

## Un nuevo método para el Monitoreo del Poder Calorífico en Redes de Distribución de Gas



D. Joachim Schenk ([Joachim.Schenk@eon-ruhrgas.com](mailto:Joachim.Schenk@eon-ruhrgas.com))  
D. Peter Schley ([Peter.Schley@eon-ruhrgas.com](mailto:Peter.Schley@eon-ruhrgas.com))

Centro de competencia para la tecnología del gas y los sistemas de energía (tecnología de redes)  
E.ON Ruhrgas AG

Andreas Hielscher ([A.Hielscher@thermo.ruhr-uni-bochum.de](mailto:A.Hielscher@thermo.ruhr-uni-bochum.de))  
Universidad Ruhr de Bochum (Alemania)

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

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

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

### Resumen:

En este artículo se muestra un nuevo método para el monitoreo del poder calorífico en redes regionales y de distribución de gas. El método utiliza perfiles estándar de carga (consumo) combinados con un moderno algoritmo de corrección para determinar volúmenes en los puntos de salida de la red. Utilizando información de entrada adicional, es posible determinar un poder calorífico para cada nodo de la red, deducido a partir del poder calorífico medido y verificado en los puntos de entrada. Con base en este método, en el futuro será posible facturar de forma rentable a los clientes que reciban gas proveniente de varios puntos de alimentación de gas natural o biometano en las áreas de distribución. De esta forma se consigue evitar el costoso condicionamiento de la alimentación por biometano y la explotación de las plantas de biogás resulta más económica.

### 1. INTRODUCCIÓN

Debido a la integración de los mercados nacionales en un mercado europeo del gas y al aumento en la importación de gas natural licuado (GNL), que se transporta por barco a Europa, se vienen observando desde hace unos años fluctuaciones cada vez mayores en la composición del gas y, con ello, del poder calorífico del gas natural transportado.

A esto se añade el aumento de la producción de biogás, con el que se alimentan por lo general redes regionales o de distribución y que, en la actualidad, está condicionado al poder calorífico predominante de la red. En las áreas de gas de alto poder calorífico, esto se lleva a cabo hoy en día mezclando con gas licuado.

La determinación del poder calorífico en las redes regionales o de distribución se basa, por lo general, en los valores registrados que el proveedor pone a disposición para los puntos de entrada. La hoja de trabajo G685 [1] de la asociación alemana del sector del gas y el agua (DVGW) establece que el poder calorífico empleado en la facturación del cliente no podrá diferir en más de un 2% del poder calorífico real. En el caso de puntos de entrada múltiples, con gases naturales de diferente calidad, este requisito se considerará superado cuando, durante el periodo de facturación, los promedios del poder calorífico ponderados por unidad de volumen no difieren en más de un 2% con respecto al poder calorífico real.

Desde hace ya algunos años han comenzado a establecerse los llamados sistemas de reconstrucción del poder calorífico para las redes de transporte, los cuales forman, hoy en día, parte del estado de la técnica [2]. Estos sistemas permiten determinar numéricamente el poder calorífico en toda la red en cualquier momento y lugar, lo que requiere valores registrados y verificados del poder calorífico asociado a los puntos de entrada, así como de los respectivos volúmenes tanto en los puntos de entrada como de salida de la red. Hasta la fecha no era posible realizar un seguimiento del poder calorífico de las redes de distribución mediante cálculo con una exactitud suficiente como para realizar la facturación del gas. El problema es que, en especial en los puntos de salida, a menudo no existen mediciones suficientes de los volúmenes.

*Se presenta un método nuevo que, con un algoritmo innovador, permite determinar los volúmenes de salida con base en los perfiles estándar de carga, partiendo de los datos de consumo específicos del cliente en un periodo de facturación pasado, así como la temperatura ambiente, el volumen de entrada medido y la presión de entrada actuales.*

En el apartado a continuación se presenta un método nuevo que, con un algoritmo innovador, permite determinar los volúmenes de salida con base en los perfiles estándar de carga, partiendo de los datos de consumo específicos del cliente en un periodo de facturación pasado, así como la temperatura ambiente, el volumen de entrada medido y la presión de entrada actuales. Más adelante, en el apartado 2, se describe brevemente el experimento de campo llevado a cabo, se explica la interpretación empleada y se presentan los resultados del experimento de campo en dos periodos (invierno y verano). También se aborda el resumen de los resultados por medio de un informe de facturación generado de forma automática y, finalmente, se presentan un resumen y una perspectiva.

brevemente el experimento de campo llevado a cabo, se explica la interpretación empleada y se presentan los resultados del experimento de campo en dos periodos (invierno y verano). También se aborda el resumen de los resultados por medio de un informe de facturación generado de forma automática y, finalmente, se presentan un resumen y una perspectiva.

### 2. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

En el apartado siguiente se presenta el método desarrollado para calcular el poder calorífico en redes de distribución de gas con el objeto de realizar la facturación a los clientes finales.

en redes de distribución de gas con el objeto de realizar la facturación a los clientes finales.

#### 2.1. Determinación de los volúmenes de salida.

Para realizar el seguimiento del poder calorífico en una red regional mediante cálculo (ver Figura 1), son necesarios, además de los valores del poder calorífico en el momento del ingreso del gas a

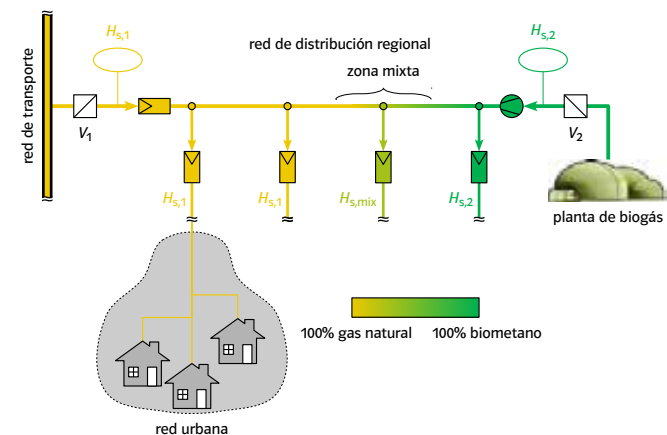


Figura 1. Representación simplificada de una infraestructura con entradas de gas natural y biometano en una red regional con redes locales secundarias.



la red, los volúmenes asociados a los puntos de entrada y de salida de la red examinada. Por lo general, para los valores de poder calorífico y volúmenes asociados a los puntos de entrada existen valores registrados y verificados con base en los promedios horarios. Los volúmenes de salida, que generalmente no se miden de forma directa, resultan de la suma de todos los clientes finales en la red urbana secundaria. Aquí se distingue entre:

- Consumidores con registros de medición de consumo, llamados clientes RMC, y
- Consumidores cuyo consumo energético se calcula por medio de perfiles estándar de carga, los cuales se denominan clientes PEC.

Los registros de medición de consumo se aplican, por lo general, a usuarios con una demanda horaria superior a 500 kW o una compra anual de 1,5 millones de kWh. Para las adquisiciones de menor volumen se emplean métodos simplificados, los llamados perfiles estándar de carga, desarrollados en la Universidad Técnica de Múnich [3] por encargo de la Asociación Alemana del Sector del Gas y el Agua (SVDW) y la Asociación de Empresas Municipales (VKU).

El consumo relativo en función de la temperatura media ponderada diaria se representa aquí a través de la función sigmoide  $h(\vartheta)$ :

$$h(\vartheta) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{\vartheta - 40^\circ\text{C}}\right)^C} + D \quad (1)$$

Los parámetros A, B, C y D se han fijado para perfiles de carga distintos (por ejemplo, casa unifamiliar, casas de vecindad, colectividades territoriales, comercio al por menor).

Adicionalmente, conocer la lectura de un cliente en el pasado, para un intervalo de tiempo dado, denominado consumo en periodo Q, permite calcular un valor para el cliente «KW» (en kWh), que expresa el consumo específico estándar del cliente. Por último, conocer la temperatura permite estimar el consumo energético (en kW) por hora previsto para el cliente de la siguiente manera:

$$Q_{\text{PEC}}(h) = KW \cdot h(\vartheta) \cdot F(d) \cdot FH(h, \vartheta) \quad (2)$$

Así,  $F(d)$  será el factor para el día de la semana y  $FH(h, \vartheta)$  el factor para la hora. La conversión del consumo energético a volumen de gas se lleva a cabo a través del poder calorífico  $H_s$ , con base en el volumen:

$$V_{\text{PEC}}(h) = \frac{Q_{\text{PEC}}(h)}{H_s} \quad (3)$$

El uso de perfiles estándar de carga en la simulación de la red de gas resulta, en este sentido, apropiado porque con ello se evita tener que equipar las infraestructuras de medición, situación que implica costes considerables. Sin embargo, la exactitud de los volúmenes determinados por medio de los perfiles estándar de carga no alcanza la calidad requerida para realizar el seguimiento del poder calorífico de manera que sea posible su aplicación a la facturación. Por ese motivo se ha desarrollado el método de corrección descrito a continuación, con base en el cual es posible mejorar significativamente la exactitud de los volúmenes calculados.

En primer lugar, se parte de la suposición de que la medición de los volúmenes estándar en todos los puntos de entrada de la red examinada se realiza de manera horaria y, con ello, que la suma del volumen de entrada se conoce con exactitud.

$$V_E(h) = \sum_i V_{E,i}(h) \quad (4)$$

El volumen de salida se obtiene de la suma de los volúmenes medidos de los clientes RMC y de los volúmenes de los clientes PEC, determinados a través de la ecuación (3).

$$V_S(h) = V_{S,\text{RMC}}(h) + V_{S,\text{PEC}}(h) = \sum_i V_{S,\text{RMC},i}(h) + \sum_i V_{S,\text{PEC},i}(h) \quad (5)$$

Puesto que en las redes de gas a veces se producen fluctuaciones de la presión, el cambio transitorio del volumen de gas contenido en la red (empaquetamiento), se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta V_{\text{red}}(h) = V_{\text{red}}(h) - V_{\text{red}}(h-1) = \frac{\rho(h) - \rho(h-1)}{\rho_n} \cdot \frac{T_n}{T} \cdot V_{\text{geo}} \quad (6)$$

Es posible determinar la presión media de la red a través de mediciones de la presión en puntos representativos a lo largo de la misma. Se puede aceptar, de forma simplificada, que la temperatura del gas se mantiene constante (por ej.  $8^\circ\text{C}$ ).

Teniendo en consideración el empaquetamiento de la red y suponiendo que la densidad del gas en la red o segmento de red examinado es constante, se puede calcular el balance de gas:

$$\Delta V_{\text{balance}}(h) = V_E(h) - V_S(h) - \Delta V_{\text{red}}(h) \quad (7)$$

La contribución de la incertidumbre del empaquetamiento de la red y de los volúmenes  $V_E$  y  $V_{S,\text{RMC}}$  medidos es, en comparación, insignificante, por lo que las desviaciones del balance se deben principalmente a inexactitudes en el cálculo de los volúmenes de los clientes PEC. Por consiguiente, es posible emplear la diferencia de volumen calculada por la ecuación (7) para corregir los volúmenes de los clientes PEC de manera proporcional al consumo.

$$\hat{V}_{S,\text{PEC},i}(h) = \left(1 + \frac{\Delta V_{\text{balance}}(h)}{\sum_i V_{S,\text{SLP},i}(h)}\right) \cdot V_{S,\text{SLP},i}(h) \quad (8)$$

Por último, el volumen total en un punto de salida corresponde a la suma de los volúmenes tomados por los consumidores aguas abajo de ese nodo.

## 2.2 Seguimiento del Poder Calorífico

El método descrito en el apartado anterior, para determinar los volúmenes de salida, es una condición previa fundamental para calcular los flujos de gas en una red, en particular, las velocidades del flujo de gas, y de esta forma simular la distribución del poder calorífico del gas. La información de entrada mostrada en la Tabla 1 es necesaria para poder determinar con exactitud la distribución temporal y espacial del poder calorífico, análogamente a los sistemas de reconstrucción de poder calorífico que existen en la actualidad.

Para implementar este método, se desarrolló en E.ON Ruhrgas un software basado en MATLAB [4]. El software de simulación SIMONE [5], sirve para determinar la velocidad del flujo de gas en todos los nodos de red y se emplea en la actualidad para realizar cálculos hidráulicos. Los dos software se enlazan entre sí. La evaluación de los perfiles estándar de carga, la entrada y salida de datos, así como la visualización de los resultados se llevan a cabo con la herramienta de software basada en MATLAB. Como resultado del cálculo se determinan los valores promedios horarios del poder calorífico en todos los nodos de la red.

Información de entrada para el monitoreo del poder calorífico	Origen de los datos
Valores del poder calorífico en los puntos de entrada	Valores registrados (verificados)
Volúmenes estándar en los puntos de entrada	Valores registrados (verificados)
Volúmenes estándar en los puntos de salida	Valores registrados (clientes RMC) y datos PEC corregidos mediante balance del volumen
Presión de la línea	Valores registrados en puntos representativos
Datos topológicos (tales como longitudes, diámetro de las líneas y rugosidad de las tuberías)	Datos obtenidos del operador de la red

Tabla 1. Información de entrada necesaria para el Monitoreo del Poder Calorífico.

### 3. VALIDACIÓN DEL MÉTODO MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN DE CAMPO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Con el objetivo de validar el método descrito en el segundo apartado, se llevó a cabo un experimento de campo en una subred de gas de alto poder calorífico de E.ON Avacon AG durante el periodo comprendido entre el 15 de diciembre de 2010 y el 31 de agosto de 2011. Durante el periodo observado se dieron diversas condiciones de flujo, condicionadas por la estación del año y la operación de las válvulas. Para llevar a cabo la validación, el poder calorífico se midió en distintos puntos de salida con ayuda de un cromatógrafo de gases (CG) móvil de la empresa Open Grid Europe.

#### 3.1 Topología

La topología de la subred analizada se muestra en la Figura 2. La red consta de 40 puntos de salida (cuyas redes locales son secundarias), tres puntos de entrada de gas natural (LA24, LG01

y LV40) y una entrada de biometano (LA45). Cuatro válvulas (VAL<sub>1</sub>-VAL<sub>4</sub>) sirven para controlar la red. Los tres puntos de entrada de gas natural provienen todos de un gasoducto común, que también aparece esquematizado en la Figura 2.

Por medio de un CG se midió el poder calorífico del biometano condicionado en el punto de alimentación LA45; otro CG se empleó para medir el poder calorífico del gas natural en el punto de entrada de Lüchow (LG01). Puesto que el abastecimiento de los tres puntos de entrada de gas natural se realiza por medio de un mismo gasoducto, también se tomó la medición del CG en LG01 como base para los puntos de entrada LA24 y LV40. Debido a que la velocidad del flujo de gas es baja en el gasoducto y las diferencias resultantes en el tiempo de tránsito, los valores del poder calorífico en los puntos de entrada no coinciden con respecto al tiempo. Por lo tanto se incluyeron los tramos de línea relevantes de la red de transporte en la simulación. Las mediciones del CG en Lüchow (LG01) se tuvieron en cuenta para el cálculo de los retrasos temporales en los puntos de entrada LA24 y LV40.

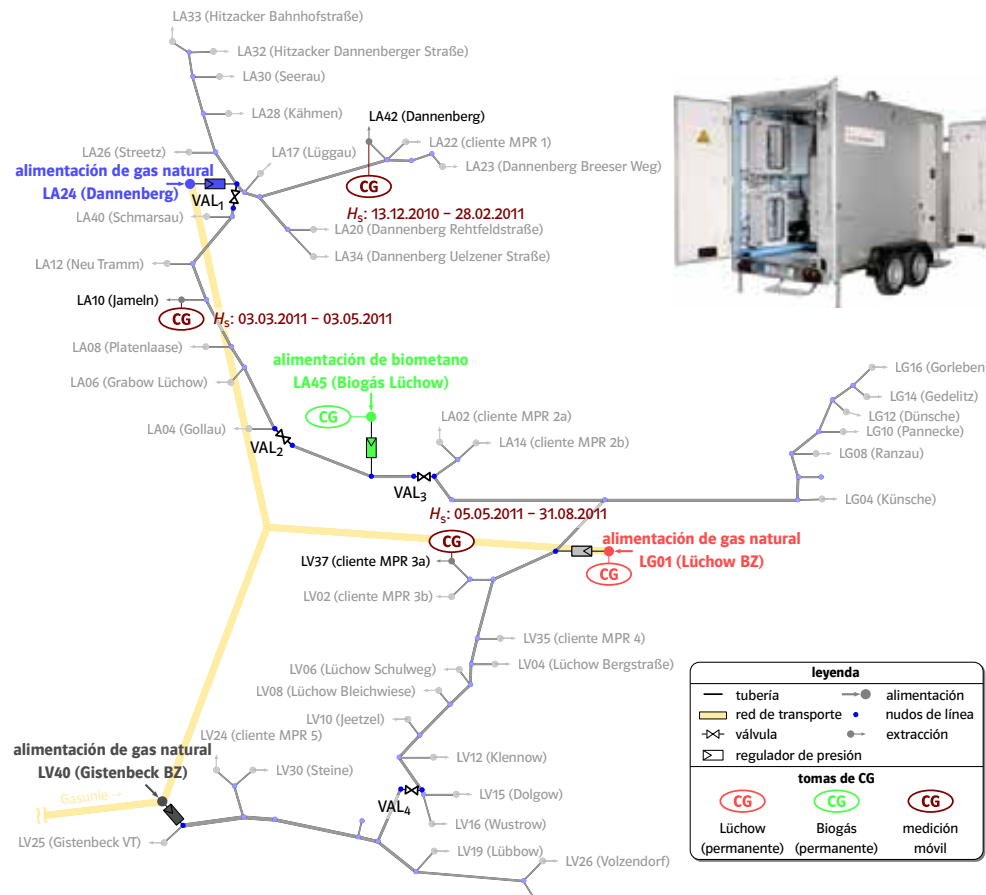


Figura 2. Representación esquemática de la topología «Lüchow-Dannenberg», una subred de gas de alto poder calorífico de E.ON Avacon con 40 puntos de salida, así como del transcurso del gasoducto situado delante. Se han destacado de forma adicional los tres puntos de alimentación por gas natural (LA24, LG01 y LV40), la alimentación por biometano (LA45), así como el lugar y, dado el caso, el periodo de las mediciones con CG (móvil).

En la Figura 2 se muestran los periodos en los cuales el CG móvil estuvo instalado en los puntos de salida LA42, LA10 y LV37. La selección de la localización estuvo sujeta a las condiciones de flujo y las mezclas de gas esperadas, así como a razones prácticas, ya que existen circunstancias que limitan la ubicación del CG móvil (conexiones de gas y electricidad, espacio disponible, etc.) Las mediciones en los puntos de entrada LG01 y LA24, así como las mediciones móviles se llevan a cabo con equipos verificados y confiables.

#### 3.2 Presentación de los resultados

A continuación se presentarán los resultados de las mediciones y un ejemplo de cálculo para dos periodos de tiempo (invierno y verano) con distintas condiciones de flujo en dos puntos de salida (LA42 y LV37). En [6] se puede encontrar una descripción más detallada de los resultados.

A fin de ilustrar la situación de flujo predominante, se ha superpuesto cada tubería de la topografía con una «envolvente», tal y como se ilustra en la Figura 3 para un sector de la topología. La anchura de la envolvente corresponde al flujo

medio de gas a través de la tubería para el periodo analizado. Se asignó a cada punto de entrada un color para visualizar la mezcla de los gases y los respectivos cambios en el poder calorífico (ver Figuras 2 y 3). El grado de mezcla de los distintos gases se representa por medio de mezclas de colores y la coloración de las envolventes de las tuberías.

En la Figura 4 se muestra la evolución en el tiempo del poder calorífico (parte superior izquierda), así como la proporción de los gases inyectados en cada punto de entrada y sus tiempos de tránsito (parte inferior izquierda).

La condición de flujo predominante se ha muestra en la parte derecha de la figura para cada caso. De forma adicional se indica la temperatura media diaria [7] para cada periodo. Junto al poder calorífico medido (—) y calculado (—) en el punto de salida correspondiente, se muestran los valores del poder calorífico en los puntos de entrada LG01 (—), LA24 (—) y LA45 (—). Para propósitos ilustrativos, se ha representado con una banda (—) el «límite del 2 por ciento», es

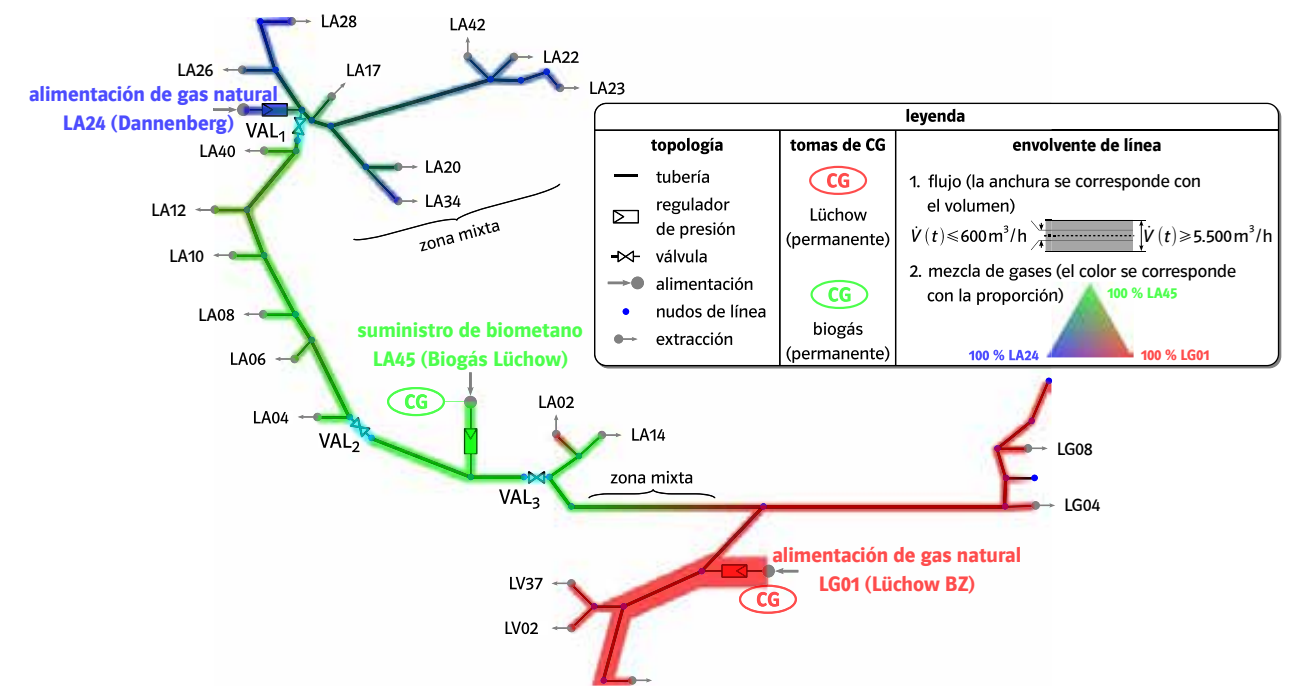


Figura 3. Con objeto de ilustrar las situaciones de flujo predominantes correspondientes, se han superpuesto las tuberías de la topología con una envolvente. La anchura de las envolventes corresponde al flujo promedio de la tubería. Además, se ha asignado un color unívoco a cada punto de alimentación. La mezcla cromática en los puntos de alimentación sirve para ilustrar la ubicación y el grado de la mezcla del gas.



decir, la desviación máxima permitida del poder calorífico medido.

Como se explicó inicialmente, los valores del poder calorífico en los puntos de salida se asignan con respecto al poder calorífico del gas que ingresa a la red sobre una base horaria. En la figura también se muestran las fracciones calculadas para cada valor horario, así como el tiempo de tránsito correspondiente al gas inyectado. Debido a que, dependiendo de la condición de flujo, el gas entregado en un instante determinado ha sido inyectado en diferentes momentos en el punto de entrada, los tiempos de tránsito se muestran como bandas limitadas por tiempos de tránsito mínimo y máximo ( ▬, ▬ y ▬ ).

Con el objeto de comprobar la eficacia del método presentado, se redujo la cantidad de propano mezclada en el biogás durante cada uno de los periodos observados, de manera que se ajustara un poder calorífico de 10,9 kWh/m<sup>3</sup>.

### 3.2.1 Situación de flujo 1 (Medición en LA42)

La situación de flujo mostrada en la parte superior derecha de la Figura 4 tuvo lugar durante el primer periodo (14/01/2011 - 23/01/2011, Ver la mitad superior de la Figura 4). Al punto de entrada de Lüchow (LG01) ingresan aproximadamente 5500 m<sup>3</sup>/h de gas natural; al mismo tiempo se suministran 600 m<sup>3</sup>/h de biometano a la red.

Debido a la alta demanda (temperatura promedio diaria baja), el gas suministrado en Lüchow alcanza a llegar hasta el punto de medición, donde se mezcla con el biometano en la zona de la planta de biogás. De esta manera al CG móvil en el punto de salida LA42 llega una mezcla de gas natural y biometano. Tal y como se muestra en la parte superior izquierda del diagrama de la figura 4, por medio de la coloración de la envolvente de las tuberías, la mezcla en el punto de salida LA42 contiene aprox. 30% de biometano y 70% de gas natural, que se suministró en su mayor parte en el punto de alimentación LG01.

La proporción inferior de biometano el día 24 de enero de 2011 se asocia a la llegada de una ola de frío: este aumento en la demanda de gas natural se cubrió mediante el abastecimiento a partir del punto de alimentación LA24, razón por la cual al punto de salida LA42 llegó una mayor cantidad de gas natural. Así mismo, el biometano inyectado fue consumido en su mayor parte en la sección aguas abajo de la medición. El poder calorífico medido muestra claramente una disminución y las fluctuaciones aumentan durante el periodo en el que se empleó una mezcla con menor cantidad de propano (17/01/2011 - 22/01/2011). Se puede observar que los cálculos obedecen muy bien a las fluctuaciones medidas del poder calorífico y que permanecen durante todo el periodo dentro del límite del 2%.

*El poder calorífico medido muestra claramente una disminución y las fluctuaciones aumentan durante el periodo en el que se empleó una mezcla con menor cantidad de propano (17/01/2011 - 22/01/2011). Se puede observar que los cálculos obedecen muy bien a las fluctuaciones medidas del poder calorífico y que permanecen durante todo el periodo dentro del límite del 2%.*

Ni el poder calorífico medido, ni el calculado se ven afectados por la mezcla con una menor cantidad de propano entre el 18 y el 25 de julio de 2011. Esto también es una indicación de que el punto de salida LV37 únicamente se abastece de gas natural a través de LG01.

### 3.3 Resumen de los resultados

En la Tabla 2 se comparan los valores del poder calorífico calculados y los medidos con base en los promedios mensuales. Los valores de promedio mensual se obtienen a partir de los valores promedio horarios ponderados por unidad de volumen (Ver numeral 3.4).

Mes	H <sub>s</sub> , medido en kWh/m <sup>3</sup>	H <sub>s</sub> , calculado en kWh/m <sup>3</sup>	Δ %
12/2010	11,369	11,368	-0,01
01/2011	11,337	11,335	-0,02
02/2011	11,337	11,339	0,02
03/2011	11,276	11,276	0,00
04/2011	11,284	11,279	-0,04
05/2011	11,353	11,353	0,00
06/2011	11,354	11,355	0,01
07/2011	11,307	11,308	0,01
08/2011	11,213	11,211	-0,02

Tabla 2. Comparación del poder calorífico medido y calculado (promedio mensual)

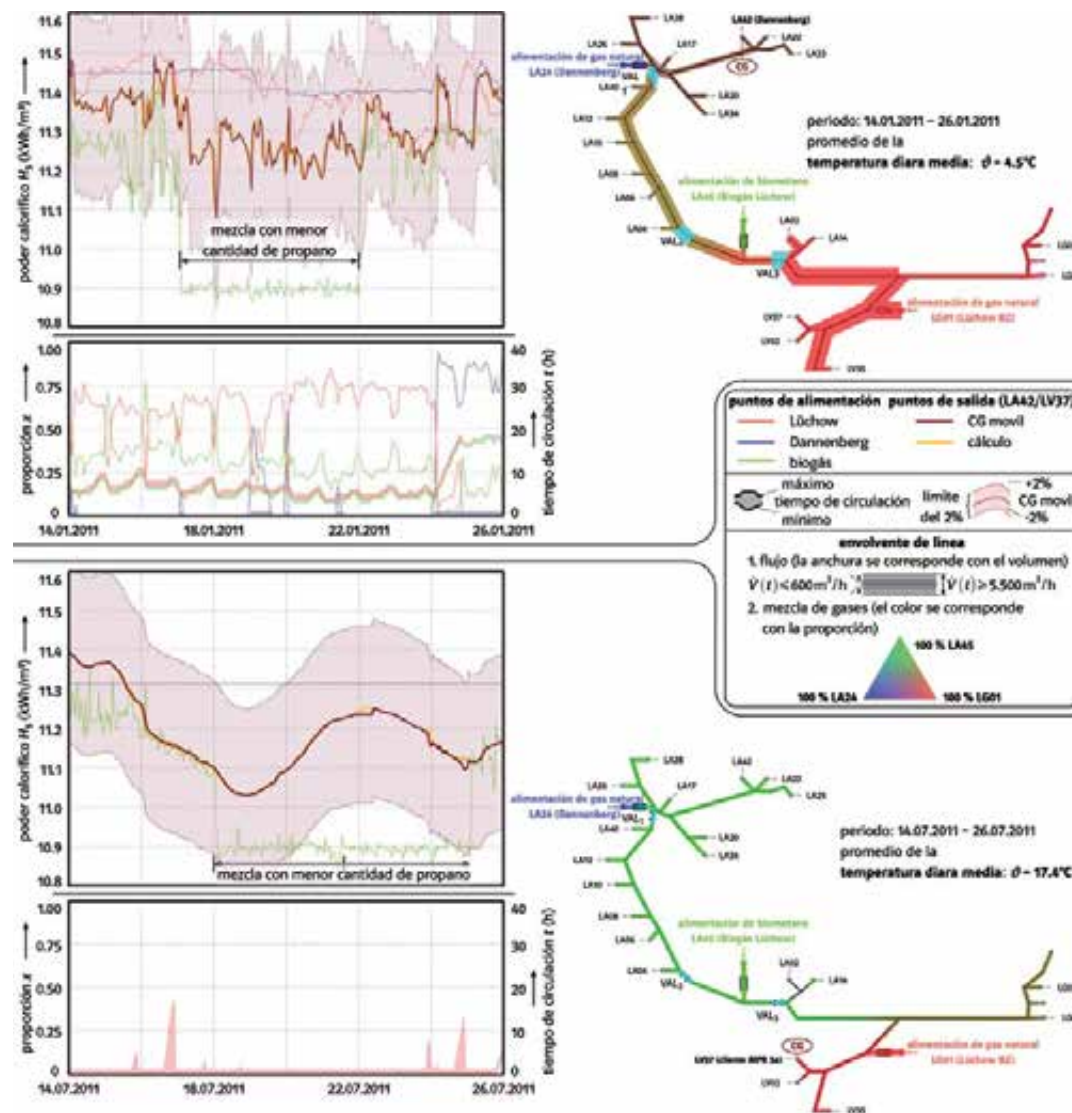


Figura 4. Comparación de los valores del poder calorífico medidos y calculados en el experimento de campo para el punto de salida LA42 en el periodo comprendido entre el 14 y el 26 enero de 2011 (arriba) y para el punto de salida LV37 en el periodo comprendido entre el 14 y el 26 de julio de 2011 (abajo). Se ha ilustrado en la parte derecha la situación de flujo predominante respectiva en relación con la topología.

Se muestra que los valores del poder calorífico medidos coinciden con los calculados: la desviación absoluta es siempre inferior al 0,05% y se encuentra, por lo tanto, dentro de la incertidumbre de medida esperada del CG.

### 3.4. Presentación de los resultados en el informe de facturación

Al finalizar el periodo de facturación (en el ejemplo se presenta mensual), se genera de manera automática un informe de facturación (vea Figura 5), en el que se indica un poder calorífico de facturación para cada punto de salida, determinado al realizar el promedio ponderado por unidad de volumen a partir de los valores horarios calculados.

Se muestra que los valores del poder calorífico medidos coinciden con los calculados: la desviación absoluta es siempre inferior al 0,05% y se encuentra, por lo tanto, dentro de la incertidumbre de medida esperada del CG.

A fin de comprobar la veracidad de los valores, se puede visualizar de forma adicional un informe más detallado. En él se describen las proporciones de volumen y los tiempos de tránsito promedios del gas suministrado en cada punto de salida (ver Figura 5, derecha). Para los valores del poder calorífico de cada hora es posible, además, indicar las proporciones exactas calculadas de los valores del poder calorífico de entrada medidos y verificados, tal y como se muestra en el ejemplo de la Figura 6.

A partir de los valores de la Figura 6 es posible deducir el poder calorífico por hora calculado mediante los valores caloríficos de entrada medidos y verificados.

información de facturación			información detallada									
punto de salida ID	periodo desde - hasta	poder calorífico de facturación $H_{s, fac}$ en kWh/m <sup>3</sup>	volumen adquirido $V_n$ en m <sup>3</sup>	punto de alimentación LG01 (Lüchow, gas natural)			punto de alimentación LA45 (Lüchow, biometano)			punto de alimentación LA24 (Dannenberg, gas natural)		
				$\bar{H}_{s,A}$ en kWh/m <sup>3</sup>	$\bar{x}_i$ en %	$\bar{t}$ en h	$\bar{H}_{s,A}$ en kWh/m <sup>3</sup>	$\bar{x}_i$ en %	$\bar{t}$ en h	$\bar{H}_{s,A}$ en kWh/m <sup>3</sup>	$\bar{x}_i$ en %	$\bar{t}$ en h
LV04	01.01.2011 - 31.01.2011	11,380	318.317	11,38	100,0	0,1						
LV06	01.01.2011 - 31.01.2011	11,380	318.317	11,38	100,0	0,1						
LV12	01.01.2011 - 31.01.2011	11,380	7.762	11,38	100,0	0,6						
LA10	01.01.2011 - 31.01.2011	11,298	71.294	11,38	51,81	2,5	11,19	48,19	4,7			
LA32	01.01.2011 - 31.01.2011	11,335	201.106	11,38	48,54	4,8	11,19	22,56	9,5	11,35	28,90	0,5
LA42	01.01.2011 - 31.01.2011	11,335	247.958	11,38	48,32	4,2	11,19	22,48	8,9	11,35	29,20	0,1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Figura 5. Representación modelo del informe de facturación, dividido en la información de facturación (izquierda) y la información detallada (derecha). Los datos necesarios para realizar la facturación (punto de salida, el periodo y el poder calorífico respectivo) pueden completarse, si fuera necesario, con informaciones detalladas tales como el volumen adquirido calculado y las proporciones de gas calculadas en los puntos de salida.

información por horas			composición								
punto de salida ID	fecha t hora	poder calorífico $H_s(t)$ en kWh/m <sup>3</sup>	punto de alimentación LG01 (Lüchow, gas natural)			punto de alimentación LA45 (Lüchow, biometano)			punto de alimentación LA24 (Dannenberg, gas natural)		
			$H_{s,A}(\tau)$ en kWh/m <sup>3</sup>	$x_i$ en %	fecha de alimentación $\tau$	$H_{s,A}(\tau)$ en kWh/m <sup>3</sup>	$x_i$ en %	fecha de alimentación $\tau$	$H_{s,A}(\tau)$ en kWh/m <sup>3</sup>	$x_i$ en %	fecha de alimentación $\tau$
LA42	19.01.2011 05:00	11,23	11,45	32,79	18.01.2011 21:00	10,91	26,52	18.01.2011 22:00			
			11,46	26,85	18.01.2011 22:00	10,89	13,84	18.01.2011 23:00			
	19.01.2011 06:00	11,20	11,45	38,46	18.01.2011 23:00	10,89	42,89	19.01.2011 00:00	11,46	13,98	19.01.2011 06:00
			11,44	3,25	19.01.2011 00:00	10,89	1,42	19.01.2011 01:00			
	19.01.2011 07:00	11,28	11,44	19,68	19.01.2011 00:00	10,89	22,80	19.01.2011 01:00	11,46	6,47	19.01.2011 06:00
			11,43	9,54	19.01.2011 01:00	10,89	8,59	19.01.2011 02:00	11,46	32,92	19.01.2011 07:00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

Figura 6. Representación (modelo) del informe de facturación con todos los detalles. Aquí es posible atribuir cada promedio por hora a los valores medidos y verificados del poder calorífico de en los puntos de entrada. Cada valor horario del poder calorífico corresponde al total ponderado de todos los valores del poder calorífico de entrada.

### 4. RESUMEN Y PERSPECTIVA

En este artículo se ha presentado un método nuevo para realizar el monitoreo al poder calorífico en redes regionales y de distribución con el propósito de realizar la facturación de los clientes finales; el método fue validado en el marco de un experimento de campo. El experimento de campo tuvo lugar durante un periodo de ocho meses en una red de gas de alto poder calorífico de E.ON Avacon AG (tres puntos de entrada de gas natural y un punto de entrada de biometano). Con ayuda de un CG móvil se midió el poder calorífico del gas en diferentes puntos y se comparó con los valores calculados. Las desviaciones en el promedio mensual fueron siempre inferiores al 0,05% y quedan, por tanto, dentro de los límites de la incertidumbre de medida del CG. Adicionalmente, se han mostrado las posibilidades de visualización de los resultados. La condición de flujo se ha representado por medio de envolventes de las tuberías en la topología. Los valores del poder calorífico de cada punto de salida se resumen en un informe de facturación, en el que es posible, con todo detalle, deducir el poder calorífico de facturación de los valores por hora medidos y verificados en los puntos de entrada.

De acuerdo con lo expuesto en la hoja de trabajo alemana sobre la facturación del gas (G685), en agosto de 2011, se presentó la solicitud para obtener la autorización del método de facturación de clientes finales en la oficina de pesos y medidas de Baja Sajonia (MEN), que otorgó la autorización el 9 de agosto de 2012. En el marco de la implementación se llevará a cabo una transferencia del método a las aplicaciones de cálculo y simulación que E.ON Avacon AG ya emplea en la actualidad.

[4] MATLAB: The Language of Technical Computing - using MATLAB Version 7.6.0.32 R 2008a, The MathWorks (2008).

[5] Simone Software Benutzerhandbuch Version 5, Fa. Liwacom (2007).

[6] J. Schenk, P. Schley, A. Hielscher, S. Mäurer und C. Fernandez: Brennwertverfolgung in Verteilnetzen - Teil 2: Auswertung Feldversuch und Implementierung, gwf-Gas|Erdgas 9 (2011)

[7] Servicio meteorológico alemán, <http://www.dwd.de/>

#### Símbolos

- $h$  Función sigmoide
- $p$  Presión del gas (absoluta)
- $Q$  Consumo de energía en kWh
- $T$  Temperatura del gas en K
- $\vartheta$  Temperatura ambiente en ° C
- $V$  Volumen estándar

#### Índices

- $S$  Salida
- $CG$  Cromatógrafo de Gases
- $E$  Entrada
- $l$  Índice de carrera
- $h$  En relación con los promedios horarios
- $n$  Condiciones estándar ( $p_n = 1013,25 \text{ Pa}$ ;  $T_n = 273,15 \text{ K}$ )
- $RMC$  Registro de Medición de Consumo
- $PEC$  Perfil estándar de carga

### 5. REFERENCIAS

[1] DVGW Arbeitsblatt G685: Gasabrechnung, DVGW Technische Regel, septiembre 2008.

[2] K. Altfeld, J. Bödeker, H. Frieling, P. Schley y M. Uhrig: Modelling of Gas Flow in Pipelines Tracking Gas Quality. Proceedings of the 2008 International Gas Research Conference, Paris (2008).

[3] M. Hellwig: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lasertprofile, Technische Universität München, Dissertation (2003).