



José Ignacio IBARRA MARROQUIN es Ingeniero Industrial por la ETSII de Bilbao, en la especialidad de Técnicas Energéticas.

Se incorpora en 1981 a la Sección Nuclear de SENER, realizando actividades relacionadas con el análisis radiológico y dispersión de contaminantes atmosféricos. En 1983 se integra en el departamento de Protección Radiológica de CIAT NUCLEAR, S. A., desarrollando los programas de control dosimétrico del personal para la CN Cofrentes. En 1984 pasa a formar parte del departamento de Ingeniería y Análisis Nucleares de HE, en actividades relativas a análisis radiológicos y medio ambiente.

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA DISPERSION ATMOSFERICA BAJO CONDICIONES DE VIENTO DEBIL Y CALMA

J. I. IBARRA

INTRODUCCION

El problema de la dispersión y transporte de contaminantes atmosféricos y de su incidencia en las capas bajas de la atmósfera es un tema de constante preocupación, más hoy en día en que la opinión pública está más sensibilizada por las cuestiones medioambientales, como de los métodos habitualmente utilizados por los técnicos para estimar la dispersión de contaminantes con los modelos físico-matemáticos de cálculo. La mayoría de estos modelos adolecen, sin embargo, de un correcto tratamiento de aquellas situaciones climatológicas caracterizadas por vientos débiles y próximos a calma.

Por otra parte, la instrumentación de medida diseñada para medir el viento en un amplio intervalo de intensidades, deja de proporcionar lecturas fiables para situaciones próximas a calmas. En realidad, el umbral de detección de esta instrumentación se sitúa, en el mejor de los casos, en torno a 0,4 m/s, si bien los primeros datos fiables comienzan a obtenerse a partir de 0,6 — 0,7 m/s aproximadamente.

Esta indefinición se ve acentuada por el hecho de que la mayoría de las situaciones de calma y viento débil se presentan durante horas nocturnas asociadas, por lo general, a estratificaciones estables y, en consecuencia, desfavorables para la dispersión de contaminantes.

La presencia de tales condiciones en nuestra geografía nacional es de todos bien conocida por lo abrupto del terreno y la abundancia de valles interiores, donde se desarrollan fundamentalmente estas características microclimáticas. Solamente podremos obtener valores realistas del factor de concentración en las situaciones señaladas si se recurre a un tratamiento pormenorizado de tales características.

ESTRUCTURA DEL CAMPO DE VIENTOS EN SITUACIONES DE VIENTO DEBIL

Conviene precisar, en primer lugar, la hipótesis de trabajo distinguiendo entre vientos débiles, como inferiores a 2 m/s, y vientos próximos a calma o inferiores a 1 m/s, como primera aproximación.

La tendencia habitual en la medida del parámetro viento es considerar éste como un escalár caracterizado por su intensidad y dirección promedios a lo largo de un período de muestreo que, en el mejor de los casos, se cifra en 15 min. Junto con la consideración del viento como una magnitud escalár, se acostumbra a evaluar las fluctuaciones de la dirección del viento en un período dado a partir de la desviación típica de la dirección horizontal del viento (σ_d). Este

es un parámetro meramente estadístico que resulta inadecuado en condiciones de viento débil.

Sin embargo, el viento es una magnitud vectorial desvinculada de las magnitudes escalares antes citadas en condiciones de viento débil, resultando más apropiada su definición a partir de otros parámetros, como el viento medio vectorial (vinculado a la intensidad, pero no coincidente con ésta) y las desviaciones típicas de los componentes horizontales del viento σ_u y σ_v , que sustituyen con ventaja la caracterización de σ_θ .

La estructura del campo de vientos es difícil de determinar cuando su intensidad es muy débil, fundamentalmente porque los instrumentos de medida funcionan en el límite de sus especificaciones técnicas reduciendo su fiabilidad y porque las oscilaciones de la dirección del viento se incrementan sustancialmente a medida que disminuye la intensidad del viento. El conocimiento, pues, de estas situaciones debe realizarse en base a extrapolaciones de la región de datos fiables, acción que concluye en un grado de confianza suficiente si se apoya en hipótesis sustancialmente teóricas, pero fundamentadas científicamente y que permitan un cierto contraste estadístico con los resultados experimentales.

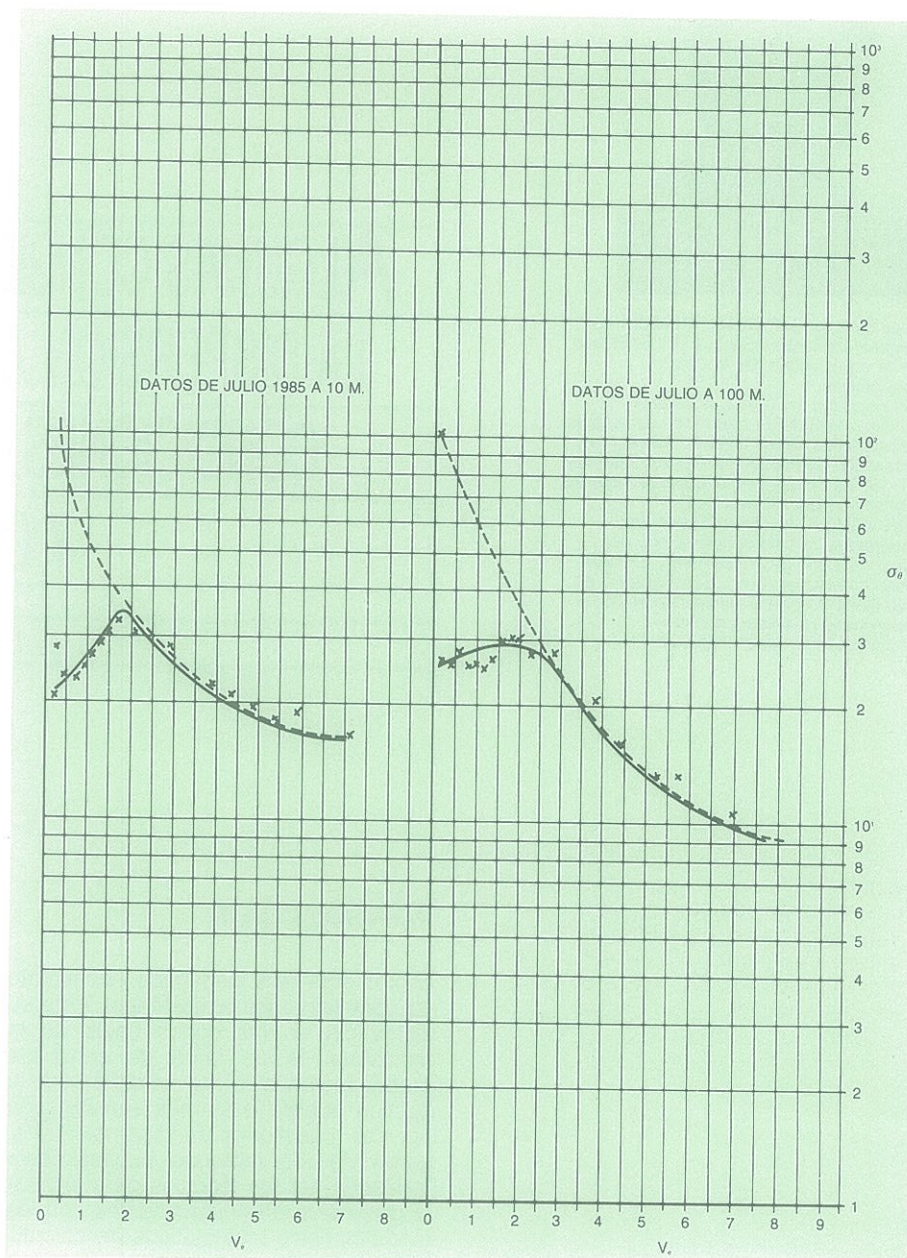
PARAMETROS ADECUADOS PARA DEFINIR LA ESTRUCTURA DEL VIENTO

La descomposición en módulo y dirección de una magnitud vectorial, con promedios independientes de cada una de ellas, altera su naturaleza algebraica y conduce a dificultades reales en la interpretación de los datos en la región inferior del intervalo de velocidades medido por la instrumentación.

Este procedimiento motiva que la variabilidad horizontal del viento sea evaluada a través del parámetro σ_θ .

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n}$$

Este parámetro, que habitualmente se evalúa en base a datos instantáneos de la dirección del viento, medidos cada segundo y promediados cada 3 min., muestra un comportamiento anormal cuando la intensidad del viento disminuye por debajo de 2 m/s aproximadamente. La figura 1 es un ejemplo claro de esta respuesta, observándose una especie de estancamiento o meseta en esta región con tendencia a valores muy pequeños de σ_θ , cuando la intensidad de viento tiende a anularse. Esta respuesta está directamente ligada a la pérdida de sensibilidad de la instrumentación en el rango de velocidades bajas.



FI

Tendría más sentido físico-matemático la determinación de las varianzas de los componentes ortogonales del vector viento. Para ello, definiremos inicialmente el viento medio vectorial horizontal como media de los valores instantáneos:

$$\bar{V}_r = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

cuyos componentes ortogonales serían:

$$v_x = V_r \cos \theta; v_y = V_r \sin \theta$$

resultando como expresiones de las varianzas ortogonales

$$\sigma_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{ix} - \bar{v}_{rx})^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ix}^2}{n} - \bar{v}_{rx}^2$$

$$\sigma_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{iy} - \bar{v}_{ry})^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{iy}^2}{n} - \bar{v}_{ry}^2$$

verificando que:

$$\sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$$

Un estudio más completo de las características del viento debe incluir el cálculo de la covarianza.

$$\sigma_{uv} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{ix} - \bar{v}_{rx})(v_{iy} - \bar{v}_{ry})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ix} v_{iy}}{n} - \bar{v}_{rx} \bar{v}_{ry}$$

permitiendo completar el tensor

$$\begin{vmatrix} \sigma_u^2 & \sigma_{uv} \\ \sigma_{uv} & \sigma_v^2 \end{vmatrix}$$

cuyos valores propios, direcciones principales e invariantes son de sumo interés.

La persistencia del viento quedaría determinada a través del coeficiente de auto correlación (ref. 1).

$$r_a = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i \cdot x_{i+1}}{(n-1) \sigma_x^2}$$

siendo $x_1, x_2 \dots x_n$ desviaciones con respecto al valor medio a intervalos constantes de tiempo.

Otros parámetros de interés que completan la caracterización del campo horizontal del viento son el índice de elipticidad de Mauchly y la constancia. El primero puede obtenerse a partir de los invariantes del tensor de covarianzas.

$$I = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$$

$$\begin{vmatrix} \sigma_u^2 & \sigma_{uv} \\ \sigma_{uv} & \sigma_v^2 \end{vmatrix}$$

como el cociente:

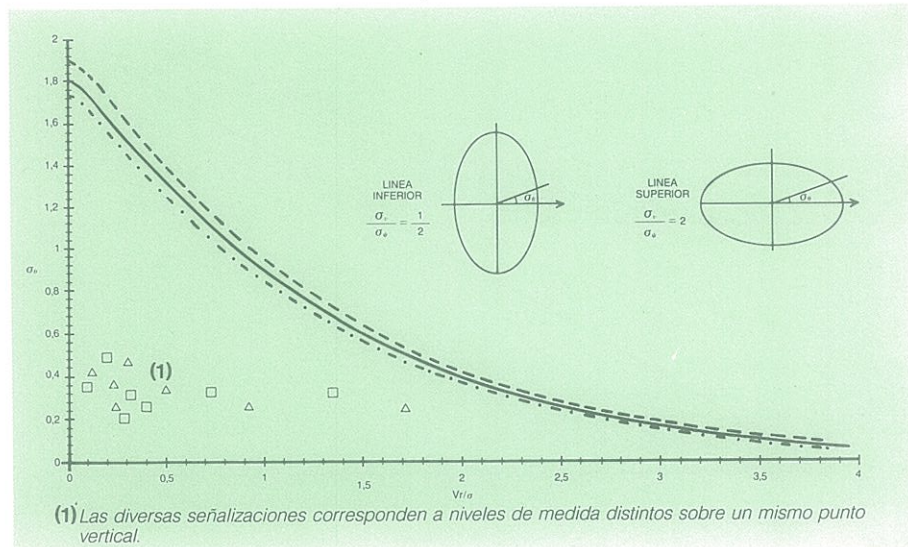
$$Le = \frac{2 \sqrt{W}}{I}$$

pudiéndose demostrar que $Le \leq 1$ correspondiendo el valor unidad a una distribución bidimensional circular. Mediante un criterio adecuado es posible determinar la probabilidad de que el viento vectorial medio se conforme a una distribución tal [1].

La constancia del viento viene dada por el cociente:

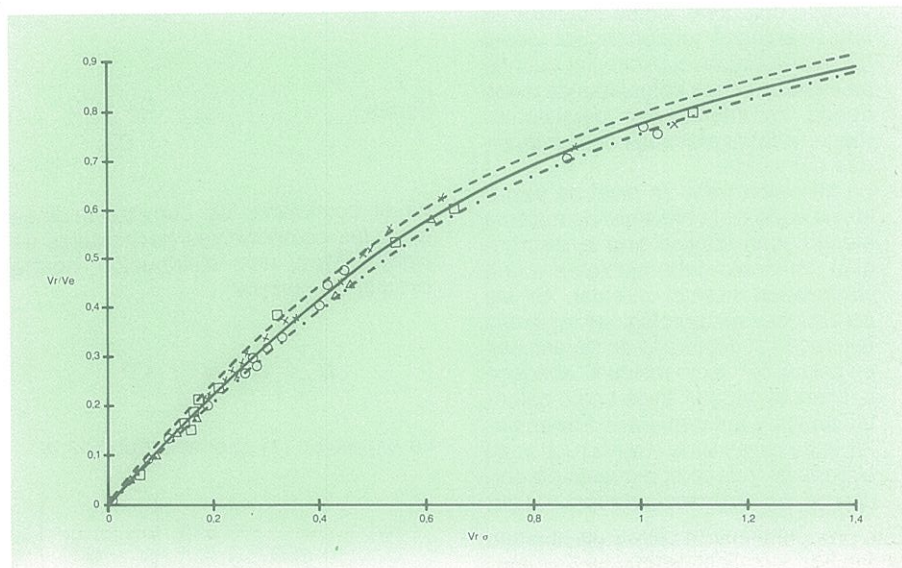
$$q = \frac{|v_r|}{v_e}$$

entre el módulo del viento medio vectorial y el viento medio escalar. El valor de $q \leq 1$ y es un índice de la variabilidad del



F II

F III



viento, ligado estrechamente a los parámetros anteriormente definidos.

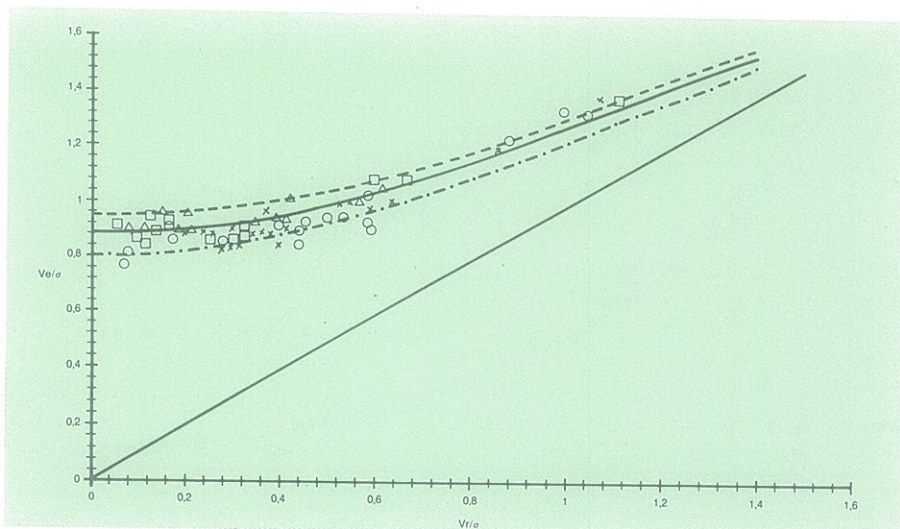
Todo lo anterior se refiere al tratamiento de las observaciones realizadas en un único punto. Para completar la definición del campo de vientos habría que extender la definición anterior a otros puntos de medida en la misma vertical, así como separados horizontalmente entre sí dentro de un área determinada de estudio. La teoría de la regresión lineal extendida al terreno de magnitudes vectoriales permitirá establecer las características estocásticas del campo de viento.

HIPOTESIS DE TRABAJO

La hipótesis básica de trabajo para el tratamiento de las condiciones de viento débil y calmas consiste en considerar la tendencia del viento hacia una distribu-

ción de densidad gaussiana circular a medida que el viento vectorial medio tiende a cero. Esta hipótesis se fundamenta en los aspectos siguientes:

- En la atmósfera libre parece comprobado que la distribución de viento es muy aproximadamente gaussiana circular [1], [2], [3]. Las observaciones están separadas entre sí por intervalos de tiempo amplio (frecuentemente un día). En estas condiciones la orografía daría lugar, en las capas bajas, a una distorsión de la frecuencia del viento. Sin embargo, para observaciones realizadas sobre datos promediados cada 10-15 minutos, la influencia orográfica distorsiona mucho menos esta distribución.
- Incluso considerando períodos promedio amplios (semanal, mensual), el test de circularidad de Marchly



F IV

proporciona valores de Le en torno a 0,9, acompañando a situaciones de viento débil. Este índice muestra ya una acentuada tendencia del viento hacia una distribución circular cuando se evalúan series completas de datos donde no intervengan persistentemente valores elevados de la intensidad del viento.

- La admisión para un nivel de turbulencia dado de la hipótesis de máxima aleatoriedad implica que la distribución del viento debe ajustarse a una distribución normal circular. Si las condiciones meteorológicas reinantes favorecen el desarrollo de situaciones en calma, el "viento residual" obedece a diversas causas, tales como calentamientos y enfriamientos diferenciales entre terrenos de distinta rugosidad superficial y desprendimiento de celdas de aire sobrecalentadas al azar.

Ante una situación de calma, difícilmente detectable por la instrumentación convencional, es razonable suponer que se pase de un modo continuo de la distribución de fluctuaciones previa a la catalogación de calma (y, por tanto, detectada por la instrumentación), a las fluctuaciones que serían apreciadas por un microscopio sensible al movimiento browniano y que, como es sabido, dicho movimiento es gaussiano e isótropo, correspondiendo en dos dimensiones, a distribuciones gaussianas bivariantes.

FORMULACION MATEMATICA

En conformidad con lo anteriormente expuesto podemos expresar la función de densidad de la distribución normal del viento como:

$$P(v_x, v_y) = \frac{1}{2\sigma_x \sigma_y \sqrt{1-r^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-r^2)} \left(\frac{v_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{v_y^2}{\sigma_y^2} - \frac{2r v_x v_y}{\sigma_x \sigma_y} \right) \right] \quad (1)$$

donde

$$r = \frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{\sigma_{xy}}$$

es el coeficiente de correlación lineal entre los componentes horizontales del viento. Para una distribución normal circular se cumple:

$$\sigma_x = \sigma_y \quad y \quad r = 0$$

La expresión [1] quedará reducida a:

$$P(v) = \frac{1}{\pi \sigma^2} \exp \left(-\frac{v^2}{\sigma^2} \right)$$

donde

$$\begin{aligned} v^2 &= v_x^2 + v_y^2 \quad y \quad \sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = \\ &= 2\sigma_x^2 = 2\sigma_y^2 \end{aligned}$$

Para determinar la intensidad media del viento hemos de considerar que:

$$\vec{v} = \vec{V}_i - \vec{V}_r$$

deduciéndose que:

$$v^2 = V^2 + V_r^2 - 2V V_r \cos \theta$$

siendo θ el ángulo que forma un valor instantáneo del vector viento con respecto al viento vectorial medio (V_i). La intensidad media del viento sería entonces calculada como:

$$\begin{aligned} V_e &= \int_{v=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} V P(v) V dV d\theta = \\ &= \frac{1}{\pi \sigma^2} \int_{v=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} v^2 \exp \left[-\frac{v_r^2}{\sigma^2} - \frac{v^2}{\sigma^2} + \frac{2vv_r \cos \theta}{\sigma^2} \right] dv d\theta \quad (3) \end{aligned}$$

Integrando la expresión [3] obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{V_e}{\sigma_v} &= \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left\{ 1 + \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{v_r}{\sigma} \right]^{2,35} \right\}^{1/2,35} \quad (4) \end{aligned}$$

con un error inferior al 1,5 %. En condiciones extremas en que $\sigma_x \rightarrow 0$ y $\sigma_y \rightarrow 0$, la expresión [4] quedaría simplificada en:

$$\begin{aligned} \frac{V_e}{\sigma} &= \\ \sqrt{\frac{2}{\pi}} &= \left\{ 1 + \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{v_r}{\sigma} \right]^n \right\}^{1/n} \quad (5) \end{aligned}$$

donde $n = 1,7$ para la distribución transversal y $n = 2,7$ para la distribución longitudinal.

La constancia del viento anteriormente definida se expresaría como:

$$q = \left\{ 1 + \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\sigma}{v_r} \right]^{2,35} \right\}^{1/2,35} \quad (6)$$

para una distribución normal circular. Dado que $q = \frac{v_r}{V_e}$ resulta sencillo expresar q en función del viento medio escalar

Continúa en la última página.