

Introducción

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que se forma en todos aquellos procesos en que tiene lugar la combustión de sustancias que contienen carbono. En ambientes interiores no industriales sus principales focos son la respiración humana y el fumar; aunque los niveles de dióxido de carbono también pueden incrementarse por la existencia de otras combustiones (cocinas y calefacción) o por la proximidad de vías de tráfico, garajes o determinadas industrias.

La concentración de dióxido de carbono en un ambiente interior puede aportar información sobre distintos aspectos y circunstancias de un edificio tales como posibilidad de efectos sobre la salud de sus ocupantes, correlación con problemas y quejas por olor o como dato para estudiar la ventilación de un local.

Para la determinación del dióxido de carbono pueden utilizarse tubos colorimétricos o monitores portátiles ya sean fotoacústicos o de infrarrojo, siendo estos últimos los más versátiles y de uso más extendido, ya que permiten tanto mediciones puntuales como mediciones promediadas en el tiempo mediante la utilización de acumuladores de datos que luego pueden estudiarse con un equipo informático.

Es muy importante que la persona que lleve a cabo las mediciones mantenga el sensor lejos de su área respiratoria, ya que en la respiración se expiran entre 30.000 y 40.000 ppm de dióxido de carbono, cantidades que pueden falsear las lecturas.

El dióxido de carbono como contaminante

El dióxido de carbono es un asfixiante simple que actúa básicamente por desplazamiento del oxígeno y que a elevadas concentraciones (>30.000 ppm) puede causar dolor de cabeza, mareos, somnolencia y problemas respiratorios, dependiendo de la concentración y de la duración de la exposición. Es un componente del aire exterior en el que se encuentra habitualmente a niveles entre 300 y 400 ppm, pudiendo alcanzar en zonas urbanas valores de hasta 550 ppm. El valor límite de exposición profesional (LEP-VLA) del INSHT para exposiciones diarias de 8 horas es de 5.000 ppm con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15.000 ppm. Estos valores son difíciles de encontrar en ambientes interiores no industriales como son oficinas, escuelas y servicios en general. En la práctica, en estos recintos se encuentran valores de 2.000 y hasta 3.000 ppm. Si se superan estos niveles puede deberse a una combustión incontrolada, en cuyo caso el riesgo para la salud puede no ser debido al dióxido de carbono sino a la presencia de otros subproductos de la combustión, principalmente el monóxido de carbono (CO), cuyo límite de exposición es muy inferior (25 ppm).

El dióxido de carbono como indicador de olor

La emisión de dióxido de carbono en la respiración humana está ligada a la de otros productos procedentes del metabolismo humano (agua, aerosoles biológicos, partículas, alcoholes, aldehídos, etc.) llamados bioefluentes y responsables de la carga de olor por ocupación humana de un local. Por ello, el nivel de concentración de dióxido de carbono en un ambiente interior puede tomarse, si no hay otras fuentes contaminantes, como indicador de la carga de olor existente debida a sus ocupantes. Para establecer valores de referencia se han realizado estudios con personas a distintas tasas de ventilación y aunque existen datos que sugieren que a 600 ppm los individuos más sensibles ya manifiestan quejas y molestias, en la práctica se acepta que no debe superarse una concentración de 1.000 ppm de dióxido de carbono con el fin de evitar problemas de olor y para que el aire sea considerado aceptable para aproximadamente el 80% de los visitantes del local. Los ocupantes adaptados, es decir los que llevan un cierto tiempo en el local, pueden no notar molestias, en términos de olor corporal, hasta que la concentración de dióxido de carbono supera 2.000 ppm. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el hecho de que no se superen en un local estos niveles de dióxido de carbono no garantiza la ausencia de compuestos de origen distinto a los ocupantes (materiales, productos de consumo, actividades, etc.) que puedan ser molestos o nocivos para la salud.

Medición del caudal de ventilación basada en la determinación de dióxido de carbono

Estudiar el funcionamiento de un sistema de ventilación implica, básicamente, la medición del caudal de ventilación. Este dato puede conocerse midiendo directamente el flujo de aire pero a menudo es más fácil realizar estimaciones a través de mediciones de dióxido de carbono. Además, la comparación, por ejemplo, de valores puntuales de dióxido de carbono entre distintas habitaciones, zonas de un mismo local, puntos de tratamiento del aire o a distintas alturas respecto al suelo, puede ayudar a la identificación y diagnóstico de distintas deficiencias en el sistema de renovación de aire de un edificio. Ello implica la utilización del dióxido de carbono como un gas trazador ya sea utilizando el existente de forma natural en el ambiente o añadiendo un flujo controlado.

Hay varios métodos para medir el caudal de ventilación a partir de mediciones del nivel de dióxido de carbono. Entre ellos destacan los siguientes.

Estimación de la proporción de aire exterior

Este método es el propuesto en la Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo. Consiste en medir las concentraciones de dióxido de carbono en el aire exterior, en el aire saliente de las unidades de tratamiento del aire (aire de suministro) y en el aire de retorno. El porcentaje o cantidad de aire exterior se obtiene a partir de la expresión:

$$Aire\ exterior(\%) = \frac{C_R + C_S}{C_R - C_0} \times 100$$

Donde:

C_S = ppm de CO_2 en el aire de suministro (si se mide en un local) o ppm de CO_2 en el aire de mezcla (si se mide en la unidad de tratamiento de aire)

C_R = ppm de CO_2 en el aire de retorno

C_0 = ppm de CO_2 en el aire exterior

Hay dos factores críticos: por una parte, el momento en que se realizan las diferentes medidas, que debe ser lo más coincidente en el tiempo que sea posible y, por otra, que al ser la precisión del resultado directamente proporcional a una diferencia de concentraciones es preferible aplicar el método en periodos de ocupación del edificio para asegurarse de que las diferencias son las mayores posibles.

El caudal de aire exterior vendrá dado por el producto del caudal total de aire suministrado por la unidad de climatización y el porcentaje de aire exterior determinado a partir de las medidas de la concentración de dióxido de carbono.

Medida del dióxido de carbono en condiciones de equilibrio

Como ya se comentó, desde el punto de vista práctico, en ambientes interiores se está tomando como indicador de la calidad de aire interior la concentración del dióxido de carbono producido en la respiración de los ocupantes del edificio y así, si no existe una reducción de su concentración por otro medio distinto de la ventilación, se considera que la ventilación es inadecuada cuando se superan las 1000 ppm de dióxido de carbono.

La norma UNE 100-011-91 (Climatización. La ventilación para una calidad aceptable de aire en la climatización de los locales) establece unos caudales de aire exterior para una calidad aceptable de aire en los locales y para controlar la concentración de dióxido de carbono y, paralelamente, olores, partículas y otras sustancias contaminantes, con un adecuado margen de seguridad. Por su parte el Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo, establece que la ventilación mínima en los locales de trabajo será de 30 metros cúbicos de aire limpio por hora y trabajador, en el caso de trabajos sedentarios en ambientes no calurosos ni contaminados por humo de tabaco, a fin de evitar el ambiente viciado y los olores desagradables.

El procedimiento, según la citada norma UNE 100-011-91, para establecer la cantidad mínima de aire de ventilación, consiste en aceptar que una persona sana, con una dieta normal, genera una cantidad de dióxido de

carbono que viene dada por:

$$qCO_2 = 0,0042M$$

siendo:

qCO_2 = la tasa de generación de dióxido de carbono en I/s por persona y

M = la actividad metabólica expresada en met

En un estado estacionario del sistema de ventilación, la relación entre el caudal de aire exterior, las concentraciones de dióxido de carbono y la tasa de generación de dióxido de carbono puede deducirse de un balance de masas de dióxido de carbono y resulta ser:

$$q = \frac{qCO_2}{[CO_2]_{recinto} - [CO_2]_{exterior}} \times 10^6$$

siendo:

q = el caudal de aire exterior en I/s por persona

qCO_2 = la tasa de generación de dióxido de carbono en I/s por persona

$[CO_2]_{recinto}$ = concentración media de dióxido de carbono en el local (ppm)

$[CO_2]_{exterior}$ = concentración de dióxido de carbono en el exterior (ppm)

Esta relación lleva a la conclusión de que el caudal de ventilación necesario es de 7,2 I/s por persona (26 m³/h por persona) que se redondea a 7,5 I/s por persona y que es la base de la recomendación de la norma UNE para la ventilación de locales de oficinas. También son de este orden de magnitud los 30 m³/h/trabajador (8,3 I/s/trabajador) exigidos en el Anexo III del R.D.486/97.

Este mismo modelo puede ser utilizado para evaluar la ventilación de un recinto, tomando la concentración de dióxido de carbono como indicador, en el supuesto de que la única fuente de dióxido de carbono sea la respiración humana y que no exista ningún procedimiento de eliminación del dióxido de carbono aparte de la ventilación y que, además, se haya alcanzado un estado estacionario.

La expresión a aplicar será:

$$q = \frac{0,0042\overline{M}}{[CO_2]_{interior} - [CO_2]_{exterior}} \times 10^6$$

Siendo **M** la actividad metabólica media de los ocupantes Para aplicar correctamente esta ecuación hay que tener en cuenta las limitaciones de uso debidas a las hipótesis de trabajo mencionadas. Los valores de concentración deben medirse simultáneamente y la actividad metabólica media de los ocupantes puede estimarse con métodos relativamente sencillos como los propuestos en la norma UNE EN 28996-95 (Ergonomía. Determinación de la producción de calor metabólico) (ver NTP-323).

Utilizar la concentración de dióxido de carbono como indicador de ventilación sólo es válido en aquellos espacios en que hay suficientes ocupantes para servir de fuente de dióxido de carbono y que, además, han permanecido en el mismo el tiempo necesario para que el nivel de dióxido de carbono alcance el equilibrio. Además otra limitación del método está asociada a la necesidad de estimar la producción de dióxido de carbono por las personas basada en su actividad física que puede ser una fuente importante de error compensable en parte si el número de ocupantes del local es elevado.

Método de la caída de la concentración

Consiste en medir, en el local sin ocupantes, la disminución de la concentración de dióxido de carbono a lo largo de un periodo de tiempo. El cálculo del caudal de ventilación se realiza a partir del nº- de renovaciones de aire del local aplicando la expresión:

$$N^{\circ} \text{ renovaciones} = \frac{1}{t} \ln \frac{C_i - C_0}{C_t - C_0}$$

Siendo:

C_0 = concentración exterior de dióxido de carbono (ppm)

C_t = concentración final de dióxido de carbono (ppm)

C_i = concentración inicial de dióxido de carbono (ppm)

t = tiempo (h)

A partir del N° de renovaciones se calculará el caudal de ventilación (Q_{Exterior})

$Q_{\text{Exterior}} \text{ (m}^3/\text{h)} = \text{Volumen del recinto (m}^3) \times N^{\circ} \text{ renovaciones (h}^{-1}\text{)}$

Para la correcta utilización de todos estos métodos es necesario tener muy en cuenta, no sólo sus limitaciones y condiciones óptimas de aplicación sino también, y en especial, la precisión de lectura del instrumento disponible ya que al depender el resultado de la diferencia de concentraciones de dióxido de carbono si ésta es poca un pequeño error en la medida se transformará en un error mucho mayor en el valor del caudal. En las figuras 1 y 2 se indica este efecto.

Figura 1. Error en la determinación del caudal de aire exterior

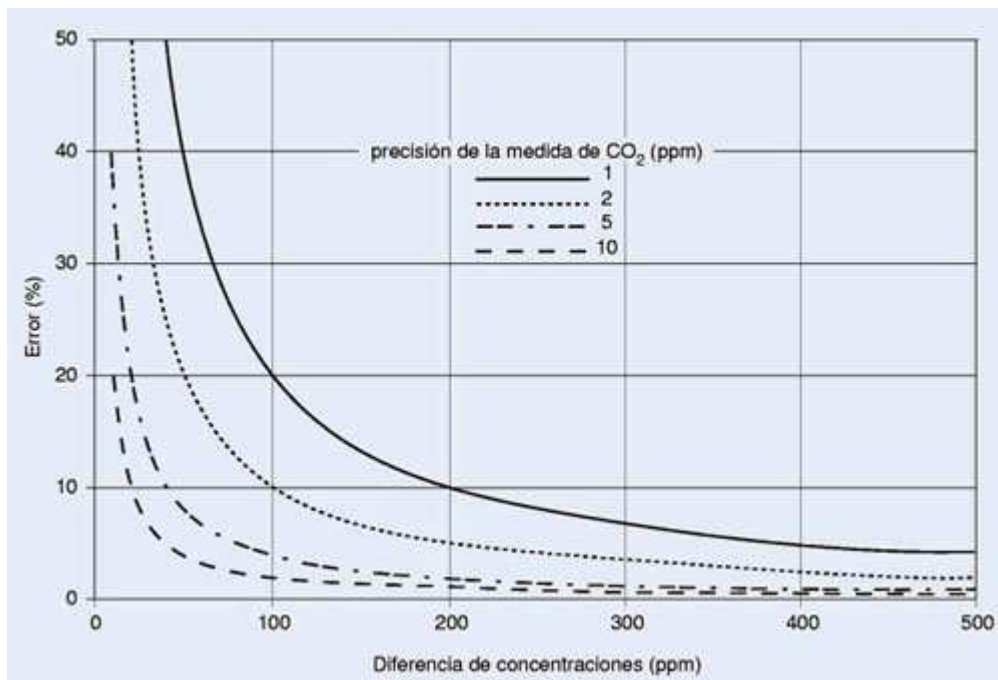
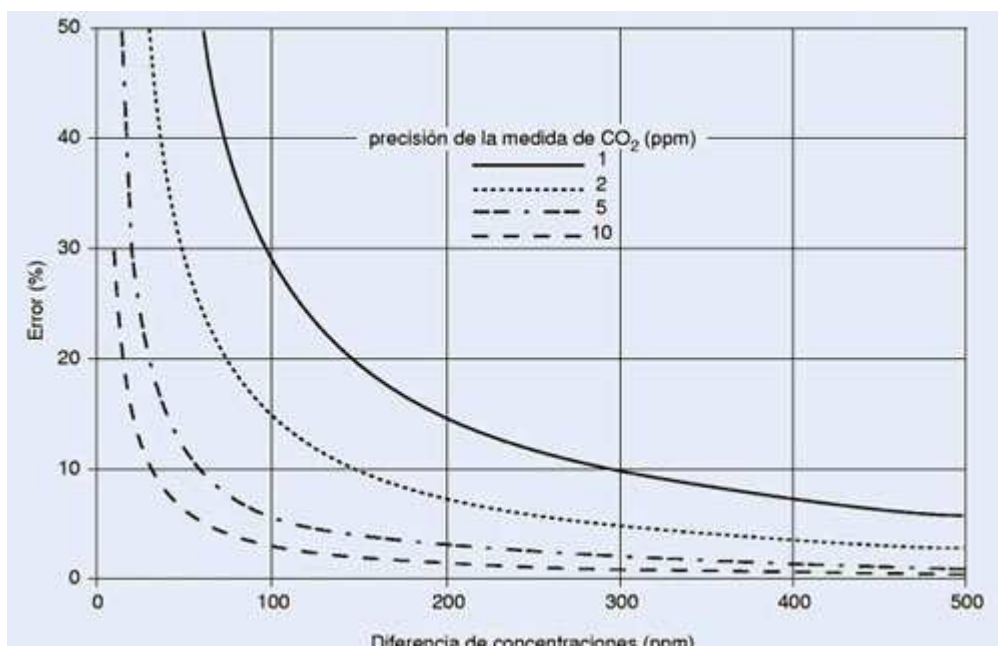


Figura 2. Error en la determinación del % de aire exterior



Se observa que para tener estimaciones del caudal de aire exterior con un error inferior al 5% es necesario que la diferencia de concentraciones sea superior a 500 ppm si se dispone de un instrumento de precisión ± 10 ppm, o bien disponer de una precisión de medida mejor que ± 2 ppm para poder estimar el caudal cuando la diferencia es de 100 ppm.

Otras informaciones sobre el sistema de ventilación que pueden obtenerse a partir de la determinación de dióxido de carbono

Entre otros problemas que pueden existir en el suministro de aire de renovación de un edificio y que es posible

identificar a través de mediciones de dióxido de carbono destacan los que se comentan a continuación.

Reentrada de aire

La concentración de dióxido de carbono en el aire de expulsión siempre es relativamente más alta que en el aire exterior debido a la ocupación del edificio y a las actividades desarrolladas (combustiones). Valores altos de la concentración de dióxido de carbono en los puntos de toma de aire, comparados con valores en otros puntos del exterior, podrían indicar una reentrada del aire de expulsión en función de los vientos de la zona. Otra posible causa de concentración alta de dióxido de carbono en las tomas de aire es la existencia de focos contaminantes exteriores (extracciones provenientes de garajes, existencia de muelles de carga de camiones o tráfico elevado).

Distribución de la ventilación

Cuando los niveles medios de concentración de dióxido de carbono medidos en los registros de retorno son superiores a los valores de dióxido de carbono medidos en los conductos de retorno, generalmente quiere indicar que existe una fuga del aire de suministro hacia el pleno de retorno o también una entrada de aire exterior a este pleno. Por una parte, una fuga de aire exterior puede implicar la existencia de problemas de temperatura y/o de humedad. Por otra parte, una fuga de aire exterior o de suministro significa un coste energético mayor, aunque se esté proporcionando una ventilación adecuada a los ocupantes.

Si la concentración de dióxido de carbono en la toma de aire exterior del sistema de ventilación es significativamente inferior a la que se suministra por las rejillas de distribución, habrá que cuestionarse la eficiencia de las unidades de tratamiento de aire para tomar aire del exterior y distribuirlo a las áreas ocupadas. Midiendo el caudal en la toma de aire exterior y comparándolo con la cantidad de aire que llega a los registros de suministro (por ej. utilizando el método del porcentaje de aire exterior), se puede determinar si el valor de concentración más elevado en el suministro se corresponde con la mezcla diseñada de aire de retorno y aire exterior.

Cortocircuitos

Si se encuentran zonas con elevadas concentraciones de dióxido de carbono puede ser indicativo de ventilación estancada o reducida. Para esta prueba hay que realizar mediciones en distintos puntos de la zona en estudio lo cual requiere la utilización de equipos de medición con sensores de respuesta rápida. Como comprobación adicional de posibles problemas en una zona, puede medirse la concentración de dióxido de carbono en cualquier registro de retorno de la zona y comprobar si el valor encontrado es inferior al valor medio de la misma. Si así fuera indicaría que existe un cortocircuito entre el suministro y el retorno.

Vías de distribución de contaminantes

El uso del dióxido de carbono como gas trazador permite aplicar las técnicas de cálculo con la ventaja del menor coste de la instrumentación. Si en una zona se introduce un gas trazador, su concentración puede medirse en zonas adyacentes para determinar el transporte y distribución del gas inyectado. Si se utiliza dióxido de carbono esto sólo es aplicable para zonas no ocupadas en las que se puede entonces introducir niveles elevados, aunque no tóxicos, de dióxido de carbono para determinar flujos entre zonas. Es importante medir inicialmente los niveles básicos de dióxido de carbono antes de introducir este gas como trazador para conocer los niveles debidos a recientes ocupaciones o a combustiones.

Variación de los niveles de dióxido de carbono a lo largo de un periodo de tiempo

Si se dispone de un equipo que permita almacenar datos sobre niveles de dióxido de carbono durante un periodo prolongado, por ejemplo un día, se podrá estudiar la variación de la concentración de dióxido de carbono y correlacionarla con la ocupación y el sistema de ventilación, o durante una semana, verificar si el funcionamiento del sistema de ventilación es suficiente para eliminar los contaminantes generados por los ocupantes el día anterior. Si la renovación del aire es suficiente, los niveles de dióxido de carbono disminuirán hasta valores de aire exterior antes de que al día siguiente vuelva a ocuparse el edificio; en caso contrario los valores mínimos irán aumentando a lo largo de la semana debido a la acumulación de contaminantes. Evidentemente, en un edificio sólo se alcanzan los niveles de dióxido de carbono del aire exterior si este está poco ocupado durante la noche.

Por otra parte, un registro de los niveles de dióxido de carbono de 8 horas en periodos anteriores y posteriores a la realización de cambios en el sistema de ventilación de un edificio, siempre que no varíen ni los niveles de dióxido de carbono en el exterior ni la ocupación, permite comprobar si los cambios han sido adecuados.

La calidad de un aire interior

La medición de los niveles de dióxido de carbono en un edificio permite detectar la existencia de problemas de calidad de aire por carga química pero también puede utilizarse en estudios relacionados tanto con el suministro de aire como en su distribución a las zonas ocupadas del edificio. Esto convierte su medición en una herramienta muy útil para el diagnóstico, siempre que se tengan en cuenta las posibles causas de error y la exactitud de las medidas realizadas. En la Tabla 1 se resumen las aplicaciones más significativas comentadas a lo largo de esta nota técnica.

TABLA 1.
Aplicaciones del dióxido de carbono en la evaluación de la calidad de un aire interior

MEDIDA	TÉCNICA EMPLEADA	OBSERVACIONES
CO₂ como contaminante	Medidas puntuales	Aire exterior: 300-400 ppm LE ppm
CO₂ como indicador de la contaminación generada por los ocupantes	Medidas puntuales (final de mañana/tarde) o series de datos	UNE 100-011-91 recomienda una concentración máxima de 1.000 ppm
CO₂ como indicador básico de un adecuada o inadecuada renovación de aire	Medidas puntuales (final de mañana/tarde) o series de datos	Algunos organismos proponen la realización de mediciones para detectar una tasa de renovación inferior a 800 ppm, aconsejar la revisión del funcionamiento del sistema de ventilación.
de aire exterior/caudal de ventilación	Medida de las concentraciones de CO ₂ en el aire de suministro, de retorno y exterior y del caudal total de aire	Determina la cantidad de aire suministrado a una zona por el sistema de tratamiento de aire. No tiene en cuenta las infiltraciones. Se basa en la diferencia entre CO ₂ interior y exterior
Caudal de ventilación	Utilización del CO ₂ como gas trazador. Almacenamiento de datos durante un periodo de tiempo, hasta alcanzar el equilibrio	Se requieren medidas muy exactas de CO ₂ . Es conveniente una tasa de renovación alta (para alcanzar condiciones de equilibrio). El método puede verse afectado por la estimación del CO ₂ generado por los ocupantes
Caudal de ventilación	Registro continuo de la disminución de los niveles de CO ₂ utilizado como gas trazador	Es conveniente una tasa de renovación alta si se utiliza el CO ₂ generado por los ocupantes. Es preferible medir el CO ₂ sin ocupación
Reentrada de aire	Comprobación puntual de los niveles de CO ₂ en el aire exterior y en el aire de entrada	Sencilla comprobación de la reentrada de aire procedente de la explotación
Distribución de la ventilación	Medida de CO ₂ en varios puntos del edificio	Comprobación de la mezcla de aire y de la distribución del aire exterior a las zonas ocupadas
Cortocircuito	Medida de CO ₂ en varios puntos del edificio	Comprobación rápida, habitación por habitación, de la velocidad y de la dirección de los chorros de aire de los difusores
Vías de distribución de la contaminación	Introducción de CO ₂ , diferencias entre medidas puntuales	Cualitativo. Generalmente sólo es efectivo si el edificio no está ocupado
Idoneidad de la ventilación nocturna	Registro continuo de datos de CO ₂	Sólo es efectivo si las zonas no están ocupadas durante la noche
Reajuste del sistema de ventilación	Registro antes y después del reajuste del sistema	Método comparativo muy exacto