

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 830**

51 Int. Cl.:

G01N 33/22 (2006.01)

G01N 25/18 (2006.01)

G01N 29/024 (2006.01)

G01S 7/41 (2006.01)

G01N 22/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.09.2016 E 16189761 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019 EP 3296736**

54 Título: **Método y sistema para medir el contenido energético del gas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
17.02.2020

73 Titular/es:

**SP TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE OF
SWEDEN (100.0%)
P.O. Box 857
50115 Borås, SE**

72 Inventor/es:

BÜKER, OLIVER

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 742 830 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método y sistema para medir el contenido energético del gas.

5 Campo de la invención

Esta invención se refiere a métodos y sistemas para medir el contenido de energético de un gas, tal como un gas combustible de hidrocarburo que fluye en una tubería.

10 Un sistema conocido descrito en el documento US 6,244,097 determina el contenido energético de un gas con el uso de la correlación de la velocidad del sonido en el gas con su constante dieléctrica y el contenido de dióxido de carbono del gas.

15 Antecedentes

El contenido energético de los gases combustibles como el gas natural (NG), el gas natural licuado (LNG), el gas natural comprimido (CNG), el biogás, etc. puede variar como resultado de variaciones en la composición de los gases, tanto en términos de mezcla de hidrocarburos, como en términos del contenido de gases caloríficamente inertes como el nitrógeno y el dióxido de carbono. Los clientes por los gases combustibles pagan de acuerdo con la energía del gas suministrado. Esto significa que es necesario determinar la masa o el volumen y el contenido energético del gas suministrado (expresado como energía por unidad de masa o unidad de volumen) para que pueda determinarse el suministro total de energía. En consecuencia, una medición de flujo simple (por masa o volumétrica) solo proporcionará la masa o el volumen suministrado y no un valor preciso para el contenido energético del gas suministrado a través de una tubería. Tal medición a veces se conoce como monitoreo o medición "fiscal", por ejemplo, la medición fiscal usada para la transferencia de custodia.

El contenido energético o valor calorífico (el término "contenido energético" usado en la presente descripción incluye el valor calorífico y el valor térmico) de los gases puede determinarse calorimétricamente, pero ha sido difícil proporcionar tales mediciones en línea para los gases que fluyen. Alternativamente, la composición química de los gases puede determinarse por cromatografía de gases (GC). Esto permite calcular el contenido energético. Sin embargo, nuevamente, tales sistemas han sido difíciles de proporcionar como una medición en línea (casi) en tiempo real y los instrumentos son complejos y costosos.

Para evitar los problemas del análisis de composición completa, o calorimetría directa, se han propuesto una serie de técnicas conocidas como medición de "correlación". En las mediciones de correlación, se obtienen una serie de valores de medición "incompletos", tales como propiedades físicas o mediciones de componentes específicos, y se desarrollan correlaciones que indican el contenido energético del gas que proporciona tales valores. La precisión de tales técnicas depende de los parámetros seleccionados para la medición y las técnicas usadas para medir los parámetros. Si bien las mediciones de correlación pueden proporcionar una precisión razonable, la complejidad de algunas de las tecnologías de medición y sus costos ha significado que la adopción se haya limitado hasta la fecha.

El objetivo de esta invención es proporcionar una técnica de medición de correlación que se base en tecnologías robustas y ampliamente disponibles con el objetivo de reducir los costos del ciclo de vida.

45 Resumen

Un primer aspecto de la invención proporciona un método para medir el contenido energético de un gas, que comprende: medir la velocidad del sonido en el gas; medir la permitividad relativa (constante dieléctrica) del gas con el uso de un sensor de radar de onda guiada; y correlacionar la velocidad medida del sonido y la permitividad relativa para obtener el contenido energético del gas.

50 Cuando el gas fluye en un conducto, las mediciones de la velocidad del sonido y la permitividad relativa se realizan en el gas que fluye. La medición puede comprender además determinar los parámetros de volumen, presión y temperatura del gas que fluye, y usar los parámetros para obtener el contenido energético del gas.

55 La medición de la permitividad relativa del gas puede comprender una medición de reflectometría de dominio de tiempo de un pulso de microondas en una guía de onda.

60 Los sensores de radar de onda guiada están ampliamente disponibles como sensores de nivel para el monitoreo de procesos, que típicamente se usan para medir el nivel de un líquido o sólido en un contenedor o línea de proceso. La medición del tiempo de vuelo en un sensor de radar de onda guiada es dependiente de la permitividad relativa del medio a través del cual se propaga la onda.

65 El método puede comprender además medir el contenido de dióxido de carbono del gas y correlacionar la velocidad medida del sonido, la permitividad relativa y el contenido de dióxido de carbono para obtener el contenido energético del gas.

5 El gas puede ser gas natural (NG), gas natural licuado (LNG), gas natural comprimido (CNG) o biogás. Cuando el gas es LNG, puede no ser necesario medir el contenido de dióxido de carbono. El término "gas" usado en la presente descripción incluye no solo hidrocarburos en fase gaseosa, tal como podría usarse para combustible de gas, sino además las formas licuadas, tales como LNG, típicamente usadas para almacenamiento y transporte.

10 Un segundo aspecto de la invención proporciona un sistema para medir el contenido energético de un gas, que comprende un primer sensor para medir la velocidad del sonido en el gas; un segundo sensor para medir la permitividad relativa del gas con el uso de un sensor de radar de onda guiada; y un correlacionador configurado para correlacionar la velocidad medida del sonido y la permitividad relativa para obtener el contenido energético del gas.

15 El sistema puede comprender además un conducto que aloja los sensores y a través del cual fluye el gas. El sistema puede comprender además sensores adicionales para determinar los parámetros de volumen, presión y temperatura del gas que fluye, en donde el correlacionador se configura para usar los parámetros para obtener el contenido energético del gas.

El primer sensor puede comprender un medidor de flujo ultrasónico u otro sensor que sea capaz de medir la velocidad del sonido.

20 El segundo sensor puede comprender una fuente de microondas y una guía de ondas de configuración predeterminada, el segundo sensor que se configura para proporcionar una medición de reflectometría en el dominio de tiempo de un pulso de microondas reflejado por una característica predeterminada de la configuración de la guía de ondas, tal como el extremo de una barra de referencia montada en la guía de onda, para determinar la permitividad relativa del gas.

25 El sistema puede comprender además un tercer sensor, como un sensor infrarrojo, para medir el contenido de dióxido de carbono del gas, y en donde el correlacionador se configura para usar la velocidad medida del sonido, la permitividad relativa (constante dieléctrica) y el contenido de dióxido de carbono para obtener el contenido energético del gas.

30 El sistema puede comprender además un procesador configurado para recibir la salida del correlacionador como entrada, y para emitir valores de valor calorífico superior, índice de Wobbe y densidad normal del gas.

35 En ciertos casos la velocidad de la medición del sonido puede reemplazarse por una medición de densidad. El sistema puede comprender además sensores adicionales para proporcionar mediciones múltiples de un parámetro dado, o mediciones de parámetros adicionales en dependencia de los requisitos.

Otros aspectos de la invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción.

Dibujos

40 La Figura 1 muestra una vista esquemática de un sistema de medición de nivel de radar de onda guiada; La Figura 2 muestra una gráfica de niveles en metano obtenidos con un sistema correspondiente a la Figura 1; La Figura 3 muestra un gráfico de constante dieléctrica teórica y medida con respecto a la presión de nitrógeno y metano; La Figura 4 muestra una vista esquemática de un sistema para determinar el contenido energético de un gas.

45 Descripción

50 Anteriormente se han propuesto varias técnicas para mediciones de correlación para determinar el contenido energético de los gases. Pueden encontrarse ejemplos en "Thermodynamic research improves energy measurement of natural gas" M. Jaeschke, *Thermochemical Acta* 382 (2002) 37 - 45, y en US 627380 y US 2002/0124630. Entre las técnicas descritas, se describen las mediciones de permitividad relativa o constante dieléctrica (ϵ_r). Se describe un dispositivo de cavidad reentrante operado como un resonador LC para derivar valores de permitividad relativa. Dichos dispositivos tienen costos de producción y tolerancias técnicas altos, por lo que no han sido ampliamente adoptados para tal uso.

55 Esta invención se basa en el reconocimiento de que las mediciones realizadas con el uso de dispositivos de radar de onda guiada (GWR) pueden proporcionar la información necesaria para determinar la permitividad relativa de una fase gaseosa con suficiente precisión para el monitoreo del contenido energético.

60 En los últimos años, los dispositivos GWR se han convertido en un método popular para medir niveles tal como los niveles de líquido en los equipos de proceso, por ejemplo, en la industria del petróleo y el gas. Se considera que los sensores de nivel de GWR ofrecen ventajas de confiabilidad y mantenimiento sobre muchas otras tecnologías de medición que se han usado tradicionalmente. En general, se considera que los sensores de nivel de GWR no se ven afectados por las propiedades del gas presente sobre el líquido en muchas condiciones de proceso. De hecho, esto es solo parcialmente cierto y las densidades elevadas de los gases pueden conducir a una pérdida de precisión cuando se usa GWR para la medición de nivel.

65 Un sensor de nivel de GWR es un dispositivo reflectómetro de dominio de tiempo (TDR) (dispositivo de medición de tiempo

de vuelo). Un ejemplo de dicho dispositivo se muestra en la Figura 1 y comprende un módulo electrónico 10 que incluye una fuente de señal de microondas y una guía de ondas 12. El dispositivo se monta en el equipo de proceso 14, tal como un tanque o tubería, de manera que el módulo electrónico 10 se monte en una superficie externa del equipo de proceso 14 en una brida de montaje 16. La guía de ondas 12 se proyecta dentro del equipo de proceso 14 de manera que se extienda a través de una fase gaseosa 18 y dentro de una fase líquida 20. En la configuración de la guía de ondas que se muestra en la Figura 1, se proporciona una característica de referencia que comprende una varilla de referencia 22 dentro del equipo de proceso debajo de la brida de montaje 16. Una sección corta 24 de la guía de ondas 12 se extiende a través de la brida fuera del equipo de proceso 14, el módulo electrónico 10 se monta en el extremo de esta sección corta 24. En uso normal, la guía de ondas se coloca de tal manera que su extremo interno se encuentre debajo de la superficie 26 de la fase líquida 20.

En uso, se emite un pulso de microondas desde el módulo electrónico 10 y viaja por la guía de ondas 12 a la superficie del líquido 26. En la superficie 26, una porción de la energía se refleja y esta viaja de regreso a lo largo de la guía de ondas 12 al módulo electrónico 10 donde se detecta. Si la velocidad v del pulso de microondas es conocido, y el tiempo t entre la emisión del pulso y la recepción del reflejo se mide, entonces la distancia d a la superficie del líquido puede calcularse con el uso de la ecuación 1. A partir de esta distancia medida, después el transmisor calcula y emite el nivel del líquido.

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (1)$$

En el vacío, una onda electromagnética viajará a la velocidad de la luz c que se relaciona con la permitividad del vacío ϵ_0 y la permeabilidad μ_0 por la relación que se muestra en la ecuación 2.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2)$$

La velocidad de propagación del pulso de microondas usado para la medición del nivel se verá afectada por la fase gaseosa, de manera que la velocidad ya no será la velocidad de la luz, sino que tendrá una velocidad menor v . La ecuación 3 relaciona la velocidad con las propiedades del material mediante el uso de la permitividad relativa ϵ_r y la permeabilidad relativa μ_r .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (3)$$

Para la mayoría de los materiales transparentes $\mu_r \approx 1$. Teniendo esto en cuenta y al combinar las ecuaciones 2 y 3, puede afirmarse que la velocidad varía con la raíz cuadrada de la permitividad relativa.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

Si el proceso siempre contiene el mismo tipo de gas y funciona a una densidad de gas constante, entonces es relativamente fácil tener en cuenta la velocidad de propagación reducida dentro del sistema de control, pero existen problemas inherentes al usar este método:

- El retraso causado por la fase gaseosa debe ser conocido.
- Puede ser posible calcular la corrección de nivel requerida con el uso de los datos de gas publicados, pero esto es complejo para mezclas de gases.
- Durante los cambios de funcionamiento en la mezcla de gases, la temperatura o la presión pueden conducir a errores considerables.

Una forma de compensar consistentemente este efecto es medir directamente la velocidad de propagación a través del gas y compensarlo continuamente.

El sistema de la Figura 1 tiene una compensación automática integrada de fase gaseosa. Esta función integrada proporciona la posibilidad de corregir la información del nivel con respecto a los cambios de temperatura y presión, que a su vez pueden estar relacionados con el cambio de la permitividad relativa del gas por encima de la superficie del líquido.

El principio adoptado para la compensación automática de la fase gaseosa es presentar un objetivo, la varilla de referencia 22 colocada a una distancia fija a lo largo de la guía de ondas como se muestra en la Figura 1.

La disminución gradual del diámetro de la guía de ondas 12 debido a la varilla de referencia 22 crea un eco de radar a una distancia física conocida, la "distancia de referencia física". Puede verse que a medida que aumenta la presión del gas, y por lo tanto el dieléctrico relativo del gas, los ecos de radar recibidos desde el objetivo de referencia 22 "Distancia de referencia aparente" y la superficie del líquido 26 "Distancia aparente" se desplazan hacia abajo lo que parece estar a una mayor distancia. Ambos ecos se desplazan por el mismo factor, por lo tanto, cuanto mayor sea la distancia, mayor

será el cambio visto, como es evidente por el mayor cambio visto en la distancia medida en comparación con la distancia de referencia. Como la demora a través de la fase gaseosa se mide directamente por la sección de referencia, esto corregirá la distancia medida "Distancia compensada" independientemente de las propiedades de la fase gaseosa en todo el rango de temperatura y presión. Esta medición permite la introducción de un denominado "microfactor" que se relaciona con la velocidad con la que la señal electromagnética se propaga a lo largo de la guía de ondas 12. Un microfactor de 1 significa que la señal se propaga con la velocidad de la luz. En el caso del sistema de la Figura 1, la compensación de la fase gaseosa se calcula a partir del desplazamiento aparente Δ Referencia en la distancia medida al eco desde el final de la sección de referencia 22 causada por la velocidad de propagación de la onda más lenta:

$$\text{microfactor} = \frac{\text{Distancia de referencia física}}{\text{Distancia de referencia aparente}} \quad (5)$$

Este método de compensación automática de fase gaseosa puede usarse además para medir la permitividad relativa dependiente de la presión (= constante dieléctrica) ϵ_r de la fase gaseosa 18 ya que el microfactor se relaciona directamente con la permitividad relativa:

$$\epsilon_r = \frac{1}{\text{microfactor}^2} \quad (6)$$

La determinación de la permitividad relativa ϵ_r se lleva a cabo automáticamente a través de la determinación del valor del microfactor (ver la ecuación 5) y la conversión del valor del microfactor en la permitividad relativa con el uso de la ecuación 6.

La ecuación de Clausius-Mossotti relaciona la propiedad macroscópica constante dieléctrica relativa ϵ_r con la propiedad microscópica polarizabilidad α :

$$P_m = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \cdot \frac{1}{\rho_m} = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0} = \frac{4\pi}{3} N_A \cdot \alpha' \quad (7)$$

La polarización molar P_m es casi independiente de la densidad molar ρ_m . Muchos gases muestran una desviación pequeña pero significativa de un gas ideal y, por lo tanto, de la ecuación 7. Estas desviaciones pueden considerarse por medio de la expansión virial. Los coeficientes viriales caracterizan las interacciones entre las partículas en el sistema, lo que hace posible representar la dependencia de la temperatura y la densidad de la polarización molar:

$$P_m = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \cdot \frac{1}{\rho_m} = A_\epsilon + B_\epsilon \cdot \rho_m + C_\epsilon \cdot \rho_m^2 + \dots \quad (8)$$

$A_\epsilon = 4\pi \cdot N_A \alpha' / 3 = N_A \alpha / 3\epsilon_0$ es el primer coeficiente virial y B_ϵ y C_ϵ son los coeficientes viriales segundo y tercero. La ecuación 8 es válida para gases no polares. Para moléculas con un momento dipolar permanente μ , un término adicional contribuye a la expansión de baja densidad de la polarización molar de acuerdo con la ecuación de Debye:

$$P_m = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \cdot \frac{1}{\rho_m} = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \left(\alpha + \frac{\mu^2}{3k_B T} \right) = A_\epsilon + A_\mu \quad (9)$$

$A_\epsilon = N_A \mu^2 / 3\epsilon_0 k_B T$ se debe a la contribución del momento dipolar permanente, que es insignificante cuando el medio no es polar. La ecuación 9 puede expresarse además por medio de coeficientes viriales, lo que resulta en:

$$P_m = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \cdot \frac{1}{\rho_m} = A_\epsilon + A_\mu + B_\epsilon \cdot \rho_m + C_\epsilon \cdot \rho_m^2 + \dots \quad (10)$$

Debido a que los términos de orden superior son difíciles de extraer de los datos, se eligió una forma empírica para extender la correlación a altas densidades. La forma final de la correlación dada por Harvey y Lemmon es la siguiente:

$$P/\rho_m = P_m = A_\epsilon + A_\mu^*/T + B_\epsilon \cdot \rho_m + C \cdot \rho_m^D \quad (11)$$

En este caso la polarización eléctrica P puede expresarse como

$$P = P_m \rho_m = (\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2).$$

Además, $A_\mu^* = N_A \mu^2 / 9\epsilon_0 k_B = A_\mu T$

debería aclarar la dependencia de la temperatura del coeficiente A_μ . Los coeficientes viriales A_ϵ , B_ϵ y C como parámetro empírico (en contraste con las ecuaciones 8 y 10) se hicieron dependientes de la temperatura de la siguiente manera:

$$A_\varepsilon = a_0 + a_1 \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (12a)$$

$$B_\varepsilon = b_0 + b_1 \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \quad (12b)$$

$$C = c_0 + c_1 \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \quad (12c)$$

10 Las mediciones se realizaron con (1) nitrógeno y (2) metano N55 (metano de investigación con alta pureza) a presiones entre 0.1 MPa y 30/35 MPa.

El metano (cilindro de gas presurizado con presión de 20MPa y volumen de 50 l) tenía la siguiente composición:

15	- CH ₄	≤ 99.9995 % en Vol.
	- N ₂	≤ 2 ppmv
	- O ₂	≤ 0.5 ppmv
20	- H ₂ O	≤ 2 ppmv
	- CO ₂	≤ 0.1 ppmv
	- Otros hidrocarburos	≤ 0.15 ppmv

25 Los parámetros requeridos para la correlación de la polarización molar P_m con la ecuación 11 se proporcionan por Harvey AH, Lemmon EW, "Method for Estimating the Dielectric Constant of N", International Journal of Thermophysics 2005; 26(1): 31-46. La Tabla 1 es un extracto de esta tabla que incluye los datos de nitrógeno y metano.

30 Tabla 1: Parámetros para la correlación de la polarización molar P_m con la ecuación 10 de acuerdo con *Harvey y Lemmon* [27]

Fluido	$a_0 \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$	$a_1 \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$	$A_\mu^* \text{cm}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}$	$b_0 \text{cm}^6 \text{mol}^{-2}$	$b_1 \text{cm}^6 \text{mol}^{-2}$	$c_0 \text{cm}^6 \text{mol}^{-2}$	$c_1 \text{cm}^{3(D+1)} \text{mol}^{-(D+1)}$	D
35 N ₂	4.3872	0.00226	0	2.2060	1.1350	-169.00	-35.83	2.1
CH ₄	6.5443	0.01330	0	8.4578	3.7196	-352.97	-100.65	2.0

40 Puede encontrarse un resumen de los resultados de las mediciones con nitrógeno en la Tabla 2 que muestra una comparación de los valores medidos ε_{med} con valores teóricos ε_{teo} para presiones en el intervalo entre 0.01 MPa a 29.96 MPa y temperaturas entre 12.8 °C a 20.1 °C. Los datos para la densidad molar requerida ρ_{metro} se obtuvieron de P.J. Linstrom y W.G. Mallard (editores): NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2005 (<http://webbook.nist.gov/chemistry>) que considera la presión y temperatura respectivas.

45

50

55

60

65

Tabla 2: Comparación de la constante dieléctrica teórica ϵ_{teo} , de acuerdo con *Harvey y Lemmon* [27] con la constante dieléctrica medida ϵ_{med} , para nitrógeno.

Temp. °C	Presión MPa	ρ_m mol m ⁻³	A_ϵ	A_μ^*	B_ϵ	C	P_m	ϵ_{teo} -	Microfactor -	ϵ_{med} -
12.8	0.01	4.2062	4.38731	0	2.15520	-167.39620	0.000018	1.00006	1.0000	1.00000
13.8	2.53	1066.8417	4.38731	0	2.15142	-167.27692	0.004683	1.01411	0.9943	1.01150
13.7	5.12	2165.7068	4.38731	0	2.15179	-167.28881	0.009510	1.02880	0.9878	1.02485
15.5	10.30	4298.6210	4.38733	0	2.14505	-167.07606	0.018886	1.05775	0.9749	1.05216
17.0	15.19	6178.7653	4.38734	0	2.13950	-166.90078	0.027151	1.08373	0.9638	1.07653
17.8	20.09	7903.7870	4.38735	0	2.13656	-166.80804	0.034728	1.10793	0.9545	1.09761
20.1	25.00	9385.3959	4.38737	0	2.12821	-166.54422	0.041227	1.12900	0.9459	1.11766
18.6	25.47	9582.3729	4.38735	0	2.13364	-166.71580	0.042090	1.13182	0.9443	1.12145
20.1	27.58	10132.9289	4.38737	0	2.12821	-166.54422	0.044502	1.13972	0.9412	1.12885
20.1	29.96	10781.5066	4.38737	0	2.12821	-166.54422	0.047341	1.14908	0.9382	1.13608

ES 2 742 830 T3

En la Tabla 3 puede encontrarse una compilación de los resultados de la medición con respecto a las investigaciones con metano con el uso del mismo método para presiones en el intervalo entre 0.07 MPa a 35.04 MPa y temperaturas entre 10.5 °C a 20.8 °C.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Tabla 3: Comparación de la constante dieléctrica teórica $\epsilon_{teo.}$ de acuerdo con *Harvey y Lemmon* [27] con la constante dieléctrica medida $\epsilon_{med.}$ para metano.

Temp. °C	Presión MPa	ρ_m mol m ⁻³	A_ϵ	A_μ^*	B_ϵ	C	P_m	$\epsilon_{teo.}$ -	Microfactor -	$\epsilon_{med.}$ -
10.5	0.07	29.7240	6.54481	0	8.32011	-349.24432	0.000195	1.00058	1.0000	1.00000
13.3	2.64	1169.3912	6.54495	0	8.28510	-348.29694	0.007664	1.02317	0.9916	1.01701
15.4	5.32	2462.8558	6.54505	0	8.25929	-347.59847	0.016164	1.04929	0.9804	1.04038
17.9	10.00	4946.7632	6.54517	0	8.22905	-346.78009	0.032537	1.10089	0.9580	1.08960
19.4	15.01	7687.4424	6.54524	0	8.21115	-346.29578	0.050644	1.16004	0.9333	1.14804
20.1	20.14	10168.1649	6.54528	0	8.20286	-346.07146	0.067038	1.21556	0.9131	1.19940
20.4	25.00	12039.8379	6.54529	0	8.19932	-345.97565	0.079389	1.25871	0.8993	1.23649
20.7	29.99	13533.5633	6.54531	0	8.19579	-345.88004	0.089225	1.29390	0.8861	1.27360
20.8	35.04	14741.9288	6.54531	0	8.19461	-345.84821	0.097163	1.32286	0.8758	1.30374

Se tuvieron en cuenta las temperaturas reales para el cálculo del valor teórico de la permitividad relativa (constante dieléctrica) en todos los casos.

La determinación del microfactor y, por lo tanto, de la constante dieléctrica se realizó con el uso de los datos de la señal (curvas envolventes) del sistema GWR (ver la Figura 2 como ejemplo para la medición de metano a 35.04 MPa a una temperatura de 20.8 °C). Como puede verse, el "pico" obtenido de la posición de referencia (varilla de referencia) se desplazó de 545 mm (señal de mapa A) a 638 mm (curva de envolvente A). Debido a la construcción del sistema de la Figura 1, el dieléctrico del gas afecta además la señal por encima del punto de referencia cero de la cara de la brida 16. El factor de corrección (microfactor) puede calcularse conforme la ecuación 5 con la consideración de la distancia adicional d_F para tener en cuenta la longitud de la sección 24.

$$\text{microfactor} = \frac{\text{Distancia de referencia física} + d_F}{\text{Distancia de referencia aparente} + d_F} \quad (13)$$

El valor d_F depende principalmente del tamaño de la brida. Para el sistema de la Figura 1 usado para estas pruebas, la distancia adicional tiene un valor de $d_F = 96$ mm. El resultado es un microfactor de 0.8733 o un valor correspondiente para la constante dieléctrica ϵ_r de 1:31122 (ver la ecuación 6). En la Figura 3 se presenta una comparación de los valores, que incluyen los datos de medición de nitrógeno y de metano. Como puede verse, los valores medidos tienen la misma curva característica que los valores teóricos pero están por debajo (desplazamiento negativo) de la curva teórica en ambos casos.

El sesgo o error sistemático puede tener muchas causas. En el caso del sistema usado para los resultados experimentales citados, la varilla de referencia 22 (500 mm) se instaló a una distancia de 45 mm del lado interno de la brida superior. Esto resulta en una distancia física de la varilla de referencia de 545 mm. Debido al diseño del sistema, el acoplamiento de la señal GWR ya está a una distancia fija $d_F = 96$ mm por encima de la brida. Esta distancia, como valor recomendado proporcionado por la fabricación del medidor de nivel, se suma al diseño del medidor de nivel principalmente en función del grosor de la brida de conexión 16. Como puede verse en las Tablas 2 y 3, ya existe una desviación entre las constantes dieléctricas teóricas y medidas a (aproximadamente) la presión atmosférica. Estas desviaciones aparentemente están relacionadas con un valor d_F incorrecto. La determinación de una nueva d_F a partir de los valores medidos mediante el uso de un método de mínimos cuadrados redonda en mejores resultados. Con el valor calculado, la curva de la constante dieléctrica teórica y la curva de la constante dieléctrica medida coinciden dentro de una incertidumbre expandida U ($k = 2$) de 0.5%. Otra fuente de incertidumbre es el método en sí. La incertidumbre de medición puede reducirse mediante el uso de una mayor distancia de referencia física (distancia hasta el extremo de la varilla de referencia 22). Cualquier error de medición presente en la medición de la varilla de referencia 22 conducirá a un error de medición en la distancia medida que debe tenerse en cuenta. En consecuencia, cuanto mayor es la distancia hasta la sección de referencia, menor es el error potencial.

Se han propuesto dispositivos GWR para varios usos de monitoreo de procesos. En ciertos casos, se ha propuesto además la determinación de la permitividad relativa para mejorar los resultados de medición de nivel. Los ejemplos pueden encontrarse en los documentos WO 2016/011531, WO 2004/06663, WO 00/43806, WO 2016/011530, WO 00/437739, GB 2358535, WO 01/18533, US 2009/0303106, y US 2005/0230619.

La Figura 4 muestra un sistema para medir el contenido de energía de un gas de acuerdo con una modalidad de la invención. El sistema comprende una tubería 40 a través de la cual fluye un gas como el gas natural (NG). Se montan una serie de sistemas de sensores en la tubería 40 para medir las propiedades del gas que fluye. Un primer sistema sensor 42 mide la velocidad del sonido en el gas. Esto puede comprender un medidor de flujo ultrasónico u otro sensor de velocidad del sonido. El segundo sistema sensor 44 comprende un sensor GWR para determinar la permitividad relativa del gas. Si bien los sistemas GWR mencionados anteriormente comprenden sensores de nivel (es decir, miden los reflejos de la superficie del líquido), quedará claro que, dado que la permitividad relativa puede obtenerse de la medición de referencia, podría usarse un sensor similar en un entorno de solo gas (es decir, en el que no hay superficie de líquido presente). Un tercer sistema sensor 46 proporciona la fracción molar de dióxido de carbono. Esto puede comprender un sensor de CO₂, un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR), un sensor fotoacústico de CO₂, un dispositivo de espectroscopía de absorción de diodo láser sintonizable (TLDS) o un analizador infrarrojo de gases en línea. Otros sensores 48, 50, 52 proporcionan datos de temperatura, presión y régimen de flujo. Las salidas de los diversos sistemas de sensores se proporcionan como entradas a un módulo electrónico 54 que incluye la capacidad de procesamiento de datos configurada como un correlacionador para correlacionar las diversas mediciones de la manera descrita anteriormente para obtener el contenido energético y la energía del gas. En ciertos casos, el primer sistema sensor puede proporcionar datos de régimen de flujo, en cuyo caso puede omitirse un sensor separado 52. En ciertos casos, el sensor 52 proporciona datos de velocidad de sonido, en cuyo caso puede omitirse un sensor 42 separado.

Una variante de este sistema está en relación con la medición del contenido energético del gas natural licuado (LNG). El LNG tiene, en contraste con el gas natural, una parte mucho menor de nitrógeno y dióxido de carbono, ya que el nitrógeno y el dióxido de carbono deben eliminarse antes del proceso final de licuefacción. Debido al riesgo de "autoestratificación", el contenido de nitrógeno del LNG se mantiene por debajo de 1%. La eliminación del dióxido de carbono del LNG es esencial para evitar la "congelación" durante el proceso de licuefacción, ya que el dióxido de carbono se congelaría a

5 temperaturas criogénicas y podría obstruir el equipo de licuefacción, tal como los intercambiadores de calor. Por consiguiente, el contenido de dióxido de carbono se mantiene en no más de 50 ppm. Esto significa que la parte de dióxido de carbono es, por lo tanto, insignificante para el LNG. Por la misma razón, los hidrocarburos más pesados se eliminan de manera que solo queda metano y algunos hidrocarburos ligeros. Por lo tanto, el LNG puede verse en buena aproximación solo como una mezcla de hidrocarburos ligeros (C1-C4) y nitrógeno, con metano como parte principal.

10 La medición de nivel es una tecnología conocida con respecto al LNG, especialmente relacionada con el medidor del tanque de almacenamiento y el medidor del nivel del tanque transportador donde el volumen de LNG cargado y descargado se mide estático por medio de diferencias de nivel. Al usar un medidor de nivel GWR apropiado, puede obtenerse además la constante dieléctrica del LNG. Debido a que el contenido de dióxido de carbono del LNG es tan bajo, su medición es innecesaria, la medición de la velocidad del sonido w y la permitividad relativa ϵ_r son suficientes para determinar todas las propiedades relevantes del gas por medio de métodos de correlación. Para aplicaciones de LNG, hay medidores ultrasónicos de flujo diseñados específicamente para medir la velocidad del sonido en línea (y en tiempo real) en condiciones de proceso. El método de GWR es particularmente adecuado para la medición en línea (y en tiempo real) de la permitividad relativa ϵ_r de LNG. El método de la invención permite que se extraiga el contenido energético del LNG del flujo existente y que se realicen mediciones de nivel durante el transporte de LNG, tal como durante la carga y/o descarga de embarcaciones transportadoras. Además, el uso de mediciones de un sensor de nivel GWR puede dar dos lecturas separadas que se afectan por ϵ_r : el eco de la barra de referencia y el eco de la superficie del líquido. Si bien los sistemas de medición de nivel GWR usados para LNG típicamente solo consideran el microfactor, para corregir la medición de nivel, el método de la invención proporciona una técnica en la que esta medición "extra" puede usarse además para obtener ϵ_r para uso en la correlación para determinar el contenido energético.

20 Se apreciará que pueden realizarse varios cambios en las modalidades descritas anteriormente mientras se mantienen dentro del alcance de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método para medir el contenido energético de un gas, que comprende:
 5 medir la velocidad del sonido en el gas;
 medir la permitividad relativa del gas con el uso de un sensor de radar de onda guiada; y
 correlacionar la velocidad medida del sonido y la permitividad relativa para deducir el contenido energético del gas.
2. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1, que comprende además medir los parámetros de presión y temperatura del gas, y usar los parámetros para obtener el contenido energético del gas.
- 10 3. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1 o 2, en donde el gas fluye en un conducto, las mediciones se realizan en el gas que fluye, que opcionalmente comprende además medir los parámetros de régimen de flujo y usar los parámetros de régimen de flujo, junto con las otras mediciones, para obtener el contenido energético del gas.
- 15 4. Un método como se reivindicó en la reivindicación 1 o 2, en donde el gas comprende gas licuado en un recipiente, la medición de la permitividad relativa se obtiene de una medición de nivel con el uso del sensor de radar de onda guiada, opcionalmente en donde la medición de la velocidad del sonido se realiza como parte de una medición de flujo durante la carga de gas licuado en el contenedor, o durante la descarga de gas licuado desde el contenedor.
- 20 5. Un método como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde medir la permitividad relativa del gas comprende una medición de reflectometría de dominio de tiempo de un pulso de microondas en una guía de ondas.
- 25 6. Un método como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además medir el contenido de dióxido de carbono del gas y correlacionar la velocidad medida del sonido, la permitividad relativa y el contenido de dióxido de carbono para obtener el contenido energético del gas.
- 30 7. Un sistema para medir el contenido energético de un gas, que comprende:
 un primer sensor (42) para medir la velocidad del sonido en el gas;
 un segundo sensor (44) para medir la permitividad relativa del gas con el uso de un sensor de radar de onda guiada; y
 un módulo electrónico (54) que incluye la capacidad de procesamiento de datos configurada para correlacionar la velocidad medida del sonido y la permitividad relativa para obtener el contenido energético del gas.
- 35 8. Un sistema como se reivindicó en la reivindicación 7, que comprende además sensores para medir parámetros de presión y temperatura del gas, y en donde el módulo electrónico (54) se configura para usar los parámetros para obtener el contenido energético del gas.
- 40 9. Un sistema como se reivindicó en la reivindicación 7 u 8, que comprende además un conducto que aloja los sensores y a través del cual fluye el gas, que opcionalmente comprende además sensores adicionales para medir parámetros de flujo volumétrico, en donde el módulo electrónico (54) se configura para usar los parámetros de flujo volumétrico y las otras medidas para obtener el contenido energético del gas.
- 45 10. Un sistema como se reivindicó en la reivindicación 7 u 8, en donde el gas comprende gas licuado en un recipiente, el segundo sensor comprende un sensor de medición de nivel de radar de onda guiada, opcionalmente en donde el primer sensor comprende un sensor de medición de flujo para usar durante la carga de gas licuado en el contenedor, o durante la descarga de gas licuado del contenedor.
- 50 11. Un sistema como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones 7 - 10, en donde el segundo sensor comprende una fuente de microondas y una guía de ondas de configuración predeterminada, el segundo sensor que se configura para proporcionar una medición de reflectometría de dominio de tiempo de un pulso de microondas reflejado por una característica predeterminada de la configuración de la guía de ondas, para determinar la permitividad relativa del gas, opcionalmente en donde la característica predeterminada es el extremo de una varilla de referencia montada en la guía de ondas.
- 55 12. Un sistema como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones 7 - 11, que comprende además un tercer sensor para medir el contenido de dióxido de carbono del gas, y en donde el correlacionador se configura para usar la velocidad medida del sonido, la permitividad relativa y el contenido de dióxido de carbono para obtener el contenido energético del gas, opcionalmente en donde el tercer sensor comprende un sensor infrarrojo.
- 60 13. Un sistema como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones 7 - 12, en donde el primer sensor comprende un medidor ultrasónico de flujo.

14. Un sistema como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones 7 - 13, puede comprender además un procesador configurado para recibir la salida del correlacionador como entrada, y para emitir valores de valor calorífico superior, índice de Wobbe y densidad normal del gas.

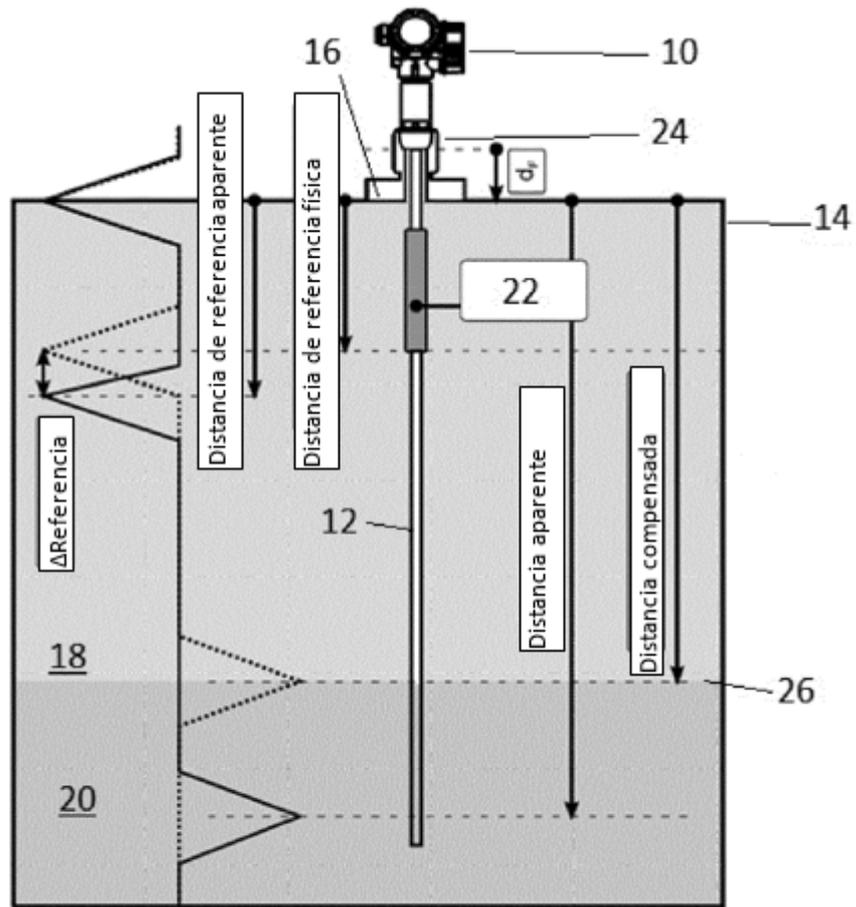


Figura 1

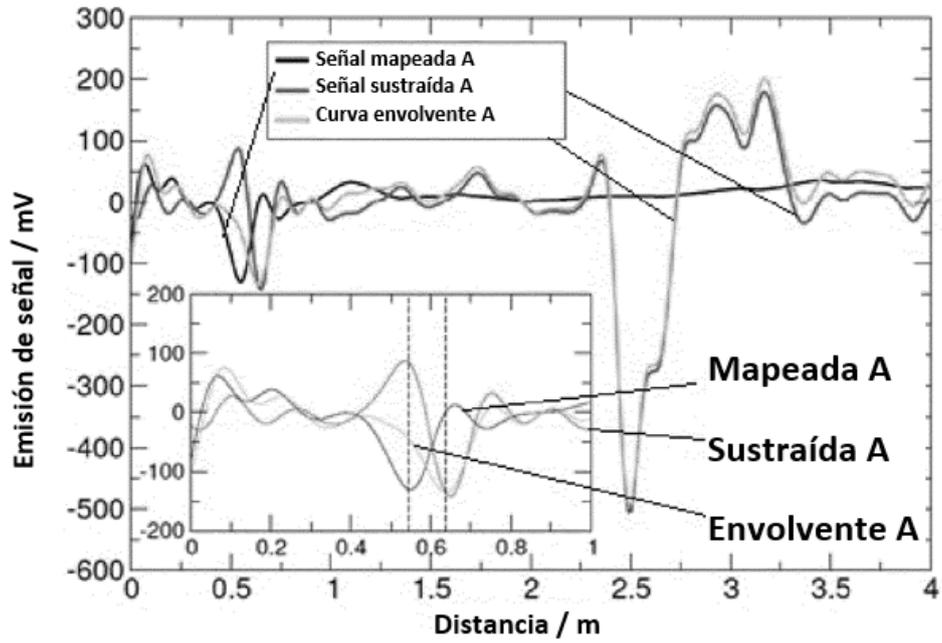


Figura 2

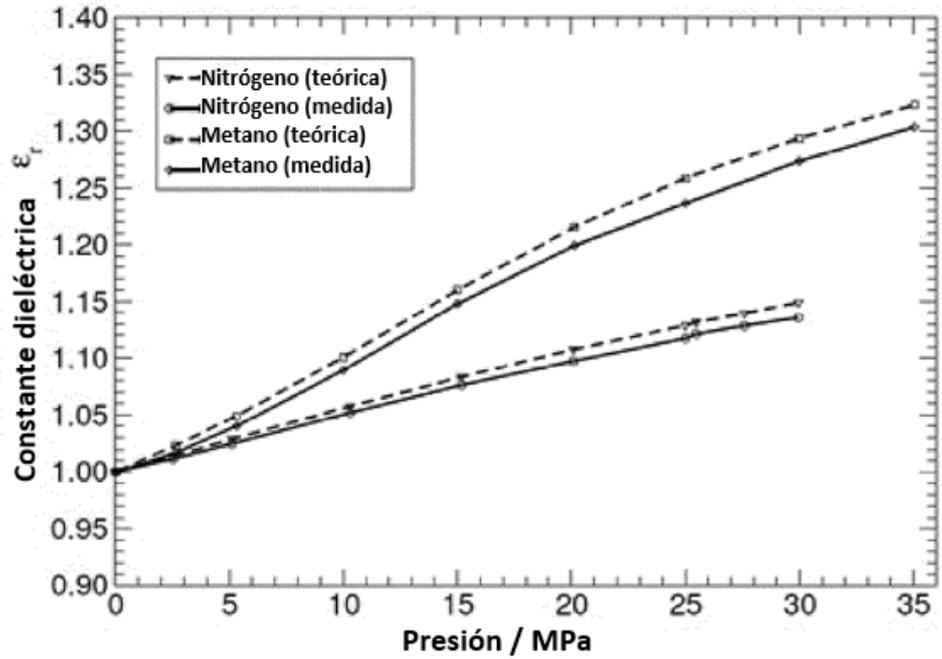


Figura 3

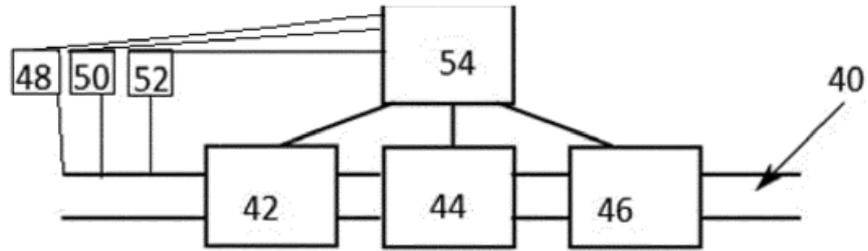


Figura 4