

# Determinación cuantitativa de fugas en instalaciones internas de Gas natural.

*S. Gil<sup>†</sup>, E. Berton*

Gerencia de Distribución - ENARGAS - Suipacha 636 - 4P (1008) Cap. Fed.  
Argentina

*J.J. Blanco Fagín y F. Iuliano*

Gerencia de Seguridad - MetroGas - Cap. Fed. Argentina

**Resumen:** En este trabajo se presenta un protocolo de detección y cuantificación de fugas de instalaciones internas de gas. El procedimiento que se describe en este trabajo es útil para caracterizar las fugas en instalaciones aún cuando el volumen de dicha instalación interna sea desconocido. El método descrito aquí hace uso de un sensor de presión conectado a un sistema de toma de datos, computadora o “data logger”, que permite medir en forma automática la presión en función de tiempo. Se realizaron pruebas de laboratorio que verifican la validez de la técnica propuesta e ilustran su aplicación en situaciones reales.

**Introducción:** Frecuentemente, es necesario determinar en forma cuantitativa el nivel de pérdida (fuga) en una instalación interna de gas natural. Esto es particularmente cierto en los casos donde se sospecha que se ha producido un accidente por un *escape* de gas. Por lo tanto, resulta de suma importancia disponer de procedimientos simples y confiables para caracterizar el nivel de dichas pérdidas. Una dificultad adicional que frecuentemente se presenta en estas situaciones, es el hecho de que a menudo no se conoce el volumen asociado a la red interna y los planos de la misma no están disponibles o no son confiables. En este trabajo presentamos un procedimiento simple de caracterización de fugas que puede aplicarse en los casos descritos. El método propuesto hace uso de sensores de presión (o transductores de presión) que pueden conectarse a un sistema de adquisición de datos por computadora o un “data logger”. Esta tecnología se ha vuelto muy accesible y de uso frecuente en los últimos tiempos<sup>[1]</sup>. El procedimiento propuesto aquí se basa en el hecho de que la presión en una instalación de gas con pérdidas, previamente presurizada y aislada de la red externa, tendrá una presión que variará en el tiempo, dependiendo del tamaño de dicha fuga y el volumen de la instalación interna. La tecnología actual hace posible, a través de un sensor de presión conectado a un sistema de adquisición de datos, medir la evolución temporal de la presión y a partir de esta determinación cuantificar dichas fugas.

Otra área de aplicación del método expuesto aquí, está relacionado con las *pruebas de estanqueidad* de instalaciones internas de gas natural. Actualmente el procedimiento utilizado en Argentina, con muchos años de antigüedad, consiste en un ensayo neumático de 15 *min*. Más específicamente, si la presión de la instalación no varía al cabo los 15 minutos siguientes, al clausurar la válvula de entrada a la instalación, ésta se considera estanca. Este procedimiento es poco preciso y de interpretación algo

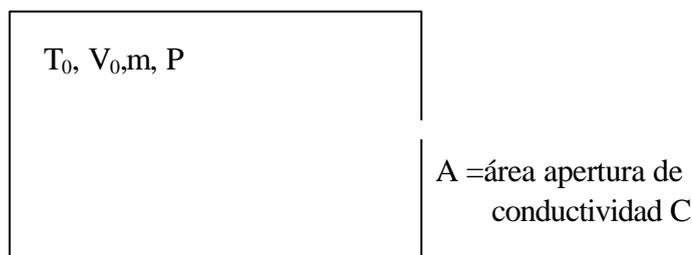
discrecional. Con el estado actual de la tecnología, es posible cuantificar las pérdidas y mejorar los ensayos de estanqueidad, que puede mejorar considerablemente las condiciones de seguridad de las instalaciones de gas.

En este trabajo, presentamos en primer término un procedimiento para caracterizar las pérdidas en instalaciones internas. Seguidamente, comparamos los resultados obtenidos experimentalmente con el método propuesto con mediciones directas de fugas, con el fin de evaluar la validez de la hipótesis implícitas en el método propuesto. Finalmente presentamos una discusión sobre el sustento teórico del método, basándonos en la teoría cinética de los gases. Las mediciones fueron realizadas usando las facilidades que MetroGas posee en la ciudad de Buenos Aires.

## Protocolo de caracterización de fugas

El método de caracterización de fugas descrito aquí se basa en el uso de sensores de presión (transductores) que pueden ser conectados a sistemas automáticos de toma de datos, ya sea por computadoras o “data loggers”<sup>[1]</sup>. Esta técnica de medición permite seguir la evolución temporal de la presión en intervalos de tiempos muy cortos, prácticamente imposible de seguir con un instrumento de lectura tradicional. Por lo tanto conectando estos sistemas de medición a un recinto aislado y presurizado, que posee una fuga, es posible determinar la variación de la presión en el tiempo con mucha precisión. En primer lugar describimos el procedimiento y expresiones útiles para la caracterización de una fuga en un recinto cerrado cuyo volumen es conocido, luego generalizamos el formalismo para el caso en que dicho volumen no se conozca. Las expresiones usadas en la descripción de la técnica se justifican teóricamente en el apéndice, dedicado a dar sustento teórico al protocolo usado en este trabajo.

**Evolución temporal de la presión en un recinto cerrado con pérdida:** Como modelo de una instalación interna de gas natural, consideramos un recinto cerrado de volumen  $V_0$ , que se supone conocido. El gas está a una temperatura  $T_0$  y presión (absoluta)  $P$ . Designamos con  $m$  la masa instantánea de gas,  $N$  es el número total de moléculas del gas. En la figura 1 se muestra un diagrama esquemático de dicha instalación. Suponemos que el recinto tiene una fuga caracterizada por una conductividad  $C$  que definiremos más adelante.



**Figura 1:** Diagrama esquemático de un recinto de gas (modelo de una instalación interna) con un orificio de área  $A$  que genera la pérdida,  $C$  es la conductividad asociada a esta fuga.

En un sistema de gas, donde la presión varía, resulta útil definir el volumen que se escapa del recinto en términos de volúmenes estándares (esto es a  $T_{Est}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $P_{Est}=1.033\text{ bar}$ ) o en términos de masa de gas. Ambas cantidades son proporcionales. En particular el caudal que fluye del recinto en condiciones estándar,  $Q_{Est}$ , se puede determinar en términos de la presión absoluta instantánea del recinto,  $P(t)$ , como:

$$Q_{Est} = \frac{\Delta V_{Est}}{\Delta t} = \frac{P(t)}{P_{Est}} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

donde el subíndice *Est* indica condiciones,  $\mathbf{DV}_{Est}$  es el volumen estándar que sale en el tiempo  $\mathbf{D}$ .  $\mathbf{DV}$  el volumen que fluye a la presión instantánea  $P(t)$ . El volumen de gas que escapa en la unidad de tiempo, flujo, dependerá del tamaño y características del orificio de salida y también de la diferencia de presión entre el interior ( $P(t)$ ) y la presión exterior al recinto,  $P_{ext}$ . Se define la conductividad  $C$  del orificio por la expresión:

$$C = \frac{P_{Est} \cdot Q_{Est}}{\Delta P} = \frac{P_{Est} \cdot Q_{Est}}{(P(t) - P_{ext})} = \frac{P(t)}{(P(t) - P_{ext})} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2)$$

La conductividad  $C$ , bajo condiciones muy generales y usuales en las situaciones que se encuentran en las redes de gas de presiones bajas y medias, depende sólo de las características de la pérdida, por ejemplo área de orificio, espesor de la pared, etc. Más específicamente, es de esperar que  $C$  sea una constante independiente de la presión interior y dependiente sólo de la geometría del orificio de fuga, siempre que el régimen en el que tiene lugar el escape sea del tipo molecular o viscoso.

Cuando el régimen que caracteriza el escape es turbulento (grandes escapes), es de esperar que esta hipótesis sobre  $C$  no se cumpla. Una discusión más detallada de este punto se presenta en el apéndice. En la práctica podemos considerar una pérdida como pequeña si el tiempo que tarda la presión de la instalación (aislada de la red) en disminuir en un factor de dos (2) es mayor que 20 segundos. Para estas condiciones podemos considerar a  $C$  como una constante independiente de la presión. Como justificaremos más adelante, en estas condiciones la presión interna (absoluta) del recinto variará en el tiempo siguiendo la siguiente relación exponencial:

$$P(t) = P_{ext} + (P_0 - P_{ext}) \cdot e^{\left(-\frac{t}{\mathbf{t}}\right)}, \quad (3)$$

donde  $P_{ext}$  es la presión exterior al recinto,  $P_0$  la presión inicial (para  $t=0$ ) del recinto y  $\mathbf{t}$  es la constante de tiempo característica de la pérdida.  $\mathbf{t}$  depende de la conductividad  $C$  y el volumen del recinto  $V_0$  a través de la siguiente expresión:

$$\mathbf{t} = \frac{V_0}{C} = \text{Constante} \quad (4)$$

Tomando logaritmos en ambos términos de la expresión (3) tenemos que:

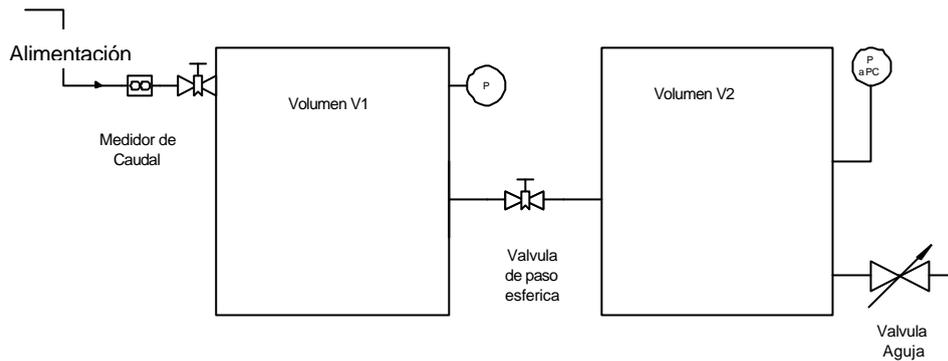
$$\ln \frac{P(t) - P_{ext}}{P_0 - P_{ext}} = - \frac{t}{\tau} \quad (5)$$

Esto significa que si podemos medir la variación de la presión en el tiempo, graficando el logaritmo de  $(P(t)-P_{ext})$  en función del tiempo ( o equivalentemente en un gráfico semilogarítmico), obtenemos una recta, cuya pendiente es  $1/\tau$ . Conociendo el volumen  $V_0$  y usando la expresión (4) podemos calcular  $C$ . Nótese asimismo que la diferencia de la presión absoluta menos la presión  $P_{ext}$  no es otra cosa que la presión manométrica del recinto. En otras palabras, la representación grafica, en escala semilogarítmica, de la presión manométrica del recinto con pérdida, en función del tiempo debería ser una recta si las hipótesis discutidas aquí son válidas (  $C$  independiente de la presión). Finalmente, el flujo de gas que escapa para cualquier presión de trabajo  $P_{trab}$ , vendrá dada por:

$$Q_{est} = \frac{dV_{est}}{dt} = \frac{P_{trab} - P_{ext}}{P_{Est}} \cdot C \cong \frac{P_{trab}^{(manom)}}{P_{Est}} \cdot \frac{V_0}{\tau} \quad (6)$$

Esta última expresión nos permite conocer el flujo de gas a cualquier presión de trabajo, en particular en condiciones estacionarias, es decir cuando la red está conectada a la red externa de gas. Si  $V_0$  se mide en litros,  $t$  en minutos y todas las presiones se miden en la misma unidad, la expresión (6) da el volumen estándar en litros por minutos [ $l/min$ ], que es lo que deseamos obtener. Como por lo regular la presión externa es muy cercana al valor estándar, la diferencia  $P(t)-P_{Est}$  es la presión manométrica  $P^{(manom)}$ .

**Caso de una instalación de volumen desconocido:** En este caso se hace uso de un recinto auxiliar de volumen  $V_1$  conocido. En la figura 2 se muestra en forma esquemática el arreglo propuesto. El recinto auxiliar consta de un manómetro convencional, una válvula de conexión a la red de interés, cuyo nivel de pérdida y volumen  $V_0$  desconocemos. El sensor de presión asociado al sistema de toma de datos se conecta a la red interna (recinto de volumen  $V_0$ ). Se presuriza el recinto auxiliar a una presión inicial  $P_{10}$  que se puede leer en el manómetro conectado al mismo y se abre la válvula de conexión entre ambos volúmenes (válvula de paso esférica).



**Figura 2:** Diagrama esquemático del arreglo propuesto para el ensayo, el medidor de caudal puede conectarse a la entrada o después de la válvula aguja, dependiendo del ensayo que se realiza. El medidor de caudal se usa en este ensayo para convalidar el formalismo propuesto. Este medidor no es necesario en aplicaciones del método propuesto aquí.

Al realizar esta última operación, las presiones de ambos recintos tienden a equilibrarse a un valor común  $P_{comun}$ , dada por:

$$P_{comun}^A \times (V_0 + V_1) = P_{10}^A \times V_1. \quad (7)$$

El volumen  $V_1$  es conocido y los valores de las presiones  $P_{10}^A$  y  $P_{comun}^A$  (absolutas) se miden, de modo que (7) nos permite obtener  $V_0$ , el volumen desconocido de la instalación:

$$V_0 = \frac{P_{10}^A}{P_{comun}^A} - 1 \times V_1 \quad (8)$$

o en términos de presiones manométricas tenemos:

$$V_0 = \left( \frac{P_{10}^{(manom)} - P_{comun}^{(manom)}}{P_{comun}^{(manom)} + P_{Est}} \right) \cdot V_1 \quad (9)$$

donde  $P_{Est}(=1.033 \text{ bar})$  es la presión de referencia para medir la presión manométrica que es aproximadamente igual a la presión estándar. El superíndice (*manom*) denota la presión manométrica.

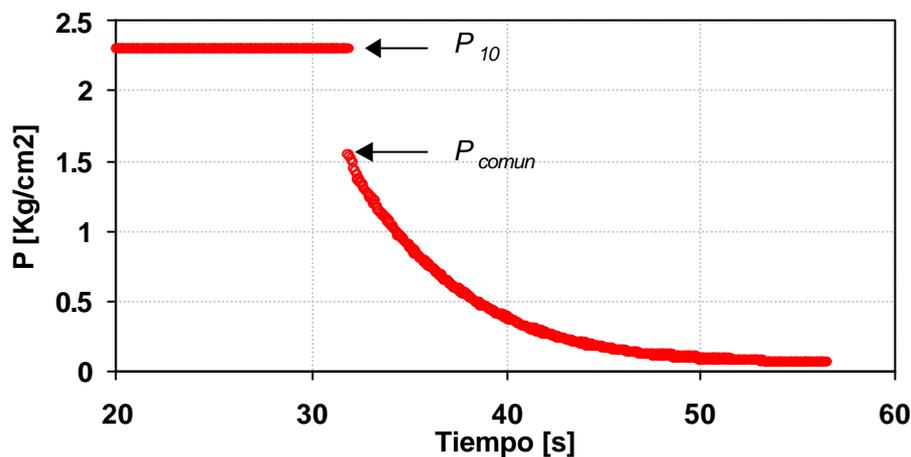
Al conectar ambos recintos por una válvula de interconexión entre los dos recintos (válvula esférica), el volumen de recinto con pérdida es el volumen total, es decir la suma de  $V_1$  y  $V_0$ . La presión común del sistema total decrecerá en el tiempo con una constante de tiempo  $t_T$  dada por:

$$t_T = \frac{(V_0 + V_1)}{C}. \quad (10)$$

En resumen, en este caso, es de esperarse que la presión medida por el sensor de presión conectado a la computadora tendrá una variación dada por:

$$P(t) = P_{ext} + (P_{comun} - P_{ext}) \times e^{-\frac{t}{t_T}}. \quad (11)$$

De la variación en el tiempo de la presión obtenemos  $t_T$  y de la extrapolación al instante  $t=0$ , instante en el que se abre la válvula, obtenemos  $P_{comun}$ . Usando la expresión (10) obtenemos  $C$ . En la figura 3 se ilustra esquemáticamente la variación de la presión en el tiempo para el presente ensayo.



**Figura 3:** Evolución esquemática de la presión en función del tiempo para el ensayo asociado al arreglo experimental de la figura 2.

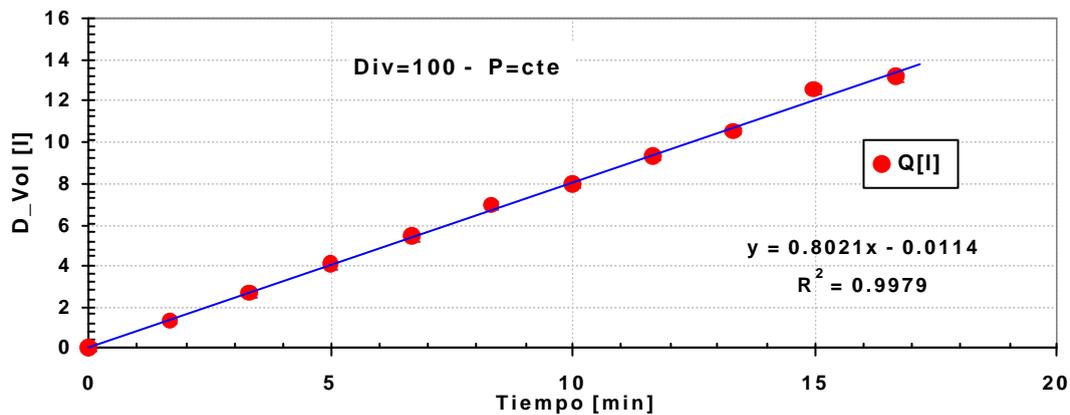
## Evaluación experimental del método.

Con el objeto de poner a prueba el método propuesto, se realizó un ensayo usando el dispositivo ilustrado esquemáticamente en la figura 2. La pérdida fue producida usando una válvula de aguja dotada de un vernier, de modo de obtener valores de pérdidas variables pero reproducibles. Además del sensor de presión conectado a una computadora, se utilizó un caudalímetro conectado a la salida de la válvula de aguja, por donde se induce la fuga al sistema, de modo de medir en forma directa los volúmenes que se escapan por dicha pérdida. También se utilizó un tubo de nitrógeno con regulador de presión para presurizar el recinto de volumen  $V_1$ . Para cada posición del vernier de la válvula se realizaron dos mediciones:

- 1. Estado estacionario:** Medición directa del caudal de pérdida, medido con el caudalímetro, para un valor fijo de presión en el recinto, regulado por el sistema de aprovisionamiento de nitrógeno. En este ensayo los recintos están permanentemente conectados a la fuente de gas (tubo de nitrógeno con su correspondiente regulador de presión). Esta situación simula el caso de una instalación interna conectada a la red. En cada uno de estos ensayos se midieron los volúmenes que escapan en función del tiempo y la presión constante utilizada.
- 2. Estado transitorio:** Para la misma apertura de la válvula aguja, se procedió a presurizar el recinto  $V_1$  con la válvula de conexión a  $V_0$  cerrada. Se mide la presión inicial del recinto  $V_1$ , que designamos  $P_{10}$ . Se aísla el recinto  $V_1$  de la fuente de nitrógeno y se abre la válvula que comunica  $V_1$  con  $V_0$ . Con el sensor de presión conectado a la computadora se mide la variación de la presión en el recinto formado por  $V_1$  y  $V_0$ , en función del tiempo.

En la figura 4 se muestra la variación del volumen medido por el caudalímetro en función del tiempo para uno de los ensayos realizados en estado estacionario. De la pendiente de la recta ( $Q_{est}$ ) que ajusta los datos y la presión utilizada ( $P_{trab}$ ) obtenemos el valor de C usando la expresión (6), para cada una de las aberturas de la válvula aguja como:

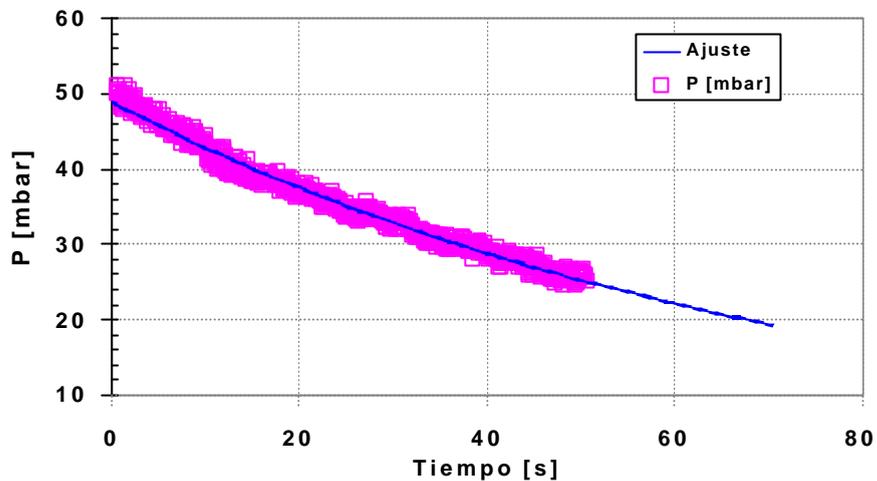
$$C = m \times \frac{P_{Est}}{P_{trab} - P_{ext}} \quad (12)$$



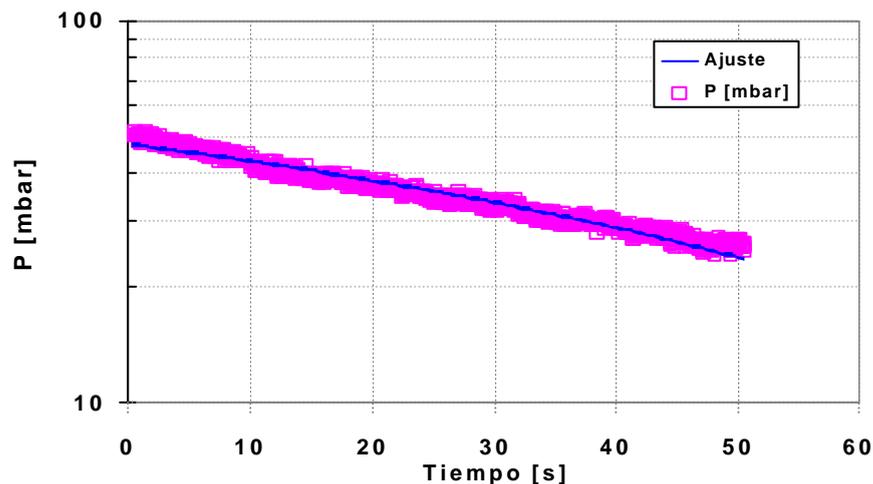
**Figura 4.** Estado estacionario. Resultado obtenido en la medición del volumen de gas escapado en función del tiempo para una dada apertura de la válvula aguja. La apertura de la misma esta caracterizada por la división del vernier (div=100 en esta caso). La pendiente ( $Q_{est}$ ) de la recta (trazo continuo) que ajusta los datos experimentales (círculos), puede realizarse muy precisamente.

En las figuras 5 y 6 se presentan los resultados de las mediciones de presión utilizando un sensor de presión conectado a una computadora, para el ensayo realizado en régimen transitorio. La figura 5 muestra los datos de presión en representación lineal,

mientras la figura 6 lo hace en escala semilogarítmica. Estos gráficos indican que la variación de presión efectivamente está bien aproximada por una variación exponencial en función del tiempo. Vemos que la representación semilogarítmica permite fácilmente extraer de los datos la constante de tiempo  $t$  que caracteriza la pérdida.



**Figura 5.** Estado transitorio. Ensayo realizado usando el recinto aislado de la red externa. Variación de la presión en función del tiempo. Los símbolos (cuadrados) representan los valores de presión obtenidos por el sensor de presión conectado a la computadora. Los datos de presión fueron adquiridos a una razón de 20 datos por segundos. La línea continua es un ajuste exponencial a los datos.



**Figura 6.** Estado transitorio. Variación de la presión en función del tiempo en representación semilogarítmica. Los datos son los mismos que los presentados en la figura 4. Los símbolos (cuadrados) representan los valores de presión, la línea continua es un ajuste exponencial a los datos.

En la figura 7, se presentan volúmenes de gas escapado del recinto en estado transitorio en un dado intervalo de tiempo. Para cada ensayo realizado, caracterizado

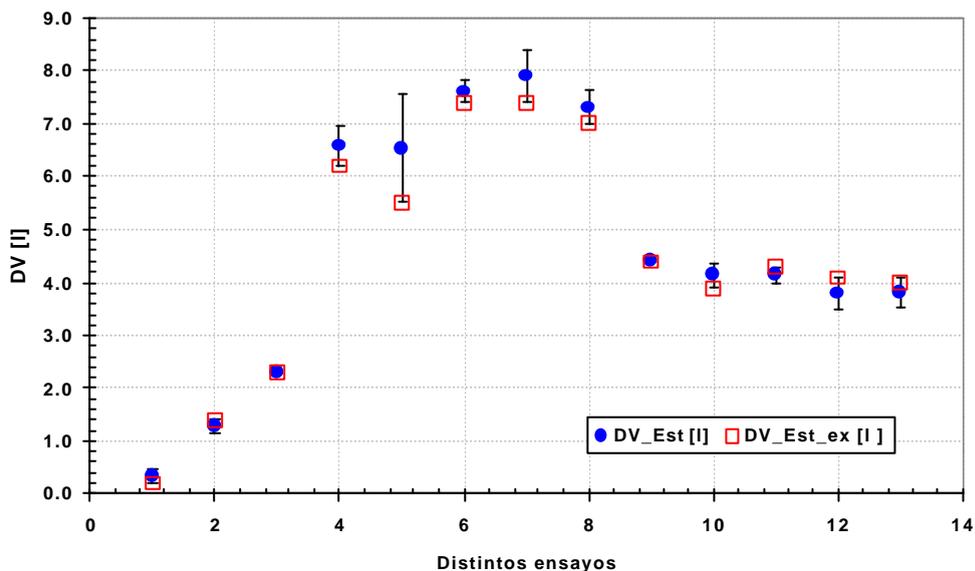
por un valor de la coordenada horizontal, se midieron los volúmenes usando un método directo, esto es midiendo el volumen que pasó por el caudalímetro en un dado intervalo de tiempo (círculos llenos). Para el mismo ensayo se determinó el volumen escapado integrando la expresión (3), (cuadrados). En régimen transitorio (recinto aislado) tenemos que:

$$\frac{dV_{Est}}{dt} \times P_{Est} = V_0 \times \frac{dP(t)}{dt}, \quad (13)$$

de donde, por integración obtenemos:

$$DV_{Est} = - \frac{V_0}{P_{Est}} \times \int_0^{t=T_{ensayo}} \frac{dP(t)}{dt} \times dt = \frac{V_0}{P_{Est}} \times (P(0) - P(T_{ensayo})), \quad (14)$$

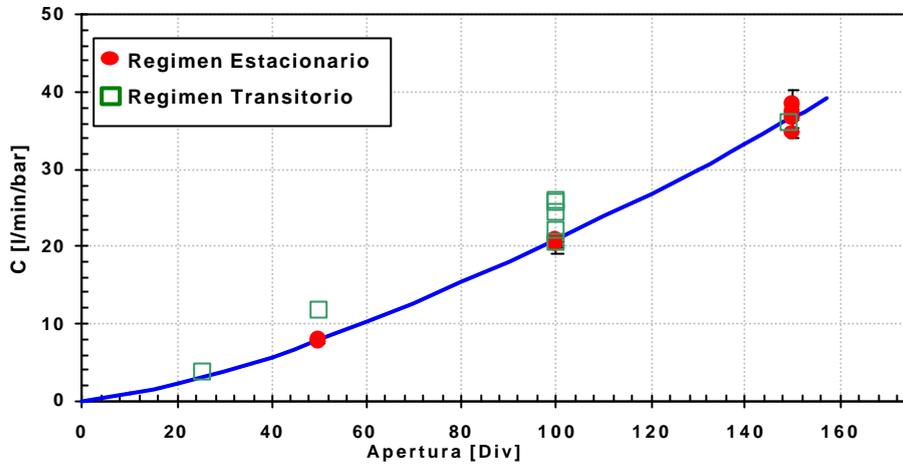
La concordancia de los dos métodos que ilustra la figura 7, es evidente.



**Figura 7.** Volúmenes de gas escapado del recinto en estado transitorio en un dado intervalo de tiempo. Para cada ensayo, caracterizado por un valor de la coordenada horizontal, se midieron los volúmenes usando un método directo, esto es midiendo el volumen que pasó por el caudalímetro en un dado intervalo de tiempo (círculos llenos). Para el mismo ensayo se determinó el volumen escapado integrando la expresión (3), (cuadrados). La concordancia de los dos métodos es evidente.

La conductividad  $C$  de la pérdida puede ser obtenida para cada configuración de la válvula aguja usando los dos regímenes. En régimen transitorio, determinamos  $C$  usando las expresiones (4) y (5). En régimen estacionario, esta conductividad también puede obtenerse por medición directa de los volúmenes escapados, utilizando la expresión (12). En la figura 8 se presentan los valores de la conductividades de  $C$  para distintas aperturas de la válvula aguja, usando los dos procedimientos descriptos, régimen estacionario y

transitorio. Vemos que la concordancia entre ambas técnicas es notable. Las discrepancias son consistentes con los errores experimentales. En particular el caudalímetro utilizado tenía una apreciación de 0.25 litros.



**Figura 8.** Determinación de la conductividad de las pérdidas generadas en la válvula aguja para distintos grados de aperturas, caracterizados por la posición del vernier de la misma (Div). Los círculos llenos corresponden a la determinación de  $C$  usando el método estático y los cuadrados abiertos a las determinaciones usando el método transitorio. Nótese la concordancia entre ambas aproximaciones.

## Conclusiones:

En el presente trabajo, presentamos una técnica de caracterización de fugas en instalaciones internas de gas, utilizando un sensor de presión conectado a una computadora, para medir la variación de presión en función del tiempo, cuando se aísla la instalación, previamente presurizada, de la red de gas. Nuestro estudio indica que la técnica descrita aquí, efectivamente permite medir y cuantificar estas pérdidas con gran precisión. En particular los valores de la conductividades de las pérdidas ( $C$ ) pueden determinarse con una precisión, del orden del 5 a 10% para dichas instalaciones. Así mismo los valores de las pérdidas medidos usando varias técnicas distintas (método estacionario usando caudalímetros y método transitorio) coinciden. Esta concordancia entre los distintos procedimientos, brinda robustez y confianza a la técnica desarrollada en este trabajo para evaluar cuantitativamente pérdidas en instalaciones internas de gas natural. Una virtud del método propuesto es que los errores accidentales (al azar) en gran medida no influyen en la determinación de las características de las pérdidas de la instalación (figura 5 y 6).

La presente técnica es particularmente útil para caracterizar pequeñas pérdidas, dada su gran sensibilidad. Asimismo, el volumen de la instalación interna puede obtenerse del mismo ensayo. Para pérdidas mayores, el procedimiento más adecuado es el método estacionario, usando preferiblemente algún gas inerte como nitrógeno. En este caso los

flujos pueden ser fácilmente medidos por los caudalímetros usuales. Cuando las pérdidas son grandes, ver apéndice, la representación gráfica de la presión versus el tiempo, en escala semilogarítmica, deja de ser lineal. Por lo tanto la validez de la suposición hecha en este trabajo, de que  $C$  sea independiente de la presión, puede ser evaluada en el mismo ensayo, verificando la linealidad del gráfico de  $P$  en función del tiempo en representación semilogarítmica.

Finalmente deseamos agradecer al Sr. Gerente de Distribución de ENARGAS, Ing. J. Deferrari por su apoyo y estímulo en el desarrollo de este trabajo. También deseamos agradecer a los Sres. J. L. Florio y Hugo O. Baño de MetroGas por su colaboración en distintas partes de este trabajo. También agradecemos a la Dra. M. Schwint por sus comentarios y lectura de este trabajo.

<sup>†</sup> *Escuela de Ciencia y Tecnología - Universidad Nacional de San Martín Buenos Aires y Departamento de Física de la F.C.E. y N. de la Universidad de Buenos Aires-Argentina. - e-mail: sgil@df.uba.ar*

## Apéndice 1

### Sustento Teórico del método propuesto.

#### Evolución temporal de la presión en un recinto cerrado con pérdida.

Como modelo de una instalación interna de gas natural, consideramos un recinto cerrado de volumen  $V_0$ , que se encuentra a una temperatura  $T_0$  y presión  $P$ , como se ilustra en la figura 1. Designamos con  $m$  la masa instantánea de gas, con  $n$  el número de moles del mismo ( $n=m/M_0$ ,  $M_0$ =Masa molecular del gas) y  $N$  es el número total de moléculas en el gas. Según la ley de estado para gases ideales (aplicable a gas natural para presiones inferiores a 3 bar) tenemos:

$$P \cdot V_0 = n \cdot R \cdot T = \frac{m}{M_0} \cdot R \cdot T \quad (A1)$$

donde  $R$  es la constante universal de los gases. Dado que estamos suponiendo que el sistema tiene pérdidas, el número de moléculas y por consiguiente la masa del gas en el recinto variarán, lo que provoca una variación concomitante de la presión, esto es:

$$\frac{dP}{dt} \cdot V_0 = \frac{dm}{dt} \cdot \frac{1}{M_0} \cdot R \cdot T \quad (A2)$$

La masa de gas saliente,  $dm$  está asociada a un cierto volumen de gas  $dV_{\text{saliente}}$  a la presión  $P$ . Este volumen de gas saliente está relacionado a la masa de gas perdida por la siguiente expresión:

$$P \cdot \frac{dV_{\text{saliente}}}{dt} = P \cdot \left[ \frac{dm}{dt} \cdot \frac{R \cdot T_0}{M_0} \right]. \quad (A3)$$

Combinando (A2) y (A3) obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{dP}{dt} \cdot V_{0=} = -P(t) \cdot \frac{dV_{saliente}}{dt} = -C \cdot (P(t) - P_{ext}). \quad (A4)$$

En esta última expresión,  $P(t)$  es la presión absoluta instantánea en el interior del recinto,  $dV_{saliente}/dt$  se refieren al flujo de gas saliente. La conductividad  $C$  del orificio de pérdida esta definida por (2). Esta última expresión puede re escribirse como:

$$\frac{dP}{(P(t) - P_{ext})} = -\frac{C}{V_0} \cdot dt \quad (A5)$$

Suponiendo que  $C$  sea independiente de la presión, integrando (A5) tenemos la expresión que da la dependencia de la presión con el tiempo:

$$P(t) = P_{ext} + (P_0 - P_{ext}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}, \quad (A6)$$

donde  $P_0$  es la presión inicial ( $t=0$ ) del recinto y  $P_{ext}$  la presión exterior. Esta expresión es equivalente a la relación (11). Como comprobamos en este trabajo, esta expresión da cuenta con muy buena aproximación, la dependencia de la presión con el tiempo en instalaciones de gas con pérdidas pequeñas. Para comprender mejor los alcances y limitaciones de la suposición en que se basa nuestra técnica, vamos a intentar analizar los parámetros físicos que caracterizan la conductividad  $C$ . Para ello, es útil recordar que las características físicas de los flujos de fluidos depende del tipo de régimen en el que operamos. Si los orificios son pequeños o las presiones bajas (más precisamente si el *camino libre medio* de las moléculas es mayor que las distancias características del sistema) estamos en el régimen molecular. A presiones mayores y siempre que el número de Reynolds sea inferior a 3000 aproximadamente, estamos en el régimen llamado viscoso, a números de Reynolds mayores, el flujo es de tipo turbulento.

**Régimen molecular:** En este caso las moléculas del gas chocan principalmente con las paredes del recipiente o bien pasan a través de los orificios. Como la masa  $m$  de gas es proporcional al número  $N$  de moléculas del mismo, el flujo de moléculas a través del orificio esta relacionada con la masa del gas que fluye, o sea:

$$\frac{1}{m} \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt}. \quad (A7)$$

Por lo tanto para determinar la variación de la presión en el recinto de gas debemos calcular el número de moléculas que abandonan el recinto de volumen  $V_0$ . A partir de la teoría cinética de los gases es posible calcular la velocidad de escape de las moléculas del recinto en cuestión, suponiendo que el orificio tiene una sección de área  $A$ , tenemos<sup>[2,3]</sup>:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\bar{c} N}{V_0} \cdot A \cdot \bar{v} \quad (A8)$$

Aquí  $v$  es la velocidad media de las moléculas, que puede calcularse partir de la teoría cinética de los gases<sup>[2-4]</sup>:

$$v = \sqrt{\frac{8 \cdot R}{\mathbf{P} \cdot M_0} \cdot T_0} \quad (A9)$$

De (A8) y (A9) tenemos que:

$$-\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{A}{V_0} \right) \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot R}{\mathbf{P} \cdot M_0} \cdot T_0} \quad (A10)$$

Combinando este resultado con (A4) y (A7) tenemos:

$$-\frac{1}{m} \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{A}{V_0} \right) \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot R}{\mathbf{P} \cdot M_0} \cdot T_0} \quad (A11)$$

Hasta aquí no hemos tenido en cuenta el efecto del medio circundante, esto es que el flujo neto molecular es la diferencia del flujo saliente y el entrante. Por simetría entre ambos flujos podemos escribir:

$$-\frac{dN}{dt} = \frac{A}{4} \cdot \mathbf{n} \cdot (N \cdot \mathbf{v} - N_{ext} \cdot \mathbf{v}_{ext}) = \frac{A}{4} \cdot \mathbf{n} \cdot (\mathbf{r} \cdot \mathbf{v} - \mathbf{r}_{ext} \cdot \mathbf{v}_{ext}) \quad (A12)$$

donde  $\mathbf{r}$  ( $\mathbf{r}_{ext}$ ) y  $\mathbf{v}$  ( $\mathbf{v}_{ext}$ ) son los valores de la densidad (externa) y velocidad (externa) del gas en el interior (exterior) del recipiente. En términos de las presiones estas ecuaciones se transforman en:

$$-\frac{dN}{dt} = \frac{A}{4} \cdot \frac{\mathbf{n}}{k \cdot T} \cdot (P - P_{ext}) = \frac{A}{4 \cdot k \cdot T} \cdot \left( \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\mathbf{P} \cdot M_0}} \right) \cdot (P - P_{ext}) \quad (A13)$$

combinando esta expresión con (2), que defina la conductividad del orificio  $C$ , tenemos:

$$-k \cdot T \cdot \frac{dN}{dt} = V_0 \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{A}{4} \cdot \left( \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\mathbf{P} \cdot M_0}} \right) \cdot (P - P_{ext}) = C \cdot (P - P_{ext}) \quad (A14)$$

Aquí  $k$  es la constante de Boltzmann. La conductividad del orificio en régimen es entonces:

$$C = A \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T_0}{2 \cdot \mathbf{P} \cdot M_0}} \quad (A15)$$

También definimos la constante de tiempo  $\mathbf{t}$  del sistema como:

$$\mathbf{t} = \frac{V_0}{C} = \frac{V_0}{A} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mathbf{P} \cdot M_0}{R \cdot T_0}} = Constante \quad (A16)$$

Estas expresiones, valen siempre y cuando el tamaño del orificio ( $A$ ) tenga dimensiones pequeñas comparadas con las del recipiente. También es importante destacar que si la diferencia de presión (absoluta) entre el recipiente y su entorno es superior a 2 aproximadamente, estas expresiones dejan de ser válidas<sup>[2,3]</sup>. Esto se debe a que si la diferencia de presión es grande o bien el flujo de gas es grande, el gas no tiene tiempo de equilibrarse térmicamente con el medio, entonces la temperatura no será contante, pues el proceso se convierte en adiabático. Vemos entonces que a flujos moderados en régimen molecular, la conductividad  $C$  solo depende de la geometría de la pérdida (A-15).

**Régimen viscoso o laminar:** Para analizar este caso, supondremos que la fuga tiene lugar a través de un pequeño tubo de diámetro  $d$  y longitud  $l$ . El flujo de gas en este caso viene dada por la ecuación de Hagen-Poiseuille<sup>[2]</sup>:

$$P \cdot \frac{dV}{dt} = P \cdot \left( \frac{P \cdot d^4}{128 \cdot \mathbf{m} \ell} \right) \cdot (P - P_{ext}). \quad (\text{A17})$$

Aquí  $\mathbf{m}$  es la viscosidad de gas y  $P$  las presiones absolutas. Si las diferencias de presiones entre el interior del recinto ( $P$ ) y su exterior no es grande, como ocurre usualmente en instalaciones de gas de bajas presiones ( $(P - P_{ext})/P_{ext} < 0.2$ ), tenemos:

$$C \approx \frac{P \cdot \frac{dV}{dt}}{(P - P_{ext})} = \bar{P} \cdot \left( \frac{P \cdot d^4}{128 \cdot \mathbf{m} \ell} \right) = A^2 \cdot \left( \frac{\bar{P}}{32 \cdot P \cdot \mathbf{m} \ell} \right), \quad (\text{A18})$$

donde  $\bar{P}$  es la presión promedio (en el tiempo) del recinto,  $A$  es el área del orificio de pérdida. Si las diferencias de presiones son moderadas,  $\bar{P}$  será aproximadamente constante y por lo tanto también lo será  $C$  en este caso.

**Régimen Turbulento:** En condiciones de régimen turbulento, esto es para números de Reynolds mayores a 2000 aproximadamente, la caída de presión a través de un orificio esta caracterizado por el coeficiente de pérdida  $K_L$  (Coeficiente de pérdida para el orificio)<sup>[4]</sup>, su valor es del orden de la unidad y depende de la forma del mismo. Esto es:

$$P - P_{Ext} = \Delta P = K_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \mathbf{r} \cdot v^2 = \frac{8}{P^2} \cdot K_L \cdot \mathbf{r} \cdot \frac{Q}{d^4}. \quad (\text{A19})$$

Donde  $\mathbf{r}$  es la densidad del gas,  $v$  la velocidad de salida del gas por el orificio y  $Q$  el caudal que fluye por el mismo.  $d$  es el diámetro efectivo del orificio. A partir de la definición de  $C$  obtenemos:

$$C = \frac{P \cdot \frac{dV}{dt}}{(P - P_{ext})} \approx A \cdot \sqrt{\frac{2}{\mathbf{r} \cdot K_L}} \cdot \left( \frac{P}{\sqrt{P - P_{ext}}} \right). \quad (\text{A20})$$

Vemos que en este caso, dado que la diferencia de presiones entre el interior y exterior pueden ser importante, es de esperar que la dependencia de  $C$  con la presión no pueda ser ignorada y la expresión (A6) deje de ser válida.

Una ventaja del método propuesto aquí, es que la validez de la hipótesis de que  $C$  sea independiente de  $P$ , puede ser evaluada de los propios datos. Esto es si el gráfico semilogarítmico de  $P$  versus tiempo es lineal, esto significa que efectivamente podemos suponer que  $C$  no depende de la presión y en protocolo propuesto queda homologado.

## Referencias

1. Existen varias compañías que proveen interfaces para convertir una computadora en un sistema de toma de datos. Entre ellas Vernier Software <http://www.vernier.com>, National Instruments <http://www.ni.com>. Igualmente, existen varios proveedores de sensores de presión: SenSym <http://www.sensym.com>, GM Electronica S.A. <http://www.gmelectronica.com.ar>, Omega <http://www.omega.com>
2. *Scientific foundation of vacuum technique* – S. Duchman – Wiley, N.Y. 1962.
3. *Introducción a la técnica de alto vacío* - B. García Castañer- Publicaciones de La JEN - Madrid 1966.
4. *A Brief Introduction to Fluid Mechanics* – D. F. Young, B.R. Munson and T. H. Okiishi – John Wiley & Sons, Inc. N.Y. 1997 (ISBN 0-471-13771-5).
5. *Física para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería*- Halliday, Resnik y Krane, 4ta. Ed. Vol. II . – Cía. Editorial Continental, S.A. México- 1985.