Generalidades sobre la distribución del gas de alumbrado y comparación con la distribución del agua potable

POR

ALFREDO DÉLANO FRÉDERICK

CAPÍTULO II

TEORIA DEL ESCURRIMIENTO DEL GAS DE ALUMBRADO EN CAÑERÍAS

Generalidades

Teóricamente, el estudio del escurrimiento del gas es mucho más complicado que el del agua, pero en los cálculos prácticos se simplifican mucho las fórmulas, de modo que los problemas relativos a cañerías de gas de alumbrado se resuelven en la misma forma que si se tratase de cañerías de agua potable.

En el caso de los líquidos, el volumen y la densidad permanecen constantes cuando varía la presión o la temperatura (para los cálculos de escurrimiento se desprecia en hidráulica la influencia de la temperatura, que es insignificante). En los gases, por el contrario, el volumen y densidad dependen de la presión y temperatura.

Cuando escurre gas por una cañería, el volumen y, por consiguiente, el gasto aumentan a medida que la presión disminuye, y vice-versa. Estas transformaciones van acompañadas, en general, de variaciones de temperatura. En el caso del escurrimiento del gas de alumbrado, como dichas variaciones de temperatura son pequeñas, se admite que la cañería y la tierra que la circunda ceden o absorben cierta cantidad de calor, manteniendo constante la temperatura del gas en todo el trayecto.

Las fórmulas se deducen en esta hipótesis, es decir, asimilando el gas a un fluido perfecto sometido a la ley de Mariotte.

Según esta ley, el producto de la presión por el volumen de una masa gaseosa es constante, de donde resulta:

$$1) \qquad \rho = k . p$$

ρ = densidad $\quad$ p = presión $\quad$ k = constante

fórmula que expresa que la densidad es proporcional a la presión.

Introduciendo la relación 1) en la ecuación del movimiento permanente de los fluidos perfectos sometidos a la acción de la pesantez:

$$2) \qquad g . d z + \frac{d p}{\rho} + v d v = 0$$

ésta se escribe:

$$g d z + \frac{d p}{k p} + v d v = 0$$

y en esta forma puede integrarse.

Efectuando la integración se obtiene:

$$3) \qquad z_1 + \frac{L p_1}{g k} + \frac{v_1^2}{2 g} = z_2 + \frac{L p_2}{g k} + \frac{v_2^2}{2 g}$$

En el caso de los líquidos, es decir, para los fluidos en que la densidad ρ es constante, resulta de la integración de 2)

$$4) \qquad Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2 g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2 g}$$

que es la ecuación de Bernouilli que se aplica al movimiento permanente de los líquidos perfectos.

Como se ve, las ecuaciones 3) y 4) son parecidas.

Se observa que los segundos términos de ambos miembros de 3) no son homogéneos con el resto de la ecuación. Sin embargo, igualando a cero la ecua-

---

NOTA: La ley de Mariotte tiene lugar cuando la temperatura permanece constante: es lo que se llama una transformación isotermal. Tales transformaciones van necesariamente acompañadas de absorción o pérdida de calor, lo que modifica la energía interna del gas. Por este motivo creemos que la ecuación 2) no es rigurosamente exacta, ya que expresa que la energía total de una partícula fluida permanece constante durante el movimiento. El primer miembro de esa ecuación representa la energía total correspondiente a la unidad de masa.

ción, la diferencia de los logaritmos: $L\,p_1 - L\,p_2 = L\,\frac{p_1}{p_2}$ es de la dimensión del cuociente de dos presiones, es decir, un número y en esta forma resulta homogénea la ecuación 3).

En distribución de gas de alumbrado sólo excepcionalmente se opera con gas a una presión inferior a la atmosférica. Por ésto no se acostumbra medir la *presión absoluta* del gas sino el *exceso de presión sobre la atmosférica.*

Hemos dicho que se denomina *baja presión* una presión que no pasa de 100 mm. de agua sobre la atmosférica. (1)

Como se ve, en este caso las presiones superan a lo más en $\frac{100}{10333} \pm 0{,}01$ la presión atmosférica.

Por *alta presión* se entiende una presión superior a unos 50 cm. de agua sobre la atmosférica. No se pueden fijar límites precisos para la alta presión: en Europa se emplean, por lo general, presiones comprendidas entre 50 cm. y 2 m. de agua en cañerías a alta presión. En EE. UU. se ha llegado a valores muy superiores, hasta 20 atm. (200 m. de agua) y aún más.

Prácticamente la distinción entre baja presión y alta presión se basa en el modo de obtener la presión: así, cuando el peso de los gasómetros da una presión suficiente para alimentar una distribución, se dice que ésta es de *baja presión* y cuando no bastando el peso de los gasómetros es necesario comprimir el gas para alimentar una cañería, se dice que dicha cañería es de *alta presión.*

Vamos a estudiar los factores que se deben considerar en los cálculos referentes a cañerías de gas de alumbrado a baja presión y a alta presión y determinar las simplificaciones que se pueden aceptar en cada uno de estos casos.

1.—Baja presión

a) Variaciones de densidad y gasto.—Suponiendo para fijar las ideas que la presión atmosférica tenga su valor normal = 10333 mm. altura de agua (76 cm. de mercurio) en el punto más bajo de una zona de distribución de gas a baja presión y que el desnivel en esa zona sea de 100 m. (valor excesivo que se presenta excepcionalmente), la presión atmosférica en el punto más alto valdrá 10333 — 129 = 10204 mm. (1 lit. de aire pesa 1,29 gr.). Si además se acepta el caso más desfavorable, a saber, que en el punto más bajo tenga el gas la presión máxima de servicio = 100 mm. (sobre la presión atmosférica) y en el punto más alto la presión mínima = 40 mm., (2), se tiene:

(1) Ultimamente en algunas ciudades de EE. UU. se ha llegado a presiones hasta de 200 mm. en distribuciones de gas a baja presión.

(2) Aunque la mayoría de las prescripciones relativas a presión exijen que ésta no baje de 50 mm., en algunas ciudades se admiten presiones de 40 mm., lo que permite aumentar la capacidad de la red. Tomaremos en los cálculos este último valor a fin de colocarnos en el caso más desfavorable.

Presiones absolutas del gas de alumbrado en cañerías a baja presión. $\left\{ \begin{array}{l} \text{máxima: } p_{máx} = 10333 + 100 = 10433 \text{ mm} \\ \text{mínima: } p_{mín} = 10204 + 40 = 10244 \text{ mm} \end{array} \right.$

Como las densidades son proporcionales a las presiones absolutas según la ley de Mariotte, la mayor variación de densidad ρ en cañerías de gas a baja presión sería:

$$\frac{\rho_{máx}}{\rho_{mín}} = \frac{p_{máx}}{p_{mín}} = \frac{10433}{10244} = \underline{1,016}$$

Como se ve, ***en una distribución de gas a baja presión, las variaciones de densidad son insignificantes (inferiores a 1,6 %) y pueden despreciarse para los cálculos de cañerías.***

Se deduce también que en cañerías de gas a baja presión sin servicio en camino, las variaciones de gasto de un punto a otro de la cañería (en un mismo instante) pueden despreciarse. (En efecto, los gastos o volúmenes son inversamente proporcionales a las presiones, según la ley de Mariotte).

b) ECUACIÓN DE MOVIMIENTO.—Acabamos de demostrar que en distribuciones de gas a baja presión puede considerarse constante la densidad del gas de un punto a otro con una aproximación suficiente para los cálculos de cañerías. En esta hipótesis el escurrimiento se efectúa como si se tratase de un fluido incompresible y por lo tanto obedece a la ecuación del movimiento de líquidos. Vamos a deducir esta consecuencia directamente partiendo de la ecuación 3).—pág. ...

$$3) \qquad z_1 + \frac{L\,p_1}{g\,k} + \frac{v_1^2}{2\,g} = z_2 + \frac{L\,p_2}{g\,k} + \frac{v_2^2}{2\,g}$$

que se refiere al movimiento permanente de un fluido perfecto compresible según la ley de Mariotte.

Como los gases no son fluidos perfectos, no es rigurosamente aplicable a ellos la ecuación anterior. En efecto, cuando escurre un gas, parte de la energía se gasta en vencer el trabajo P de los rozamientos. Se deduce que para aplicar la ecuación 3) al escurrimiento de los gases es necesario restar P al primer miembro:

$$5) \qquad z_1 + \frac{L\,p_1}{g\,k} + \frac{v_1^2}{2\,g} - P = z_2 + \frac{L\,p_2}{g\,k} + \frac{v_2^2}{2\,g}$$

Esto mismo debe hacerse cuando se aplica la ecuación de Bernouilli 4) al escurrimiento del agua u otro líquido.

P se designa con el nombre de pérdida de carga.

Despejemos P de la ecuación 5):

$$6) \qquad P = (z_1 - z_2) + \frac{L\,p_1 - L\,p_2}{g\,k} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2\,g}$$

La expresión $L\,p_1 - L\,p_2$ se puede transformar. Para ésto pongamos:

$$p_1 - p_2 = \Delta$$

entonces:

$$L\,p_1 - L\,p_2 = L\,(p_2 + \Delta) - L\,p_2$$

Un conocido desarrollo en serie (que se emplea en el cálculo numérico de los logaritmos) nos da:

$$L\,(p_2 + \Delta) - L\,p_2 = 2\,\frac{\Delta}{2\,p_2 + \Delta} + \frac{2}{3}\left(\frac{\Delta}{2\,p_2 + \Delta}\right)^3 + \ldots\ldots$$

Limitando el desarrollo al primer término se comete un error e (resta de la serie) que vale:

$$e \leq \frac{2\,\Delta^3}{12\,p_2\,(p_2 + \Delta)\,(2\,p_2 + \Delta)}$$

Tratándose de cañerías de gas de alumbrado a baja presión, para calcular el valor máximo de e podemos poner $\Delta = 16$ gr/cm.² Esta es la mayor diferencia de presión absoluta entre dos puntos de una cañería. (Ver Variación de densidad y gasto, pág..). En el caso de cañerías a baja presión p_2 apenas difiere de la presión atmosférica y se puede poner $p_2 = 1\,000$ gr/cm². Introduciendo estos valores se obtiene:

$$e \leq \frac{2 \times 16^3}{12 \times 1000 \times 1016 \times 2016}$$

$$e \leq \frac{1}{3 \times 10^6}$$

valor despreciable respecto del primer término que vale $\dfrac{2 \times 16}{2\,000 + 16} = \dfrac{1}{63}$

De aquí resulta que, cometiendo un error máximo de 0,005%, podemos escribir:

$$L\,(p_2 + \Delta) - L\,p_2 = \frac{2\,\Delta}{2\,p_2 + \Delta}$$

Pero teníamos: $\Delta = p_1 - p_2$

luego:
$$L\,p_1 - L\,p_2 = \frac{2\,(p_1 - p_2)}{p_1 + p_2}$$

Designando por p_m la presión media:

$$\frac{p_1 + p_2}{2} = p_m$$

resulta:
$$L\,p_1 - L\,p_2 = \frac{p_1 - p_2}{p_m}$$

Introduciendo en 6) este valor se obtiene:

$$P = (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{g\,k.p_m} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2\,g}$$

pero $\rho = k.p$ (fórmula 1 de la pág...), luego, si designamos por ρ_m la densidad del gas a la presión p_m, se puede escribir

$$\rho_m = k\,p_m$$

y, por consiguiente,

$$P = z_1 - z_2 + \frac{p_1 - p_2}{g.\rho_m} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2\,g}$$

o bien:

$$7) \qquad z_1 + \frac{p_1}{g.\rho_m} + \frac{v_1^2}{2\,g} - P = z_2 + \frac{p_2}{g\,\rho_m} + \frac{v_2^2}{2\,g}$$

ecuación idéntica a la que se refiere al movimiento permanente de los líquidos. En efecto, la expresión (7), no es otra cosa que la fórmula de Bernouilli a la que se ha agregado el término correctivo—P, para tomar en cuenta las pérdidas de carga.

Las fórmulas 5) y 7) no son prácticas para los cálculos de cañerías de gas, por cuanto en ellas figuran las *presiones absolutas* del gas, en tanto que en distribuciones de gas se acostumbra medir *los excesos de presión del gas sobre la presión atmosférica.*

Designemos por h_1, h_2 los excesos de las presiones p_1, p_2 sobre la presión atmosférica; sean p_1', p_2' los valores correspondientes de las presiones atmosféricas. Podemos escribir las relaciones:

$$p_1' = p_1^1 + h_1$$

$$p_2 = p_2' + h_2$$

Sustituyendo en 7) se obtiene:

$$8) \qquad z_1 + \frac{p_1' + h_1}{\rho_m . g} + \frac{v_1^2}{2g} - P = z_2 + \frac{p_2' + h_2}{\rho_m . g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Como la variación de densidad del aire llega como máximo a 1°/₀ entre dos puntos de una distribución de gas a baja presión, podemos aceptar para la densidad atmosférica un valor medio constante ρ_{at}. A este grado de aproximación es aplicable a la atmósfera la ecuación 7), en la que se debe anular la pérdida de carga P, y además, los términos en que interviene la velocidad, puesto que la atmósfera es un fluido prácticamente en equilibrio. En estas condiciones, podemos escribir:

$$9) \qquad z_1 + \frac{p_1'}{\rho_{at}. g} = z_2 + \frac{p_2'}{\rho_{at}. g}$$

Para anular p_1' y p_2' entre las ecuaciones 8) y 9) multiplicamos la última por $\frac{\rho_{at}}{\rho_m}$:

$$z_1' \frac{\rho_{at}}{\rho_m} + \frac{p_1'}{\rho_m . g} = z_2 \frac{\rho_{at}}{\rho_m} + \frac{p_2'}{\rho_m . g}$$

expresión que, restada de 8) da:

$$z_1 \left(1 - \frac{\rho_{at}}{\rho_m}\right) + \frac{h_1}{\rho_m . g} + \frac{v_1^2}{2g} - P = z_2 \left(1 - \frac{\rho_{at}}{\rho_m}\right) + \frac{h_2}{\rho_m . g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Se acostumbra designar por s la densidad del gas respecto del aire, luego podemos poner: $s = \frac{\rho_m}{\rho_{at}}$. Introduciendo s en la ecuaciónp recedente, ésta se escribe:

$$10)\quad z_1\left(1-\frac{1}{s}\right)+\frac{h_1}{\rho_m . g}+\frac{v_1^2}{2g}-P=z_2\left(1-\frac{1}{s}\right)+\frac{h_2}{\rho_m . g}+\frac{v_2^2}{2g}$$

Como se ve, escrita la ecuación en esta forma, no es cómodo interpretarla gráficamente, dibujando la línea de carga puesto que para ello habría que reducir las cotas en la razón 1: $\left(1-\frac{1}{s}\right)$. Además, este coeficiente de reducción es negativo por cuanto la densidad del gas es inferior a la del aire $s < 1$. Se ve, pues, que *la ecuación 10) no se presta para construir la línea de carga como se acostumbra en el caso de cañerías de agua.*

Tampoco es práctico expresar las presiones en altura de una columna de gas. En efecto, la altura de una columna gaseosa no da idea alguna concreta ya que no puede quedar libremente limitada como la superficie de un líquido. Por estas razones, tratándose de cañerías de gas de alumbrado, las presiones y pérdidas de carga se miden por la altura de una columna de agua (con manómetros de agua en forma de U). Para reducir a columna de agua las alturas de gas que figuran en la expresión 10), basta multiplicarlas por el peso específico γ del gas *respecto del agua.* (*)

Designando, pues, por P_a la pérdida de carga expresada en altura de agua, la fórmula 10) multiplicada por γ da:

$$11)\quad z_1\left(1-\frac{1}{s}\right).\gamma+h_1+\frac{v_1^2}{2g}\gamma-P_a=z_2\left(1-\frac{1}{s}\right)\gamma+h_2+\frac{v_2^2}{2g}.\gamma$$

En esta forma se aplica la ecuación de escurrimiento a los problemas de cañerías de gas de alumbrado a baja presión. Por lo general, se desprecian los términos que contienen v^2 por tener un valor mucho más pequeño que los restantes.

c) Diferencias de presión debidas al desnivel.—A una diferencia de nivel $z_1 - z_2$ corresponde cierta variación de presión en una masa gaseosa. En cañerías de gas de alumbrado a baja presión, esta variación puede deducirse de la ecuación 11) que, según hemos visto, es suficientemente aproximada para el cálculo de dichas cañerías.

Para averiguar la influencia de la altura sobre la presión, basta anular el efecto de la velocidad, o mejor dicho, se debe considerar una masa gaseosa en equilibrio. En este caso las pérdidas de carga se reducen a cero. Anulando, pues, en 11) P_a y los términos que contienen v se obtiene:

(*) El peso específico γ del gas, respecto del agua, vale $\gamma = \rho_m . g$ si ρ_m representa la densidad del gas, respecto del agua.

$$z_1\left(1-\frac{1}{s}\right)\gamma+h_1=z_2\left(1-\frac{1}{s}\right)\gamma+h_2$$

de donde

$$h_1-h_2=(z_1-z_2)\left(\frac{1}{s}-1\right)\gamma$$

Pero $\frac{\gamma}{s}$ representa el peso específico del aire (respecto del agua) y podemos designarlo por γ_{aire}.

$$12)\qquad h_1-h_2=(z_1-z_2)\,(1-s)\,\gamma_{aire}.$$

Como la densidad del gas de alumbrado es inferior a la del aire $s<1$, resulta que z_1-z_2 es del mismo signo que h_1-h_2. Por otra parte, las alturas se han considerado positivas hacia arriba. Tomando en cuenta estas circunstancias se deduce de la última ecuación que: *las diferencias de nivel producen variaciones proporcionales del exceso de presión del gas de alumbrado sobre la atmósfera, haciéndolo crecer a medida que aumenta la cota y vice-versa.* Esto se puede expresar también diciendo que *la influencia de la altura sobre la presión aprovechable del gas de alumbrado es inversa a la influencia de la altura sobre la presión de los líquidos.*

Sin embargo, las presiones *absolutas* del gas de alumbrado crecen hacia abajo, lo mismo que en el agua u otro líquido.

APLICACIÓN DEL GAS DE SANTIAGO.—Calculemos, para Santiago, la variación de presión que tiene lugar en una cañería de gas de alumbrado para cada metro de desnivel. Designemos por δ esta variación unitaria que no es otra cosa que el valor que en (12) toma h_1-h_2 cuando $z_1-z_2=1$ m. De 12) resulta:

$$13)\qquad \delta=(1-s)\,\gamma_{aire}.$$

En esta fórmula, $s=\dfrac{\text{densidad del gas}}{\text{densidad atmosférica}}$. Ahora bien, la temperatura del gas en las cañerías, es prácticamente igual a la temperatura media de la atmósfera. Podemos aceptar 20 grados cent. como temperatura media. (*)

En cuanto a la presión atmosférica media en Santiago vale 715 mm. de mercurio.

(*) La temperatura media atmosférica es inferior a 20° en Santiago, pero si se toma la temperatura media de 8 A. M. a 8 P. M., es decir, cuando es más fuerte el consumo de gas, puede aceptarse el valor 20° cent. Este también es el valor medio de la temperatura del gas al pasar por los medidores de fabricación.

Calculemos, pues, el peso específico del aire γ_{aire} a 20° cent. y 715 mm. de presión. Para esto escribamos la ecuación característica de los gases perfectos:

$$\frac{p}{\rho\,T} = \frac{p_0}{\rho_0\,T_0}$$

de donde:

$$\rho \cdot g = \rho_0 g \cdot \frac{p\,T_0}{p_0\,T}$$

Sea $T_0 = 0° \text{ C} = 273°$ absolutos

$$p_0 = 760 \text{ mm. mercurio.}$$

Se sabe que el peso específico del aire a 0° y 760 mm. presión vale 1,293 k/m.³ ; entonces el peso específico del aire a la temperatura T_0 y presión p_0 será:

$$\rho_0 \cdot g = 1{,}293 \text{ kg/m.}^3$$

El peso específico del aire a la temperatura T = 20° C = 293° absolutos y la presión p = 715 mm. de mercurio valdrá:

$$\rho\,g = \rho_{aire} = 1{,}293 \cdot \frac{715}{760} \cdot \frac{273}{293}$$

$$\gamma_{aire} = 1{,}134 \text{ kg/m.}^3$$

Luego, para las condiciones medias de presión y temperatura que corresponden a Santiago, se tiene, según 13):

14) $$\delta = 1{,}134\,(1 - s)$$

Esta fórmula da la diferencia de presión en kg/m.² o sea, en mm. de agua por m. de desnivel.

Actualmente (año 1917) se fabrica en Santiago un gas de densidad muy alta: s = 0,62. Para este valor resulta:

$$\delta = 1{,}134\,(1 - 0{,}62)$$

$$\delta = 0{,}43 \text{ mm.}$$

Luego, para el gas de Santiago (s = 0,62) la diferencia de presión correspondiente a un metro de desnivel es δ = 0,43 mm. de agua.

d) Influencia de los cambios de velocidad.—La ecuación (11), muestra que a una variación $v_1 - v_2$ en la velocidad del gas corresponde una variación de presión $h_1 - h_2 = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \gamma$ fuera de las pérdidas de carga que puedan producirse si es brusca la variación de velocidad.

Supongamos un gas de densidad $s = 0,5$. Tomando para la atmósfera el estado medio que corresponde a Santiago (20 grados de temperatura y 715 mm. de presión barométrica), el m.³ de aire pesa 1,134 kg.

En estas condiciones, el peso del m.³ de gas es:

$$\gamma = 0,5 \times 1,134 = 0,567 \text{ kg/m.}^3$$

Hagamos $v_2 = 0$ y calculemos la magnitud de $h_1 - h_2$ para diferentes valores de v_2 :

v_1	$\frac{v_1^2}{2g}$	$h_1 - h_2 = \frac{v_1^2}{2g} \cdot \rho$ kg/m.² = mm. de agua
1 m seg.	0,051 m.	0,03 mm. altura de agua
5 »	1,274 »	0,72 » » » »
10 »	5,097 »	2,89 » » » »

Como se ve, las variaciones de presión que corresponden a los cambios de velocidad son insignificantes, aún para grandes velocidades como 10 m/seg. Por este motivo, *en los cálculos de cañerías de gas de alumbrado se desprecia la influencia de los cambios de velocidad.*

2.—Alta presión

a) VARIACIONES DE DENSIDAD Y GASTO.—Las diferencias de presión a lo largo de una cañería de gas a alta presión, son lo suficientemente grandes para que las variaciones de densidad a que dan lugar resulten apreciables.

En efecto, aún tratándose de presiones moderadas tales como las que se usan en Europa, las variaciones de densidad llegan a 10%. Tomemos una cañería a alta presión con una presión inicial de 1,50 m. de agua sobre la atmosférica y una presión final de 0,5 m. de agua. Supongamos, para fijar las ideas, que la presión atmosférica tenga su valor normal igual a 10,33 m. de agua. En estas condiciones, según la ley de Mariotte, las densidades extremas ρ_1 y ρ_2 estarán en la relación:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{10,33 + 1,50}{10,33 + 0,50} = 1,09$$

Las variaciones de gasto a lo largo de una cañería sin servicio en camino son de la misma magnitud, puesto que los gastos (volúmenes) son inversamente proporcionales a las presiones.

En cuanto a cañerías con presiones tan altas como las que se emplean en EE. UU. que alcanzan hasta 20 atmósferas, pueden tener variaciones de densidad y de gasto de 1 a 20 a lo largo de la cañería.

En los cálculos de cañerías de gas de alumbrado a alta presión se acostumbra medir los gastos *reducidos a la presión atmosférica,* lo que es lógico, puesto que el gas se utiliza a presiones que apenas sobrepasan 1 % de la atmosférica. (Debe recordarse que según hemos dicho, las cañerías a alta presión se emplean solamente para transportar el gas. Antes de utilizarlo se reducen las presiones al valor corriente de 5 a 10 cm. de agua).

b) PÉRDIDA DE CARGA.—Hemos visto (pág. . .) que la ecuación de Bernouilli para fluidos perfectos compresibles según la ley de Mariotte se escribe:

$$1) \qquad z_1 + \frac{L\,p_1}{g\,k} + \frac{v_1^2}{2\,g} = z_2 + \frac{L\,p_2}{g\,k} + \frac{v_2^2}{2\,g}$$

y que para aplicar esta ecuación al escurrimiento de los gases—que no son fluidos perfectos—es preciso restar al primer miembro las pérdidas de carga P, debidas a los rozamientos:

$$z_1 + \frac{L\,p_1}{g\,k} + \frac{v_1^2}{2\,g} - P = z_2 + \frac{L\,p_2}{g\,k} + \frac{v_2^2}{2\,g}$$

En los cálculos de cañerías de gas a alta presión, se puede despreciar la influencia de los cambios de nivel y velocidad. En efecto, se obtiene así una aproximación suficiente, según demostraremos luego.

Con esta simplificación la ecuación precedente se escribe:

$$\frac{L\,p_1}{g\,k} - P = \frac{L\,p_2}{g\,k}$$

de donde: (15)

$$P = \frac{L\,p_1 - L\,p_2}{g\,k}$$

Como se ve, la pérdida de carga no es proporcional a la diferencia de presiones $p_1 - p_2$. Vimos que esto último sucede aproximadamente cuando es pequeña la razón $\frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2}$ según acontece en el caso de cañerías de gas a baja presión (ver ecuación 7) de la página ..). En los cálculos de cañerías, lo que interesa es la diferencia de presiones $p_1 - p_2$ de manera que en las fórmulas de escurrimiento para cañerías de gas a alta presión no se hace figurar la pérdida de carga P, sino la diferencia de presiones $p_1 - p_2$ que corresponde a determinadas condiciones de velocidad, diámetro, etc.

c) INFLUENCIA DE LA ALTURA.—Veamos el efecto de las diferencias de nivel sobre la presión. Podríamos deducirlo de la ecuación de Bernouilli, pero es más fácil determinarlo directamente, observando que un desnivel H produce una variación en la presión utilizable del gas, igual a la diferencia de peso de una columna de aire y otra de gas de altura H. Esta diferencia de peso depende de la densidad del gas. Consideremos, para fijar las ideas, un gas de densidad $s = 0{,}5$, es decir, que pese la mitad que el aire a igualdad de presión y temperatura. Para las condiciones medias de presión y temperatura de Santiago (20 grados C. y presión de 715 mm. de mercurrio = 9,68 m. de agua) el m.^{3} de aire pesa 1 134 kg. En el cuadro que sigue se ha calculado el peso del m.^{3} de gas de densidad $s = 0{,}5$ a diferentes presiones y se ha formado las diferencias entre el peso del gas y el del aire. Estas diferencias dan la variación de presión del gas por metro de desnivel en kg/m.^{2} o lo que es lo mismo, en mm. altura de agua.

Exceso h de presión del gas sobre la atmósfera.	Peso del m.³ de gas a la presión h	Peso del m.³ de aire en kg.	Variación δ de presión del gas por metro de desnivel en k m.² = mm. de agua.	$\frac{\delta}{h}$
1 m. de agua	$0,5 \times 1,134 \times \frac{9,68 + 1}{9,68} = 0,62$ k/gm.³	1,13	$-$ 0,51	$\frac{0,51}{1 \times 1000} = 0,00051 = 0,05\%$ h
10 m. de agua	$0,5 \times 1,134 \times \frac{9,68 + 10}{9,68} = 1,15$ k/gm.³	1,13	+ 0,02	$\frac{0,02}{10 \times 1000} = 0,000002 = 0,0002\%$ h
100 m. de agua	$0,5 \times 1,134 \times \frac{9,68 + 100}{9,68} = 6,43$ kg/m.³	1,13	+ 5,30	$\frac{5,30}{100 \times 1000} = 0,000053 = 0,0053\%$ h
200 m. de agua	$0,5 \times 1,134 \times \frac{9,68 + 200}{9,68} = 12,30$ kg/m.³	1,13	+ 11,17	$\frac{11,17}{200 \times 1000} = 0,000056 = 0,0056\%$ h

Como se ve, en el cuadro, la variación δ de presión del gas por metro de desnivel alcanza hasta 11 mm. (para h = 200 m.) pero el valor absoluto de esta variación no permite formarse concepto de su importancia. Por ésto hemos formado la razón $\frac{\delta}{h}$ (última columna). Se nota que las variaciones de presión en % de h alcanzan el mayor valor para h = 1 m., en cuyo caso dicha variación representa el 0,05% de h por metro de desnivel.

Suponiendo un desnivel de 100 m. entre los extremos de la cañería (valor que rara vez se sobrepasará), la variación de presión correspondiente sería de 5% para h = 1 m. y muy inferior para otros valores de la presión h del gas.

En resumen, *el error que se comete al despreciar la influencia de la altura sobre la presión del gas en cañerías a alta presión, alcanza a lo más a un 5% de la presión del gas.*

d) Influencia de los cambios de velocidad.—Los cambios de velocidad tienen una influencia aún menor que las diferencias de nivel. Por este motivo, en los cálculos de cañerías de gas a alta presión no se toman en cuenta los cambios de velocidad. Ver a este respecto lo dicho en pág. ......

Resumen

Cañerías de gas de alumbrado a baja presión.—En este caso se puede considerar constante la densidad del gas a lo largo de una cañería.

Las diferencias de nivel producen variaciones proporcionales de presión (aproximadamente) considerando como presión del gas el exceso sobre la atmósfera, o sea, la presión aprovechable del gas. La presión aprovechable del gas aumenta con la elevación (al revés de lo que ocurre en el caso de los líquidos) y la variación de presión δ por metro de desnivel, vale:

$$\delta = (1 - s)\, \rho_{\text{aire}}$$

$$s = \text{densidad del gas respecto del aire}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \text{peso específico del aire.}$$

La influencia de los cambios de velocidad es insignificante y se desprecia en los cálculos de cañerías de gas a baja presión.

La ecuación de escurrimiento se escribe:

$$z_1\left(1 - \frac{1}{s}\right)p + h_1 + \frac{v_1^2}{2g}\,\rho - P_a = z_2\left(1 - \frac{1}{s}\right)\rho + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}\,p$$

z_1, z_2 = cotas;
h_1, h_2 = exceso de presión del gas sobre la atmósfera:
v_1, v_2 = velocidades del gas;
s = densidad del gas, respecto del aire;
ρ = peso específico del gas;
P_a = pérdida de carga expresada en altura de agua.

CAÑERÍAS DE GAS DE ALUMBRADO A ALTA PRESIÓN.—En este caso la densidad del gas varía sensiblemente a lo largo de una cañería. De aquí resulta que, en una cañería sin servicio en camino el gasto varía de un punto a otro. Para los cálculos de cañerías se considera el gasto reducido a la presión atmosférica y se desprecia la influencia de la altura y de los cambios de velocidad.

(Continuará)