

NTP 329: Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales continuas



Models de dispersion de gaz et vapeurs dans l'atmosphère: Sources ponctuelles continues
Dispersion models of gases and vapours in the atmosphere: Continuous point sources

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactores:

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

José M^a Cuscó Vidal
Ingeniero Técnico Químico

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

En la presente Nota Técnica se pretende ilustrar la aplicación de un modelo de dispersión (Pasquill-Gifford) para la estimación de las concentraciones ambientales de contaminantes producidas por una fuente puntual continua de gases no pesados.

Introducción

En el análisis de la estimación de las consecuencias de las emisiones accidentales a la atmósfera de contaminantes procedentes de actividades industriales, uno de los aspectos clave a considerar es su dispersión en el medio ambiente.

Una de las características principales que condiciona la evolución de un gas/vapor en la atmósfera es su densidad, distinguiéndose tres posibilidades:

- Gases ligeros. Densidad inferior a la del aire.
- Gases pasivos o neutros. Densidad similar a la del aire.
- Gases pesados. Densidad mayor que la del aire.

A efectos prácticos no se puede hablar, en la mayoría de los casos, de un comportamiento puro de gas ligero neutro o pesado, ya que los factores que influyen en él son múltiples y variables en el tiempo y una mezcla gas/aire puede evolucionar como un gas pesado sin serlo debido a:

- Peso molecular del gas.
- Temperatura del gas.
- Temperatura y humedad del aire ambiente.
- Presencia de gotas líquidas arrastradas en la emisión.
- Reacciones químicas en la nube, etc.

Otra característica es la duración del escape, que puede dar lugar a:

- Escapes instantáneos formando una bocanada ("puf").
- Escapes continuos sin depender del tiempo, formando un penacho ("plume").
- Escapes continuos dependiendo del tiempo.

En este documento, por razones de simplificación, se estudia el segundo tipo de escape.

La mayoría de los incidentes por escape empiezan con una descarga de un producto peligroso desde su continente normal. Estos incidentes se pueden originar por orificios o roturas de recipientes de proceso, por juntas de unión en bridas, o por válvulas y venteos de emergencia, por destacar las causas más frecuentes.

Los escapes pueden ser en forma de gas, de líquido o en fase mixta líquido-gas; nosotros trataremos únicamente el primer tipo, si bien debe señalarse que en fase líquida y mixta la aportación másica del escape es muy superior y la velocidad de evaporación determinará la cantidad aportada para la formación de la nube. De ahí la peligrosidad de escapes de gases licuados del petróleo o de cloro licuado, por citar unos ejemplos típicos.

El modelo gaussiano de fuente puntual continua que se va a tratar en este documento supone como hipótesis de partida que las concentraciones de contaminante en cualquier punto considerado viento abajo están estabilizadas y no dependen del tiempo. Este modelo describe el comportamiento de los gases/vapores de fuerza ascensional neutra, dispersados en la dirección del viento y arrastrados a la misma velocidad.

Respecto a los gases pesados una configuración típica de un escape a nivel del suelo se muestra en la figura 1.

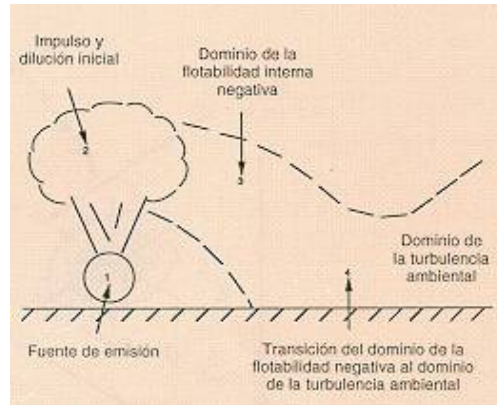


Fig. 1: Desarrollo y dispersión de una nube de gas pesado

Los gases pesados muestran una elevación inicial del penacho debido al impulso de salida, como sucede en todo escape, seguida de una cierta caída en curva por influencia de su densidad. Comparándolos con los gases neutros se ve que los gases pesados presentan en los momentos iniciales un comportamiento distinto, por lo cual se han desarrollado modelos sofisticados que no se consideran en este documento. Sin embargo, al cabo de un cierto tiempo y a medida que se diluyen en el aire, las características y el comportamiento se pueden asimilar a los de un gas neutro. Si el escape de un gas pesado es de una proporción o intensidad de descarga moderadas, se puede tratar aceptablemente con el modelo gaussiano de gas neutro que es de aplicación mucho más sencilla, especialmente si lo que queremos es estudiar lo que sucede en puntos que no sean excesivamente próximos al punto de emisión.

Descripción del modelo

El fundamento para el modelo de Pasquill-Gifford es una dispersión gaussiana en los ejes horizontal y vertical (figuras 2 y 3). La fórmula normalizada para la dispersión de una fuente puntual elevada es:

$$C = \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (1)$$

siendo,

C = Concentración en el punto x, y, z (kg/m³)

G = Intensidad de la emisión (kg/s)

H = Altura de la fuente emisora sobre el nivel del suelo más la elevación del penacho (m).

σ_y, σ_z = Coeficientes de dispersión (m).

u = Velocidad del viento (m/s).

La utilización de esta fórmula está limitada a distancias entre 100 m y 10 km y es aplicable para cortos períodos de tiempo, hasta unos diez minutos, que es el tiempo promediado o tiempo de muestreo normalizado. Para períodos de tiempo superiores a diez minutos, la concentración viento abajo de la fuente de emisión es en cierta manera inferior, debido a la alteración de la dirección del viento.

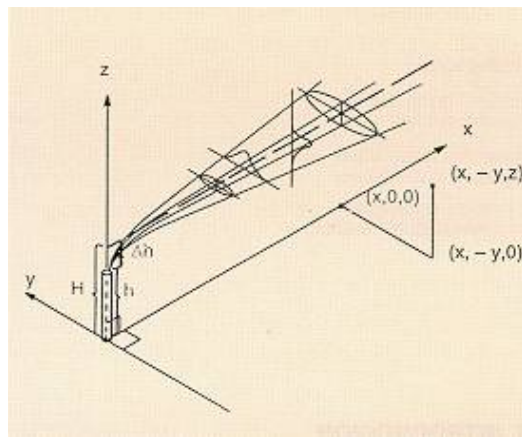


Fig. 2: Sistema de coordenadas y geometría básica de la ecuación gaussiana del penacho

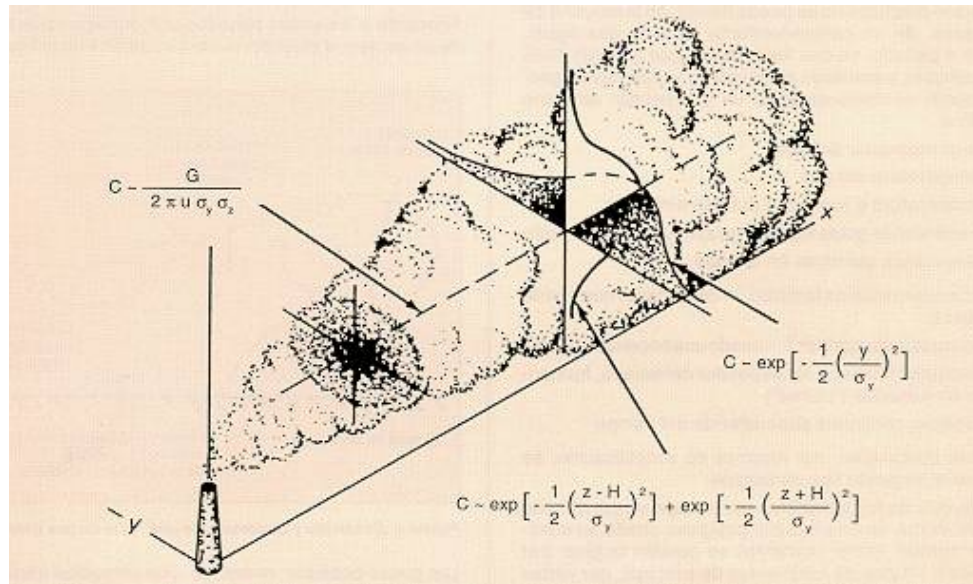


Fig. 3: Los tres términos de la ecuación gaussiana del penacho: concentración en el eje central y términos vertical y lateral

Estimación de la elevación del penacho

La elevación del penacho (δh) se define como la diferencia entre la altura de la línea central final del penacho y la altura inicial de la fuente. Esta elevación está originada por la fuerza ascensional y el impulso vertical del efluente.

La temperatura de salida del efluente en el caso de que supere en más de 50 °C la temperatura ambiental, tiene mayor influencia que el impulso vertical en la determinación de la altura que alcanzará el penacho.

Como regla general la elevación del penacho es directamente proporcional al contenido calorífico del efluente y a la velocidad de salida del mismo, e inversamente proporcional a la velocidad local del viento.

Una de las fórmulas más empleadas para el cálculo de esta elevación es la de Holland:

$$\Delta h = \frac{V_s d}{u} \left(1,5 + 2,68 \cdot 10^{-3} \cdot P \frac{T_s - T_a}{T_s} d \right) \quad (2)$$

siendo:

δh = Elevación del penacho por encima de la fuente emisora (m)

V_s = Velocidad de salida del contaminante (m/s)

d = Diámetro interior del conducto de emisión (m)

u = Velocidad del viento (m/s)

P = Presión atmosférica (mbar)

T_s = Temperatura del contaminante (K)

T_a = Temperatura ambiente atmosférica (K)

$2,68 \cdot 10^{-3}$ es una constante expresada en $\text{mbar}^{-1} \text{m}^{-1}$

Los valores de δh obtenidos con esta fórmula deben corregirse (tabla 1) multiplicando por un factor, establecido por Pasquill-Gifford-Turner, que es función de las condiciones meteorológicas, que se describen más adelante.

Tabla 1

Categorías de estabilidad (Clases)	Factor de corrección aplicado al Δh , calculado por la fórmula de Holland
A,B	1,15
C	1,10
D	1,00
E,F	0,85

Factores que influyen en la dispersión del penacho

Las condiciones meteorológicas y la duración del escape tiene una gran importancia en el alcance de la dispersión del penacho. Los factores principales son: la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica.

La estabilidad atmosférica viene definida en función del gradiente vertical de temperatura de las capas del aire.

Los datos de velocidad del viento y estabilidad atmosférica, siempre que sea posible, deben obtenerse de estaciones meteorológicas locales. Dado que no siempre es posible disponer de esta información, a través de una tabla establecida por Pasquill (Tabla 2) puede obtenerse la categoría de estabilidad atmosférica estimada según las condiciones de insolación y velocidad del viento.

Tabla 2: Condiciones de estabilidad meteorológica de Pasquill

Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura	Insolación diurna			Condiciones nocturnas	
	Fuerte	Moderada	Ligera	Finamente cubierto ó más de la mitad cubierto	Nubosidad $\leq 3/8$
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

La velocidad del viento se acostumbra a medir a 10 metros de altura. Esta velocidad, a niveles más bajos de 10 metros, se ve reducida notablemente debido a los efectos de rozamiento. Para niveles distintos de este valor, la velocidad del viento debe corregirse según la relación

$$U_z = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (3)$$

siendo:

u_z = Velocidad del viento a la altura de la fuente emisora (m/s)

u_{10} = Velocidad del viento a la altura de 10 m (m/s)

z = Altura de la fuente emisora (m)

p = Coeficiente exponencial

Los valores de p son función de la estabilidad atmosférica y la rugosidad del suelo.

En la tabla 3 se presentan tales valores.

Tabla 3: Coeficientes de corrección de la velocidad del viento

Estabilidad	Coeficiente exponencial atmosférico (p)	
	Urbano	Rural
A	0,15	0,07
B	0,15	0,07
C	0,20	0,10
D	0,25	0,15
E	0,40	0,35
F	0,60	0,55

Coeficientes de dispersión

En la expresión (1) del apartado 2, los parámetros σ_y y σ_z son las desviaciones tipo en las direcciones lateral y vertical respectivamente, que representan una medida de la dispersión del penacho en dichas direcciones. Tales parámetros son función de la distancia a la fuente emisora viento abajo y de la clase (categoría) de estabilidad atmosférica definida en el punto 4.

Estos coeficientes se suelen presentar en forma gráfica o pueden calcularse según fórmulas empíricas. Diferentes autores llegan a expresiones que difieren ligeramente.

En las figuras 4 y 5 se muestran unos gráficos ampliamente utilizados para obtener las σ_y y σ_z , obtenidos a partir de las fórmulas de Turner. Estos gráficos indican que para una determinada distancia viento abajo de la fuente de emisión, la amplitud del penacho es máxima cuando la inestabilidad atmosférica es también máxima y es mínima cuando la atmósfera es muy estable.

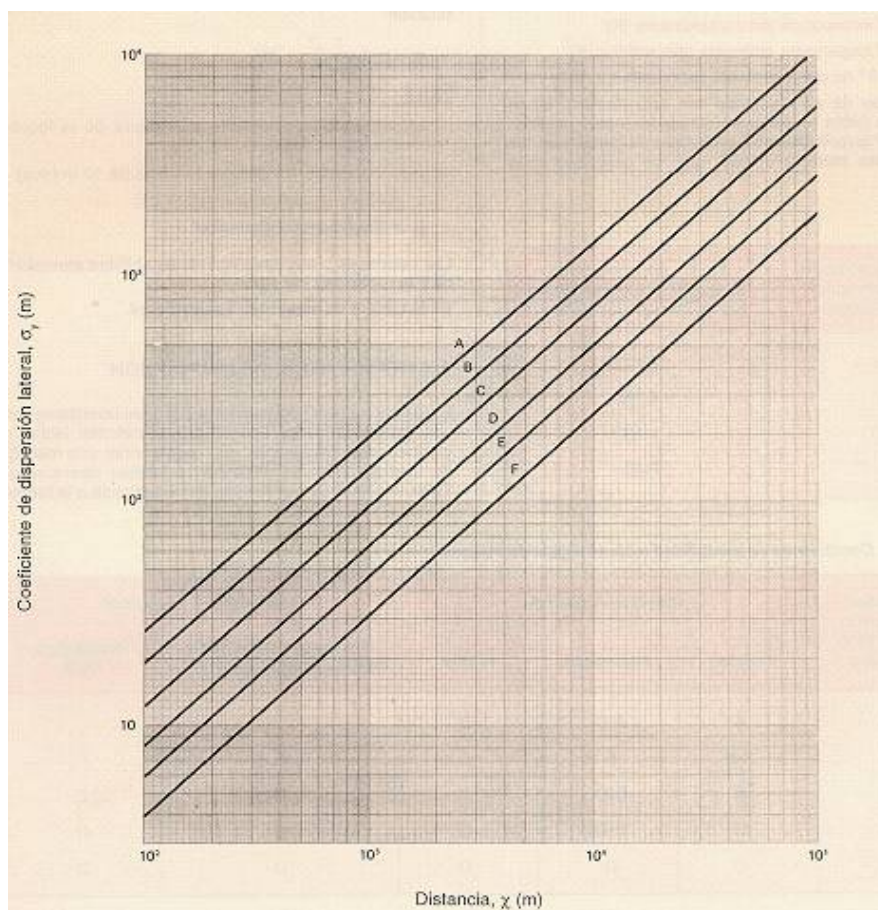


Fig. 4: Coeficiente de dispersión lateral σ_y según distancia y categoría de estabilidad atmosférica

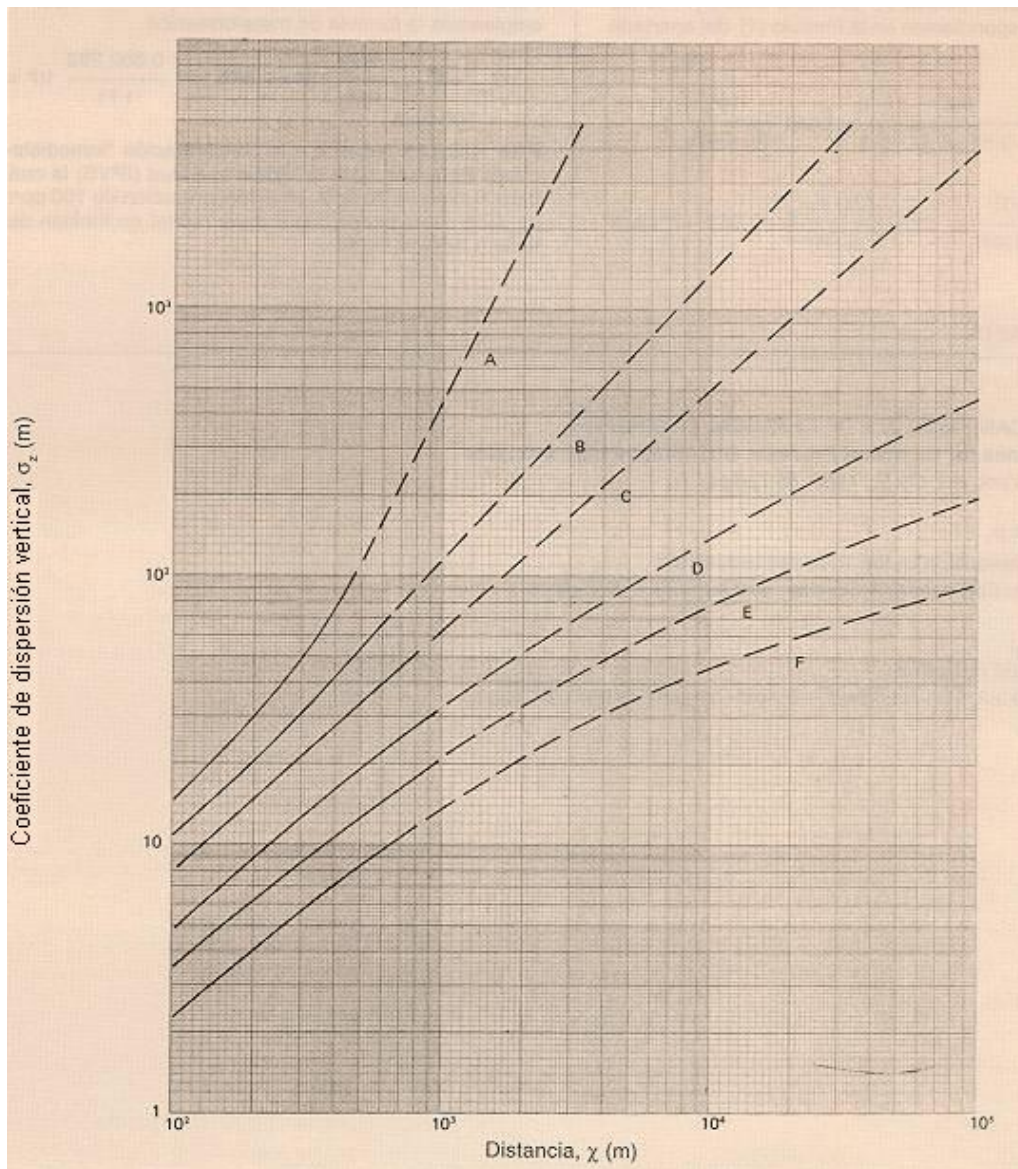


Fig. 5: Coeficiente de dispersión vertical σ_z según distancia y categoría de estabilidad atmosférica

Los valores obtenidos por estos gráficos o por las fórmulas que han dado lugar a ellos, solamente son aplicables en campo abierto y debe tenerse en cuenta que en condiciones inestables (A) y estables (F) se pueden cometer errores de varias veces en la estimación de σ_z .

Para condiciones de estabilidad intermedias entre las anteriores, la estimación de σ_z se puede esperar que como máximo, se desvíe al doble del valor estimado por los gráficos.

Resolución de un caso práctico

Calcular la concentración de cloro de un escape de 0,3 kg/s situado a 1 m sobre el suelo, que afectaría a un punto localizado a 120 m en la dirección del viento, a 10 m en dirección transversal del mismo y 2 m de altura.

Las condiciones meteorológicas corresponden a estabilidad D, velocidad del viento 5 m/s (a 10 m de altura).

Datos: Rugosidad del suelo equivalente a urbana y estabilidad meteorológica D, $p = 0,25$

- Temperatura ambiente $T_a = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (293 K)
- Presión atmosférica $P = 1\text{ atm}$ absoluta
- Peso molecular $\text{Cl}_2 M_0 = 71$
- Constante de los gases, $R = 0,082 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$

Solución

Se puede aplicar el modelo de dispersión gaussiano, ya que a pesar de ser el cloro un gas más denso que el aire (densidad relativa del gas respecto al aire = 2,5), la intensidad de descarga es pequeña y la zona de dispersión como gas pesado afectará a distancias

cortas.

$$u_z = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p = 5 \left(\frac{2}{10} \right)^{0,25} = 3,3 \text{ m/s}$$

Los coeficientes de dispersión lateral σ_y y vertical σ_z se obtienen de los gráficos o de las fórmulas de Turner.

Para estabilidad atmosférica D

$$\sigma_y = 0,128 \cdot x^{0,90} = 9,51 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 0,093 \cdot x^{0,85} = 5,44 \text{ m}$$

siendo x = la distancia deseada

La concentración pedida se obtendrá sustituyendo los valores correspondientes en la fórmula (1) del apartado 2.

$$C = \frac{0,3}{2\pi \cdot 9,51 \cdot 5,44 \cdot 3,3} \left[\exp \frac{-10^2}{2 \cdot 9,51^2} \right]$$
$$\left[\exp \frac{-(2-1)^2}{2 \cdot 5,44^2} + \exp \frac{-(2+1)^2}{2 \cdot 5,44^2} \right] = 2,965 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$$

Para dar la concentración en partes por millón (ppm). empleamos la fórmula de transformación.

$$C_{\text{ppm}} = C_{\text{kg/m}^3} \frac{RT_a}{PM_0} 10^6 = 2,965 \cdot 10^{-4} \frac{0,082 \cdot 293}{1,71} 10^6 = 100 \text{ ppm}$$

Este valor es superior a la concentración "Inmediatamente Peligrosa para la Vida o la Salud (IPVS)" la cual para el cloro es 30 ppm. Una concentración de 100 ppm es peligrosa y puede llegar a ser mortal en función del tiempo de exposición.

Bibliografía

(1) AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS
Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis
Nueva York, AL Ch. E., 1989, 585 págs.

(2) LEES, F.P.
Loss Prevention in the Process Industries
Londres, Butterworth & Co. Ltd., 1980, 2 Vo/s., 1316 págs.

(3) SAX, N. I.
Industrial Pollution
Nueva York, Van Nostrand Reinhold Company, 1974, 702 págs.