

1. CÁLCULOS

1.1. CONDICIONES NORMALES Y REALES DE UN GAS

La masa específica o masa por unidad de volumen (densidad absoluta) de un gas que pasa de una presión absoluta $H_0 = 1 \text{ kgf/cm}^2$ (relativa = 0) a otra de valor absoluto H_1 y de la temperatura 0° C a otra t_1 , variará de su valor $m_0 \text{ (kg/Nm}^3\text{)}$ primitivo en esas condiciones normales a otra $m_1 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ en las llamadas condiciones reales de presión H_1 y temperatura t_1 según la expresión:

$$m_1 = m_0 \cdot H_1 \cdot \frac{273}{273 + t_1}$$

Justificación de fórmula: según la ecuación de los gases perfectos que cumplen más o menos exactamente los gases reales, la relación entre el volumen, la presión y la temperatura t_1 de un gas y el volumen y la presión del mismo a 0° C es:

$$V_1 \cdot H_1 = V_0 \cdot H_0 \cdot (1 + \alpha t_1)$$

siendo α el coeficiente de dilatación de los gases, que vale, aproximadamente, $1/273$, con lo que la última fórmula queda:

$$V_1 \cdot H_1 = V_0 \cdot H_0 \cdot \left(\frac{273 + t_1}{273} \right) \quad (A)$$

Indudablemente, si se dispone de una masa $M \text{ (kg)}$, ésta no varía con el volumen y la temperatura es siempre la misma. Sólo varía su masa específica o densidad absoluta: m_0 para el volumen V_0 y temperatura 0° C y m_1 para el volumen V_1 y temperatura t_1 . Entonces:

$$M = m_0 \cdot V_0 = m_1 \cdot V_1$$

o, lo que es lo mismo:

$$V_0 = \frac{M}{m_0} \quad \text{y} \quad V_1 = \frac{M}{m_1}$$

con lo que, sustituyendo en (A):

$$\frac{M}{m_1} \cdot H_1 = \frac{M}{m_0} \cdot H_0 \left(\frac{273 + t_1}{273} \right)$$

simplificando y despejando se llega a:

$$m_1 = m_0 \cdot \frac{H_1}{H_0} \cdot \frac{273}{273 + t_1}$$

Finalmente, trabajando con presiones absolutas, es $H_0 = 1$, con lo que:

$$m_1 = m_0 \cdot H_1 \cdot \frac{273}{273 + t_1}$$

1.2. CAUDAL REAL

Para el cálculo del caudal real, la fórmula a utilizar será la siguiente:

$$Q_r = Q_0 \cdot \frac{H_0}{H_1} \cdot \frac{T_1}{T_0} \cdot \frac{Z_1}{Z_0}$$

donde:

Q_0 : Caudal del gas en condiciones normales (Nm^3/h).

H_0 : Presión absoluta del gas en condiciones normales (kgf/cm^2).

T_0 : Temperatura absoluta del gas en condiciones normales ($^\circ \text{K}$).

Z_0 : Factor de compresibilidad en las condiciones normales.

Q_r : Caudal real del gas en las condiciones de trabajo (m^3/h).

H_1 : Presión absoluta del gas en las condiciones de trabajo (kg_f/cm^2).

T_1 : Temperatura absoluta del gas en las condiciones de trabajo ($^\circ \text{K}$).

Z_1 : Factor de compresibilidad en las condiciones de trabajo.

A efectos de cálculos el factor Z_1/Z_0 se puede despreciar ya que aproximadamente el valor es 1.

$$Q_r = 4000 \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{288}{273} = 844 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{equivalente a } 0,234 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

1.3. DIÁMETRO A ADOPTAR

El diámetro de la tubería a instalar dependerá de:

- La naturaleza del gas con su densidad característica.
- La caída de presión que se admita, la cual vendrá influenciada por el caudal y la presión de trabajo.
- La velocidad resultante de circulación del gas.

Para evitar el golpe de ariete al cerrar bruscamente una llave de paso, la velocidad del gas puede estar entre 5 a 30 m/s como máximo. Para el cálculo se escoge el valor máximo que es 20 m/s.

Por tanto, la fórmula a aplicar para hallar el diámetro de la tubería es:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{v \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,234}{20 \cdot \pi}} = 0,122\text{m} = 122\text{mm}$$

Esto da lugar a un diámetro nominal de 5" aproximadamente. Para minimizar las pérdidas de carga se escoge un diámetro de 6". Este diámetro de tubería es el que va desde el vaporizador hasta el comienzo de la ERM

1.4. PÉRDIDA DE CARGA. CÁLCULO MATEMÁTICO

En este apartado se diferenciarán dos zonas:

- Desde la salida de GNL de los depósitos hasta la entrada de GNL en el vaporizador.
- Desde la salida de GN del vaporizador hasta la entrada de la ERM.

Únicamente se expondrán las fórmulas a utilizar debido a que los cálculos se pueden realizar por ordenador de forma más rápida.

1.4.1. Salida de GNL del depósito

En esta zona el fluido circulante es prácticamente líquido y su comportamiento es en régimen laminar.

Es por ello que la pérdida de carga será mínima y por lo tanto se desprecia el resultado. Esta pérdida se debe al frotamiento entre el fluido y las paredes de la tubería y accesorios.

1.4.2. Salida de GN del vaporizador

1.4.2.1. Cálculo manual

En este apartado solamente se exponen las fórmulas ya que las pérdidas de carga son mínimas debido al pequeño trayecto del GN por la instalación y porque existe poca oposición de las dos válvulas en el transcurso del fluido hasta la llegada a la entrada de la ERM.

Las fórmulas que dan las pérdidas de carga y que utilizaremos generalmente para el manejo de los gases usuales varían con la presión del gas en cuestión, son debidas a RENOARD y son válidas si se cumplen las condiciones siguientes:

1° El cociente Q/D sea menor de 150, siendo Q el caudal transportado en m^3/h (a 15°C y presión atmosférica) y D el diámetro interior real de la tubería en mm.

2° El llamado número de Reynolds dado por: $R = T \cdot (Q/D)$, en donde T para el gas metano y el gas natural es 22300, sea igual o inferior a $2 \cdot 10^6$.

Para presiones medias y altas (de 0,05 a más de 4 bar) la fórmula de Renouard a aplicar es:

$$P_A^2 - P_B^2 = 48600 \cdot d_s \cdot L \cdot \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}}$$

donde:

$P_A - P_B$: presiones absolutas (la relativa o de manómetro más 1 bar de la atmosférica, 1,033 bar para ser más exactos) en bar, en el origen y el extremo, respectivamente, del tramo de tubería cuya pérdida de carga queremos hallar.

d_s : densidad ficticia o aparente que es un valor que depende de la densidad relativa (aire = 1) del gas que se trate y de la viscosidad y compresibilidad del mismo. El valor de d_s para el gas natural oscilará entre 0,54 a 0,61. Para mayor exactitud:

$$d_s = d \cdot \left(\frac{v}{0,16} \right)^{0,04} \cdot Z \cdot \frac{T}{288} \cdot \left(\frac{0,85}{E} \right)^{1,96}$$

en la que:

d : densidad relativa del gas (aire = 1).

v : viscosidad cinemática (cociente de la viscosidad absoluta y la masa específica) del mismo en Stokes (unidad de viscosidad dada en cm^2/s).

Z : factor de compresibilidad medio que es un valor sin dimensiones que hay que tener en cuenta en el caso de utilizar gas a presiones muy elevadas como puede ser el gas natural como puede ser el gas natural y cuyo valor se deduce de la expresión:

$$Z = 1 - \frac{P}{500}$$

siendo P la presión absoluta en bar, con lo que un tramo de tubería entre dos puntos A y B en los que las presiones absolutas son P_A y P_B el valor medio sería:

$$Z_m = 1 - \frac{P_m}{500}$$

en donde dicha presión media P_m sería, con bastante aproximación:

$$P_m = \frac{P_A + P_B}{2}$$

y más exactamente:

$$P_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_A^3 - P_B^3}{P_A^2 - P_B^2}$$

T: temperatura absoluta (° K).

E: factor de rugosidad o coeficiente de rendimiento de valor: 0,8 a 0,95.

L: longitud del tramo en km

Q: caudal en m³/h (medido a 15° C y 760 mmHg).

D: diámetro real, en mm, de la conducción.

1.4.2.2. Cálculo por ordenador

Para redes complejas se trabaja por computadora debido a que el cálculo puede ser engorroso y complicado. Para ello se utiliza el método de iteración de HARDY CROSS calculando la pérdida de carga por la ley de Prandtl-Colebrook:

$$dP = J \cdot L = \frac{j \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D} \cdot L$$

con:

dP: pérdida de carga o presión total

J: pérdida de carga lineal o por unidad de longitud

L: longitud del tramo

V: velocidad

D: diámetro

j: coeficiente obtenido de:

$$\frac{1}{\sqrt{j}} = -2 \cdot \log \left(\frac{K}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{j}} \right)$$

siendo Re = número de Reynolds de valor:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

y

V: velocidad

D: diámetro

ν : viscosidad cinemática

1.5. DIMENSIONADO GENERAL DE LA PLANTA

1.5.1. Datos previos

- Se supone un consumo uniforme máximo de 4000 Nm³/h cuando las instalaciones estén a su pleno rendimiento.
- Se ha considerado un tiempo de funcionamiento diario de 12 horas.

- 1 cisterna de GNL contiene 40 m³ de GNL.
- 1 descarga de cisterna de GNL es de 38 m³ de GNL equivalente a 21000 Nm³ de GN.
- 1 m³ de GNL equivale a 550 Nm³ de GN.
- 1 Nm³ de GN equivale a 10 termias.

1.5.2. Capacidad Real de Almacenamiento (CRA)

$$CRA = 0,95 \cdot CNA = 0,95 \cdot 260 = 247 \text{ m}^3 \text{ útiles}$$

siendo CNA la Capacidad Nominal de Almacenamiento

1.5.3. Consumo Máximo Diario (CMD) de GNL

$$CMD(GNL) = \frac{CMD(GN)}{550} = 12 \cdot \frac{4000}{550} = 87 \text{ m}^3 \text{ GNL en un día}$$

1.5.4. Días de Reserva Estratégica (DRE)

$$DRE = \frac{CRA}{CMD} = \frac{247}{87} = 2,84 \text{ días}$$

1.5.5. Frecuencia Punta (FP) de descarga de cisternas

$$FP = \frac{CMD}{38} = \frac{87}{38} = 2,29 \text{ cisternas/día}$$

1.6. POTENCIA CALORÍFICA

La instalación se preverá para una vaporización del 100 % del caudal de emisión partiendo de GNL almacenado en tanques.

1.6.1. Flujo de GNL

Cogiendo como valor aproximado de $0,78 \text{ kg/Nm}^3$ la masa específica (m_0) de GN en condiciones normales, el flujo será:

$$W = 4000 \cdot 0,78 = 3120 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

1.6.2. Aporte calorífico

Datos previos:

- Calor específico medio de $0,5 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
- Calor de vaporización de 122 kcal/kg
- Rendimiento global afectado por pérdidas en la instalación es el 88 %
- Necesidad de calentamiento del GNL desde -162°C a 15°C
- Flujo del GNL es 3120 kg/h

$$\left(\frac{q}{9} \right) = (W \cdot C_e \cdot \Delta t + W \lambda) \eta$$

$$\left(\frac{q}{9} \right) = [3120 \cdot 0,5 \cdot (15 + 162) + 3120 \cdot 122] \frac{100}{88} = 746300 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

1.7. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

De acuerdo con el apartado 5.4 de la ITC MIE AP-15, se instalarán extintores de polvo seco, sobre carros portátiles en cantidad de 10 kg por cada 1 kg de GNL, equivalente a:

$$M = V \cdot \rho \cdot 10$$

siendo:

M: la masa de polvo de extinción

V: El volumen de GNL de los 2 tanques

ρ : la densidad del GNL

$$M = 260 \cdot 0,5 \cdot 10 = 1300 \text{ kg}$$

Entonces para cada tanque le corresponderán 650 kg de polvo seco que se repartirán en 6 carros de 100 kg más 1 carro de 50 kg para cada tanque, además de 4 carros de 100 kg suplementarios en la zona de Regasificación.

Independientemente de los extintores se instalará un sistema de irrigación de agua sobre cada tanque con el exclusivo objeto de actuar como refrigeración en case de derrame y/o incendio en alguno de los restantes, ya que no es recomendable el empleo de agua sobre un posible derrame de GNL.