

# Cálculo del Tiempo de Venteo de Gas de un Gasoducto

## Blowdown Time Calculation For A Gas Pipeline

**Manuel Angulo Bustillo**

Ingeniero Consultor Independiente  
manuel.angulo@ezpipecalc.com

**RESUMEN:** Durante los procesos de puesta en servicio o por trabajos de mantenimiento de gasoductos, es necesario desocupar la tubería del gas contenido en ella, tomando especial importancia el cálculo del tiempo que demora esta operación de venteo, para la planeación de dicha tarea y las que se suceden posteriormente.

A través de las teorías de la mecánica de fluidos, se han establecido ecuaciones de flujo que reflejan diferentes fenómenos o comportamientos de los fluidos a velocidades sónicas y subsónicas que representan de manera aceptable ese comportamiento para los gases ideales, con los ajustes pertinentes para los gases reales. Estas ecuaciones de flujo son el punto de partida para las formulaciones usadas en la medición del gas que pasa a través de medidores de caudal por inferencia de pérdida de presión. Del mismo modo, algunas normas las aplican para cuantificar la magnitud de la energía liberada por la salida del gas por un hueco en una tubería presionada o durante su ruptura total.

La cuantificación de la masa de gas contenida en un recipiente o en un gasoducto presionado es fácilmente determinable con una altísima certidumbre mediante las correcciones volumétricas a gas real a partir de su presión, temperatura y peso molecular. De otra parte, el flujo instantáneo saliendo a la atmósfera se puede determinar con las variables anteriores agregando la relación de calores específicos.

Conociendo la masa de gas por desalojar y el flujo instantáneo, puede establecerse una ecuación lo más sencilla posible con la que se pueda calcular el tiempo de desalojo desde una presión inicial hasta la presión atmosférica.

**Palabras clave:** *Tiempo de venteo, Venteo accidental, Gasoductos, Flujo crítico, Venteo atmosférico*

**ABSTRACT:** During the gas pipeline commissioning or maintenance work, it is necessary to empty the gas contained in a gas pipeline, taking into special consideration the blowdown time estimation that this task takes for planning it and those occurring subsequently.

Take into account the theories of fluid mechanics, flow equations have been established to reflect different phenomena or fluid behaviors in sonic and subsonic velocities which represent acceptably this behavior for ideal gases, with the required adjustments for real gases. These flow equations are the starting point for the formulations used in the gas measurement that passes through flow meters by inference of pressure loss, similarly, some standards apply them to quantify the magnitude of the released energy by gas outlet through a hole in the pressurized pipe or during the total rupture.

Gas mass quantification contained in a vessel or in a pressured gas pipeline is easily determinable with a very high certainty by volumetric corrections on real gas based on pressure, temperature, molecular weight. On the other hand, the instantaneous flow coming out to the atmosphere can be determined with the mentioned variables adding the specific heats ratio.

Knowing the mass of gas for emptying and the instantaneous flow, an equation can be established as simple as possible to calculate the blowdown time from an initial pressure up to atmospheric pressure.

**Keywords:** *Blowdown time, Accidental Blowdown, Gas pipeline, Critical Flow, Blowdown.*



## 1 INTRODUCCIÓN

El cálculo del tiempo de venteo de un recipiente presionado, como un gasoducto, al que se le desea desalojar el gas para una actividad de mantenimiento que lo requiera o se le desea desocupar el gas inerte de la prueba de presión antes de su puesta en servicio, se ha hecho a partir de ecuaciones, algunas simples y otras más complejas, pero es muy común que el usuario no esté convencido de su efectividad si desconoce el origen de dicha fórmula.

En 1984, John L. Crammer Jr. [1], publicó una ecuación para el cálculo del tiempo de venteo bastante práctica y simple de usar:

$$t = \frac{0.0588 P_i^{\frac{1}{3}} G^{\frac{1}{2}} D^2 L F_c}{d^2 Z} \quad (1)$$

En 1988 [2] Weiss, Botros y Jungowski publicaron una ecuación un poco más compleja en su aplicación, por la cantidad de variables involucradas.

$$t = (t_c + t_s) * \tau_v * C_f \quad (2)$$

$$t_c = \ln\left(\frac{P_i}{P_a}\right) - \left(\frac{k}{k-1}\right) * \ln\left(\frac{k+1}{2}\right) \quad (3)$$

El valor de "t<sub>s</sub>" se obtiene de la Tabla 1 y es dependiente de la relación de calores específicos, "k" (C<sub>p</sub>/C<sub>v</sub>).

Tabla 1. >>

k (C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub> )	t <sub>s</sub>
1.20	0.7371
1.25	0.7605
1.30	0.7833
1.35	0.8058
1.40	0.8278

$$\tau_v = \frac{V * \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{c * A_{th} * C_d} \quad (4)$$

$$C = \sqrt{\frac{Z * k * R * T}{M}} \quad (5)$$

$$C_f = a_1 + a_2 \log_{10}\left(\frac{f * L}{D}\right) + a_3 \left[\log_{10}\left(\frac{f * L}{D}\right)\right]^2 + a_4 \left[\log_{10}\left(\frac{f * L}{D}\right)\right]^3 \quad (6)$$

$$a_1 = 1.0319 - 5.2735\left(\frac{1}{A_r}\right) + 25.680\left(\frac{1}{A_r}\right)^2 - 38.409\left(\frac{1}{A_r}\right)^3 \quad (7)$$

$$a_2 = -0.26994 + 17.304\left(\frac{1}{A_r}\right) - 86.415\left(\frac{1}{A_r}\right)^2 + 144.77\left(\frac{1}{A_r}\right)^3 \quad (8)$$

$$a_3 = 0.24175 - 12.637\left(\frac{1}{A_r}\right) + 56.772\left(\frac{1}{A_r}\right)^2 - 88.351\left(\frac{1}{A_r}\right)^3 \quad (9)$$

$$a_4 = -0.054856 + 2.6258\left(\frac{1}{A_r}\right) - 8.9593\left(\frac{1}{A_r}\right)^2 + 12.139\left(\frac{1}{A_r}\right)^3 \quad (10)$$

Los coeficientes "a<sub>1</sub>", "a<sub>2</sub>", "a<sub>3</sub>" y "a<sub>4</sub>" son válidos para valores de "A<sub>r</sub>" mayores de 3 y menores de 30.

$$A_r = \frac{A_p}{A_{th} * C_d} \quad (11)$$

t, Tiempo de venteo en minutos, minutos para (1) y segundos para (2)

P<sub>i</sub>, Presión inicial, psia para (1) y kPa abs para (2)

G, Gravedad específica, aire=1

D, Diámetro de la tubería del gasoducto, pulgadas para (1) y m para (2)

L, longitud, millas para (1) y m para (2)

d, diámetro interno del venteo, pulgadas para (1) y m para (2)

Z, Compresibilidad

F<sub>c</sub>, Factor de choque, entre 1.0 y 3.2, para (1)

t<sub>c</sub>, Tiempo en régimen sónico, sin dimensiones

t<sub>s</sub>, Tiempo en régimen subsónico, sin dimensiones

P<sub>a</sub>, Presión atmosférica, kPa abs

k, Relación de calores específicos, Cp/Cv

τ<sub>v</sub>, Constante de tiempo, s

V, Volumen interior de la tubería, m<sup>3</sup>

c, Velocidad del sonido en el gas

T, Temperatura absoluta, K  
 R, Constante universal de los gases (8314 J/kmol-K)  
 M, peso molecular del gas  
 C<sub>r</sub>, Factor de corrección  
 F, Factor de fricción de Darcy  
 A<sub>r</sub>, relación área de tubería de venteo al área efectiva de descarga  
 A<sub>p</sub>, Área de la sección de la tubería del gasoducto  
 A<sub>th</sub>, Área de la sección de la tubería del venteo  
 C<sub>d</sub>, Coeficiente de descarga

Actualmente, la publicación Gas Pipeline Hydraulics de E. Shashi Menon [3] recomienda el uso de la ecuación publicada por Crammer, pero sin la corrección por compresibilidad.

Sitios de empresas especializadas como Pipe-Eng [4] pusieron a disposición del público desde el 2019 en su sitio web varias herramientas, una de las cuales es para el cálculo del tiempo de venteo, utilizando la misma fórmula publicada por John L. Crammer Jr. [1].

En este trabajo se propone una fórmula sencilla derivada matemáticamente de las fórmulas para flujo sónico y para flujo subsónico, a partir de variables que permitan usarla para diferentes gases, como el gas natural, el nitrógeno, el aire, estos dos últimos comúnmente usados en las pruebas de presión previas a la puesta en servicio del sistema y que mayoritariamente se desalojan desde la presión a la que se hizo la prueba.

El propósito es mostrar una ecuación del cálculo del tiempo a partir de datos fácilmente conocidos y que se pueda hacer mediante una hoja electrónica o con una calculadora con funciones de potencia y logaritmos.

## 2 METODOLOGÍA

A partir de ecuaciones conocidas para la cuantificación de la masa de gas real y del flujo másico a través de una restricción antes de la salida a la atmósfera, establecer una relación matemática que pueda ser resuelta en niveles prácticos y ágiles, validándolos con un modelo computacional, igualmente elaborado a partir de dichas ecuaciones, discretizando el cálculo en periodos de tiempo lo más cortos posible para simular aceptablemente de esta manera un fenómeno de flujo y presión variables en el tiempo con suficiente grado de confianza.

La ecuación del cálculo de la masa de un gas almacenado en un volumen geométrico definido, como una tubería o un recipiente a presión, se obtiene de la expresión general: masa = volumen x densidad.

La densidad de un gas real almacenado se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{PM}{ZRT} \quad (12)$$

De modo que la masa contenida se puede expresar:

$$m = V \frac{PM}{ZRT} \quad (13)$$

Donde:

V = volumen geométrico que contiene el gas

P = presión absoluta a la que está el gas contenido

T = temperatura absoluta del gas contenido

M = peso molecular del gas

Z = compresibilidad del gas a las condiciones de almacenamiento

R = constante universal de los gases

El flujo másico instantáneo en una boquilla o

salida para flujo isoentrópico, entropía constante, se deduce de la expresión:

$$W = C_d A P_1 \sqrt{\left(\frac{2gM}{ZTR}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[ \left(\frac{P_2}{P_a}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_a}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (14)$$

Donde:

$C_d$  = coeficiente de descarga

$A$  = área de la sección restringida por donde se produce la descarga

$P_1$  = presión en la garganta del punto de venteo

$P_a$  = presión atmosférica

$g$  = atracción de la gravedad

$k = C_p/C_v$ , relación de calores específicos del gas

La ecuación (14) es usada en el GRI-00/0189 [5] para establecer el flujo instantáneo durante la rotura de una tubería presionada. También el ASME B31.8S Managing System Integrity of Gas Pipelines [6], la usa como punto de partida para definir la fórmula para cuantificar la liberación instantánea de calor de una salida de gas natural a la atmósfera por la rotura de una tubería. Lo anterior indica que se puede aceptar para modelar flujo de gases reales con el correspondiente ajuste por compresibilidad con el factor "Z".

En las ecuaciones (13) y (14), la variable "Z" llamada factor de compresibilidad, es una propiedad termodinámica que permite aproximar adecuadamente el comportamiento de los gases ideales a los gases reales. Los resultados del modelo computacional servirán para establecer los ajustes de "Z" en la fórmula resultante.

### 3 CÁLCULO DEL TIEMPO DE VENDEO

Evacuar hasta la presión atmosférica implica que una parte del flujo será en régimen sónico y

otra en régimen subsónico, el tiempo total será la suma de los tiempos calculados. Mostraremos la ecuación de cada régimen.

Podemos expresar, a partir de la ecuación (13), un diferencial de masa evacuada con la siguiente expresión:

$$dm = V \frac{M}{ZRT} dP \quad (15)$$

También podemos expresar el diferencial del tiempo de evacuación de ese diferencial de masa, mediante una división de la masa por el flujo másico, así:

$$dt_c = \frac{dm}{w_c} \quad \text{para régimen sónico} \quad (16)$$

y

$$dt_s = \frac{dm}{w_s} \quad \text{para régimen subsónico} \quad (17)$$

El punto donde el flujo sónico pasa a subsónico se conoce como relación de presión crítica,  $R_c$ , y se expresa con la siguiente ecuación, válida para gases ideales con calores específicos constantes, pero comúnmente aceptada en la simulación de procesos reales como el que nos ocupa:

$$R_c = \frac{P_2}{P_1} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{k}{k-1}\right)} \quad (18)$$

#### 3.1 TIEMPO EN FLUJO SÓNICO

En el régimen de flujo sónico, en la garganta del venteo la velocidad del gas es la velocidad del sonido en dicho medio y el caudal dependerá sólo de la presión en la garganta.

Considerando el límite indicado en la ecuación (18) y reemplazando en la ecuación (14), el flujo másico en régimen crítico se establece como:

$$W_c = C_d A P_1 \sqrt{\left(\frac{g M k}{Z T R}\right) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (19)$$

Desarrollando la formulación de un diferencial de tiempo para el régimen sónico a partir de las ecuaciones (15), (16) y (19):

$$dt_c = \frac{V \frac{M}{Z R T}}{C_d A P \sqrt{\left(\frac{g M k}{Z T R}\right) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} dP \quad (20)$$

o

$$dt_c = \frac{V}{C_d A \sqrt{Z T R}} \sqrt{\left(\frac{M}{g k}\right) \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{dP}{P}} \quad (21)$$

El término " $\sqrt{Z T}$ " es una función de "P" lo que le agrega un alto grado de complejidad a la ecuación (21) para resolverla mediante una integración. Sin embargo, el resultado de este término cambia muy poco en cualquier rango de presiones, por lo tanto, podemos asumirlo como una constante para simplificar la solución de la serie mediante una integración entre la presión inicial ( $P_1$ ) y la presión final ( $P_2$ ), teniendo en cuenta que la presión final ( $P_2$ ) debe cumplir la limitación impuesta en la ecuación (18) para régimen crítico:

$$t_c = \frac{V}{C_d A \sqrt{Z T R}} \sqrt{\left(\frac{M}{g k}\right) \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} \quad (22)$$

Resultando la siguiente ecuación para el tiempo de venteo en régimen sónico:

$$t_c = \frac{V}{C_d A \sqrt{R} \sqrt{T_{cr}} Z_{cr}} \sqrt{\left(\frac{M}{g k}\right) \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (23)$$

El valor de " $\sqrt{(T_{cr} Z_{cr})}$ " representativo se establecerá con los resultados obtenidos en un modelo computacional por prueba y error, a partir de la presión y temperatura iniciales, y su compresibilidad correspondiente.

### 3.2 TIEMPO EN FLUJO SUBSÓNICO

En el régimen de flujo subsónico, en la garganta del venteo, la velocidad del gas es menor que la velocidad del sonido en dicho medio, y el caudal que pasa por la garganta dependerá de la presión del recipiente (P) y la presión atmosférica ( $P_a$ ):

$$W_s = C_d A P \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \quad (24)$$

Multiplicando y dividiendo por ( $P_a/P$ ), la ecuación se transforma en la siguiente:

$$W = C_d A P \frac{P_a}{P} \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \quad (25)$$

Cancelando y simplificando términos:

$$W = C_d A P_a \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{2-\frac{2}{k}} - \left(\frac{P}{P_a}\right)^{2-\frac{k+1}{k}}\right]} \quad (26)$$

o

$$W = C_d A P_a \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{2(k-1)}{k}} - \left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad (27)$$

o

$$W = C_d A P_a \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} \quad (28)$$

o

$$W = C_d A \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} \sqrt{P_a} \sqrt{P_a} \quad (29)$$

o

$$W = C_d A \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} \sqrt{P_a} \sqrt{P - P_a} \sqrt{\frac{P_a}{P - P_a}} \quad (30)$$

o

$$W = C_d A \sqrt{\left(\frac{2g M}{Z T R}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\frac{\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{P - P_a}{P_a}}\right]} \sqrt{P_a} \sqrt{P - P_a} \quad (31)$$

0

$$W = C_d A \sqrt{\left(\frac{2gM}{ZTR}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right) \left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} \sqrt{P_a} \sqrt{P - P_a} \quad (32)$$

Para facilitar el tratamiento mediante la función integral, queda la ecuación de la siguiente manera:

$$W = \frac{C_d A}{F} \sqrt{\left(\frac{2gM}{ZTR}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right)} \sqrt{P_a} \sqrt{P - P_a} \quad (33)$$

Siendo el valor de F:

$$F = \sqrt{\frac{\frac{P}{P_a} - 1}{\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}} \quad (34)$$

Desarrollemos la formulación de un diferencial de tiempo para el régimen subsónico a partir de las ecuaciones (15), (17) y (33):

$$dt_s = \frac{\frac{VM}{ZRT} dP}{\frac{C_d A}{F} \sqrt{\left(\frac{2gM}{ZTR}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right)} \sqrt{P_a} \sqrt{P - P_a}} \quad (35)$$

0

$$dt_s = \frac{VF\sqrt{M}}{C_d A \sqrt{2gZRT} \sqrt{\left(\frac{k}{k-1}\right)} \sqrt{P_a} \sqrt{P - P_a}} dP \quad (36)$$

$$t_s = \frac{VF\sqrt{M}}{C_d A \sqrt{2gZRT} \sqrt{\left(\frac{k}{k-1}\right)} \sqrt{P_a}} \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{\sqrt{P - P_a}} dP \quad (37)$$

Resolviendo la integral,

$$t_s = \frac{VF\sqrt{M}}{C_d A \sqrt{2gZRT} \sqrt{\left(\frac{k}{k-1}\right)} \sqrt{P_a}} 2 \left( \sqrt{P_1 - P_a} - \sqrt{P_2 - P_a} \right) \quad (38)$$

Simplificando,

$$t_s = \frac{VF\sqrt{Z}\sqrt{M}}{C_d A \sqrt{gR} \sqrt{T_{su} Z_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \left( \sqrt{\frac{P_1}{P_a} - 1} - \sqrt{\frac{P_2}{P_a} - 1} \right) \quad (39)$$

El valor de " $\sqrt{(T_{su} Z_{su})}$ " más representativo se establecerá con los resultados obtenidos en un modelo computacional por prueba y error, a partir de la presión y temperatura iniciales, y su compresibilidad correspondiente para ajustarlo a gases reales.

El cálculo de "F" se puede hacer usando P promedio entre  $P_1$  y  $P_2$ , quedando F de la siguiente manera:

$$F = \sqrt{\frac{\frac{P_{avg}}{P_a} - 1}{\left(\frac{P_{avg}}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P_{avg}}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}} \quad (40)$$

Siendo  $P_1$  y  $P_2$  la presión al inicio del venteo subsónico y la presión al momento de parar el venteo, respectivamente, en unidades de presión absolutas, con la restricción de la ecuación (18) para flujo subsónico.

### 3.3 TIEMPO TOTAL DE EVACUACIÓN

El tiempo total desde una presión que produzca un régimen crítico hasta la presión atmosférica se puede obtener al sumar los tiempos calculados para los dos regímenes,  $t_c + t_s$ , en las ecuaciones (23) y (39), además tomando Z en la ecuación (39) con valor 1.00 sin agregar ningún error apreciable.

Siendo P la presión inicial, la presión  $P_2$  corresponde al punto donde cambia el flujo de sónico a subsónico, quedando el tiempo de venteo iniciado en flujo crítico:

$$t_c = \frac{V}{C_d A} \sqrt{\left(\frac{M}{gk}\right) \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{1}{\sqrt{Z_{cr} T_{cr} R}}} \ln\left(\frac{PR_c}{P_a}\right) \quad (41)$$

y

$$t_s = \frac{VF\sqrt{2}\sqrt{M}}{C_d A \sqrt{gRZ_{su}T_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \left(\sqrt{\frac{1}{R_c}} - 1\right) \quad (42)$$

La ecuación (42) puede transformarse mediante agrupamientos y simplificaciones:

$$t_s = \frac{VF}{C_d A} \sqrt{\frac{2M}{gR}} \sqrt{\frac{1}{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \left(\sqrt{\frac{1}{R_c}} - 1\right) \quad (43)$$

o

$$t_s = \frac{VF}{C_d A} \sqrt{\frac{2M}{gR}} \sqrt{\frac{1}{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \left(\sqrt{\frac{1}{R_c}} - 1\right) \quad (44)$$

o

$$t_s = \frac{VF}{C_d A} \sqrt{\frac{2M}{gR}} \sqrt{\frac{1}{R_c}} \sqrt{\frac{1}{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k-1}{k}\right)} (\sqrt{1 - R_c}) \quad (45)$$

o

$$t_s = \frac{VF}{C_d A} \sqrt{\frac{2M}{gR}} \sqrt{\frac{1}{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\left(\frac{k}{k-1}\right)}} \sqrt{\left(\frac{k-1}{k}\right)} (\sqrt{1 - R_c}) \quad (46)$$

o

$$t_s = \frac{VF}{C_d A} \sqrt{\frac{2M}{gkR}} \sqrt{\frac{1}{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\left(\frac{k}{k-1}\right)}} \sqrt{(k-1)(1 - R_c)} \quad (47)$$

o

$$t_s = \frac{V}{C_d A} \sqrt{\frac{M}{gkR}} \frac{2F}{\sqrt{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\left(\frac{k}{k-1}\right)} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)}} \sqrt{(k-1)(1 - R_c)} \quad (48)$$

o

$$t_s = \frac{V}{C_d A} \sqrt{\left(\frac{M}{gkR}\right) \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\left(\frac{k+1}{k-1}\right)}} \frac{2F}{\sqrt{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{(k-1) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} (1 - R_c)} \quad (49)$$

Si sumamos las ecuaciones (41) y (49), nos queda:

$$t = \frac{V}{C_d A} \sqrt{\frac{M}{gkR} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \left[ \frac{1}{\sqrt{Z_c T_c}} \ln\left(\frac{P R_c}{P_{atm}}\right) + \frac{2F}{\sqrt{Z_{su}T_{su}}} \sqrt{(k-1) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} (1 - R_c)} \right] \quad (50)$$

Si expresamos el volumen V y el área A en función de los diámetros de las tuberías, y para simplificar la solución del problema asumimos que el impacto del efecto Joule-Thomson está considerado en la compresibilidad Z. Para diferentes valores de "k", las ecuaciones quedarían así:

$$t = \frac{D^2 L}{C_d d^2} \sqrt{\frac{M}{gkRT} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \left[ \frac{1}{\sqrt{Z_{cr}}} \ln\left(\frac{P R_c}{P_a}\right) + \frac{2F}{\sqrt{Z_{su}}} \sqrt{(k-1) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} (1 - R_c)} \right] \quad (51)$$

$$t = \frac{D^2 L}{C_d d^2} 1.5111 \sqrt{\frac{M}{gRT}} \left[ \frac{1}{\sqrt{Z_{cr}}} \ln\left(\frac{0.55512P}{P_a}\right) + \frac{0.8976}{\sqrt{Z_{su}}} \right] \text{ para } k=1.27 \quad (52)$$

$$t = \frac{D^2 L}{C_d d^2} 1.5069 \sqrt{\frac{M}{gRT}} \left[ \frac{1}{\sqrt{Z_{cr}}} \ln\left(\frac{0.5493P}{P_a}\right) + \frac{0.9013}{\sqrt{Z_{su}}} \right] \text{ para } k=1.28 \quad (53)$$

$$t = \frac{D^2 L}{C_d d^2} 1.5027 \sqrt{\frac{M}{gRT}} \left[ \frac{1}{\sqrt{Z_{cr}}} \ln\left(\frac{0.5475P}{P_a}\right) + \frac{0.9049}{\sqrt{Z_{su}}} \right] \text{ para } k=1.29 \quad (54)$$

$$t = \frac{D^2 L}{C_d d^2} 1.4987 \sqrt{\frac{M}{gRT}} \left[ \frac{1}{\sqrt{Z_{cr}}} \ln\left(\frac{0.5457P}{P_a}\right) + \frac{0.9085}{\sqrt{Z_{su}}} \right] \text{ para } k=1.30 \quad (55)$$

$$t = \frac{D^2 L}{C_d d^2} 1.4604 \sqrt{\frac{M}{gRT}} \left[ \frac{1}{\sqrt{Z_{cr}}} \ln\left(\frac{0.5283P}{P_a}\right) + \frac{0.9434}{\sqrt{Z_{su}}} \right] \text{ para } k=1.40 \quad (56)$$

Teniendo en cuenta que el valor de k más común para gas natural es 1.28, además, para g 32.2 pie/s<sup>2</sup>, R 1544.8 pie-lb/lbmol-°R, L en pies, T<sub>f</sub>

en °R, las unidades de D y d son las mismas, así como las de P y  $P_{atm}$ , resulta la siguiente ecuación general para el cálculo del tiempo en segundos, para el gas natural:

$$t = 0.03636171 \frac{D^2 L}{C_d a^2 Z^a} \sqrt{\frac{G}{T}} \left[ \ln\left(\frac{0.5493 P}{P_a}\right) + e^b \right] \quad (57)$$

o

$$t = 0.03636171 \frac{D^2 L}{C_d a^2 Z^a} \sqrt{\frac{G}{T}} \left[ \ln\left(\frac{0.5493 b P}{P_a}\right) \right] \quad (58)$$

Utilizando un modelo computacional con el que se discreticen para periodos muy cortos de tiempo las ecuaciones (41) y (58), además se consideren varios valores del gradiente de pérdida de calor por el efecto Joule-Thomson, se obtendrían unos resultados que servirían para determinar los valores de a y 0.5493b. Es decir, en el modelo computacional cada diferencial tendrá una temperatura diferente si el gradiente de pérdida de calor es mayor que cero, ajustándose al proceso real de venteo.

El valor obtenido para 0.5493b es 1.20, y para el de a se puede tomar entre 0.35 y 1.55, en una variación lineal en donde 1.55 corresponde a un descenso de temperatura de 1 °F por cada atmósfera de caída de presión [7] y 0.35 si no se considera el efecto Joule-Thomson. El valor promedio de 0.95 se puede tomar como altamente representativo y corresponde a un descenso de temperatura de 0.5 °F por cada atmósfera de caída de presión.

Siguiendo el mismo procedimiento, se deriva la ecuación para el cálculo del tiempo en segundos, para aire o nitrógeno, con  $k = 1.40$ :

$$t = 0.0352407 \frac{D^2 L}{C_d a^2 Z^a} \sqrt{\frac{G}{T}} \left[ \ln\left(\frac{0.5283 P}{P_a}\right) + e^b \right] \quad (59)$$

o

$$t = 0.0352407 \frac{D^2 L}{C_d a^2 Z^a} \sqrt{\frac{G}{T}} \left[ \ln\left(\frac{0.5283 b P}{P_a}\right) \right] \quad (60)$$

Utilizando el mismo modelo computacional y despreciando el efecto Joule-Thomson por ser relativamente mucho menos influyente que el gas natural en una expansión por restricción de la corriente, el valor obtenido para 0.5283b es 1.25 y para el de a es 1.00.

Alternativamente, si mantenemos el primer coeficiente de la ecuación (58) en la ecuación (60) se obtiene para 0.5283b es 1.20 y para el de a 0.95; esto permite tener una ecuación general que puede usarse para gas natural, aire o nitrógeno, así:

$$t = 0.03636 \frac{D^2 L}{C_d a^2 Z^{0.9}} \sqrt{\frac{G}{T}} \left[ \ln\left(\frac{1.2 P}{P_a}\right) \right], \text{seg.} \quad (61)$$

L en pies y T en °R.

o

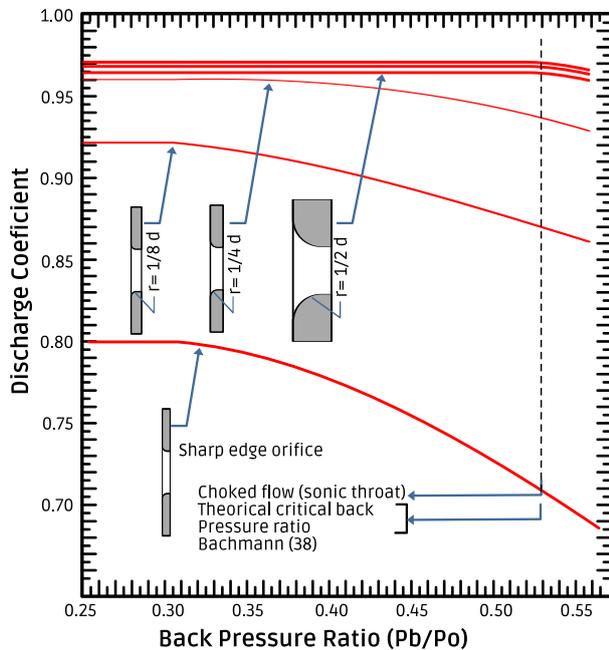
$$t = 0.0889 \frac{D^2 L}{C_d a^2 Z^{0.9}} \sqrt{\frac{G}{T}} \left[ \ln\left(\frac{1.2 P}{P_a}\right) \right], \text{seg.} \quad (62)$$

L en metros y T en K.

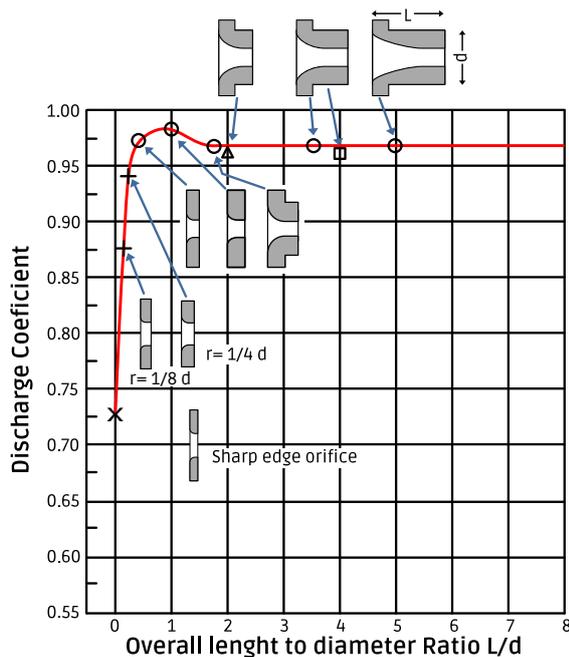
El coeficiente de descarga,  $C_d$ , debe seleccionarse teniendo en cuenta la existencia de restricciones en la línea de venteo antes de la salida del gas a la atmósfera, como reducción de áreas en válvulas, placas limitadoras de flujo, atenuadores de ruido u otros dispositivos como **raincap** o similares en el extremo de la salida.

Nótese que  $C_d$  de las ecuaciones (61) y (62) es el valor inverso de  $F_c$  de la ecuación (1), [1, 3, 4], y que para calcular Z en (1) se requiere además la temperatura. Este mismo  $C_d$  se usa en la ecuación (11) [2].

**Figura 1. >>** Variación del coeficiente de descarga en función de la relación de presión para diferentes diseños de elementos de restricción de flujo (Tomado de [8]).



**Figura 2. >>** Variaciones del valor del coeficiente de descarga medio en función de la geometría del elemento de restricción de flujo (Tomado de [8]).



En los casos de placas limitadoras de caudal en el extremo del venteo, los valores sugeridos en las Figuras 1 y 2 [8], serían de mucha utilidad para la selección del coeficiente de descarga,  $C_d$ .

#### 4 RESULTADOS

El modelo computacional resuelve el problema como una sumatoria de diferenciales a partir de las ecuaciones presentadas (21) y (36), además, y debido al descenso ininterrumpido de la presión durante el venteo, se consideró en el modelo computacional el efecto de Joule-Thomson, que es el proceso en el cual la temperatura del gas contenido en un sistema disminuye cuando la presión también disminuye de manera sostenida y rápida, manteniendo la entalpía constante.

Con los resultados del modelo computacional, se pudo establecer que las asunciones introducidas no llevan a una desviación apreciable del cálculo con las ecuaciones (57) y (58) propuestas.

Las variables de la ecuación propuesta son de fácil consecución en el proceso del sistema que se desea desocupar, excepto el coeficiente de descarga,  $C_d$ , que requiere de cierta experticia y conocimiento del responsable de usar cualquier fórmula o el mismo modelo para fijarle un adecuado valor en función de la configuración del sistema de venteo que se desea utilizar.

En las Figuras 3 y 4, a manera de comparación, se muestra el tiempo de desalojo de venteo atmosférico, calculados con el modelo computacional, con la ecuación logarítmica propuesta (58) y con la ecuación de potencia (1), [1, 3, 4], para presiones desde 10 hasta 2500 psig en un

COMPARACIÓN DE LAS ECUACIONES CON EL MODELO COMPUTACIONAL, Tf=90°F

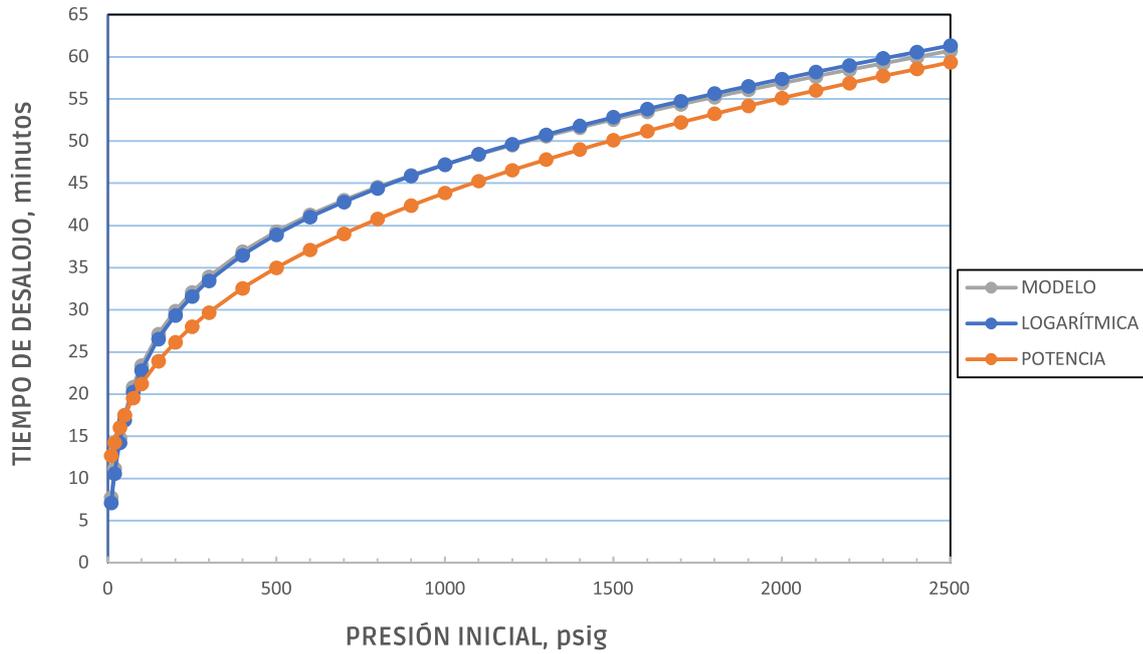


Figura 3. >> Comparación de los valores obtenidos con las ecuaciones de función logarítmica y de función de potencia con los valores obtenidos del modelo computacional con temperatura de flujo 90°F.

COMPARACIÓN DE LAS ECUACIONES CON EL MODELO COMPUTACIONAL, Tf=60°F

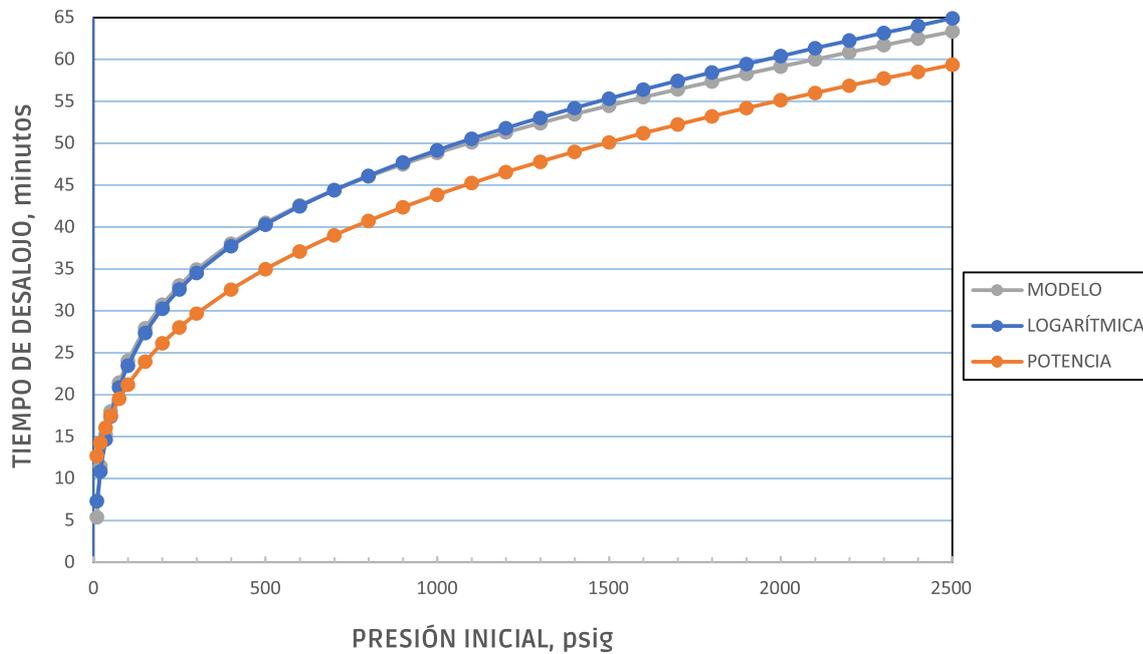


Figura 4. >> Comparación de los valores obtenidos con las ecuaciones de función logarítmica y de función de potencia con los valores obtenidos del modelo computacional con temperatura de flujo 60°F.

tramo de gasoducto, con las siguientes características:

- Longitud, 41000 pies.
- Diámetro interno del gasoducto, 12 pulgadas.
- Diámetro interno del venteo, 4.026 pulgadas.
- Presión atmosférica, 14.7 psia.
- Temperatura inicial del gas, 90 °F (Figura 3) y 60 °F (Figura 4).
- Gravedad específica del gas, 0.60
- Coeficiente de descarga, 0.72, en las ecuaciones (57) y (58), equivalente al inverso de 1.39 como factor de choque de la ecuación (1).

## 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A diferencia de la ecuación (1) comúnmente usada [1, 3, 4], la ecuación propuesta aquí incluye además la temperatura de inicio del venteo, sin que sea más compleja ni más difícil de usar, lo que matemáticamente representa de mejor manera la situación del venteo atmosférico que se desea simular.

La cantidad de gas que se pueda desalojar dependerá de la presión atmosférica en el sitio en que se haga la operación; a mayor altura sobre el nivel del mar, habrá menor presión atmosférica y mayor cantidad de gas será desalojado, teniendo en cuenta que siempre quedará un remanente de gas a presión atmosférica. Esta variable incide con mayor peso en las ecuaciones (57) y (58) que en la (1), conforme al fenómeno real.

## 6 REFERENCIAS

- [1] Crammer Jr. JL.1984. Basic Pipeline Engineering Manual, pág.152.
- [2] Weiss MH, Botros KK, Jungowski WM. 1988. Simple method predicts gas-line blowdown times. United States.
- [3] Menon ES. 2005. Gas Pipeline Hydraulics, página 242.
- [4] PipeEng, Miscellaneous, Gas Blowdown Time – AGA Equation, [www.pipeeng.com](http://www.pipeeng.com)
- [5] GRI-00/0189, A Model for Sizing High Consequence Areas Associated with Natural Gas Pipelines, Gas Research Institute.
- [6] B 31.8S Managing System Integrity of Gas Pipelines, numeral 3.2.
- [7] McAllister EW. 2005. Pipeline Rules of Thumb Handbook. VI Edición, página 508.
- [8] Ortiz Afanador JM, Velosa Chacón JF. 2011. MET&FLU, No 4-2011, Elementos para Restricción de Flujo de Gas, página 6.