

MEDIDORES ULTRASÓNICOS: EXPERIENCIAS EN LA VERIFICACIÓN DE FLUJO CERO

Federico Dabbah¹, Sergio Lupo², Juan Forastieri³, Hernán Brenta⁴, Ezequiel Filipovic⁵

¹ INTI, Bs. As., Argentina, fdabbah@inti.gob.ar

² INTI, Bs. As., Argentina, slupo@inti.gob.ar

³ INTI, Bs. As., Argentina, jaforast@inti.gob.ar

⁴ INTI, Bs. As., Argentina, hbrenta@inti.gob.ar

⁵ INTI, Bs. As., Argentina, efilipov@inti.gob.ar

Resumen: En el presente trabajo se resumen los ensayos a flujo cero realizados sobre medidores ultrasónicos presurizados. El objeto de los mismos fue evaluar el comportamiento metrológico de estos equipos durante su utilización en los puentes de medición de gas natural de transferencia en custodia y adquirir experiencia en la verificación de la estabilidad del cero del equipo in situ. Si bien este ensayo no reemplaza a la calibración de flujo bajo presión, conocer el comportamiento del cero del medidor durante su utilización, nos permite evaluar la necesidad de recalibración en un tiempo inferior al estipulado.

Para ello se ensayó un medidor ultrasónico en laboratorio a distintas condiciones de presión y temperatura y siete medidores in-situ.

Debido a que la velocidad del sonido indicada por estos medidores es un parámetro de diagnóstico y la misma es función del fluido, se optó por la utilización de nitrógeno de alta pureza para realizar dichos ensayos, el cual tiene una velocidad del sonido conocida, que nos permitió evaluar el desempeño de los mismos.

Los valores de velocidad de flujo cero y de velocidad del sonido fueron evaluados según las recomendaciones especificadas en el reporte N° 9 de AGA [2].

Palabras Claves: Medidores Ultrasónicos, verificación de flujo cero.

1. INTRODUCCION

En la República Argentina, el Gas Natural es una de las fuentes de energía más importantes. Su aporte dentro de la matriz energética del país supera el 50 % del total, motivo por el cual, es de suma importancia conocer el comportamiento de los instrumentos de medición empleados para su cuantificación dentro del ámbito legal y comercial, ya sean para transacciones fiscales internas y/o de frontera. Los medidores del tipo ultrasónico utilizados para la medición de grandes volúmenes de gas natural han ido ganando un espacio importante dentro de esta industria. Año tras año, las estadísticas muestran una tendencia creciente hacia la utilización de este tipo de tecnología. Por tal motivo, el INTI, desde su centro de "Física y Metrología", ha impulsado en forma conjunta con las empresas relacionadas con la industria del Gas Natural (Productores, Transportistas, Distribuidores, Fabricantes de medidores, etc.) una serie de ensayos utilizando medidores ultrasónicos

con el fin de relevar su comportamiento a determinadas condiciones de funcionamiento. Dichos ensayos son la verificación de flujo cero y la verificación de la velocidad del sonido, realizados a su vez según dos modalidades:

- a diferentes condiciones de temperatura y presión, dentro de una cámara térmica

- a temperatura ambiente y una presión determinada en laboratorio.

Además de los ensayos programados específicamente, en los últimos años, las empresas comenzaron a requerir la verificación de flujo cero de medidores con más de tres años de uso instalados en puentes de medición empleados en transferencia en custodia. Algunos de ellos se ensayaron en laboratorio, bajo la supervisión de INTI, mientras que otros fueron verificados in-situ dentro de una estructura edilicia cercana al puente de medición apropiada para poder alcanzar la estabilidad térmica del equipo y resguardarlo de las inclemencias climáticas.

La configuración de los pares acústicos de los medidores ensayados fueron de cuatro cuerdas exceptuando uno que fue de dos cuerdas. En la figura 1 se observa la disposición de las mismas. Esta distribución nos brinda información de la velocidad puntual en cada cuerda aportando información de distintas secciones transversales del medidor.

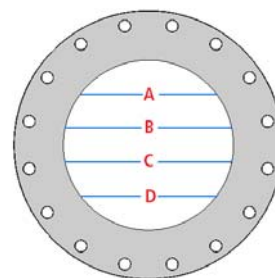


Fig. 1. Disposición de cuerdas.

Donde A; B; C; D : son las cuerdas.

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

Para estos ensayos se utilizan dos bridas ciegas cada una de las cuales son ensambladas a cada extremo del medidor.

Estas están provistas de vainas para la medición de temperatura con termorresistencias y válvulas para llenar o purgar el gas de ensayo.

La medición de presión se realizó sobre el cuerpo del medidor.

Antes de iniciar el ensayo se verifica la estanquidad del sistema.

Como procedimiento de ensayo se siguieron los lineamientos especificados en la referencia ES-15046 [5].

2.1. Ensayo en cámara térmica

Se ensayó un medidor ultrasónico de 304,8 mm (12" de diámetro) haciendo uso de una cámara térmica.

Las condiciones nominales de ensayo propuestas son las detalladas en la tabla 1.

Tabla 1 –Presiones y temperaturas de ensayo

Temperatura [°C]	Presión [Pa]
-7	1400
-7	4100
20	1400
20	4100
40	1400
40	4100

Los datos utilizados para el análisis surgieron de los promedios aritméticos de los valores tomados durante una hora de medición para cada cuerda en donde las variaciones de las temperaturas medidas, cuatro para este ensayo, y la dispersión entre las mismas se mantuvo dentro de las tres décimas de grado.

Con el objeto de muestrear la homogeneidad térmica del sistema y detectar posibles estratificaciones, se midió la temperatura en seis puntos como se muestra en la figura 2.



Fig. 2 – Disposición de las termorresistencias

El software utilizado en este medidor permitía realizar el reajuste a cero de las cuerdas.

El objeto de estos ensayos fue evaluar la incidencia de la presión y la temperatura en la lectura de velocidad de las cuerdas y de la velocidad del sonido.

Si bien en este trabajo se resumen solo seis ensayos, este medidor fue probado durante más de 40 días. En 20°C y 40°C se obtuvieron más ensayos no expuestos.

2.2. Ensayo sobre medidores in situ

Se ensayaron seis medidores ultrasónicos, dos de 254 mm (10" de diámetro) y cuatro de 406,4 mm (16" de diámetro). Dos de estos últimos fueron ensayados en dos oportunidades con un intervalo de 3 años.

Dado que por cuestiones de seguridad los puentes de medición se encuentran en lugares de difícil acceso y alejados de zonas urbanas, se dificulta el traslado de los

medidores ultrasónicos, razón por la cual se decidió realizar las mediciones dentro de una estructura edilicia cercana al mismo que permitiera alcanzar condiciones homogéneas de temperatura del equipo aptas para realizar el ensayo y resguardarlo de las inclemencias climáticas. La estabilidad térmica tuvo su dependencia en la variación de la temperatura ambiente. Las mismas se alcanzaron durante la noche o luego de periodos mayores a doce horas de reposo.

En todos los casos se tomaron como datos representativos el promedio aritmético de los valores tomados durante una hora de medición para cada cuerda en donde la variación en la temperatura interna del medidor fue estable.

En la mayoría de los casos se logró una estabilidad térmica dentro del medidor, inferiores a las dos décimas de grado a excepción de uno de los ensayos que fue inferior a seis décimas. Es de hacer notar que este último ensayo no se vio afectado tanto en sus valores de velocidad del flujo como la velocidad del sonido por el aumento en la estabilidad de la temperatura.

La distribución de las termorresistencias utilizadas in situ se muestra en la figura 3.



Fig. 3 - Disposición de las termorresistencias

En este caso el objeto de los ensayos fue establecer si los valores promediados para cada cuerda en la velocidad del sonido y la velocidad del flujo, se encuentren dentro de los requisitos de AGA 9 1998 u 2007 según su fecha de fabricación.

2.3. Resultados

En las tablas 2 y 3 se detallan los resultados correspondientes al punto 2.1. (Ensayo en cámara térmica).

En la tabla 2 se observa el resultado de la velocidad de flujo de cada cuerda para cada una de las condiciones de presión y temperatura ensayadas.

Tabla 2 – Promedio aritmético de la velocidad del flujo

E	M	T [°C]	P [kPa]	Velocidad del flujo de cada cuerda			
				A [m/s]	B [m/s]	C [m/s]	D [m/s]
1	1	-7,19	1378,9	0,0107	-0,0012	0,0212	0,0083
2		-7,12	4136,8	0,0116	-0,0003	0,0317	0,0057
3		20,63	1378,9	-0,0032	-0,0010	0,0133	0,0134
4		20,17	4136,8	-0,0011	0,0082	0,0173	0,0074
5		40,84	1378,9	-0,0081	-0,0005	0,0116	0,0194
6		41,02	4136,8	-0,0010	-0,0012	0,0090	0,0144

Donde, E: N° de ensayo; M: N° medidor; T: Temperatura; P: Presión

En la tabla 3 se observa el resultado de la velocidad del sonido de cada cuerda para cada una de las condiciones de presión y temperatura ensayadas.

Tabla 3 – Velocidad del sonido

E	M	Velocidad del Sonido de cada cuerda				Velocidad del Sonido calculada [m/s]
		A [m/s]	B [m/s]	C [m/s]	D [m/s]	
1	1	335,16	334,71	334,25	334,10	334,00
2		339,73	339,27	338,79	338,64	338,91
3		352,49	352,07	351,59	351,43	351,66
4		357,93	357,48	357,00	356,83	357,19
5		364,40	363,87	363,48	363,19	363,83
6		370,87	370,43	370,11	369,82	370,26

Donde, E: N° de ensayo; M: N° medidor; T: Temperatura; P: Presión

En las tablas 4 y 5 se detallan los resultados correspondientes al punto 2.2. (Ensayo sobre medidores in situ).

En la tabla 4 se observa el resultado de la velocidad de flujo de cada cuerda para cada ensayo.

El ensayo N°10 corresponde a un medidor que posee solo dos cuerdas.

Tabla 4- Promedio aritmético de la velocidad del flujo

E	M	Diámetro	Velocidad del flujo de cada cuerda			
			A [m/s]	B [m/s]	C [m/s]	D [m/s]
7	2	10"	0,0041	-0,0036	-0,0019	-0,0022
8	3	10"	-0,1352	0,0309	-0,0017	-0,0192
9	4	16"	0,0121	-0,0017	0,0038	0,0052
10	5	16"	0,0001	0,0026	----	----
11	6	16"	-0,0060	-0,0030	-0,0020	0,0010
12			0,0056	-0,0017	-0,0052	0,0082
13	7	16"	0,0080	0,0000	-0,0030	0,0100
14			0,0153	0,0010	-0,0042	-0,0050

Donde, E: N° de ensayo; M: N° medidor

En la tabla 5 se observa el resultado de la velocidad del sonido de cada cuerda para cada ensayo.

Tabla 5 – Velocidad del sonido

E	M	Velocidad del Sonido de cada cuerda				Velocidad del Sonido calculada [m/s]
		A [m/s]	B [m/s]	C [m/s]	D [m/s]	
7	2	351,90	351,88	351,92	351,91	351,91
8	3	352,37	352,19	351,72	352,02	350,81
9	4	349,19	349,22	349,27	349,37	349,27
10	5	348,83	348,57	----	----	348,62
11	6	349,64	349,52	349,45	349,54	349,50
12		344,45	344,43	344,46	344,63	344,34
13	7	346,47	346,39	346,41	346,57	346,42
14		347,67	347,74	347,94	347,57	347,67

Donde, E: N° de ensayo; M: N° medidor

El valor de la columna “Velocidad del Sonido calculada” de las tablas 3 y 5 se obtuvo de la aplicación de la fórmula establecida en AGA 10 [3] para cada ensayo.

2.4. Análisis

La American Gas Association (AGA) en su reporte N° 9, edición 1998 [2], recomienda que en la verificación de flujo cero, la velocidad del fluido individual de cada cuerda no sea mayor a 0,012m/s. En el mismo reporte, pero editado en el año 2007, se recomienda que dicho valor sea inferior a 0,006m/s, que la desviación respecto a la velocidad del sonido se encuentre dentro de $\pm 0.2\%$ y que la dispersión entre el máximo y mínimo de todas las cuerdas no supere los 0,5 m/s.

Exceptuando los medidores N°1 y N°3, todos cumplieron las especificaciones de la velocidad del sonido citadas en la versión 2007 de AGA 9 [2]. Si bien los medidores N°1, N°3, N°5 y N°7 por su fecha de fabricación deberían ser evaluados según la versión de AGA 9 1998 [2] los dos últimos se encuadraron dentro de la versión más reciente (AGA 9 2007 [2]).

Con el sistema homogeneizado a 20°C y a una presión aproximada de 4100 kPa, en ensayos cuya duración fue del orden de 24, 48 y hasta 72 hs, para variaciones de temperaturas no superiores a una décima de grado, el desvío estándar en la velocidad del flujo para cada cuerda se mantuvo debajo de los 0,0037 m/s. y debajo de 0,1 m/s para la velocidad del sonido. La estabilidad en la temperatura determina la estabilidad en los valores de las velocidades. En todos los resultados de este ensayo el valor de la velocidad del flujo promedio de las cuerdas y la mediana no presentaron diferencias por debajo del cuarto dígito decimal, dando a entender un comportamiento semejante a una distribución normal centrada. Esta condición y la baja dispersión no favoreció que las cuerdas que presentaron valores fuera de los especificados en AGA 9 1998 [2] mejoraran su valor promedio entrando bajo lo especificado en la recomendación de AGA [2].

El ensayo del medidor N°1 realizado en la cámara térmica, presentó en todo momento problemas con los valores promedio de la velocidad del flujo en las cuerdas C y D. En la gráfica de los ensayos N° 3 (figuras 4 y 5) y ensayo N° 4 (figuras 6 y 7) se observa como una mejor estabilidad en la temperatura mejora la diferencia entre valor máximo y mínimo de la velocidad de las cuerdas C y D. Aunque con esta mejora, las mismas no se encuentran dentro de lo especificado en AGA 9 1998.

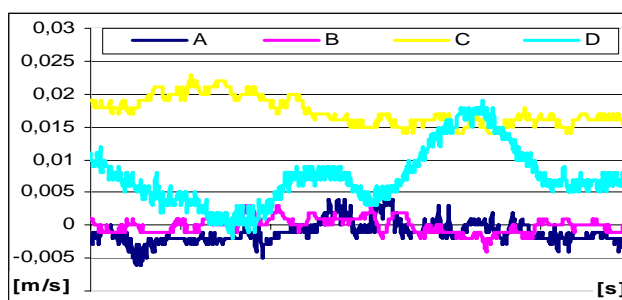


Fig. 4 – Velocidades del flujo correspondientes al ensayo N°3

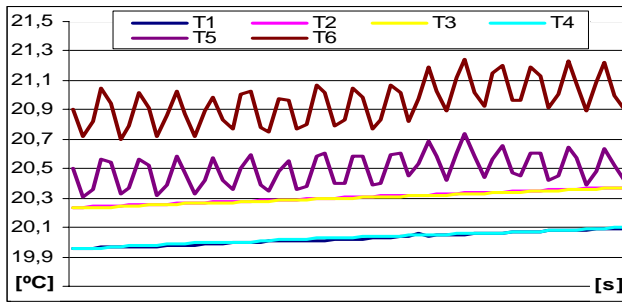


Fig. 5 - Temperaturas correspondientes al ensayo N°3

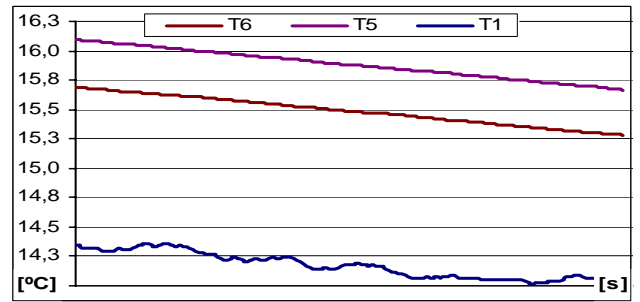


Fig. 9 - Temperaturas correspondientes al ensayo N°10

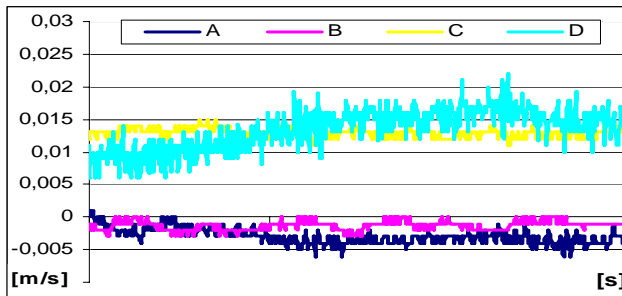


Fig. 6 - Velocidades del flujo correspondientes al ensayo N°4

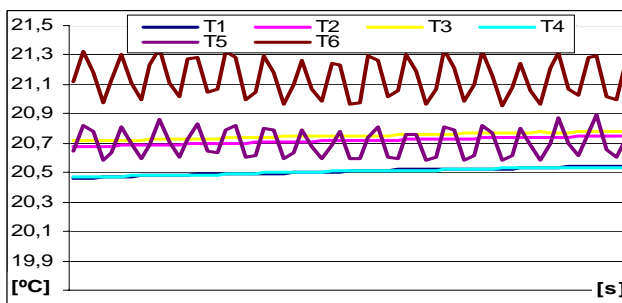


Fig. 7 - Temperaturas correspondientes al ensayo N°4

En el ensayo del medidor N°5 (ensayo N° 10) de dos cuerdas realizado in situ se observa que si bien el rango de temperatura es amplio y la estabilidad en las cuerdas no es buena aunque el promedio de las mismas entra dentro de lo especificado en AGA 9 2007. Esto puede apreciarse en las figuras 8 y 9.

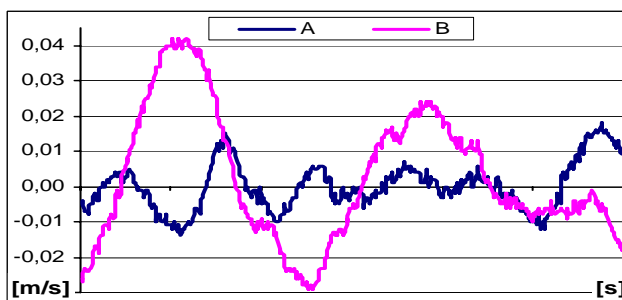


Fig. 8 - Velocidades del flujo correspondientes al ensayo N°10

En el ensayo del medidor N° 6 (ensayo N° 11 y 12) se observa que en el ensayo N°11 del año 2007, con un rango de temperatura importante (0,5°C) el medidor esta dentro de los especificado en AGA 9 2007, en cambio en el ensayo N°12 del año 2010 con un rango y una estabilidad en la temperatura menor a la décima de grado, el medidor no se encuadra dentro de lo especificado en AGA 9 versión 2007 pero si lo hace para la versión de 1998.

Si bien por la fecha de fabricación de este medidor, le corresponde la versión de AGA 9 de 1998, es notorio el cambio en la lectura de las cuerdas en el ensayo a flujo cero en un periodo de tres años de uso en campo.

Esto se observa en las figuras 10; 11; 12 y 13.

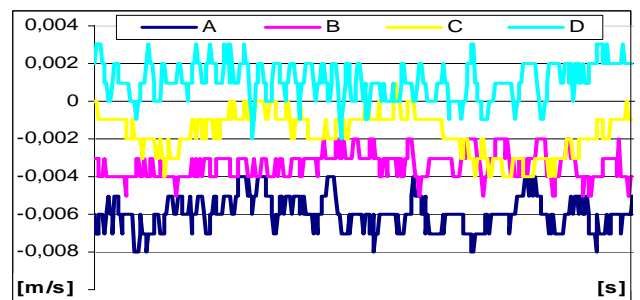


Fig. 10 - Velocidades del flujo correspondientes al ensayo N°11

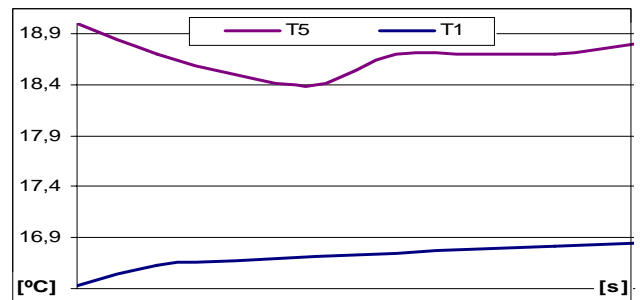


Fig. 11 - Temperaturas correspondientes al ensayo N°11

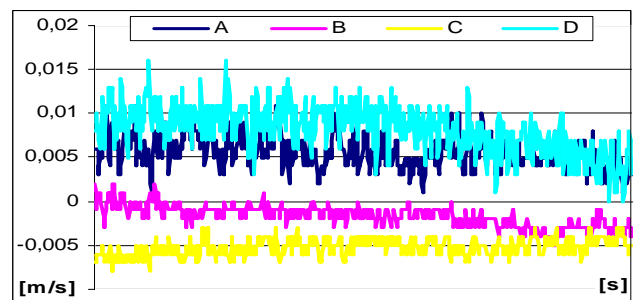


Fig. 12 - Velocidades del flujo correspondientes al ensayo N°12

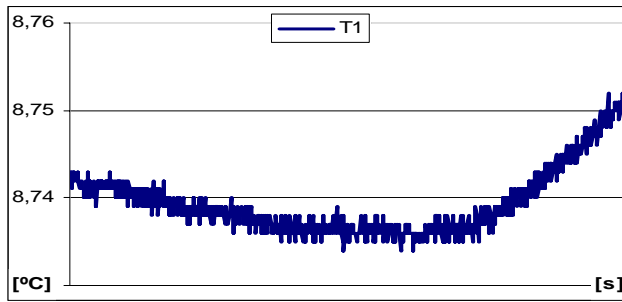


Fig. 13 - Temperaturas correspondientes al ensayo N°12

3. INCERTIDUMBRE

El cálculo de la velocidad del sonido utilizada como referencia se obtuvo con una incertidumbre para todos los casos menor a 0,05%. Este valor fue calculado en base a la ecuación general de la velocidad del sonido cita en el reporte N° 10 y N°8 de AGA. [1][3] y la GUM [4]. Debido a la complejidad del modelo matemático para la determinación de los coeficientes de sensibilidad, el cálculo de los mismos fue realizado numéricamente en los intervalos de la medición.

La incertidumbre calculada según la GUM [4] para el medición de temperatura fue de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ y para la medición de presión $\pm 0,01$ bar.

En todos los casos se utilizó un factor de cobertura $k=2$.

Ecuación General de la velocidad de sonido:

$$W = \left[\left(\frac{c_p}{c_v} \right) \left(\frac{RT}{M_r} \right) \left(Z + \rho \frac{\partial Z}{\partial \rho} \right) \right]^{0.5} \quad (1)$$

En donde:

W : Velocidad del sonido [m/s]

c_v : La capacidad calorífica molar de una sustancia a volumen constante (gas real) [kJ/kg-K].

c_p : La capacidad calorífica molar de una sustancia a presión constante (gas real) [kJ/kg-K].

R : Constante universal de gases 8.314510 [J/mol-K]

T : Temperatura del gas [K]

M_r : Masa molar de la mezcla [g/mol]

Z : Factor de compresibilidad [adimensional]

ρ : Densidad molar [moles/dm³]

$\partial Z/\partial \rho$: Primera derivada parcial del factor de compresibilidad con respecto a la densidad molar. [dm³/mol]

J : Joules [kg-m²/s²]

Donde:

$$\mu_C = \sqrt{(\mu_A * c_A)^2 \oplus \dots \oplus (\mu_G * c_G)^2} \quad (2)$$

En donde:

μ_C : Incertidumbre combinada

μ_n : Incertidumbre estándar de n

c_n : Coeficiente de sensibilidad de n

A continuación se detalla el cálculo de incertidumbre para la cuerda A del ensayo N°1 del medidor N°1 realizado en los laboratorios de INTI

En la tabla 6 se detallan los datos de entrada contemplados para el calculo de incertidumbre.

Tabla 6 – datos de entrada

Incertidumbre en la medición de temperatura	0.1	°C
Incertidumbre en la medición de presión	1	kPa
Temperatura Promedio	-7.19	°C
Presión Promedio	1378.9	kPa
Promedio velocidad del Sonido Cuerda A	335.16	m/s
Promedio velocidad del Sonido Cuerda B	334.71	m/s
Promedio velocidad del Sonido Cuerda C	334.25	m/s
Promedio velocidad del Sonido Cuerda D	334.16	m/s
Velocidad del sonido calculada	334.0	m/s
Desvío estándar de la temperatura	0.15	°C
Desvío estándar de la presión	0.03	kPa
Desvío estándar de la velocidad del Sonido Cuerda A	0.007	m/s
Desvío estándar de la velocidad del Sonido Cuerda B	0.006	m/s
Desvío estándar de la velocidad del Sonido Cuerda C	0.008	m/s
Desvío estándar de la velocidad del Sonido Cuerda D	0.008	m/s

En la tabla 7 y 8 se observan los valores de incertidumbre obtenidos de las diferentes fuentes con su respectiva distribución y coeficientes de sensibilidad contemplados pasa su sumatoria según ecuación 2.

Tabla 7 – Budget de incertidumbre

Fuentes de incertidumbre	Tipo de incertidumbre	Tipo de distribución	c	U	k	μ
Temperatura de medición (A ₁)	B	Normal	0.6175	0.1	2	0.031
Estabilidad en la temperatura (A ₂)	A	Normal		0.05	2	0.015
Presión de medición (B ₁)	B	Normal	0.1770	0.01	2	0.001
Estabilidad en la presión (B ₂)	A	Normal		0.03	2	0.003
Repetibilidad de la cuerda (C)	A	Normal	1	0.007	2	0.004
Resolución del medidor ultrasónico (D)	B	Rectangular	1	0.010	1.73	0.001
Impurezas en el gas patrón (E)	B	Rectangular	1	0.0013	1.73	0.001
Impurezas debidas al purgado (F)	B	Rectangular	1	0.0002	1.73	0.000
Ecuación de estado (G)	A	Rectangular	1	0.0342	1.73	0.017

Tabla 8 – Resultados de incertidumbre

Incertidumbre combinada (μ_c)	[m/s]	0.08
Incertidumbre expandida (U_c)	[m/s]	0.16
Incertidumbre expandida porcentual	[%]	0.05

Donde, $A = (A_1 + A_2)$ y $B = (B_1 + B_2)$; c: coeficiente de sensibilidad; μ : incertidumbre estándar; k: factor de cobertura; U: incertidumbre expandida.

Las figuras 14, 15 y 16 se corresponden al ensayo N°1 del medidor N°1 en la cámara térmica se puede observar la cuerda (A) analizada en el calculo arriba expuesto.

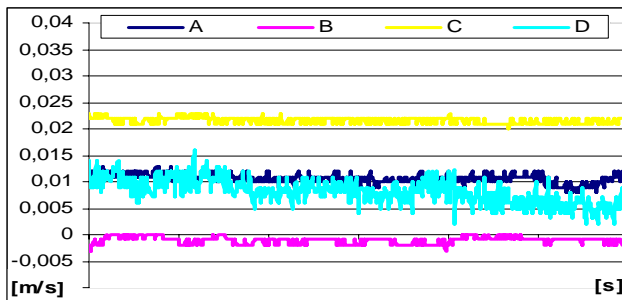


Fig. 15 - Velocidades del flujo correspondientes al ensayo N°1

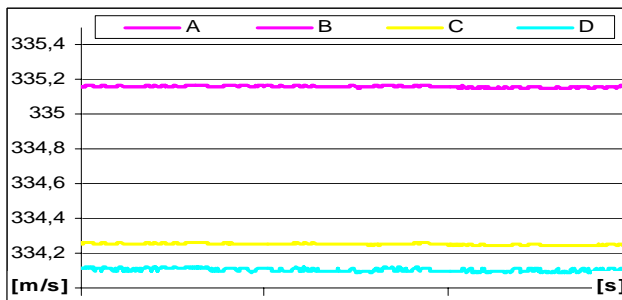


Fig. 15 - Velocidad del sonido correspondientes al ensayo N°1

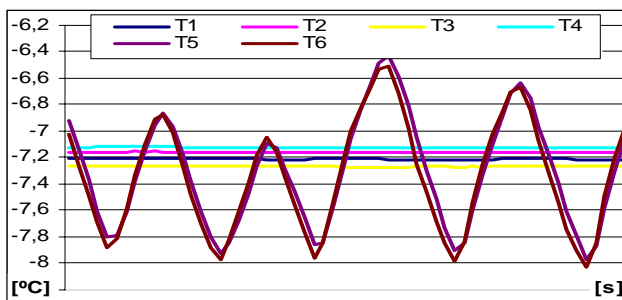


Fig. 16 - Temperaturas correspondientes al ensayo N°1

4. CONCLUSIONES

Para el medidor ensayado en el laboratorio del INTI se observó que:

- Los cambios en la presión no generan diferencias significativas sobre los valores de flujo indicado por cada cuerda.
- Al invertir la posición de los transductores de la cuerda A con los transductores correspondientes a los de la cuerda

D las lecturas de la velocidad del flujo se encontraron próximas a los valores obtenidos, manteniendo el signo que presentaban antes de variar dicha posición.

- Cuando se realizó el ensayo a -7°C , el valor medio de la velocidad del flujo se vio levemente incrementado respecto de los ensayos a 20 y 40°C .

Para los medidores ensayados in situ se observó que:

- Si bien la estabilidad térmica es importante, en las cuerdas cuyos valores se encuadraban dentro de los especificados en el reporte N°9 de AGA [2] se advirtió que los mismos se obtienen aproximadamente una hora después de alcanzar la presión máxima de ensayo el medidor, operación que produce un aumento significativo y temporario de la temperatura interna del sistema. En cambio las cuerdas cuyos valores finales no se encuadraban dentro de los especificados en el reporte N° 9 de AGA [2], solo después de lograr una estabilidad térmica del orden de $0,02^{\circ}\text{C}$, indicaban valores dentro de los especificados en el reporte antes mencionado o levemente superiores a ellos.
- Las cuerdas estables mantienen su condición y parecen ser imperturbables a los cambios de presión y pequeñas variaciones de temperatura.

Si bien los resultados obtenidos de los ensayos realizados fueron alentadores, los mismos no pueden hacerse extensivos a todo el universo de esta tecnología e incentiva a la búsqueda de nuevas oportunidades para seguir realizando estudios en el futuro de ensayos de verificación de flujo cero y velocidad de sonidos en equipos de diferentes modelos.

REFERENCIAS

- [1] AGA 8 - American Gas Association - Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases.
- [2] AGA 9 - American Gas Association - Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters. Junio 1998 y AGA 9 Abril de 2007 Second Edition.
- [3] AGA 10 - American Gas Association - Speed of Sound in Natural Gas and Other related Hydrocarbon Gases, July 23, 2002 DRAFT.
- [4] GUM - Guide to Expression of Uncertainty in Measurements (BIPM, IEC, IFCC, IUPAC, IUPAP, OIML) 1993.
- [5] ES-15046 Revisión R - Ultrasonic Flow Meter, Unit Level Test Procedure and Zero Flow Calibration for SeniorSonic and Junior Sonic, Emerson Process Management, Daniel Division, Drawing No ES-15046, Revision Level R.