos que se obtienen a partir de un Dispositivo Generador de Trazas (DGT). El DGT realiza una mezcla dinámica de un Material de Referencia Certificado (MRC) con la matriz de solución de dicho material, obteniéndose una corriente que contiene al analito de interés en una concentración más baja que aquella con que se encuentra en el MRC. El DGT puede diluir un MRC gaseoso en diferentes proporciones, hasta una relación máxima de 2000:1, y se diseñó de manera que la concentración de la corriente resultante tuviera una muy baja incertidumbre, de tal forma que dicha corriente sirve como Material de Referencia (MR) para calibración de analizadores. Para obtener un rango adecuado de concentraciones posibles de analito de interés, se requiere que el dispositivo tenga la capacidad de generar micro-caudales másicos tan bajos como 5 µg/s. Para tener control sobre micro-caudales de esa magnitud, el DGT utiliza micro-capilares a los cuales se les caracterizó su caudal como función de la caída de presión del flujo a su paso por el capilar. Se caracterizaron 6 micro-capilares, con diámetros internos de 25, 50 y 75 µm y longitudes de 50 y 100 mm, controlando la presión de entrada con un sistema de regulación de presión en paralelo con alta estabilidad (variaciones menores a 0,5 %). Los caudales generados se midieron por medio de un patrón primario tipo pistón, y se realizó la comparación entre estos valores de caudal con los valores teóricos dados por el modelo de la norma ISO 6145 (TC 158 2003b), haciendo evidente la necesidad de incluir un factor de corrección para ajustar el modelo teórico a los resultados obtenidos.

**Palabras clave:** Material de Referencia Certificado, Material de Referencia, dilución dinámica, microflujo

**Abstract:** This paper present the characterization of the mass micro flows generated in a Trace Generator Device (TGD). This TGD mixes dynamically a Certified Reference Material (CRM) in the dilution matrix of the material, giving a flow who contain the interest analyte in a lower composition than the one given in the CRM. The TGD can dilute a gaseous CRM in different ratios, even until a relation 2000:1, and has been designed in a way that the composition of the outlet flow have a low uncertainty, so the resulting flow can be used as a Reference Material (RM) for calibrating analyzers. To obtain an adequate range of possible concentrations of the substance of interest, it is required that the device has the capability of generate mass micro flows as lower as 5 µg/s. To control this type of micro flows, the TGD use micro capillaries tubes whose relation between flow rate and pressure drop has been characterized. Six micro capillaries were characterized, with diameters of 25, 50, and 75 µm and 50 and 100 mm of length, controlling the inlet pressure with a parallel regulation system of pressure with high stability (variations lower than 0,5%). The generated flows were measured with a primary standard piston type, and these values were compared with the theoretical flows given by the mathematic model included in the norm. ISO 6145 (TC 158 2003b). This comparison draws the conclusion that it is necessary to include a correction factor to tune the theoretical model with the obtained results.

**Keywords:** Certified Reference Material, Reference Material, dynamic dilution, micro flow.

\*wpedraza@cddtdegas.com





## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de dispositivos de tamaño muy pequeño que incluyen movimiento de fluidos, ha hecho surgir la necesidad de estudiar la mecánica de fluidos con escalas del orden de decenas o cientos de micrómetros. A este campo se le ha llamado "microfluídica", y su enfoque se centra en dos áreas fundamentales: (1) desarrollo y fabricación de micro dispositivos integrados, y (2) uso potencial de microsistemas para el estudio de procesos químicos, biológicos y físicos, usados principalmente en las áreas de separación, inmunoensayos, reacciones químicas y bioquímicas, análisis de DNA, y en el diagnóstico de enfermedades [1].

El Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) ha incursionado en el campo de los microfluidos para la optimización de los procesos de calibración de analizadores, con el

desarrollo de un Dispositivo Generador de Trazas (DGT). Dicho DGT tiene la capacidad de diluir un Material de Referencia Certificado (MRC) para obtener una corriente de calibración con una concentración más baja, llegando a concentraciones al nivel de trazas como las que se requieren para la medición de gases contaminantes presentes en el gas natural ( $H_2S$  y  $CO_2$ ) y en el aire ambiente ( $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $O_3$ ). La dilución se realiza por medio de una mezcla dinámica del MRC, que tiene una composición conocida y estable del analito de interés y una baja incertidumbre, y un gas blanco que corresponde a la matriz de dilución del MRC (que en los casos mencionados, es  $N_2$ ). Este dispositivo requiere la generación de caudales máscicos con una relación hasta de 2000:1 entre el gas de dilución y el MRC, respectivamente. Esto implica tener la capacidad de generar microcaudales máscicos del MRC con magnitudes entre  $2,5 \mu\text{g/s}$  y  $1000 \mu\text{g/s}$ .



Para la generación de los microcaudales, se utilizan elementos como bombas volumétricas, controladores másicos, micro-orificios y capilares, dependiendo del material, las presiones de operación y el espacio disponible. Debido a que el DGT se diseñó para realizar mezclas dinámicas de MRC de gases reactivos (como el  $H_2S$ ), los materiales con que se construyó tienen propiedades especiales, como baja adsorción y baja corrosividad. Por esta razón, se eligieron microcapilares elaborados en un polímero de alta gama denominado *Polyether Ether Ketone* (PEEK) como elemento generador de microcaudal.

Este artículo presenta el proceso de caracterización de los micro-caudales generados como función de la caída de presión, en 6 microcapilares con diámetros de  $25\ \mu m$ ,  $50\ \mu m$  y  $75\ \mu m$ , y longitudes de 50 mm y 100 mm para cada diámetro.

## METODOLOGÍA

### 1. Requerimientos

El desarrollo del dispositivo requirió el establecimiento de requisitos operativos y metrológicos. A continuación se muestra un listado de los requisitos en cuestión:

#### • Requerimientos operativos

- o Presión de operación: 110 psia – 40 psia
- o Presión de suministro al pistón: 18 psia
- o Temperatura de operación =  $20\ ^\circ C \pm 1\ ^\circ C$
- o Instalación con patrón primario tipo pistón

#### • Requerimientos metrológicos

- o Estabilidad en la presión mejor a 1%
- o Desviación estándar relativa  $< 1\%$  del caudal generado

### 2. Elemento de control de caudal

El MRC se prepara por medio de una mezcla dinámica de corrientes siguiendo la normativa ISO 6145 (TC 158 2003b) [ 2], en la que se describen los elementos de control y medición de caudal que se pueden utilizar. Entre ellos se encuentran: bombas volumétricas (ISO 6145-2:2014), inyección continua (ISO 6145-4:2004), capilares (ISO 6145-5:2009), orificios críticos (ISO 6145-6:2003), y controladores másico-térmicos (ISO 6145-7:2009).

Un análisis comparativo entre los diferentes métodos anteriormente mencionados mostró que los elementos controladores de caudal, como los orificios críticos y los capilares, son los más apropiados, debido a que son accesorios simples,

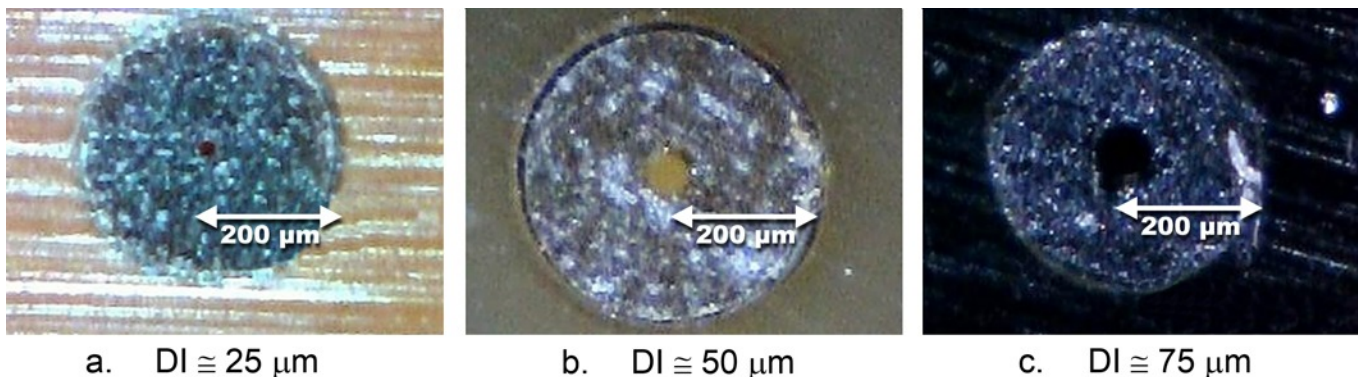


Figura 1. Diámetros de los capilares bajo caracterización



pueden instalarse con facilidad en una línea de flujo sin mayor necesidad de mantenimiento (ya que no poseen partes móviles) y pueden ser fabricados en materiales inertes, siendo compatibles con gases reactivos. Por último, el caudal generado es estable y reproducible [ 3].

Se seleccionaron entonces capilares como elemento controlador de caudal, con diámetros de 25  $\mu\text{m}$  (Figura 1a), 50  $\mu\text{m}$  (Figura 1b) y 75  $\mu\text{m}$  (Figura 1c), y longitudes de 50 mm y 100 mm para cada uno de ellos.

### 3. Diseño del montaje

Con el objetivo de caracterizar el caudal con relación a la caída de presión a través de cada microcapilar, se realizó un montaje en serie entre los microcapilares bajo estudio y el patrón primario tipo pistón, el cual se usa como elemento de medición de caudal. El montaje consta de un sistema de control de presión a la entrada y salida del capilar por medio de reguladores de presión

mecánicos, medición de presión por medio de transductores de presión electrónicos, y medición de temperatura por medio de detectores de temperatura resistivos (RTD). Los valores registrados por estos medidores son tomados por un sistema de adquisición de datos, el cual muestra en tiempo real el comportamiento de las presiones y temperaturas del sistema y almacena estos valores en un archivo histórico, para luego evaluar los comportamientos a lo largo de la calibración.

Como matriz de dilución, se dispone de nitrógeno UHP (Ultra High Purity) grado 5.5 (impurezas menores a 1 ppm), el cual se encuentra a una presión aproximada de 1700 psi. Por esta razón, es necesario regular la presión para mantener presiones de entrada al capilar entre 110 psia y 40 psia. Tras el sistema de capilares también se instaló una válvula estranguladora, para cumplir con el requerimiento operativo de mantener la presión de salida estable. La Figura 2 muestra el diagrama de proceso del sistema.

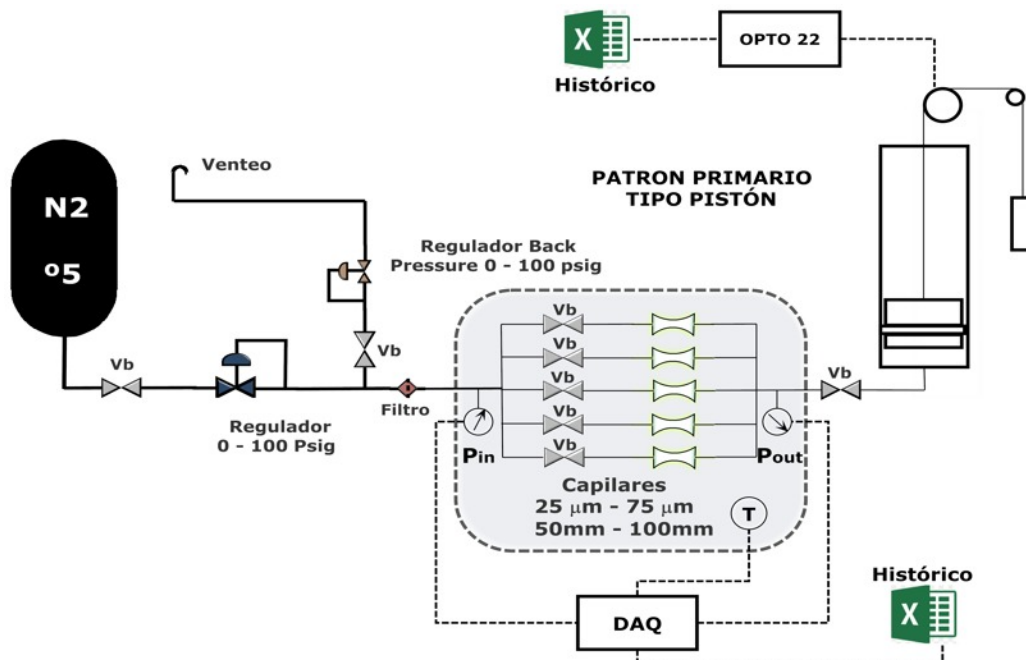


Figura 2. Esquema del montaje experimental para la caracterización de microflujos.

El caudal generado con este sistema se determinó con el patrón primario tipo pistón del CDT de GAS, el cual está controlado por un sistema de automatización que se encarga del control de la calibración y del monitoreo y registro de las variables del proceso (presión atmosférica, temperatura ambiente, presión del fluido, temperatura del fluido y volumen de la cámara).

#### 4. Regulación de presión

La estabilidad de la presión, tanto en la entrada como a la salida del capilar, es fundamental para lograr una buena reproducibilidad en el microcaudal generado. Debido a que el mínimo requerimiento de caudal en la línea es inferior a  $500 \mu\text{L}/\text{min}$ , surgió la necesidad de crear un *bypass* en la línea de flujo del MRC, de manera que se incrementara el flujo en la línea de suministro evitando cambios bruscos en la presión por la apertura y cierre permanente en el asiento del

regulador. Este efecto puede presentarse debido a la corta distancia entre el asiento y el actuador a estas condiciones de caudal (ver Figura 3b). Al provocar un caudal de fuga, el caudal en la línea principal se incrementa, garantizando una apertura total del regulador y por tanto una mayor estabilidad en la presión de la línea principal (ver Figura 3a).

Se instalaron reguladores de presión de asiento de dos etapas aguas abajo, ya que son más estables que los de asiento de una etapa, y un regulador *back pressure* aguas arriba, para generar el flujo *bypass* con presión en la línea de venteo regulada y así mantener el caudal en la línea sin picos de presión. La Figura 4 presenta los reguladores de presión seleccionados.

#### 5. Regulación de caudal

Para poder controlar adecuadamente un amplio rango de caudales, se diseñó un colector compuesto por los capilares bajo estudio que

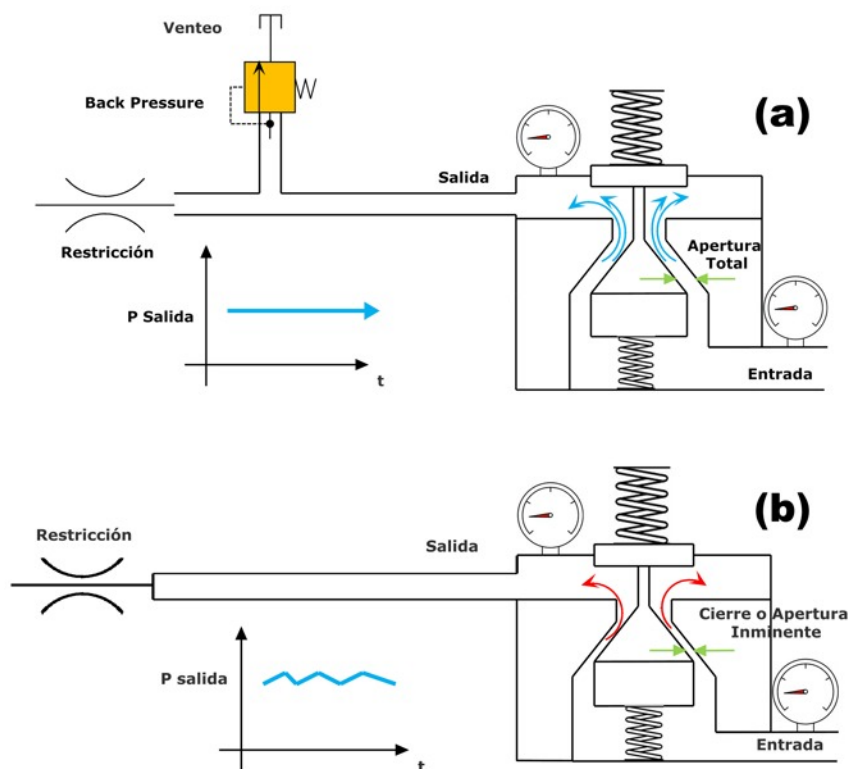


Figura 3. Apertura de regulador con flujo en *bypass* (a) y flujo directo (b).

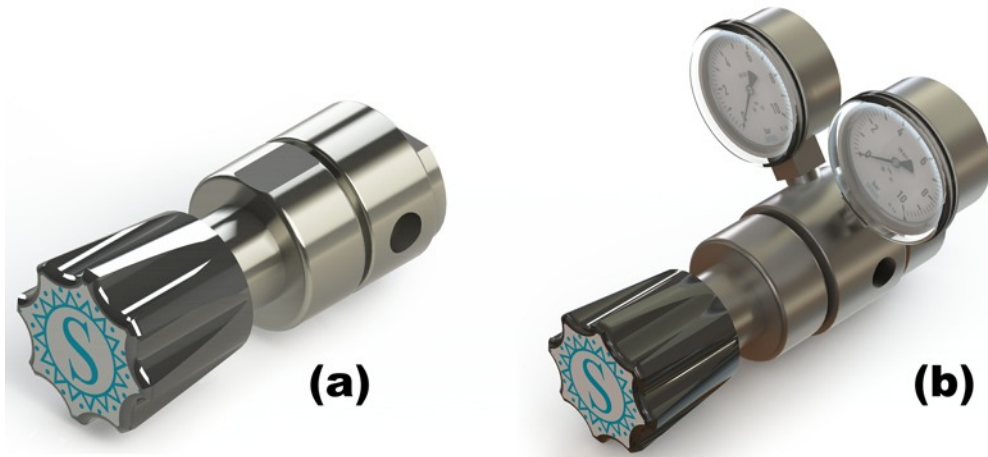


Figura 4. Reguladores de presión usados en el montaje experimental (a) Regulador Back Pressure (b) Regulador de dos etapas

permite superponer el flujo de dos o más capilares en paralelo según sea necesario. Dentro del diseño del DGT se decidió sumergir el sistema en un líquido con alta capacidad calorífica y de esta manera amortiguar los efectos del cambio de la temperatura ambiente en la superficie del microcapilar. La Figura 5 presenta el sistema resultante.

### 6. Estimación teórica del caudal

Se realizó inicialmente una estimación teórica de flujos máscicos por medio de una ecuación simplificada, como la de Hagen-Poiseuille [4], considerando el flujo como laminar, completamente desarrollado e incompresible,

como lo aplicaron Bomelburg [5] y Olin [6]. La sintonización del modelo con los datos experimentales se realizará por medio de un factor de corrección. La Ecuación 1 es la ecuación básica utilizada

$$Q_{mt} = \frac{\pi \cdot D^4 \cdot (P_{in} - P_{out}) \cdot \bar{\rho}}{128 \cdot L \cdot \mu} \quad (1)$$

Siendo  $D$  el diámetro interno del microcapilar,  $P_{out}$  la presión absoluta a la salida,  $P_{in}$  la presión absoluta a la entrada del micro-capilar,  $\mu$  la viscosidad cinemática del gas, y  $\bar{\rho}$  la densidad

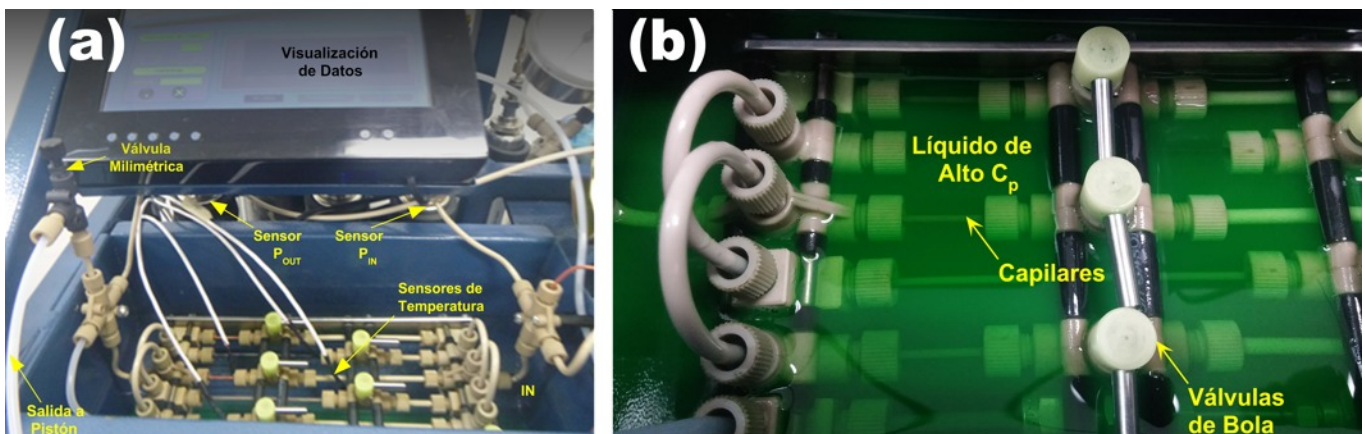


Figura 5. Fotografías del montaje experimental para la generación de micro-caudales

calculada con la presión promedio entre  $P_{in}$  y  $P_{out}$ , la cual se evalúa matemáticamente considerando el factor de compresibilidad ( $Z$ ) evaluado a través de la base de datos de referencia de las propiedades termodinámicas y de transporte de fluidos de NIST (Refprop 9.0) [7].

La comparación entre el caudal másico teórico  $Q_{mt}$  y el caudal másico experimental  $Q_{me}$ , obtenido por medición con un patrón primario tipo pistón con alcance de 1 cm<sup>3</sup>/min a 1000 cm<sup>3</sup>/min, permitiría determinar el coeficiente de descarga ( $C_d$ ), que es un factor de corrección, como se muestra en la Ecuación 2.

$$C_d = \frac{Q_{me}}{Q_{mt}} = \frac{128 \cdot L \cdot \mu \cdot Q_{me}}{\pi \cdot D^4 \cdot (P_{in} - P_{out}) \cdot \bar{p}} \quad (2)$$

## RESULTADOS

### Prueba de estabilidad de presión

La Tabla 1 resume el comportamiento de la presión de entrada a los capilares en la prueba de estabilidad. Allí se puede observar la máxima inestabilidad en la presión presentada por cada

capilar durante el proceso de calibración, en cada uno de los puntos de calibración con una duración aproximada de 200 s para cada punto. De esta manera se cumple con el requerimiento operativo en cuanto a la estabilidad en la presión se refiere ya que la máxima inestabilidad se presenta en el capilar de 50  $\mu$ m x 50 mm siendo un 0,239%.

### Caudal teórico y experimental

Para cada capilar, se determinó experimentalmente el caudal másico resultante, entre 4 y 6 caídas de presión generadas a través del capilar. Cada experimento se llevó a cabo con 4 réplicas. Con temperatura bastante estable, estando alrededor de 20 °C en todos los casos. Posteriormente, se calculó el caudal teórico a través del capilar usando la Ecuación 1, para cada una de las condiciones experimentales en las que se midió el caudal. La Tabla 2 presenta los datos obtenidos tanto para los caudales experimentales como para los teóricos, mostrando también las desviaciones estándar de los valores de temperatura y de caudal másico experimental como evidencia de la alta estabilidad de las pruebas.

50 $\mu$ m x 50mm		50 $\mu$ m x 100mm		75 $\mu$ m x 50mm		75 $\mu$ m x 100mm		25 $\mu$ m x 100m		25 $\mu$ m x 50mm	
Pin [psi]	Desviación máxima [%]	Pin [psi]	Desviación máxima [%]	Pin [psi]	Desviación máxima [%]	Pin [psi]	Desviación máxima [%]	Pin [psi]	Desviación máxima [%]	Pin [psi]	Desviación máxima [%]
110	0,239	110	0,05	90	0,03	90	0,04	90	0,04	100	0,07
100	0,094	90	0,12	80	0,17	80	0,16	80	0,15	85	0,06
90	0,159	70	0,10	70	0,11	70	0,10	65	0,06	65	0,17
70	0,126	60	0,13	55	0,05	50	0,07	55	0,13		
60	0,129	50	0,13	40	0,09	40	0,10				
50	0,177	40	0,21								
40	0,221										

**Tabla 1.** Estabilidad de la presión de entrada de los capilares durante todo el proceso de calibración. La columna "Desviación máxima" presenta la diferencia porcentual más grande medida durante la prueba entre los valores instantáneos de la presión y su valor objetivo.

Capilar *	T Promedio [C]	Desv est T	$\Delta P$ [kPa]	Qe [0g/s]	Desv est Qe	Qt [2g/s]
75x50	19,17	0,014	171,706	234,031	0,118	310,413
	19,20	0,023	240,669	386,988	0,282	519,689
	19,25	0,006	309,608	550,688	0,557	777,600
	19,04	0,020	378,536	787,376	0,937	1083,868
	19,08	0,024	447,478	1005,746	0,174	1438,455
	19,10	0,005	516,430	1220,653	0,809	1841,053
75x100	19,07	0,013	171,706	133,022	0,138	155,277
	19,10	0,009	240,669	229,807	0,251	259,907
	19,10	0,008	309,608	340,438	0,190	388,799
	19,11	0,009	378,536	481,318	0,237	541,933
	19,14	0,004	447,478	627,942	0,520	719,109
	19,15	0,018	516,430	785,880	0,107	920,540
50x50	20,01	0,081	171,732	58,476	0,053	60,967
	19,99	0,048	240,674	105,839	0,246	102,083
	19,98	0,044	309,620	158,987	0,145	152,723
	19,99	0,070	378,558	219,154	0,290	212,923
	19,96	0,043	447,492	294,165	0,283	282,636
	20,03	0,060	516,435	371,019	0,462	361,670
50x100	20,12	0,014	171,740	28,919	0,337	30,464
	20,13	0,000	240,691	44,630	0,153	50,993
	20,15	0,020	309,638	65,179	0,038	76,300
	20,11	0,037	378,592	87,142	0,142	106,433
	19,87	0,090	447,528	111,821	0,237	141,411
	19,91	0,115	516,458	136,158	0,316	180,909
25x50	19,30	0,036	171,732	2,484	0,064	3,831
	19,37	0,015	240,674	5,170	0,037	6,411
	19,45	0,034	309,620	8,270	0,032	9,584
	19,66	0,014	378,558	12,174	0,038	13,333
	19,83	0,036	447,492	16,377	0,044	17,675
	19,97	0,041	516,435	20,091	0,190	22,623
25x100	19,14	0,036	309,667	3,877	0,115	4,799
	19,14	0,058	378,601	6,322	0,099	6,688
	19,27	0,047	447,543	8,848	0,207	8,873
	19,25	0,042	516,484	12,270	0,087	11,361

T promedio y Desv est T corresponden a la media y la desviación estándar de las mediciones de temperatura entre las 4 réplicas.  $\Delta P$  es la caída de presión generada. Qe y Desv est Qe corresponden al promedio y la desviación estándar del caudal experimental de las 4 réplicas. Qt es el caudal teórico calculado con la Ecuación 1.

\* El primer número representa el diámetro del capilar (en  $\mu\text{m}$ ) y el segundo la longitud (en mm).

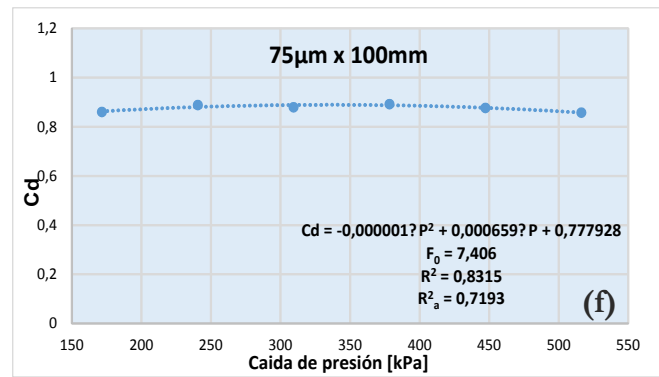
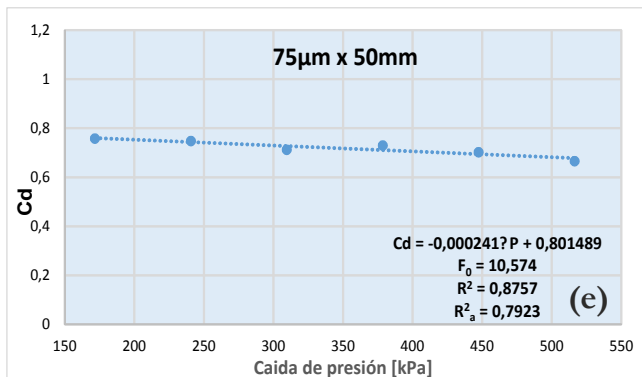
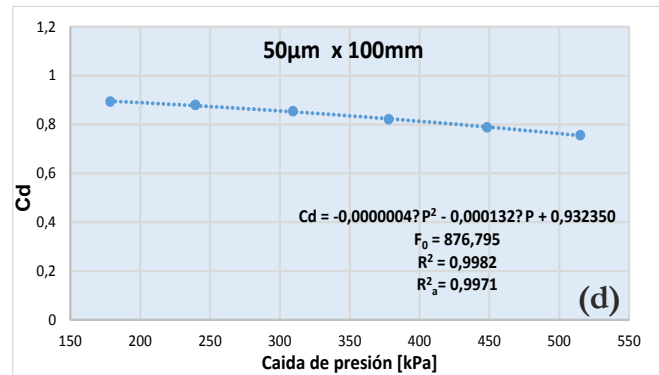
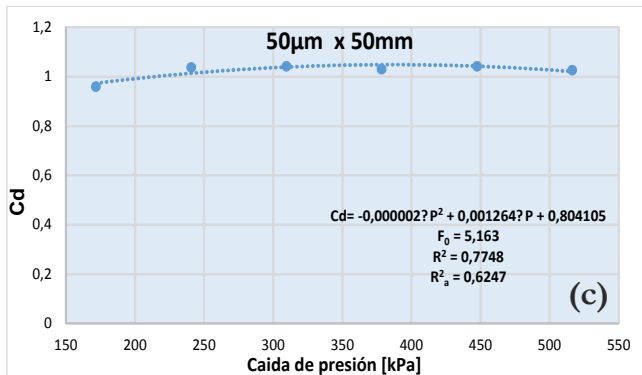
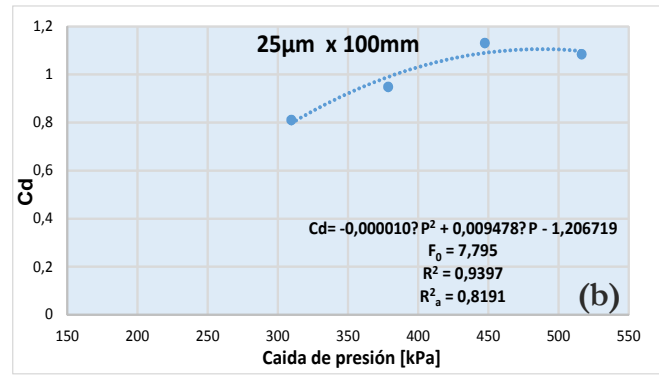
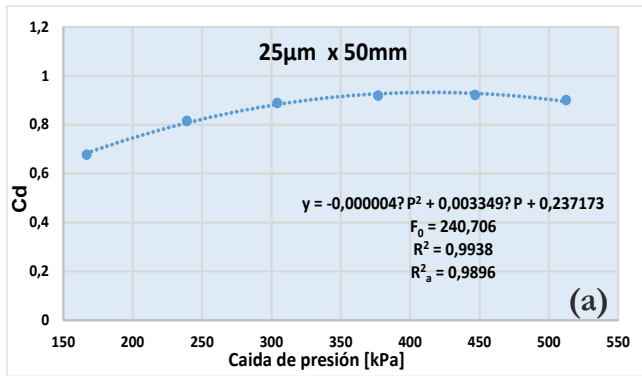
**Tabla 2.** Caudales máxicos y experimentales obtenidos durante la prueba.

### Coefficiente de descarga $C_d$

A partir de la Ecuación 2, con el caudal experimental y el cálculo del caudal teórico a las mismas condiciones de la prueba, se determinó el coeficiente de descarga  $C_d$ , el cual corrige el modelo matemático para obtener los caudales generados experimentalmente. Los resultados obtenidos se ajustaron utilizando regresión lineal múltiple, y se propusieron diferentes modelos para cada microcapilar. Los criterios de comparación

entre modelos condujeron a concluir que para cada capilar hay un modelo polinómico conveniente, en este caso el modelo cuadrático tiene los mejores ajustes excepto para el capilar de  $75\mu\text{m} \times 50\text{mm}$ . La Figuras 6 muestra los resultados del modelo más conveniente para el  $C_d$  de los capilares bajo análisis, incluyendo los datos estadísticos como  $F_0$  del análisis de varianza (Anova), coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ).





**Figura 6.** Resultados del modelado matemático del coeficiente de descarga con respecto a la caída de presión

## DISCUSIÓN

Al determinar el coeficiente de descarga (Ecuación 2), el cual es la relación entre el caudal teórico y el medido con el patrón, se obtuvieron valores comprendidos entre 0,8 y 1,2. La diferencia entre valores experimentales y teóricos en este caso puede deberse a la simplicidad de la ecuación mecánica utilizada, que no considera posibles efectos como la rugosidad interna, la circularidad del micro capilar y la porosidad del material, y además su validez presenta restricciones respecto

al régimen de flujo. El caudal real también tiene una alta sensibilidad con la densidad del fluido, y esta propiedad puede entonces estar afectando la precisión del modelo teórico, ya que no fue posible medir exactamente la temperatura del fluido a su paso por el capilar sino en la cámara del pistón, que la densidad afecta la viscosidad del fluido, y que pequeñas imperfecciones del material pueden modificar el flujo del fluido. Por otra parte, el coeficiente de descarga, que idealmente debe ser una constante de corrección, varió significativamente dependiendo de la caída

de presión; esto a pesar de que no se estudió el efecto de la temperatura sobre el caudal, pues las pruebas se ejecutaron con variaciones de temperatura menores a 1 %.

Para obtener un modelo teórico que represente mejor el comportamiento de los micro-caudales a través de los micro-capilares, es necesario examinar el efecto de los factores anteriormente mencionados, e incluir en el modelo aquellos que sean más relevantes. Igualmente, es de gran importancia evaluar el efecto de la temperatura sobre los micro-caudales generados al paso del fluido por los capilares. De esta manera el modelado matemático será más apropiado, ya sea logrando un modelo mecanístico más adecuado para micro-capilares, o por lo menos consiguiendo un modelo que pueda ser ajustado a los valores reales por medio de un coeficiente de descarga  $C_d$  constante (o con una tendencia uniforme para diferentes capilares, de modo que el modelo de ajuste sea más universal).

### CONCLUSIONES

Se logró caracterizar el flujo a través de 6 micro-capilares con función de la caída de presión a una temperatura cercana a 20 °C, utilizando la ecuación de Hagen-Poiseuille y un coeficiente de descarga. Este coeficiente de descarga no resultó constante para cada capilar, y se utilizó regresión lineal múltiple para ajustar su valor respecto a la caída de presión generada.

La caracterización del caudal de los micro-capilares permite determinar el flujo a través de éstos dependiendo de la caída de presión a través del capilar, de modo que controlando la presión de entrada y manteniendo constante la de salida se puede lograr los flujos deseados por cada línea de corriente activa en el DGT, con un rango de caudales importante.

El sistema de micro-capilares caracterizado permite obtener caudales entre 2,5 y 1200  $\mu\text{g/s}$ , lo que a su

vez le confiere la posibilidad al DGT de realizar mezclas dinámicas con relaciones de caudal de 2000:1 inclusive. De esta manera, el dispositivo permite generar gran cantidad de MR de diferente concentración a partir de un MRC y un gas de dilución, y es posible generar MR de concentraciones del orden de 0,1 ppm.

### REFERENCIAS

1. Hard S, F S. *Microfluidic Technologies for Miniaturized Analysis*: Springer; 2007.
2. International Organization for Standardization. 2003. *Gas analysis - Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods - Part 1: Methods of calibration*, ISO TC 158, ISO 6145-1.
3. Kawakita K, Pereira MT. *Experimental Investigation on Critical Flow Through Microorifices and Capillaries*. IPT-Institute for Technological Research. 2000:10.
4. Chakraborty J, S C. *Some Fundamental Aspects of Fluid Mechanics over Microscopic Length Scales. Mechanics Over Micro and Nano Scales*. 2011:1- 60.
5. Bomelburg H. *Estimation of Gas Leak Rates through Very Small Orifices and Channels*. 1977.
6. Olin J. *Capillary Tube Thermal Mass Flow Meters & Controllers*. Sierra Instrument. 2013.
7. Lemmon E, Huber M, MO M. *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties - REFPROP. 9.0*. 2010:<http://nist.gov/srd/nist23.cfm>.

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SCADA WEB PARA UN PROBADOR PORTABLE DE MEDIDORES DE GAS

Yésica Tatiana Zárate García, Christian Alexander Rovira Quijano, Oscar Yazit Salab García \*

Grupo 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:** La Corporación CDT de GAS desarrolló un probador portable con el propósito de realizar verificación de medidores de gas in situ. Con base en la experiencia adquirida por el Centro de Desarrollo, se ha brindado a este prototipo nuevos atributos respecto a modelos comerciales existentes, que le dan al dispositivo mayor portabilidad, confiabilidad y agilidad en las prácticas de verificación. Una de las innovaciones consistió en dotar el probador con un sistema SCADA que opera en entorno web, permitiendo el control, la supervisión, la adquisición y el análisis de datos desde cualquier dispositivo móvil, como computadores portátiles, tablets y celulares, sin requerir instalación de una aplicación de software; simplemente accediendo desde el navegador web que venga instalado por defecto en el dispositivo. Este objetivo se logra a partir de algunos cambios sobre la arquitectura básica del SCADA y del uso de herramientas de software especializadas.

Este artículo presenta los detalles de este desarrollo que incrementa la portabilidad del probador, eliminando la necesidad de instalar y configurar un conjunto de herramientas licenciadas para operarlo. Así mismo, proporciona la opción de publicar el SCADA en internet, para que los interesados en la verificación auditen el proceso desde la comodidad de su oficina.

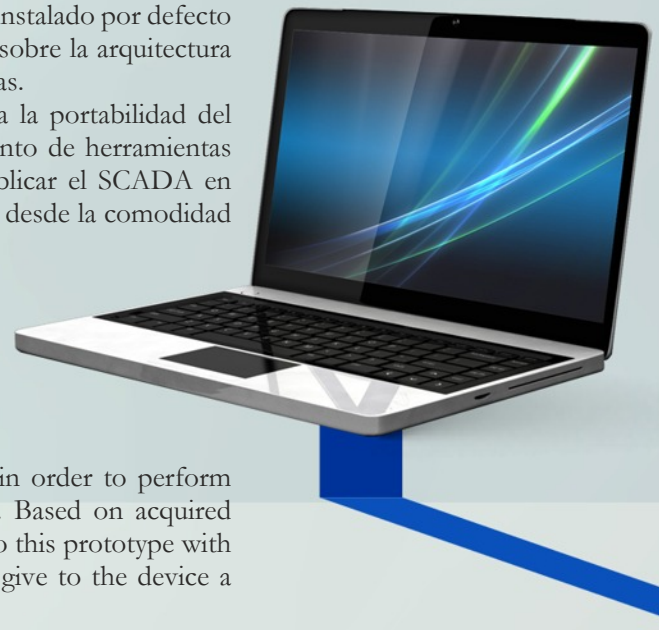
**Palabras clave:** Metrología, Probador, Verificación, Portabilidad

**Abstract:** CDT de GAS Corporation developed a portable prover in order to perform verification to metrological performance to field gas meters in-situ. Based on acquired experience of this Technological Development Center has provided to this prototype with new features with respect exists commercial models, in order to give to the device a better portability, reliability and agility in verification practices.

One of the new features consisted to endow the prover with SCADA system that works in web environment, allowing to do Supervisory, Control, Acquisition and Analyses of data since any mobile devices as laptops, tablets and smart phones, without require software app installation; only accessing from web browser installed by default in the device. This objective is accomplished after to do some changes over basic architecture of the SCADA and of use of specialized software tools.

This paper presents details of this develop that increase the prover portability, by eliminating the need of install and configure a group of licensed software tools. Furthermore, it provide the option of publish the SCADA in internet in order to whose interested in the verification can audit the process from comfort of his office.

**Keywords:** Metrology, Prover, Metrological Performance, Verification, Portability



\* osalab@cdtdegas.com





## 1. INTRODUCCION

Existe la necesidad de garantizar que los medidores de volumen de gas industriales instalados en campo, en los puntos de transferencia de custodia del gas natural, mantengan sus indicaciones con errores de medición dentro de los máximos permisibles establecidos en normas o regulaciones vigentes [1][2]. Para dar cumplimiento a este requerimiento es importante mantener prácticas de aseguramiento metrológico en las que se prevean no solo calibraciones de los medidores, sino también verificaciones periódicas en intervalos de tiempo convenidos por las partes involucradas en la transacción que se está cuantificando con el sistema de medición, o cuando alguna de ellas lo requiera.

A nivel nacional e internacional el aseguramiento metrológico se garantiza, principalmente, mediante calibraciones en laboratorio con niveles de incertidumbre inferiores a los valores exigidos en normas aplicables. Esta solución implica complicadas operaciones logísticas, con inconvenientes tales como riesgos de daños del medidor durante transporte, costos de envío, la existencia de periodos considerables de comercialización de gas sin medición, y costos asociados a la verificación en laboratorio.

Como una alternativa para disminuir de manera apreciable dichos costos y riesgos debidos a la logística para la verificación en un laboratorio, así como la optimización de los periodos de calibración de los medidores, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) ha diseñado y desarrollado un probador portable para verificación *in situ*.

Tradicionalmente, los probadores portables se han adquirido en nuestro país a fabricantes de origen extranjero, obteniendo de éstos soluciones tecnológicas adecuadas, pero que con el tiempo han evidenciado algunas desventajas como bloqueo sobre el origen de la información, imposibilidad de evaluar la transparencia en la presentación de los datos, y dificultades con el soporte técnico. A partir de un continuo proceso de apropiación del conocimiento en medición, y de los detalles propios de los procesos de verificación automatizados, se ha venido desarrollando este tipo de infraestructura a nivel local, con modelos de probadores para laboratorio con el sello del CDT de GAS.

Continuando con el proceso de desarrollo de probadores, el CDT de GAS ha construido un nuevo modelo de probador portable, diseñado para facilitar los procesos de verificación de medidores en campo. Para lograr dicho propósito, se orientó el diseño para que el

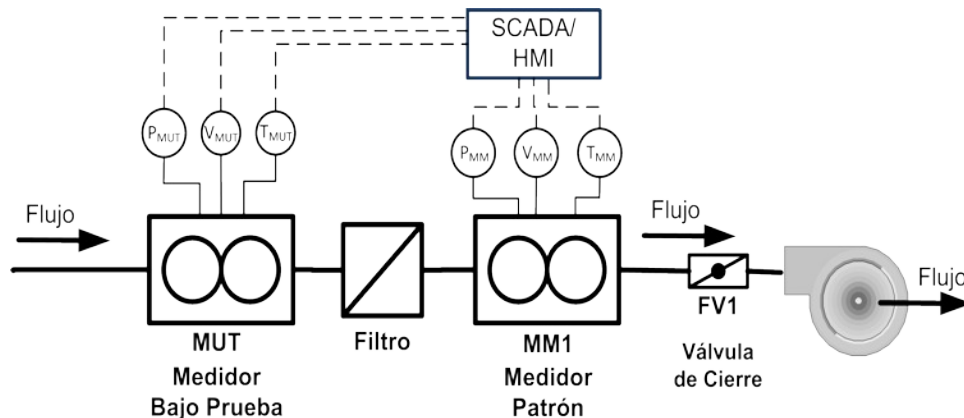
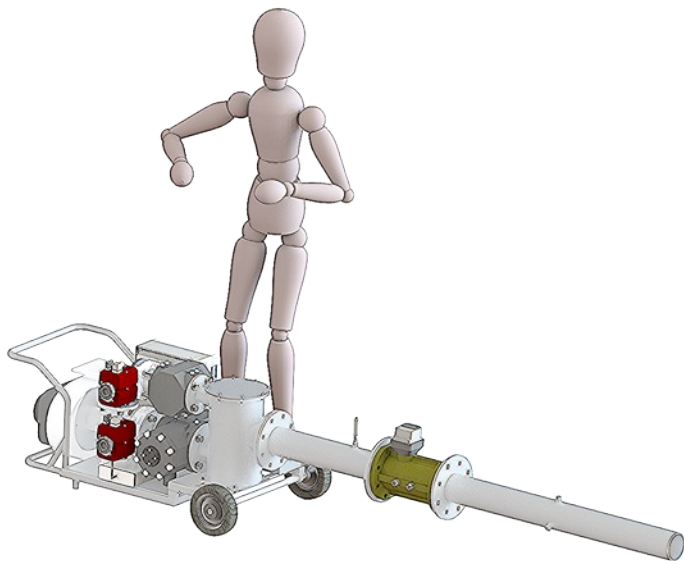


Figura 1. Probador de transferencia



**Figura 2.** Probador Portable GMP250

dispositivo sea compacto y liviano, así como robusto; que entregue resultados altamente confiables con niveles de incertidumbre acordes a las exigencias del proceso; que posea un alto nivel de automatización; y que como característica especial ofrezca la posibilidad de supervisar, controlar, adquirir los datos y visualizar el proceso de verificación desde un sistema *Supervisory Control And Data Acquisition* en entorno **web** (SCADA Web). De esta manera, la información puede ser accedida desde cualquier computador o dispositivo móvil, incluyendo portátiles, *smartphones* y *tablets*. El presente artículo describe el proceso de diseño e implementación de este sistema SCADA web.

### A. Antecedentes

Existen diferentes métodos para la verificación de medidores volumen *in situ*, como lo son:

- Determinación del flujo mediante la instalación medidores no intrusivos, tales como ultrasónicos *clamp-on*, sobre la línea[6].
- Determinación del flujo usando gases trazadores, método que se basa en la inyección de gas de una composición

conocida, aguas arriba del medidor para luego inferir el caudal de la línea a partir de los datos de composición obtenidos por un analizador aguas abajo[4].

-Uso de medidores máscos-térmicos de inserción, los cuales miden velocidad de gas y permiten inferir flujo.

-Comparación directa de las indicaciones entre un medidor de respaldo instalado en ramificación del sistema de medición y el medidor instalado.

El probador portable usa la configuración denominada “probador de transferencia”, que está compuesto por al menos un medidor patrón, un conjunto de instrumentos de medición de presión y temperatura, y una unidad que realiza el control, registro de datos y permite realizar supervisión del proceso a través de un PC. Estos dispositivos se han desarrollado para uso en laboratorios, pero también para uso en campo. La Figura 1 presenta un esquema de la distribución de componentes en un probador de transferencia.

A nivel nacional, el desarrollo de estos probadores para medidores de gas ha evolucionado lentamente, y el proceso de apropiación de conocimientos y experiencia en este tema inició hace tan solo 10 años atrás. Debido a esta limitante tecnológica, los probadores que poseen hoy en día diferentes empresas transportadoras y/o distribuidoras de gas han sido mayormente adquiridos a marcas extranjeras por medio de sus representantes autorizados.

La Corporación CDT de GAS ha podido adelantar procesos de desarrollo de tecnología gracias a la ejecución de proyectos auspiciados por COLCIENCIAS, con los cuales ha desarrollado infraestructura para el fortalecimiento propio y para la industria del gas natural, y ha generado conocimientos y experiencia. Soportado en éstas sólidas bases,



hoy en día se cuenta con la capacidad de diseñar y desarrollar bancos de verificación de medidores de gas *in situ*, con la suficiente robustez para enfrentar los diferentes fenómenos físicos que pueden presentarse en dichas infraestructuras, y acogiendo nuevas tecnologías de información.

### B. Descripción del Prototipo del Probador Portable

El probador portable tiene la capacidad de realizar verificaciones en diferentes zonas geográficas, y puede evaluar medidores de volumen de gas de tipo rotativo y turbinas, pues son los más comunes [5][6]. El intervalo de verificación del probador portable va desde 1 m<sup>3</sup>/h hasta 250 m<sup>3</sup>/h. La Figura 2 es una representación en perspectiva del probador portable.

El método usado en el probador portable corresponde a la comparación directa entre la indicación de volumen del *Master Meter* (MM), que se denota por  $V_{MM}$ , y la del *Meter Under Test* (MUT), que se representa como  $V_{MUT}$ . El modelo de medición del probador portable se presenta en la Ecuación 1.

La comparación entre los medidores se realiza usando aire a condiciones atmosféricas, y el resultado obtenido es el porcentaje de error del MUT (%E). El probador portable se diseñó para que el valor de la incertidumbre de la verificación fuera igual o menor al 0,5 %, teniendo en cuenta la naturaleza *in situ* del proceso, el propósito del probador y las recomendaciones de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) para verificaciones subsecuentes [8]. Algunos datos adicionales sobre el probador se presentan en la Tabla 1.

## II. METODOLOGÍA

### A. Requerimientos para el sistema SCADA del probador

En los probadores, las herramientas de *software* revisten gran importancia ya que son estas las que permiten la configuración, supervisión, control, registro de datos y finalmente la realización de cálculos, estimación de incertidumbre y emisión de un informe de resultados a partir de los datos obtenidos. Es importante que estas herramientas brinden un alto nivel de automatización, y que orienten al operario en cada una de las etapas del proceso de forma tal que se minimicen posibles errores humanos y se dé mayor rapidez a su ejecución. Por tanto se requiere para que el probador opere de forma totalmente automatizada que conste, como mínimo, de dos aplicaciones:

- Un sistema SCADA
- Una Herramienta para el Análisis de Datos (HAD)

Las Tabla 1 y 2 recopilan las funciones que deben cumplir el SCADA y la HAD, respectivamente.

Tradicionalmente, el software SCADA, está supeditado a ser usado en un PC, al cual se le instala la plataforma para con la cual se logra ejecutar el sistema. Para estas plataformas se requiere licencias de uso, para cada PC en el que se requiera implementar. Junto a la instalación, estas plataformas requieren un conjunto de configuraciones adicionales. En la mayoría de los casos, por ejemplo, el diseño de la HMI, queda fijado a una única resolución de pantalla, restringiendo el uso en otros dispositivos de resolución diferente. En otros casos se requiere configurar para este PC una IP fija. En cuanto al hardware, la mayoría de los SCADA, requiere de

$$\%E[\%] = \left[ \left( \frac{V_{MUT}}{V_{MM}} \cdot \left( \frac{P_{MUT} \cdot (T_{MM} + 273.15)}{P_{Mm} \cdot (T_{MUT} + 273.15)} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\%ep}{100} \right) \right) - 1 \right] \times 100 \quad (1)$$

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Medidores objetivo	Rotativos y turbinas de DN 50 mm -100 mm
Medidores patrón	El probador usa dos medidores patrón, tipo rotativo. Un medidor rotativo de doble lóbulo para eliminar efectos por pulsaciones sobre medidores bajo prueba en altos caudales.
Intervalo de operación	1 m <sup>3</sup> /h a 250 m <sup>3</sup> /h Estabilidad de ±2% de cada caudal de prueba.
Temperatura de operación	10 °C a 40 °C
Presión atmosférica de operación	500 hPa a 1200 hPa
Incertidumbre relativa al error de medición	U = 0,50% (k=2) para 1 m <sup>3</sup> /h = Q = 6,5 m <sup>3</sup> /h
	U = 0,50 % (k=2) para caudales entre 6,5 m <sup>3</sup> /h = Q = 250 m <sup>3</sup> /h
Hardware de automatización	Controlador PAC ( <i>Programmable Automation Controller</i> )
Adquisición de Pulsos	Se adapta a todos los tipos de señal de pulsos disponibles en la actualidad: NAMUR, Contacto Seco, Colector Abierto y Activas.
Alimentación eléctrica	1Φ /110 VAC/60 Hz – 8A
Peso aproximado	Aprox. 70 Kg

*Tabla 1. Especificaciones técnicas probador*

una conexión cableada. En los casos en los que la planta automatizada es estática, las anteriores actividades no representan un problema, sin embargo limitan la operación de un SCADA para un dispositivo portable como el que se desarrolló.

Las herramientas de análisis de datos están desarrolladas, en la mayoría de casos sobre software de cálculos, para las cuales se requiere un instalador y una licencia de usuario, representando así un costo adicional.

Con el fin de facilitar el acceso, se planteó, para el software de control y de análisis de datos, el requerimiento de poder ser ejecutado desde cualquier dispositivo móvil y con el mínimo de procedimientos previos a su uso.

### **B. Selección de Hardware del SCADA**

La selección del hardware para el SCADA Web se basó en el reconocimiento de las diferentes actividades que debe realizar el SCADA para llevar a cabo un proceso de verificación de un medidor, así como el flujo de información que existe entre las diferentes etapas. La estructura operativa resultante del SCADA Web se presenta en la Figura 3, y la Tabla 4 incluye la descripción de las actividades de dicha estructura. La información de los procesos de verificación se almacena en una base de datos con el fin de centralizar, organizar y facilitar las labores de consulta, y tener la posibilidad de integrar el probador a un Sistema de Ejecución de Manufactura (MES) o Sistema de Planeación de Recursos (ERP) de la empresa.

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
Interfaz de Usuario	Permite realizar la Configuración y la supervisión del proceso de verificación.
Secuencia de verificación	Ejecuta el procedimiento de verificación de medidores de gas de manera automática
Diagnóstico de aptitud de instrumentos de medición de magnitudes secundarias	Evalúa automáticamente que los instrumentos de temperatura, presión y humedad relativa se encuentren conectados y en condiciones aptas para iniciar el proceso de verificación.
Selección de patrón a usar	Selecciona el patrón de forma automática por medio de válvulas de control.
Ajuste de caudal	Ajusta cada caudal de la verificación de manera automática.
Evaluación de Hermeticidad	Prueba de fugas automática de acuerdo a método reconocido.
Corrección del error de los instrumentos de medición de magnitudes secundarias	Ejecuta algoritmo de corrección del error de los instrumentos de temperatura, presión y humedad relativa se encuentren conectados.
Registro de Datos del Proceso	El SCADA debe registrar la información obtenida del proceso de calibración
Visualización de gráficos de tendencias	Permite visualizar en ejes coordenados los valores de las diferentes variables del proceso de verificación de medidores de gas.

**Tabla 2.** Funciones del SCADA

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
Organización de Datos	Organizar y adecuar los datos para facilitar labores de análisis.
Ejecución de Cálculos	Todos los cálculos necesarios para la determinación del %E y la estimación de incertidumbre asociada.
Visualización de los datos	Presentación de los datos usados en los cálculos.
Emisión de resultados	Informe generado automáticamente

**Tabla 3.** Funciones de la HAD

Para cumplir con los requisitos operativos definidos, se estableció una estructura de *hardware* como la que se presenta en la Figura 4. Esta configuración hace posible que el PAC ejecute la rutina de verificación automatizada, la adquisición de datos, el control del caudal y accionamiento de válvulas. Se incluyó un dispositivo procesador que se denomina “Servidor SCADA”, el cual permite alojar la base de datos, gestionar los datos provenientes del controlador y ejecutar la aplicación SCADA Web.

Para dar acceso desde cualquier dispositivo móvil, es indispensable un dispositivo de comunicaciones. Para esto se integró un dispositivo *Gateway* que genera una pequeña red local (*Ethernet*) para comunicar el controlador con el Servidor SCADA de forma tal que los datos del proceso sean transportados hacia la base de datos con la confiabilidad que ofrece una red cableada.

Este mismo *Gateway* permite generar una red local wifi para que los dispositivos móviles se



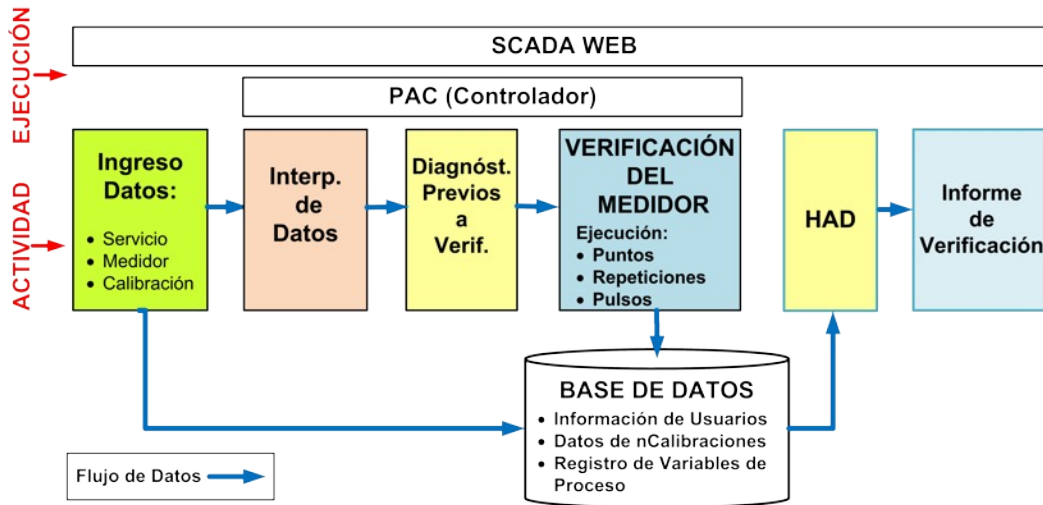


Figura 3. Actividades del proceso de verificación.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	EJECUTA
1. Ingreso de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos del medidor de identificación del medidor.</li> <li>• Especificaciones técnicas del medidor bajo prueba.</li> <li>• Datos de configuración de la prueba: valores de caudal, repeticiones y volúmenes.</li> </ul>	SCADA WEB + Base de Datos
2. Interpretación de datos	Proceso en el cual se interpretan y se adecuan los datos de forma tal que la plataforma de automatización ejecute el proceso de verificación de forma confiable.	SCADA WEB PAC
3. Diagnósticos previos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificación de la aptitud de los instrumentos de medición para iniciar una prueba.</li> <li>• Prueba de hermeticidad.</li> <li>• Diagnóstico de recepción de pulsos</li> </ul>	SCADA WEB PAC
4. Verificación de medidores	Ejecución de la rutina de verificación, la cual se resume en un bucle que realiza acciones de control con el fin de registrar volúmenes, presiones y temperaturas de los medidores MM y MUT a diferentes tasas de caudal.	SCADA WEB PAC + Base de Datos
5. Análisis de Datos	A partir de los datos registrados hacer cálculos y estimaciones de incertidumbre.	SCADA WEB + Base de Datos
6. Emisión de Informe	Generar un informe de resultados, acorde a requisitos especificados por normas aplicables.	SCADA WEB PAC

Tabla 4. Descripción de actividades del probador

puedan conectar y acceder al SCADA Web en el sitio. Este dispositivo *Gateway* también brinda al probador la posibilidad de acceder a la red 3G, y con esto la facilidad de dar acceso remoto desde una amplia variedad de lugares.

### C. Desarrollo de aplicación SCADA Web

Tras integrar el hardware necesario, se procedió al desarrollo del SCADA Web. Se decidió implementar una configuración de software basada en cuatro elementos:

- Servidor OPC del fabricante del PAC
- IntegraXor (Servidor Web para desarrollo de SCADA)
- MySQL (Base de datos)
- Inkscape (Editor gráfico)

Estos elementos están instalados en el Servidor SCADA, e interactúan entre sí de acuerdo a las líneas de flujo de datos presentadas en la Figura 5.

El servidor OPC [9] [10] es una aplicación de software que cumple con unas especificaciones dadas por la organización *OPC Foundation*. Esta aplicación sirve como interfaz para comunicar

datos nativos del controlador, que vienen dados en protocolos propios del fabricante, para que sean usados bajo parámetros estándar por una aplicación “Cliente OPC”, para que ésta última, pueda tener acceso a los datos en tiempo real, monitorear alarmas y eventos, acceder a datos históricos, y otras aplicaciones. En este caso, el Servidor OPC sirve para transmitir datos entre la estrategia de automatización que opera en el controlador y el segundo elemento de software (IntegraXor).

IntegraXor es una plataforma para desarrollar SCADA basado en Web que cumple cuatro funciones específicas: (1) adquiere datos en protocolo OPC; (2) permite el desarrollo de las aplicaciones y páginas web en HTML, que comprenden las pantallas de la HMI y la HAD; (3) permite configurar y ejecutar una estructura de registro de datos obtenidos en la verificación en la base de datos; (4) posee una aplicación “Servidor Web” que lanza el SCADA como una página web en una red local o en internet.

Como último paso, se desarrolló la interfaz gráfica de usuario. Para este fin se integraron las aplicaciones de software IntegraXor y una versión adaptada para SCADA de la herramienta para edición gráfica Inkscape. Ésta última herramienta está enfocada en la edición de gráficos *Scalable Vector Graphics* (SVG), permitiendo que las pantallas de la interfaz se redimensionen sin pérdida de resolución, y se adapten fácilmente a pantallas de diferentes tamaños. Inkscape permitió desarrollar cada una de las pantallas y asociar los atributos (movimiento, color, visibilidad y valor, entre otros) de cada uno de los elementos que se muestran con cada una de las variables manejadas en IntegraXor.

El registro de los datos de proceso se hace en una base de datos realizada con MySQL, y administrada por IntegraXor.

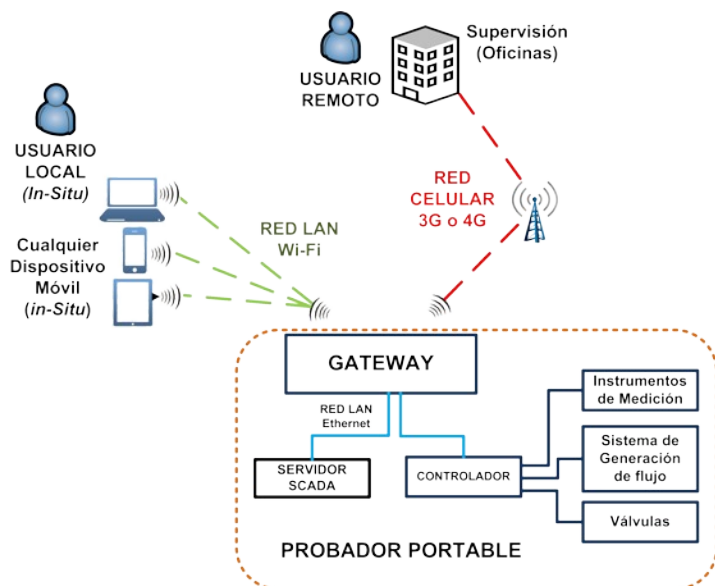


Figura 4. Estructura hardware

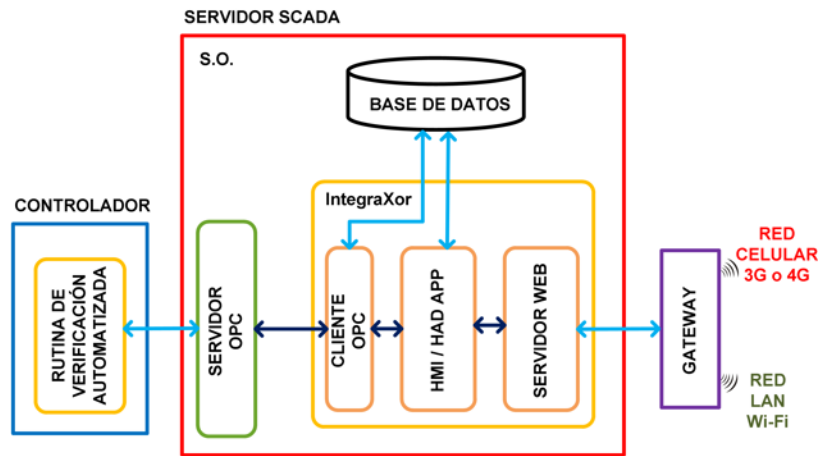


Figura 5. Configuración del software

### III. RESULTADOS

Como resultado se obtuvo un sistema SCADA que opera de acuerdo a la secuencia de pantallas que se muestran en las siguientes figuras:

Para ingresar a la página del SCADA WEB, es necesario estar en red (para este caso la red local de wifi) y luego digitar la dirección en el navegador web (por ejemplo) : [http://192.168.0.55:7131/SCADA\\_PROVER/](http://192.168.0.55:7131/SCADA_PROVER/); como se observa en la Figura 7 aparece la primera pantalla con el botón “Inicio”.

Al pulsar en “Inicio”, se presenta la primera ventana de configuración, en la que se solicita ingresar la información necesaria para la verificación como se observa en la Figura 8.

Una vez se han ingresado todos los datos, al pulsar siguiente se da acceso a la ventana de caudales (ver

Figura 9), en esta ventana se eligen los valores de caudal de la prueba que se ejecutarán de manera automática y en la secuencia seleccionada en la ventana anterior.

La siguiente ventana es la de verificación de instrumentos, está verificación se realiza de forma automática y se muestran los resultados al final, los cuales pueden ser de dos tipos: OK, tal como se muestra en la Figura 10 en la que se observa que la verificación de instrumentos ha sido exitosa, o como se muestra en la Figura 11, en la que se ha presentado una falla en un instrumento de presión.

A continuación de verificación de instrumentos, se realiza la prueba de hermeticidad del sistema (ver Figura 12), con la que se busca garantizar que no existan fugas en el tramo de tuberías comprendido entre el MUT y MM. Una vez se ha

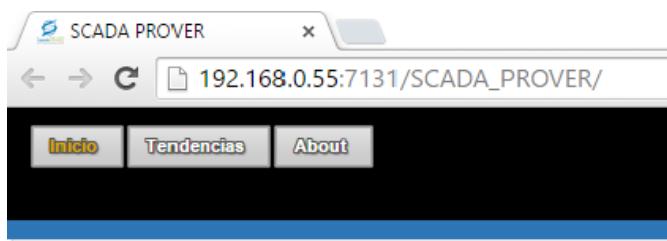


Figura 6. Dirección web del SCADA



Figura 7. Pantalla de inicio



**Datos de Verificación** 28 / 8 / 2015

**Datos del Servicio**

Solicitante: LAB. MÓVIL ID de Servicio: ID  
 Dirección: Sede UIS Guatigurá Calibrado Por: Yesica Zárate

**Datos del Medidor**

Fabricante: Dresser Número de Serie: 21200506  
 Designación: IM-RM G100 Tipo de Medidor: Rotativo

**Especificaciones**

Kfactor: 3773.58 Pulsos/m<sup>3</sup> Tipo Señal: Contacto Seco  
 Qmin: 2 m<sup>3</sup>/h Secuencia: Descenso  
 Qmax: 100 m<sup>3</sup>/h Estado: Nuevo

**Siguiente**

*Figura 8. Pantalla de ingreso de datos del servicio del MUT*

**Datos de Verificación**

**Caudales**

	Caudal	Repeticiones	Pulsos	Volumen	Duración por Rep.
<input checked="" type="checkbox"/> Q1	160 m <sup>3</sup> /h	3	30189	8 m <sup>3</sup>	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> Q2	74.26 m <sup>3</sup> /h	3	14013	3.71 m <sup>3</sup>	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> Q3	34.47 m <sup>3</sup> /h	3	6504	1.72 m <sup>3</sup>	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> Q4	16 m <sup>3</sup> /h	3	3019	.8 m <sup>3</sup>	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> Q5	7.43 m <sup>3</sup> /h	3	1402	.37 m <sup>3</sup>	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> Q6	3.45 m <sup>3</sup> /h	3	651	.17 m <sup>3</sup>	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> Q7	2 m <sup>3</sup> /h	3	378	.1 m <sup>3</sup>	3:00 min.
<input type="checkbox"/> Q8	m <sup>3</sup> /h			m <sup>3</sup>	min.
<input type="checkbox"/> Q9	m <sup>3</sup> /h			m <sup>3</sup>	min.
<input type="checkbox"/> Q10	m <sup>3</sup> /h			m <sup>3</sup>	min.

**Regresar** **Continuar**

*Figura 9. Pantalla de configuración de la prueba*

**Verificación de Instrumentos** 28 / 8 / 2015

**Estado de Instrumentos**

Item	Detalle	Estado
TT1	OK	✓
TT2	OK	✓
TT3	OK	✓
TT4	OK	✓
PT1	OK	✓
PT2	OK	✓
DPT1	OK	✓
RHT1	OK	✓

The schematic diagram shows a gas meter assembly with various instruments connected to it. The instruments are labeled as TT1, TT2, TT3, TT4, PT1, PT2, DPT1, and RHT1, each with a green checkmark indicating successful verification.

*Figura 10. Verificación de instrumentos - exitosa*

aprobado la hermeticidad del sistema, se procede con el diagnóstico de recepción de pulsos. En esta etapa se evalúa que las señales pulsos, que representan el volumen indicado tanto por los MM y del MUT, sean adquiridas de manera adecuada.

Superados los diagnósticos previos se ejecutan los puntos configurados para la verificación. La ejecución de cada punto comprende el ajuste de cada valor de caudal, y el registro de las variables medidas, durante cada repetición. Durante la prueba se pueden observar en tiempo real los valores de las variables del proceso así como el estado de los actuadores involucrados.

#### IV. DISCUSIÓN

Este desarrollo permitió incursionar en una aplicación de SCADA web a partir del uso de unos elementos específicos de software y hardware, así como de una configuración particular para la interacción de estos componentes, logrando con esto una primera versión que cumple con los

requerimientos especificados en su diseño, y que permitió llevar a cabo el proyecto dentro del tiempo establecido. Aun así, para brindar mayor robustez, confiabilidad y seguridad al proceso es necesario generar próximas versiones en las que se implementen varias mejoras. La primera de estas mejoras debe estar orientada a implementar una estrategia de seguridad para el acceso y la transmisión de datos; y en segundo lugar brindar mecanismos de redundancia que salvaguarden la integridad de los datos adquiridos, en procesos de verificación presentes como en los anteriores, cuando se llegasen a presentar fallas en el sistema.

También es importante mencionar dentro de este proceso de mejoramiento continuo para el SCADA del Probador, que se debe poner como punto el conocimiento adquirido en esta primera versión, para proponer, analizar y probar, nuevos elementos de software y hardware, con el fin de generar nuevas versiones con mejores capacidades a la vez que se optimicen los recursos invertidos.

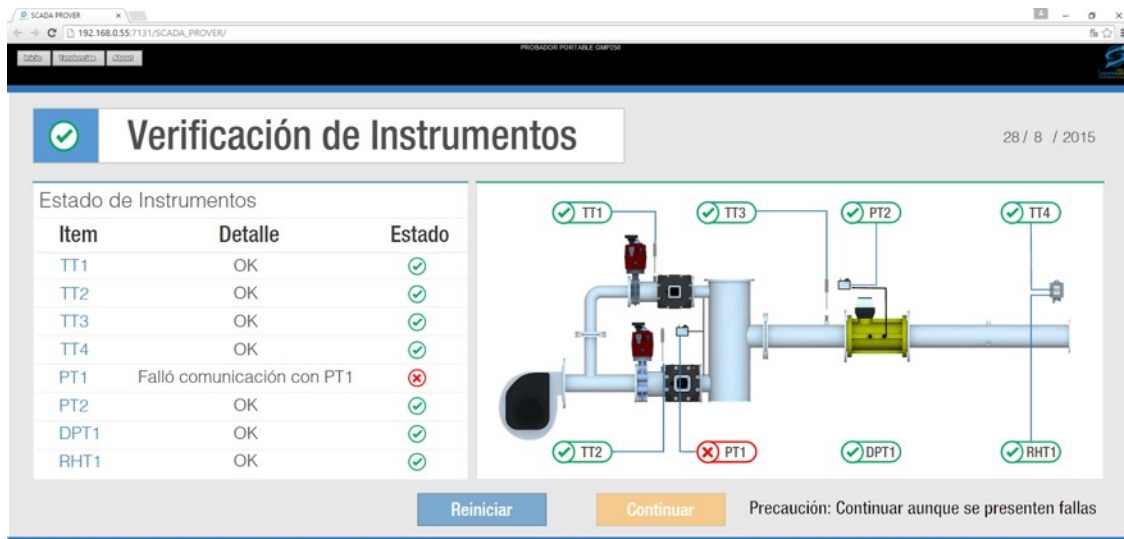


Figura 11. Verificación de instrumentos - fallo en instrumento de presión

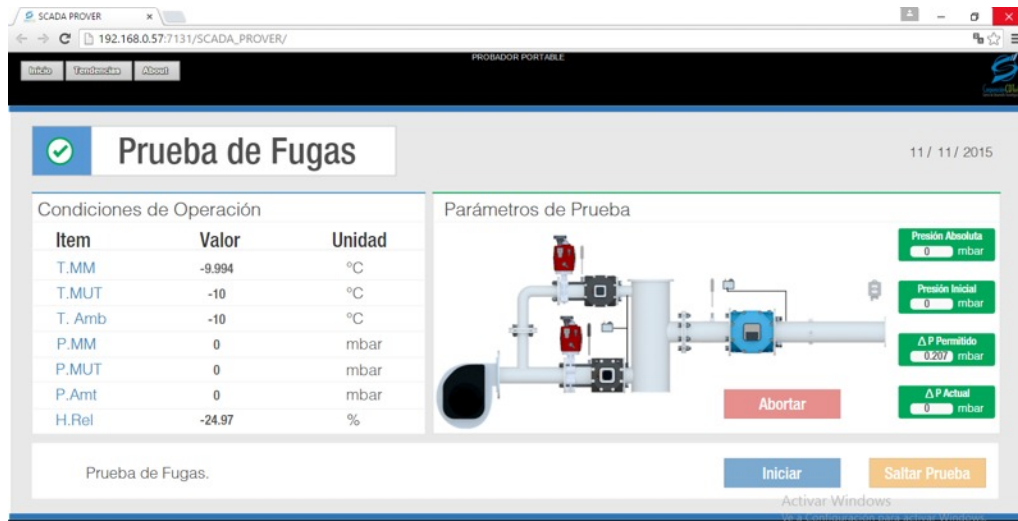


Figura 12. Prueba de fugas



Figura 13. Pantalla de la verificación

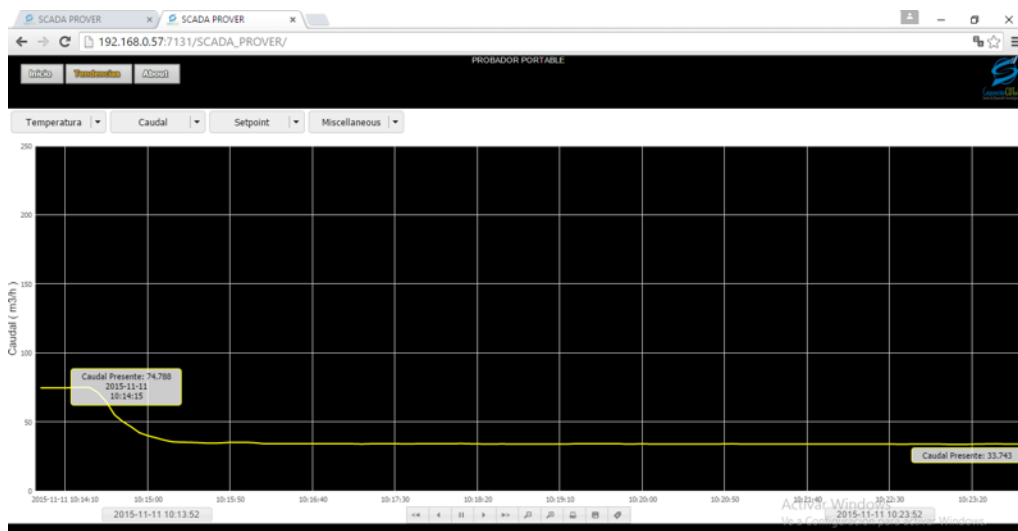


Figura 14. Ajuste de caudal - tendencia

## V. CONCLUSIONES

La Corporación CDT de GAS logra desarrollar un nuevo equipo, "Probador Portable" orientado a facilitar las operaciones de evaluación del desempeño metrológico de los medidores de gas de campo, mediante verificaciones *in situ*.

Se logra dotar el Probador Portable de una aplicación SCADA Web a la medida que permite realizar las verificaciones de medidores de gas haciendo supervisión, control, registro y análisis de datos desde un dispositivo móvil, mediante el uso de su navegador web, sin la necesidad de instalar un aplicativo específico.

Este desarrollo ha sido posible a partir de la integración de tres aplicaciones de software específicas como lo son un servidor OPC provisto por el fabricante del PAC, un servidor web para generar la aplicación SCADA, un editor gráfico para generar la HMI y finalmente el registro de las variables de interés realizado en la base de datos MySQL, permite la fácil manipulación de los datos para la generación de los resultados de verificación. Este desarrollo cumple con requerimientos planteados, pero es importante brindar un producto más robusto pero a la vez más económico.

## VI. REFERENCIAS

- [1] CREG, "Resolución CREG 071 de 1999 - Reglamento Único de Transporte." *Diario Oficial*, 1999.
- [2] OIML *Measuring systems for gaseous fuel*, OIML International Recommendation OIML R140-e07. 2007.
- [3] George, DL., *Evaluation of Clamp-On Ultrasonic Meters as In-Situ Meter Verification Tools*, Report to PRCI, Contract PR-015-05602, 2006.
- [4] Riezebos H, van Essen G, *New tools for In-Situ Checking of gas Flow Meter*. International Gas Union Conference. 2011. Seoul, Korea.

[5] Abril Blanco H, Ortiz Afanador JM. *Desarrollo de laboratorio móvil para Aseguramiento Metrológico de Calidad y Cantidad de Gas Natural tipo Transferencia Custodia en Colombia*. MET&FLU 2013; 8: 8-13.

[6] Abril Blanco H, Ortiz Afanador JM, Fuentes Osorio J. *Verificación de medidores ultrasónicos a baja presión como una solución eficiente para procesos de confirmación sugerido en la ISO 10012*. MET&FLU 2013; 8: 16-22.

[7] BIPM, "Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)." BIPM, 2008.

[8] OIML *Gas Meters*, OIML International Recommendation OIML R137-1-2 e12. 2012.

[9] MatrikonOPC. *Que es un Servidor OPC?*. Disponible en: <http://matrikonopc.es/opc-servidor/index.aspx>. Accedido: Octubre 30,2015.

[10] OPC Foundation. *What is OPC?* Disponible en: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/> Accedido: Octubre 30,2015.

[11] IntegraXor Web SCADA .Disponible en: <http://www.integraxor.com/> Accedido: Octubre 30,2015.

[12] Inkscape. *What is Inkscape?* Disponible en: <https://inkscape.org/en/about/> Accedido: Octubre 30,2015.



# DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN EN MARMITAS AUTOGENERADORAS DE VAPOR COMO ALTERNATIVA PARA PROMOVER SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DESCENTRALIZADO EN APLICACIONES DE PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS

*Víctor José Manrique Moreno*

*Grupo 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:** Los esquemas de calentamiento descentralizado ofrecen oportunidades de flexibilidad y eficiencia en diversos procesos industriales, frente a los esquemas de calentamiento centralizado. De esta forma es posible reemplazar, por ejemplo, una red de distribución de vapor al interior de una planta, por una red interna de distribución que suministre gas natural a un quemador en cada equipo o unidad de proceso. En particular, para el sector de procesamiento de alimentos a escala semi-industrial y comercial, las marmitas autogeneradoras de vapor son una alternativa para la implementación de estos esquemas. Este artículo presenta los antecedentes y avances en desarrollo tecnológico por parte de CDT de GAS, de un innovador prototipo de marmita autogeneradora de vapor, a gas natural, así como los resultados de evaluación de su desempeño energético.

**Palabras clave:** *sistema de calentamiento descentralizado, sistema de calentamiento centralizado, marmita autogeneradora de vapor, eficiencia energética*

## 1. INTRODUCCIÓN.

En Colombia, el sector industrial representa el 24 % de la demanda final de energía, la cual se caracteriza por un uso principalmente térmico. Esta energía térmica es suministrada por carbón (35 %) y gas natural (28 %) entre otros combustibles [1].

De acuerdo con el diagnóstico del Plan Indicativo PROURE 2010-2015, las mayores ineficiencias en la industria colombiana están asociadas a la obsolescencia tecnológica de los equipos térmicos y eléctricos (principalmente calderas y motores de baja eficiencia), al uso de sistemas de calentamiento indirecto en los procesos, y a la falta de buenas prácticas operacionales y de gestión de energía. En relación a esta problemática se han desarrollado numerosos mecanismos e incentivos para

promover la eficiencia energética, incluyendo la optimización de procesos de combustión y del uso de calderas [2].

Recientemente la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) con Colciencias, han patrocinado estudios de caracterización de los consumos energéticos de diferentes procesos, usos y equipos en sectores manufactureros. Estos estudios han permitido determinar, por ejemplo, que en los sectores manufactureros como alimentos y bebidas, tabaco, textiles, cuero, madera, papel y cartón, el uso de energía térmica representa hasta el 82 % de su demanda total de energía, y se emplea en gran medida para generación de vapor. Así mismo, se han identificado las siguientes acciones, como prioritarias para mejorar la eficiencia energética en el sector industrial [3]:

- Incremento de la eficiencia energética en calderas pirotubulares con combustibles gaseosos, principalmente de gas natural.
- Implementación de sistemas de calentamiento directo, y de calentamiento descentralizado

Este artículo presenta las marmitas autogeneradoras de vapor, a gas natural como una tecnología para la cocción de alimentos a nivel comercial y semi-industrial, que permite la migración de sistemas de calentamiento

centralizado (caldera de vapor) hacia sistemas descentralizados (marmitas autogeneradoras de vapor) basados en gas natural.

El prototipo de marmita desarrollada por CDT de GAS está dirigido principalmente a las PyMEs de procesamiento de dulces semielaborados de fruta y leche, y cocinas institucionales y comerciales. De esta forma, el CDT de GAS busca llevar al mercado una solución tecnológica apropiada, eficiente y accesible que impulse su competitividad y sostenibilidad integral de sus sectores de interés.



### 1.1 Sistemas de calentamiento descentralizado

En un sistema centralizado de suministro de calor, generalmente se genera vapor en una caldera, y se transporta a través de tuberías hasta cada equipo o unidad de proceso de la planta (ver Figura 1).

Estos esquemas centralizados son útiles en grandes plantas basadas en combustibles sólidos o líquidos, en donde no es posible distribuir el combustible a cada equipo de proceso que demanda calor. Sin embargo, presentan las siguientes desventajas:

- Requieren redes de distribución de vapor.
- Requieren generar vapor a presiones relativamente altas, para atender diferentes presiones de operación, y vencer las pérdidas por distribución.
- El sistema central debe operar siempre, incluso si la demanda es menor que la proyectada.

### 1.2 Sistemas de calentamiento descentralizado

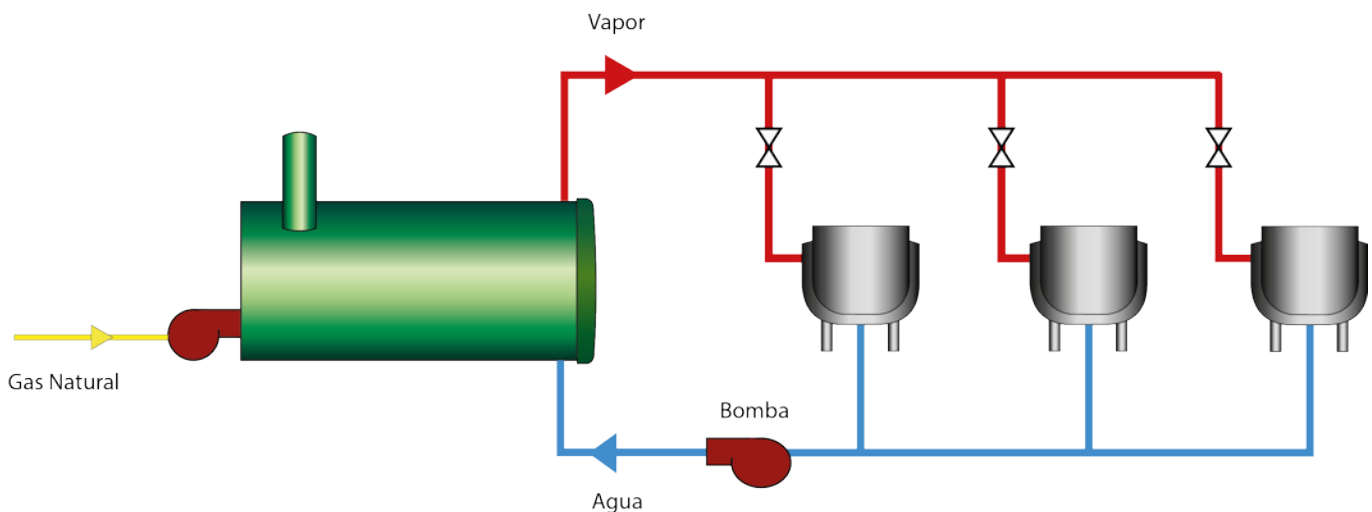
Como se mencionó anteriormente, una de las acciones prioritarias identificadas para mejorar la eficiencia energética en el sector industrial es la implementación de sistemas de calentamiento descentralizado [4].

Los sistemas de calentamiento descentralizado permiten satisfacer las demandas de calor a partir de gas natural, mediante un quemador ubicado directamente en cada proceso o equipo. De esta manera, es el combustible el que se distribuye al interior de la planta como portador energético, y no el vapor (Figura 2).

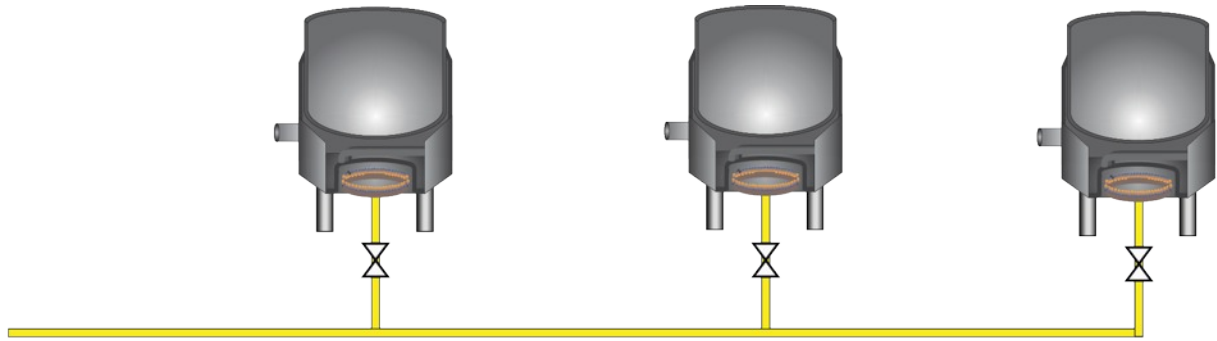
Algunas ventajas que presentan los sistemas de calentamiento directo y descentralizado con respecto a los sistemas centralizados basados en calderas de vapor son los siguientes:

- Mayor eficiencia porque no existen pérdidas de energía por transporte y reducción de presión del vapor.
- Mayor eficiencia energética porque los sistemas operan a carga nominal, en un sistema centralizado la caldera puede operar a carga parcial cuando algún proceso demandante de vapor está inactivo.
- Se mejora la productividad de los procesos porque se garantiza una disponibilidad más rápida del calor, en un sistema centralizado ocurren tiempos muertos para llevar la caldera a régimen [4].

Adicionalmente, un esquema descentralizado permite operar con presiones de vapor más bajas respecto a las requeridas con una sistema



**Figura 1.** Esquema de calentamiento centralizado. El vapor generado en una caldera central se distribuye a cada unidad/equipo del proceso.



Gas Natural

*Figura 2. Esquema de calentamiento descentralizado. El combustible (gas natural) se distribuye hasta cada unidad/equipo, en donde se calienta localmente.*

centralizado de caldera, con los consecuentes ahorros de energía [5].

## 2. MARMITAS DE VAPOR DIRECTO VS MARMITAS AUTOGENERADORAS DE VAPOR

Una marmita es un recipiente metálico de forma semi-esférica, para la cocción de alimentos u otros productos. Las marmitas se diferencian de otros recipientes porque cuentan con una doble pared o "chaqueta" por donde se hace circular un fluido térmico (generalmente, vapor de agua) el cual permite calentar de forma indirecta el producto a una temperatura controlada (limitada a 100°C-150°C), en función de la presión de saturación del vapor circulante.

El agua que se condensa al interior de la marmita se evacúa y retorna a la caldera por bombeo, para volver a generar vapor. En este caso, se denomina "marmita de vapor directo", y opera en un sistema de calentamiento centralizado.

Por su parte, una "marmita autogeneradora de vapor" es una variante de las marmitas de vapor directo, en donde la chaqueta de vapor se modifica para permitir que contenga una cantidad fija de agua (para generación de vapor), y se acondiciona un sistema de calentamiento por combustión de gas natural o por resistencias eléctricas [6].

Dado que el vapor se condensa dentro de la misma chaqueta en donde se evapora, todo el condensado se recupera y está disponible inmediatamente para ser evaporado nuevamente (sin necesidad de sistemas de bombeo o líneas adicionales).

En el caso de calentamiento por combustión de gas natural, el aprovechamiento óptimo de la energía está determinada por la eficiencia del intercambiador de calor entre los gases de combustión y el agua de vaporización.

El diseño de este intercambiador de calor debe permitir una alta eficiencia (maximizando el área de transferencia de calor y el tiempo de permanencia de los gases) pero además debe integrarse completamente dentro del cuerpo de la marmita, junto con los componentes de control y seguridad y combustión. Así mismo, debe cumplir los requerimientos de resistencia a la presión y temperatura de operación, y a la corrosión.

### 2.1 Antecedentes Históricos.

La primera marmita (de vapor directo) fue patentada por Edward Witheley en 1881 en Estados Unidos (Patente US251751 A). Sin embargo, algunas fuentes atribuyen el crédito de la invención a Alfred Groen, quien en la década de 1890 comenzó una fábrica de marmitas



llamada Groen Co. la cual actualmente opera bajo el nombre Unified Brands (Figura 3).

La marmita de Witheley consiste en la forma básica junto con el principio de operación de una "marmita de vapor directo" convencional.

En 1905, George Dickson obtuvo la primera patente de una marmita autogeneradora de vapor (Patente US 798498 A), como su nombre lo indica, genera por sí misma el vapor que necesita y por tanto permite prescindir de la caldera (Figura 4).

A partir de esta invención, durante el siglo XX surgen diferentes variaciones e innovaciones en cuanto a la forma de calentamiento (gas, eléctrica,

o vapor directo), el estilo (fija o volcable) y las facilidades adicionales, como por ejemplo diferentes sistemas de agitación, o de drenaje.

## 2.2 Contexto Internacional

Actualmente Cleveland Range y Unified Brands (Groen) son los fabricantes líderes en innovación y producción de marmitas autogeneradoras de vapor en Estados Unidos. Cada compañía ofrece modelos de marmitas de vapor directo y marmitas autogeneradoras tanto en versión eléctrica, como a gas.

Los modelos más recientes de marmitas de Groen (<http://www.unifiedbrands.net/>) se basan en la

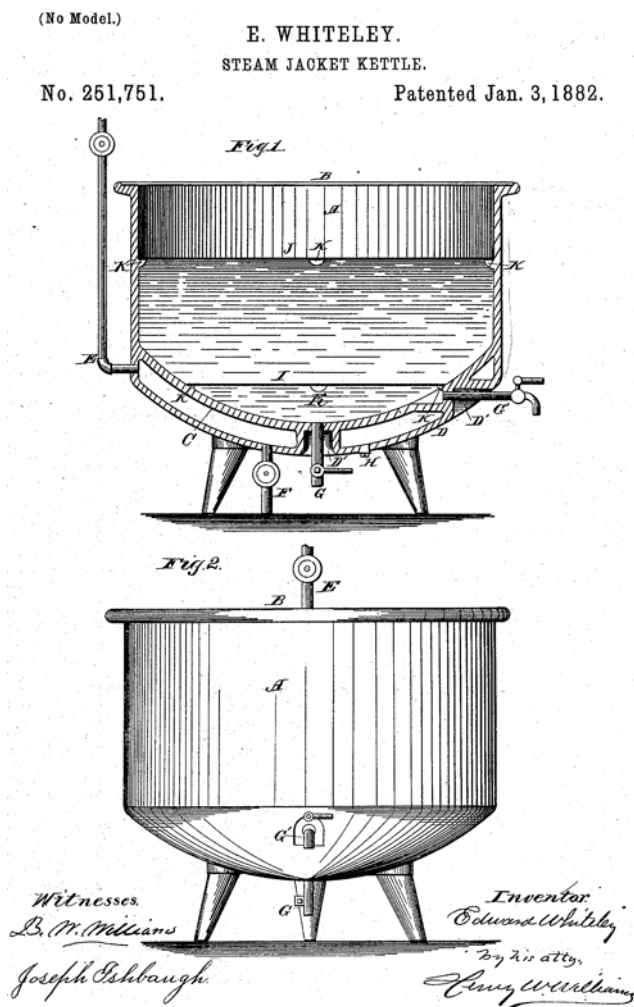


Figura 3. Marmita de vapor directo de Witheley, 1882 [7].

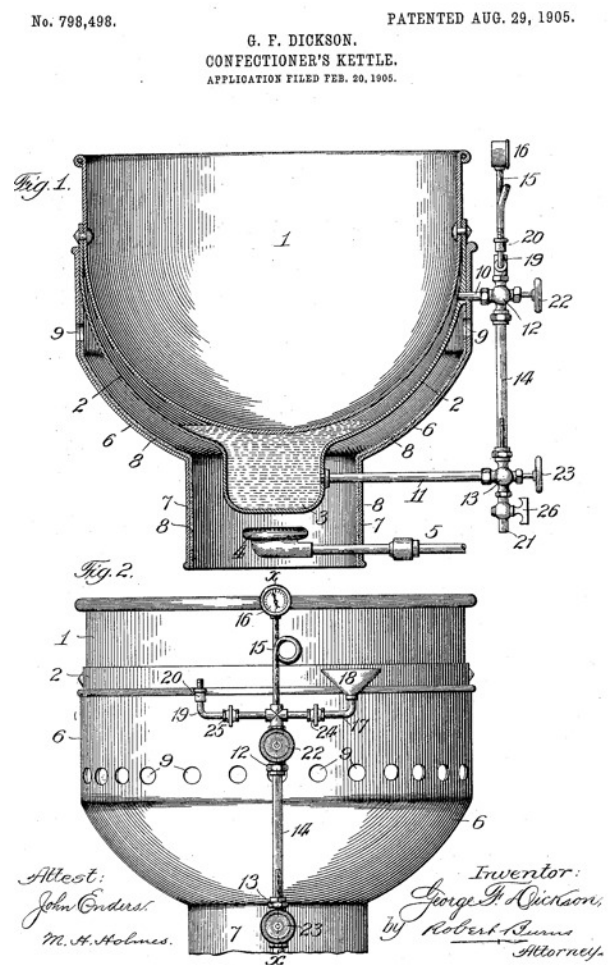


Figura 4. Marmita autogeneradora de vapor de Dickson - 1905 [8].

patente US4343292 A de 1982, y otras patentes anteriores. En este diseño, la generación de vapor ocurre dentro de una serie de tubos aleteados, que toman el agua desde la parte inferior de la chaqueta de vapor, y la conducen al exterior de la marmita, donde se calientan por los gases de combustión provenientes de un arreglo de quemadores tipo boquillas. El vapor producido es conducido por los mismos tubos hasta la parte superior de la chaqueta de vapor (concepto de caldera "acuatubular") (ver Figura 1).

Por su parte, los modelos actuales de Cleveland Range ([www.clevelandrange.com](http://www.clevelandrange.com)) se basan principalmente en la patente US 5524608 A de 1996 y otros patentes anteriores. En este diseño, los gases de combustión se dirigen mediante tubos al interior de la marmita, donde calientan el agua para generación de vapor (concepto de caldera "pirotubular") y finalmente salen por un ducto de evacuación. Ver Figura 2.

Otras empresas internacionales que dentro de su portafolio de productos incluyen marmitas autogeneradoras de vapor, con calentamiento a gas, (basadas en las anteriores patentes u otras) son:

- Electrolux (<http://professional.electrolux.com/>)
- Fagor (<http://www.fagorindustrial.com/>)
- Vulcan Equipment ([www.vulcanequipment.com/](http://www.vulcanequipment.com/)?)
- Hamilton Kettles ([www.vulcanequipment.com/](http://www.vulcanequipment.com/)?)
- Southbend ([www.southbendnc.com/steam-kettles.html](http://www.southbendnc.com/steam-kettles.html)?)
- Legion Industries ([www.legionindustries.com](http://www.legionindustries.com))
- Firex ([www.firexkettles.com](http://www.firexkettles.com))
- Ozti (<http://www.ozti.com.tr/>)
- Zanussi ([www.zanussiprofessional.es](http://www.zanussiprofessional.es))

Estos fabricantes se destacan por la altísima calidad de manufactura y materiales de sus equipos,

robustez de sus sistemas de control y seguridad, y por establecer el estado del arte en desempeño energético. Sin embargo, los precios de lista en EEUU se encuentran entre los USD 15 000 a USD 25 000 para modelos autogeneradores con capacidad nominal entre 25 y 40 gal (100 a 150 litros [9]), lo cual hace que estén por fuera de alcance para un segmento de mercado nacional que podría beneficiarse de esta tecnología.

### 2.3 Fabricantes Nacionales

En Colombia existen varias empresas metalmecánicas y fabricantes de equipos para cocina que producen y comercializan marmitas de vapor directo principalmente, y algunos modelos a gas, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Industrial Taylor ([www.industrialtaylor.com.co](http://www.industrialtaylor.com.co))
- Citalsa ([www.citalsa.com](http://www.citalsa.com))
- Joserrago ([joserrago.com.co](http://www.joserrago.com.co))
- MGC & Cia (<http://www.mgc.com.co/marmitas.asp>)
- Pallomaro ([www.pallomaro.com](http://www.pallomaro.com))
- Gas y Gas (<http://www.gasygasmed.com/marmitas/>)

Algunas de estas empresas son distribuidores de marmitas y otros equipos de cocción de grandes fabricantes norteamericanos como Groen y Cleveland Range, o de fabricantes europeos como Fagor. Su mercado está orientado hacia las grandes cocinas institucionales como por ejemplo hospitales, batallones, cadenas de restaurantes, y cadenas de hoteles, debido a los costos relativamente altos.

Otras empresas han desarrollado sus propias versiones de marmitas autogeneradoras de vapor, que comercializan desde USD 5 000 dependiendo del tamaño y características especiales. Sin embargo, en general no se ha encontrado que dentro de su documentación se incluyan parámetros de desempeño energético (como por ejemplo: eficiencia energética, o tiempo de

calentamiento) que hayan sido medidas bajo procedimientos normalizados. Estos parámetros son necesarios para brindar confiabilidad en el proceso de selección garantizando un desempeño energético que optimice los costos de operación.

#### 2.4 Trayectoria de desarrollo de marmitas en CDT de GAS.

Desde 2010, a partir de una iniciativa propia cofinanciada por Colciencias, el CDT de GAS ha desarrollado dos prototipos de marmita autogeneradora de vapor con el objetivo de desarrollar tecnología nacional que contribuya a cerrar la brecha entre las marmitas autogeneradoras de "alta gama" de fabricantes internacionales, y las necesidades de las pequeñas y medianas empresas nacionales, principalmente de sectores como la

confitería tradicional (dulces semielaborados a base de fruta y/o leche).

Cada uno de los prototipos implementó un sistema de intercambiador de calor diferente. El segundo sistema (2013) permitió lograr un incremento significativo en la eficiencia de calentamiento (63 %) frente a la eficiencia del primer prototipo (54 %) [10]. Finalmente, en 2015 se han incorporado mejoras en el sistema de control y seguridad.

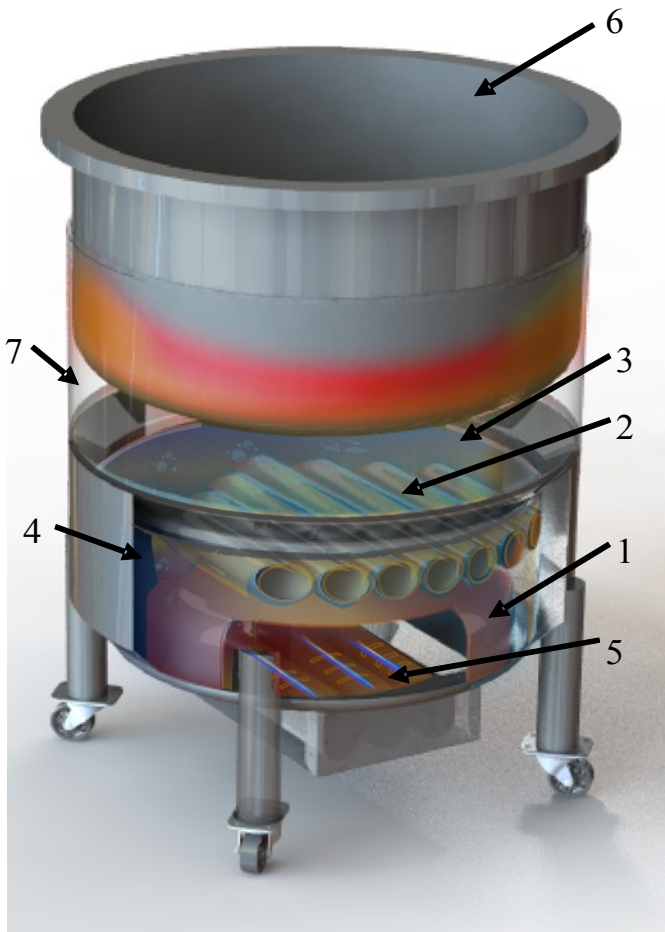
Dada la importancia del intercambiador de calor para el desempeño energético de este prototipo de marmita, los esfuerzos de desarrollo tecnológico se han enfocado en este componente. A continuación se describe este componente, y algunos aspectos importantes a considerar para la evaluación de su desempeño energético.

### 3. DESARROLLO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Como se ha mencionado, el intercambiador tiene como objetivo aprovechar el calor generado por los gases de combustión (producidos por quemadores de gas) para calentar agua y generar vapor dentro de la marmita autogeneradora de vapor.

Conceptualmente, este intercambiador de calor (patente en trámite) está conformado por dos cámaras (1: la cámara de combustión, 2: la chaqueta de gases) unidas por un arreglo de tubos que transfieren los gases de combustión desde la cámara 1 a la cámara 2. Este diseño se conoce como "pirotubular" porque los gases de combustión van a través de estos tubos, y el fluido que se está calentando (en este caso: agua para generar vapor) está por fuera de los tubos. De esta forma, se presenta un medio dinámico (gases que fluyen desde la cámara de combustión, a través del intercambiador de calor) y un medio estático (agua de vaporización).

El intercambiador de calor está compuesto por las siguientes partes (Figura 5):



**Figura 5.** Marmita de CDT de GAS



El intercambiador de calor está compuesto por las siguientes partes (Figura 3):

- **Cámara de combustión** (1): En esta cámara se desarrolla la combustión del gas natural. La cámara de combustión aloja en su parte inferior, uno o más quemadores de gas (5).
- **Tubos de calor** (2): Son tubos preferiblemente de sección circular, que están ubicados en la parte superior de la cámara de combustión, y evacuan los gases de combustión, hacia la chaqueta de gases.
- **Recipiente de agua de vaporización** (3). El conjunto de cámara de combustión y tubos de calor está inmerso dentro de un recipiente cilíndrico. Este recipiente contiene agua que al calentarse genera el vapor requerido por la marmita autogeneradora.
- **Chaqueta de gases** (4). El recipiente que contiene el agua para vaporización está rodeado por una sección cilíndrica o "chaqueta". El espacio anular entre el recipiente de agua de vaporización, y la propia chaqueta de gases, define la cámara 2 mencionada anteriormente. La chaqueta tiene una ventana que permite la salida de los gases hacia un ducto de escape o chimenea. Otros elementos constitutivos de una marmita son el recipiente que contiene el producto a procesar (6) y la chaqueta de vapor (7).

### 3.1 Requisitos adicionales de seguridad y control.

Una marmita debe considerar además los requerimientos de control y seguridad de la norma ASTM F1602 -12 o ASTM F1603-12 según su tamaño, y del Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión (Sección VIII, División I, Partes: UG, UHA, UW y Apéndices: 9 y 19), así como las Normas Técnicas Aplicables para equipos a gas comerciales.

En general, el prototipo de CDT de GAS ha sido diseñado considerando estos requisitos, y está equipado con:

- Un tren de combustión de gas, incluyendo un sistema de encendido automático, y un sensor de llama y una válvula de corte automática en caso de apagado de los quemadores,
- Una válvula de seguridad,
- Un visor de nivel de agua,
- Un termostato con sensor e indicador de temperatura,
- Un sensor e indicador de presión (manovacuumetro).

## 4. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

### 4.1 Eficiencia de Calentamiento. – (*Heating Efficiency*)

La eficiencia energética en una marmita es la relación entre la energía efectiva que calienta el producto que se está procesando y la energía que fue suministrada en forma de combustible. Esta eficiencia (*Heating Efficiency*) se determina mediante el procedimiento normalizado ASTM F1785 y se define como:

$$\text{Heating Efficiency} = \frac{m * C_p * (T_f - T_i)}{V_{std} * PC}$$

En donde:

- *m*: masa de agua correspondiente al 90% de la capacidad a rebose de la marmita
- *C<sub>p</sub>*: Calor específico del agua
- *T<sub>f</sub>*: Temperatura Final: 70°C
- *T<sub>i</sub>*: Temperatura Inicial: 25°C
- *V<sub>std</sub>*: Volumen de gas utilizado corregido a condiciones estándar
- *PC*: Poder calorífico del gas, a condiciones estándar

La Corporación CDT de GAS ha evaluado eficiencias de calentamiento de  $63,8 \pm 1 \%$  (mediante procedimiento ASTM F1785) para su



prototipo de 40 gal, lo cual es muy cercano al estado del arte en desempeño energético de marmitas de su clase (65 %) [11].

#### 4.2 Eficiencia de generación de vapor – (Boiler Efficiency)

Una forma de evaluar el desempeño del intercambiador de calor dentro de la marmita, es mediante el parámetro *Boiler Efficiency* el cual se define como la relación entre la energía utilizada para generación de vapor, y la energía suministrada en el combustible.

De forma indirecta (como se describe en ASME PTC4.1), el parámetro *Boiler Efficiency* puede evaluarse sustrayendo del 100% de la energía contenida en el gas, las diferentes pérdidas de energía

$$\text{Boiler Efficiency} = 100\% - \sum \text{Pérdidas}$$

La sumatoria de pérdidas incluye:

1. gas no quemado (ineficiencia de combustión)
2. energía sensible de los gases (secos) en la chimenea, en función de su temperatura
3. energía latente y sensible del vapor de agua formado tras la combustión (presente en los gases de combustión), y
4. otras pérdidas debidas a convección, radiación, y conducción (por ejemplo: calentamiento de la propia marmita), excluyendo la transferencia de calor (por condensación del vapor y conducción) hacia el recipiente, pues no es una pérdida sino una transferencia de la operación normal.

La Corporación CDT de GAS ha evaluado de forma indirecta la eficiencias de caldera de sus prototipos con resultados entre 89 y 84 % para temperaturas de salida de los gases de combustión entre 164 °C a 210 °C respectivamente y excesos de aire entre 15 y 20 % [11].

#### 4.3 Consumo de gas a fuego lento (Simmer Energy Rate)

El consumo de gas a fuego lento es un parámetro que caracteriza la demanda de gas para conservar una temperatura establecida, a lo largo del tiempo. Es importante para productos que deben procesarse o mantenerse a temperaturas estables, durante un largo período de tiempo. La marmita incorpora un control de temperatura ON/OFF que opera el sistema de combustión. Cuando el producto alcanza la temperatura deseada, los quemadores se apagan, cuando la temperatura desciende los quemadores se encienden nuevamente para incrementar la temperatura al punto establecido.

El parámetro Simmer Energy Rate se evalúa de acuerdo a ASTM F1785 como el caudal de gas promedio, para mantener la marmita llena de agua (al 90 % de su capacidad a rebose) a una temperatura de 70 ± 5 °C durante 3 horas.

La Corporación CDT de GAS ha evaluado (bajo procedimiento ASTM F1785) que el caudal del consumo de gas (aparente) a fuego lento para sus marmitas es del 13 % de la potencia máxima nominal.[11]

### CONCLUSIONES

- Las marmitas autogeneradoras de vapor son una alternativa tecnológica para sistemas de calentamiento descentralizado, frente a los sistemas de calentamiento centralizado tradicionales. En este caso, es el gas natural como portador energético el fluido que se distribuye al interior de la planta, y no el vapor.
- CDT de GAS ha desarrollado con el apoyo de Colciencias, un prototipo comercial de marmita autogeneradora de vapor, con una eficiencia de calentamiento de 63 %. No es posible comparar esta eficiencia en relación a otros fabricantes nacionales,

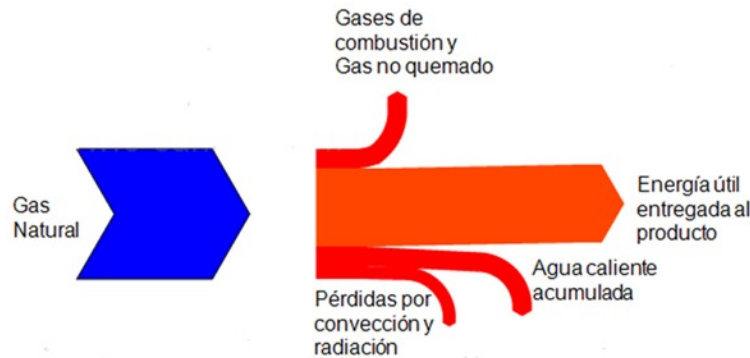


Figura 6. Distribución de la energía en la marmita

debido a que no se ha encontrado que este parámetro no sea evaluado o reportado. Por otra parte, la eficiencia alcanzada es similar a la eficiencia de calentamiento de fabricanes estadounidenses, como Cleveland Range (65 %).

- Este nuevo producto está dirigido a PyMES del sector de alimentos como por ejemplo: empresas tradicionales que producen dulces semielaborados de fruta y dulce, y para cocinas institucionales.
- En una marmita autogeneradora de vapor, es importante considerar varios parámetros de eficiencia energética los cuales inciden en los costos de operación. La eficiencia de calentamiento (Heating Efficiency), eficiencia de caldera (Boiler Efficiency) y el consumo a fuego lento (Simmer Energy Rate) son parámetros que permiten caracterizar y comparar el desempeño energético de diversas marmitas.

### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Corporación CDT de GAS y a Colciencias por su patrocinio a través de la Convocatoria 642 de 2013. (Contrato 175-2013)

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. Unidad de Planeación Minero Energética UPME; 2015. [http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN\\_IdearioEnergético2050.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergético2050.pdf).

2. PROURE Plan de Acción Indicativo 2010-2015. Bogotá - Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética UPME; 2010. <http://www.si3ea.gov.co/Portals/2/plan.pdf>.

3. Arrieta AA. Oportunidades de mejoramiento de la eficiencia térmica en procesos industriales. September 2014. [http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/Memorias%20Eventos/Eficiencia%20Energética/8\\_EFICIENCIA%20ENERGÉTICA%20TERMICA%20EN%20PROCESOS%20INDUSTRIALES\\_UDEA.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/Memorias%20Eventos/Eficiencia%20Energética/8_EFICIENCIA%20ENERGÉTICA%20TERMICA%20EN%20PROCESOS%20INDUSTRIALES_UDEA.pdf).

4. Arrieta AA. Energía, Economía y Medio Ambiente en procesos Industriales. Medellín: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia; 2007. [http://www.metropol.gov.co/ProduccionLimpia/Documents/Usos%20eficiente%20Energía/Economía\\_energía\\_medio\\_ambiente.pdf](http://www.metropol.gov.co/ProduccionLimpia/Documents/Usos%20eficiente%20Energía/Economía_energía_medio_ambiente.pdf).

5. Steam Pressure Reduction: Opportunities and Issues. Washington: U.S. Department of Energy. EERE; 2005. <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/37853.pdf>.

6. Fisher D. Commercial Cooking Appliance Technology Assessment. San Ramon CA 94583: Food Service Technology Center; 2002. [http://www.fishnick.com/equipment/techassessment/Appliance\\_Tech\\_Assessment.pdf](http://www.fishnick.com/equipment/techassessment/Appliance_Tech_Assessment.pdf).

7. Whiteley E. Steam-jacket kettle. June 1882. <http://www.google.com/patents/US251751>.

8. Dickson GF, Confectioners And Bakers Supply Co. Confectioner's kettle. Agosto 1905. [www.google.com/patents/US798498](http://www.google.com/patents/US798498).

9. Cleveland KGL-40 40 Gallon Stationary 2/3 Steam Jacketed Gas Kettle - 140,000 BTU. Webrestaurantstore.com. <http://www.webrestaurantstore.com/cleveland-kgl-40-40-gallon-stationary-2-3-steam-jacketed-gas-kettle-140-000-btu/390KGL40.html>. Published October 15, 2010. Accessed October 15, 2010.

10. Manrique V. Diseño y Construcción de una Marmita Autogeneradora de Vapor, como alternativa para la Reconversión Tecnológica de la Industria del Bocado Veleño en Santander. 2011. <http://www.uis.edu.co/>.

11. Manrique V, García L, Alfonso J. Experimental evaluation of energy efficiency in a gas-heated self-contained steam jacketed kettle. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2014;59:012009. doi:10.1088/1757-899X/59/1/012009.



# BIOMETANO: ALTERNATIVA SOSTENIBLE DEL GAS NATURAL

*Adriana Alexandra Aparicio Ariza\**

*Grupo de investigación en Fluidos y Energía GIFE.*

*Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas*

*km 2 vía El Refugio, Piedecuesta, Santander, Colombia.*

**Resumen:** Los residuos orgánicos, también llamados biomasa residual, son un problema ambiental que requiere especial atención, debido a que su incorrecta disposición genera gases de efecto invernadero y un bajo nivel de aprovechamiento de su potencial energético, pero esto tiene solución debido al desarrollo de tecnologías para la producción de biocombustibles. Otro problema ambiental que ha encendido las alarmas en las últimas décadas es la utilización indiscriminada de combustibles fósiles que emiten contaminantes a la atmósfera contribuyendo al calentamiento global. El combustible fósil de menor impacto ambiental es el gas natural, pero de acuerdo a la UPME se proyecta una paulatina disminución de las reservas y un aumento de su consumo por parte de la población colombiana, lo que anuncia una posible crisis de abastecimiento. Dados los anteriores panoramas, el biometano resulta ser una alternativa sostenible que en un momento determinado lograría contrarrestar las deficiencias de abastecimiento de gas natural en el país.

**Palabras clave:** *Biogás, Biometano, Biomasa, Digestión anaerobia, Residuos orgánicos.*

*\*aaparicio@cdtdegas.com*



**Abstract:** Organic waste, also called residual biomass, is an environmental problem that require attention because the emission of greenhouse gases due to an incorrect disposition and because the low exploitation of their energetic power. However, those situations is solving by the development of technology for biofuel production. Another environmental problem is the indiscriminate use of fossil fuels that emits pollutants to atmosphere increasing global warming. Natural gas is a fossil fuel that has a low environmental impact, but, according to UPME, natural gas reserves are going to decrease and the population consumption are going to increase through time, so it announce an supplying crisis. Due to those scenes, biomethane is a sustainable choice, which, in a moment, will probably achieve counter the deficiency supplying of natural gas in the country.

**Key words:** Biogas, Biomethane, Biomass, Anaerobic Digestion, Organic waste.





## INTRODUCCIÓN.

Actualmente, el biogás es considerado un biocombustible de primera generación, como el biodiesel y el bioetanol, debido a la madurez de su tecnología de producción e implementación [1]; sin embargo, difiere de ellos con respecto a la materia prima que emplea para su proceso, ya que los biocombustibles de primera generación se abastecen de cultivos propios para este fin, compitiendo con las necesidades de alimentación de las comunidades y afectando la biodiversidad. Por el contrario, el biogás se obtiene principalmente de materia orgánica residual, que lo ha convertido en un foco de atención, no solo para atender las necesidades de la canasta energética, sino como alternativa para la disposición de gran parte de los residuos sólidos orgánicos.

El biometano es un combustible renovable gaseoso, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, en una proporción de alrededor de 65 % a 35 %, [1]; proviene de la refinación del biogás obtenido ya sea por tecnologías térmicas o biológicas, cuya materia prima es la materia orgánica (biomasa). Una composición aproximada del biogás se muestra en la Tabla 1; a pesar de que la mayoría de estos

compuestos son considerados impurezas para efectos de la transformación del biogás en biometano [2], el biogás se emplea comúnmente para la generación de calor, que puede ser útil por ejemplo, en áreas rurales con poco acceso a una fuente de energía fósil. En cambio el biometano, puede llegar a ser intercambiable con el gas natural (teniendo un apropiado tratamiento), siendo utilizado para los mismos fines, principalmente, para el servicio doméstico y como combustible vehicular.

El presente artículo, muestra un panorama general del biogás, las tecnologías necesarias para su obtención y refinación, y la situación actual de Colombia frente a este tipo de biocombustible, con el propósito de identificar de manera general, las oportunidades o mejor dicho, el potencial que tiene el país para transformar sus residuos en formas alternativas de energía, amigables con el ambiente.

## PANORAMA MUNDIAL

Muchos países han implementado esta tecnología para la transformación de residuos orgánicos, principalmente en Europa, donde los recursos fósiles no son tan abundantes y la

Compuesto	Cantidad aproximada
<b>Metano</b>	40 % - 75 %
<b>Dióxido de Carbono</b>	15 % - 60 %
<b>Vapor de agua</b>	5 % - 10 %
<b>Ácido Sulfhídrico</b>	0,005 % - 2 %
<b>Siloxanos</b>	0 % - 0,02 %
<b>Hidrocarburos halogenados (COV*)</b>	< 0,6 %
<b>Amoniaco</b>	< 1 %
<b>Oxígeno</b>	0 % - 1 %
<b>Monóxido de Carbono</b>	< 0,6 %
<b>Nitrógeno</b>	0 % - 2 %

\*Compuestos Orgánicos Volátiles

*Tabla 1. Composición del biogás. Adaptado de: [2]*

demanda energética es alta. El tamaño de las plantas difiere de un lugar a otro dependiendo del tipo y la disponibilidad de la materia prima (residuos agrícolas, residuos industriales, estiércol, etc.) y de las necesidades energéticas de la región (generación de calor, electricidad, gas vehicular, etc.).

Suecia es el principal exponente de la implementación de biocombustibles en la canasta energética nacional, especialmente en la utilización de biogás vehicular, reduciendo la dependencia a los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizando el 50% de su producción anual (1,7 TWh) para este fin [3]. Alemania también se ha puesto en la tarea de reducir el consumo de combustibles fósiles y cuenta con plantas de producción de biogás que suplen el 3 % del consumo nacional de energía eléctrica anualmente. China e India cuentan con un gran número de plantas de producción de biogás a pequeña escala, el cual utilizan para cocinar, para iluminarse y en algunos casos, para pequeños motores de combustión. Otros países que también producen biogás a partir de residuos agrícolas son: Francia, Holanda, Austria, e Italia [3].

En Estados Unidos el biogás producido proviene principalmente del tratamiento de aguas residuales y la mayor parte de plantas se encuentran ubicadas en el oriente del país, conformando aproximadamente 2100 plantas en total, de las cuales, si se aprovechara todo su potencial, permitirían suplir las necesidades de alrededor de 3,5 millones de hogares estadounidenses y reducir sustancialmente su cuota anual de gases de efecto invernadero[4].

A pesar de que Brasil ha sido pionero en la utilización de biocombustibles líquidos como el biodiesel o el bioetanol, es Argentina quien lleva la delantera en cuanto a instalación y puesta en marcha de plantas de biogás de mediana capacidad, abasteciendo a 25000 hogares aproximadamente

con energía a partir de la basura [5]. Sin embargo, otros países de Latinoamérica se han dado a la tarea de poner en marcha pequeñas plantas de biogás para el consumo energético de algunas zonas rurales, como es el caso de Brasil, Cuba, Costa Rica y Colombia [6].

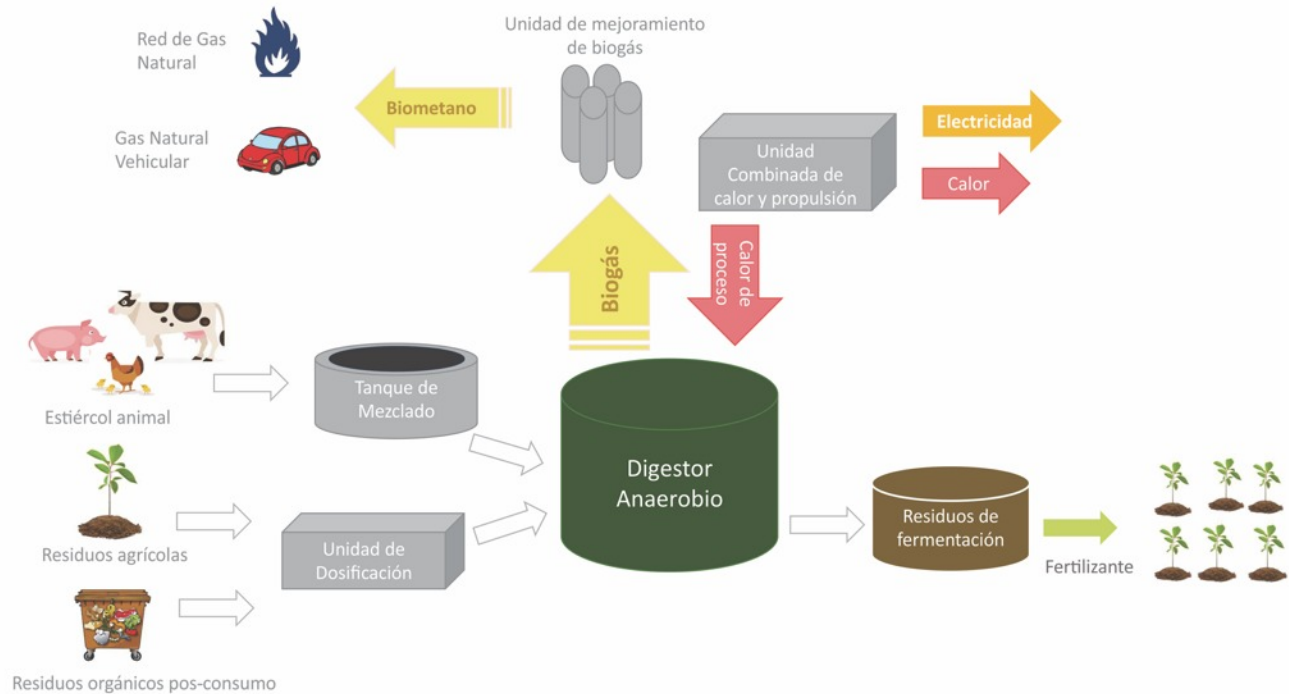
### PANORAMA NACIONAL

Colombia poco a poco ha venido ganando terreno en la producción de biocombustibles líquidos de primera generación, y comienza a apostarle al desarrollo de proyectos que incentiven el aprovechamiento de los residuos orgánicos para la generación de energía, a través de la producción de biogás. Actualmente, en el país operan algunas plantas de biogás como la que se encuentra en el Jardín Botánico de Bogotá, la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando y el relleno sanitario de la pradera en Medellín [7].

Además, en la web se encuentra un modelo con el cual se puede estimar el índice de generación de metano, teniendo en cuenta información relativa al clima, caracterización de residuos y datos específicos sobre el biogás de sitios representativos de Colombia, permitiendo que el usuario tenga una aproximación de la generación y recuperación de biogás para un relleno sanitario [8]. Este tipo de herramientas contribuyen a que haya un aumento en las iniciativas de convertir en energía lo que se considera como basura, en especial en los rellenos sanitarios que, en muchos lugares del país, están a punto de colapsar

### MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE BIOGÁS

Como se mencionó anteriormente, el biometano se puede obtener mediante la refinación de los productos gaseosos que resultan del tratamiento térmico y biológico de la biomasa. Dentro de las



**Figura 1.** Procesos de DA y sus productos

tecnologías térmicas se destaca la gasificación, con el cual se obtiene un producto gaseoso compuesto principalmente por hidrógeno ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y metano ( $CH_4$ ) [9]; De manera similar, es posible obtener metano como un subproducto del proceso de pirólisis, en el cual el producto principal es un combustible líquido llamado biooil [10]. Por otro lado, la digestión anaerobia (DA) constituye un proceso biológico, que emplea microorganismos para la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y es el principal proceso para la obtención de biogás [11].

A pesar de la amplia investigación relacionada con las tecnologías térmicas y los biocombustibles que se producen a partir de ellas, su implementación continua siendo incipiente en comparación con la digestión anaerobia, que constituye una tecnología madura y de masiva aplicación a nivel internacional. De acuerdo a lo anterior y al propósito del artículo, éste se enfocará en la producción de biogás mediante DA.

La DA se alimenta principalmente de biomasa con un alto contenido de humedad, razón por la cual, se prefieren para esta tecnología los residuos alimenticios pos-consumo, el estiércol animal, las aguas residuales, los residuos agroindustriales, entre otros [11]. La temperatura es uno de los parámetros de operación característicos del proceso, clasificándolo en condiciones psicrófilas ( $12\text{ }^{\circ}C$  a  $16\text{ }^{\circ}C$ ), mesófilas ( $35\text{ }^{\circ}C$  a  $37\text{ }^{\circ}C$ ) y termófilas ( $55\text{ }^{\circ}C$  a  $60\text{ }^{\circ}C$ ) [12]. Por otro lado, el pH ejerce una importante influencia en el proceso, siendo favorable trabajar con pH aproximadamente neutro, entre 6,8 y 7,2 [13]. La Figura 1 muestra de forma general las etapas y los productos de la DA, dentro de los cuales se encuentra el biometano; además que evidencia la versatilidad del proceso en términos de aprovechamiento de todos los productos, ya sea como insumos para la agricultura o como suplementos energéticos.

## DE BIOGÁS A BIOMETANO

El biometano es la forma mejorada del biogás, el cual puede ser intercambiable con el gas natural convencional, es decir, tiene los mismos usos finales que el combustible fósil. Para que el biogás llegue a ser biometano, debe someterse a un proceso de refinación o purificación, en el cual se remuevan todos los componentes dañinos, e incluso, los microorganismos patógenos para su uso doméstico.

La refinación de biogás, consiste de forma general en los tratamientos que permitan [2]:

- Un proceso limpio, eliminando las trazas de componentes que puedan dañar de cualquier manera la red de gas natural.
- Un proceso mejorado en el cual la cantidad de CO<sub>2</sub> se remueve para ajustar el poder calorífico y la densidad relativa, con el fin de cumplir con los requisitos de intercambiabilidad (índice de Wobbe).

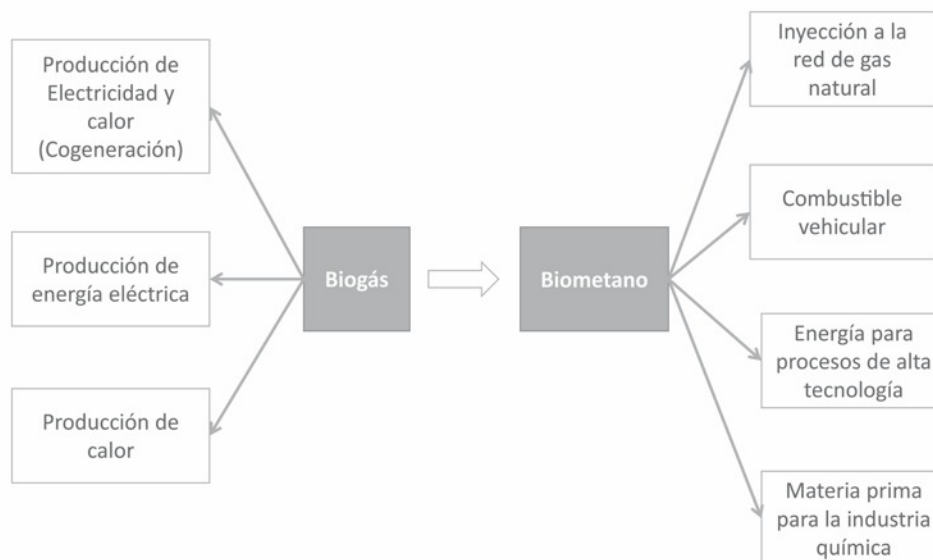
En la Tabla 2 se resumen las impurezas más comunes del biogás, sus posibles consecuencias en caso tal de no ser eliminadas y la(s)

tecnología(s) que se puede(n) implementar para su remoción [2], y en la Figura 2 se resumen los usos potenciales tanto del biogás como del biometano.

Como el biometano y el gas natural presentan características energéticas similares, la Tabla 3 permite visualizar una comparación general entre estos dos combustibles gaseosos.

## DISCUSIÓN

En el siglo XXI el mundo se enfrenta a dos grandes problemáticas: por un lado, la disminución de reservas probadas de combustibles fósiles ha hecho que varios países, que dependían exclusivamente de estos, buscaran otras alternativas energéticas para abastecerse, y por otro lado, el aumento del consumo por parte de la población, ha provocado un aumento en los desechos, que perjudican el ambiente debido a los precarios programas para la correcta disposición de los residuos sólidos. Como se mencionó previamente, países europeos como Alemania, Suecia, Italia, entre otros, han solucionado estos problemas convirtiendo sus residuos orgánicos en



*Figura 2. Usos potenciales del biogás y el biometano*



Impureza	Posible impacto	Tratamiento
<b>Agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosión de tanques de almacenamiento, compresores y motores debido a la reacción con H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub> para la formación de ácidos.</li> <li>• Acumulación de agua en tuberías.</li> <li>• Condensación y/o congelación debido a altas presiones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Separación física: Condensación</li> <li>• Separación química: Técnicas de absorción y absorción mediante sustancias químicas.</li> </ul>
<b>Polvo</b>	Obstrucción debido a la deposición (Transformación de gas en sólido) en tanques de almacenamiento de gas y compresores.	Las técnicas de secado incluso favorecen la remoción de polvo
<b>H<sub>2</sub>S</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosión en tanques de almacenamiento de gas, en compresores y en motores.</li> <li>• Concentraciones tóxicas de H<sub>2</sub>S remanentes en el biogás.</li> <li>• Formación de SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> debido a la combustión, los cuales son más tóxicos que el H<sub>2</sub>S y pueden causar corrosión al contacto con el agua.</li> </ul>	<p>Remoción durante el proceso de digestión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosificación de aire (oxígeno) al sistema de biogás para oxidar el H<sub>2</sub>S en azufre elemental</li> <li>• Adición de cloruro de hierro en el digestor para formar partículas precipitadas de FeS</li> </ul> <p>Remoción después del proceso de digestión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorción usando óxido o hidróxido de hierro</li> <li>• Absorción con líquidos</li> <li>• Separación por membranas</li> <li>• Filtros biológicos</li> <li>• Adsorción mediante carbón activado</li> </ul>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Disminuye el poder calorífico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorción física y química de CO<sub>2</sub></li> <li>• Adsorción por oscilación de presión</li> <li>• Adsorción por oscilación al vacío</li> <li>• Separación por membranas</li> <li>• Separación criogénica</li> <li>• Enriquecimiento biológico de metano</li> </ul>
<b>Siloxanos</b>	Formación de SiO <sub>2</sub> y micro cristales de cuarzo debido a la combustión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorción con solventes orgánicos</li> <li>• Adsorción en ácido fuerte</li> <li>• Adsorción en base fuerte</li> <li>• Adsorción con Silicagel</li> <li>• Adsorción con Carbón Activado</li> <li>• Separación criogénica</li> </ul>
<b>Hidrocarburos</b>	Corrosión de motores debido a la combustión	Remoción mediante carbón activado
<b>NH<sub>3</sub></b>	Corrosión cuando se disuelve en agua	El método más práctico y menos costoso es mediante carbón activado.
<b>O<sub>2</sub> / Aire</b>	Peligro de explosión debido a la mezcla de altas concentraciones de oxígeno en el biogás.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción mediante membranas</li> <li>• Adsorción por oscilación de presión a baja temperatura</li> </ul> <p>Los anteriores métodos son costosos, razón por la cual, se recomienda prevenir cualquier introducción de aire al digestor mediante un monitoreo cuidadoso.</p>
<b>Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup></b>	Corrosión en motores de combustión.	

*Tabla 2. Impurezas del biogás, su posible impacto y tecnologías disponibles para su tratamiento*

biogás, el cual, es utilizado directamente o mejorado, para que el biometano resultante sea inyectado a la red de gas natural o usado como combustible vehicular.

Haciendo un balance general, en toda América aún no se cuenta con este uso masivo del biogás, ni con la cultura de disponer correctamente los residuos (salvo en contadas regiones del continente), pero si se han comenzado a desarrollar proyectos a pequeña escala que permita que poblaciones necesitadas de energía, se vean beneficiadas con este proceso biológico de conversión de biomasa. Según un estudio realizado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) [14], en Estados Unidos, el potencial de metano a partir de fuentes orgánicas y rellenos sanitarios, se estima en 7,9 millones de toneladas por año lo que podría reemplazar en un 61 % el gas natural (5 % en energía eléctrica y 56 % en el sector transporte); es más, si Estados Unidos se diera a la tarea de incrementar el uso de combustibles bajos en carbono (biometano y/o gas natural), las emisiones de CO<sub>2</sub> no incrementarían sustancialmente cada año, sino que

su aumento sería tan solo del 0,2 % anual en una proyección al año 2040 realizada por EIA [15].

Si nos centramos en Colombia, la situación es la siguiente: actualmente no hay una regulación que permita el uso de biometano como sustituto del gas natural. De momento, solo existe regulación expedida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), que controla principalmente el régimen de precios, la regulación de redes y la calidad del servicio y el producto, para los gases combustibles de la primera, segunda y tercer familia (gases manufacturados, gas natural y GLP, respectivamente, según clasificación de la Norma Técnica Colombiana NTC-3527) [16]. Esta constituye la principal barrera para la introducción del tercer biocombustible en la canasta energética del país (después del biodiesel y el bioetanol, que ya tienen su propio mercado).

Empresas como EPM S.A. (Empresas Públicas de Medellín) y Gas Natural en Bogotá, han manifestado su iniciativa para tratar y comercializar biogás de rellenos sanitarios; ante

GAS NATURAL	BIOMETANO
Combustible de origen fósil (no renovable)	Combustible de origen renovable
Toma millones de años la descomposición de la materia orgánica para la producción de gas natural	La producción del biogás se realiza con materia orgánica "fresca", como los residuos agrícolas, que se descomponen rápidamente.
La producción de gas natural depende únicamente de las reservas naturales, las cuales varían de un país a otro.	Dada la materia prima necesaria para la obtención de biogás, este se produce en cualquier parte del mundo.
Interviene drásticamente en el ambiente, mediante la perforación de los suelos y la destrucción de los hábitats.	Su producción no afecta el ambiente, ni representa un gran riesgo de polución o pérdida de biodiversidad
La combustión del gas natural incrementa las emisiones de CO <sub>2</sub> .	El Biometano también emite CO <sub>2</sub> a la atmosfera, pero estas emisiones corresponden a las mismas que tendría la materia orgánica en descomposición.

*Tabla 3. Ventajas del biometano frente al gas natural*

esto, la CREG expone que no se cuentan con los estándares internacionales necesarios para que el biometano sea comercializado e inyectado a la red de gas natural, lo que significa un gran riesgo, tanto para la integridad de los sistemas de transporte y distribución, como para los equipos de los usuarios finales; incluso es un riesgo para la salud, debido a la exposición de contaminantes y microorganismos patógenos, contenidos en el biocombustible.

Pero entonces, ¿cómo logran algunos países europeos, como Alemania y Suecia, inyectar biometano en la red de gas natural y en los vehículos? ¿Será realmente que faltan estándares internacionales? Quizá nuestra economía depende tanto de la industria petrolera que los biocombustibles y el ambiente están en un segundo plano. Además, el gobierno solo brinda subsidio para impulsar la comercialización del gas natural; este es otro tema importante a tener en cuenta cuando la regulación del biocombustible gaseoso sea establecida.

Por otro lado, analizando el potencial del país en materias primas, Colombia por ser de naturaleza agrícola, tiene la ventaja de producir grandes cantidades de residuos orgánicos provenientes de la agricultura. De acuerdo al Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia [17], la cantidad de biomasa residual en el 2010 era de aproximadamente 177 millones de toneladas al año, lo que corresponde a un potencial energético de 450 mil TJ. Adicionalmente, los rellenos sanitarios están colapsando debido a la gran cantidad de residuos sólidos que se desechan sin ningún tipo de separación, porque lamentablemente, en Colombia, aún no existe la cultura del reciclaje; de los 11 millones de toneladas anuales de residuos que se producen, 9 millones de toneladas que podrían aprovecharse, se están convirtiendo literalmente en basura y en un problema ambiental [18].

Finalmente, es importante resaltar el hecho de que, si bien este es un proceso lento en el cual poco a poco se va trabajando en la inclusión de fuentes alternativas de energía, Colombia va por buen camino. Sin embargo, falta mayor atención por parte de los entes gubernamentales para promover proyectos y/o investigaciones que permitan avanzar de forma clara en la estipulación de parámetros de calidad del biogás; esto puede deberse al protagonismo que se le ha dado al gas natural en las últimas décadas. No obstante, queda la siguiente inquietud: si las reservas actuales de gas natural en el país sugieren la necesidad de realizar inversiones para la importación del mismo a partir de los próximos años, ¿no sería bueno también invertir parte de ese capital en promover el tratamiento masivo de los residuos orgánicos, y la depuración de biogás resultante, así como adaptar legislaciones europeas de acuerdo a las necesidades y requerimientos del país en materia de calidad de biogás? De esta manera, sería posible aportar a la solución tanto del problema de las basuras como el del abastecimiento energético.

## CONCLUSIONES

- El biometano resulta luego de una depuración del biogás donde se retiran las impurezas, y presenta las mismas características del gas natural. Además, tiene ventajas importantes como: ser de origen renovable, posibilidad de ser producido en cualquier parte del mundo y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros.
- Actualmente, Europa lleva la delantera en la utilización de biometano como combustible (doméstico y vehicular), aunque en América, algunos países adelantan proyectos para el aprovechamiento del potencial energético de los rellenos sanitarios.

- En Colombia, el potencial energético de la biomasa residual asciende los 450 mil TJ/año, cifra importante que permite plantear la posibilidad de aprovechar los residuos de la agricultura y de los rellenos sanitarios, para la transformación de energía mediante la producción de biocombustibles gaseosos.
- Hasta el momento no se cuenta con una regulación que permita la inyección de biogás (o biometano) en la red nacional o la comercialización para uso vehicular, ya que según la CREG no se cuenta con estándares internacionales y esto representa un alto riesgo para equipos y usuarios finales.
- Se hace necesaria la inversión tanto de tiempo y recursos económicos por parte de entes gubernamentales, para impulsar la producción de un tercer biocombustible, que facilite la utilización del mismo en zonas no interconectadas a la red o garantice el abastecimiento en los próximos años, donde las reservas de gas natural comiencen a escasear.
- El biometano para Colombia representa una alternativa sostenible para el futuro, ya que aportaría a la solución de problemas relacionados con la disposición de los residuos orgánicos y respaldar un posible desabastecimiento de gas natural debido al agotamiento de las reservas actuales del combustible fósil.

## REFERENCIAS

[1]. Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK. *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. Renew Sustain Energy Rev.* 2010;14(2):578-597.

- [2]. Ryckebosch E, Drouillon M, Vervaeren H. *Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass Bioenergy.* 2011;35(5):1633-1645.
- [3]. Rasmussen P, Mathiasson A. *IGU Biogas Report 2015. International Gas Union; 2015:20. Disponible en: [http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field\\_file/IGU%20Biogas%20Report%202015.pdf](http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/IGU%20Biogas%20Report%202015.pdf). Accedido Noviembre 25, 2015.*
- [4]. *American Biogas Council. Current and Potential Biogas Production. Disponible en: <https://www.americanbiogascouncil.org/pdf/abcbiogas101handout.pdf>. Accedido Noviembre 26, 2015.*
- [5]. *La Nación. El biogás, la alternativa ecológica argentina. Disponible en: <http://www.lanacion.com.ar/1763929-el-biogas-la-alternativa-ecologica-argentina>. Publicado Enero 29, 2015. Accedido Noviembre 26, 2015.*
- [6]. *Alzate C. Biodigestión, energía limpia a partir de desechos sucios. El Tiempo. Disponible: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13329458>. Publicado Febrero 1, 2014.*
- [7]. *Twenergy. Colombia apuesta por los biodigestores para generar biogás en las áreas rurales. Disponible en: <http://twenergy.com/a/colombia-apuesta-por-los-biodigestores-para-generar-biogas-en-las-areas-rurales-1165>. Publicado Octubre 4, 2015.*
- [8]. *SCS Engineers. Modelo Colombiano de Biogás | LMOP | US EPA. EPA-United States Environmental Protection Agency. Disponible en: <http://www3.epa.gov/lmop/international/colombia.html>. Publicado 2010. Accedido Noviembre 29, 2015.*
- [9]. *McKendry P. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. Bioresour Technol.* 2002;83(1):55-63.
- [10]. *Balat M, Balat M, K?rtay E, Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. Energy Convers Manag.* 2009;50(12):3147-3157.
- [11]. *Iqbal SA, Rahaman S, Rahman M, Yousuf A. Anaerobic Digestion of Kitchen Waste to Produce Biogas. Procedia Eng.* 2014;90:657-662.
- [12]. *Molino A, Nanna F, Ding Y, Bikson B, Braccio G. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. Fuel.* 2013;103:1003-1009..



- [13]. Cioabla A, Ionel I, Dumitrel G-A, Popescu F. *Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues*. *Biotechnol Biofuels*. 2012;5(1):39.
- [14]. NREL (National Renewable Energy Laboratory). *Biogas Potential in the United States*. *Energy Analysis*; 2013:4. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60178.pdf>. Accedido Noviembre 26, 2015.
- [15]. Conti J, Holtberg P, Diefenderfer J, Napolitano S, Schaal M, Turnure J, Westfall L. *Annual Energy Outlook 2015 with Projections to 2040*. *Energy Information Administration (EIA)*; 2015:154. Disponible en: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383%282015%29.pdf>.
- [16]. CREG. *Resolución N° 135 de 2012 - Por la cual se adoptan normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con Biogás*. 2012. Disponible en: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/6e48d2a9e2da32de05257ae20078b5aa/\\$FILE/Creg135-2012.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/6e48d2a9e2da32de05257ae20078b5aa/$FILE/Creg135-2012.pdf).
- [17]. Escalante Hernández H. *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. UPME-IDEAM-Colciencias-UIS. 2010. Disponible en: [http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/files/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia\\_.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/files/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia_.pdf).
- [18]. ICONTEC Internacional. *Estrategia de residuos sólidos para Colombia*. Disponible en: <http://icontec.org/index.php/ho/noticias-destacadas/1418-estrategia-de-residuos-solidos-para-colombia>. Publicado 2014. Accedido Noviembre 29, 2015.



Corporación CDT de GAS  
Centro de Desarrollo Tecnológico del GAS



# inline

fluid systems

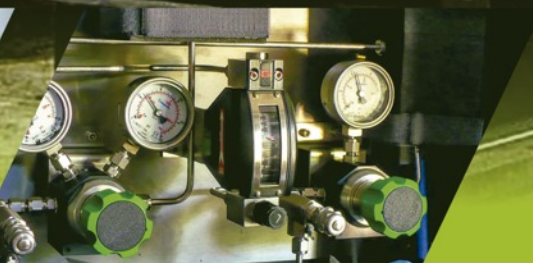
Una empresa de **base tecnológica** creada en Santander, para aprovechar la vocación hidrocarburífera y los factores regionales que potencian la **innovación** y el **desarrollo empresarial**.



Regulación



Medición



Analítica

**Soluciones para medición** de hidrocarburos, desde producción a uso final, que contribuyen a la competitividad y desarrollo sostenible del Sector **oil & gas** y la industria en Latinoamérica





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

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