

TEMA 50

MEDICIÓN DE LOS CONTAMINANTES QUÍMICOS. MEDICIONES PUNTUALES Y PROMEDIO. MEDICIONES PERSONALES Y AMBIENTALES. INSTRUMENTOS DE LECTURA DIRECTA. SISTEMAS ACTIVOS DE TOMA DE MUESTRAS. CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS. SISTEMAS PASIVOS DE TOMA DE MUESTRAS. TRANSPORTE Y CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS. REPRESENTATIVIDAD DE LAS MEDICIONES. ESTRATEGIAS DE MUESTREO. CONDICIONANTES DE LA TOMA DE MUESTRAS. CONTROL DE CALIDAD DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA

INTRODUCCIÓN

Como parte de la evaluación de riesgos puede ser necesario realizar mediciones de las sustancias químicas a las que están expuestos los trabajadores. La vía de entrada más importante es la inhalatoria, ya que la respiración es un proceso continuo y hay una elevada superficie de contacto entre los alveolos y la sangre, en caso de que las sustancias químicas lleguen hasta estos.

La evaluación de la exposición laboral a agentes químicos por inhalación basada en el muestreo del aire de los lugares de trabajo se lleva a cabo comparando la concentración en el aire ponderada en el tiempo de un determinado contaminante, y obtenida a partir de mediciones representativas, con los valores límite de exposición profesional (VLEP) fijados para el agente en cuestión, tanto los definidos para exposiciones diarias como los aplicables a exposiciones de corta duración. Las mediciones consisten en la captación de la sustancia química y posterior análisis para cuantificar la concentración.

En este tema se abordan los aspectos que hay que tener en cuenta en el proceso de medición para garantizar la calidad de las mediciones. Estos procesos incluyen la estrategia de medición, que tiene que asegurar la representatividad de la muestra, los muestreadores utilizados y su calibración, el transporte y conservación de las muestras hasta que estas se analizan, y el control de calidad.

1. MEDICIÓN DE LOS CONTAMINANTES QUÍMICOS

La normativa de Prevención de Riesgos Laborales (PRL) en el artículo 3 del Real Decreto 374/2001 sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo indica que *"la evaluación de riesgos derivados de la exposición por inhalación a un agente químico peligroso deberá incluir la medición de las concentraciones del agente en el aire, en la zona de respiración del trabajador, y su posterior comparación con el valor límite ambiental que corresponda"*.

El mencionado artículo continúa más adelante diciendo que *"las mediciones a las que se refieren los apartados anteriores no serán sin embargo necesarias, cuando el empresario demuestre claramente por otros medios de evaluación que se ha logrado una adecuada prevención y protección"*. Es decir, no siempre será necesario medir, siempre y cuando se pueda demostrar *"claramente"* que el personal trabajador tiene una *"adecuada protección"*. En estos casos es frecuente el uso de métodos cualitativos de evaluación del riesgo, como por ejemplo los

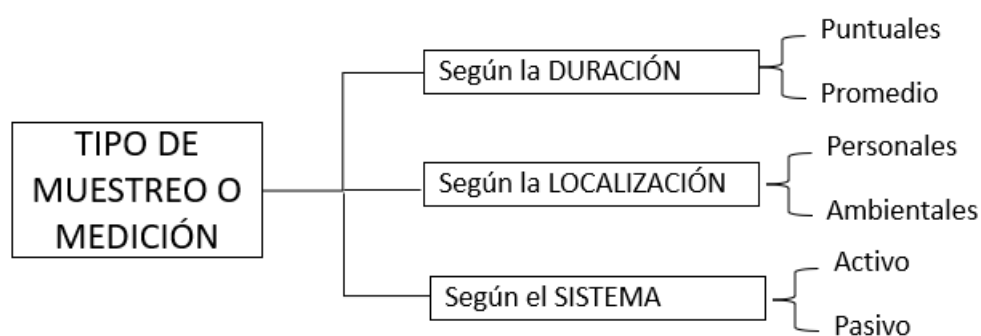
modelos de exposición ART (*Advanced Reach Tool*¹ o *Sttoffenmanager*² (INSST, 2017³). Ambos, disponibles también en TREXMO⁴, una herramienta desarrollada para minimizar las diferencias que resultan de la interpretación del usuario al elegir las distintas opciones que ofrecen los modelos. En TREXMO el usuario sólo introduce ciertos datos de exposición y la herramienta convierte dichos datos a los parámetros específicos usados por los distintos modelos.

El Reglamento de los Servicios de Prevención (RSP) establece en su artículo 5 que cuando la evaluación de los riesgos requiera efectuar mediciones, análisis o ensayos y exista normativa específica de aplicación, esto es, metodología analítica específica, el procedimiento de evaluación deberá ajustarse a las condiciones concretas establecidas en aquella. En todo caso se utilizarán métodos validados que proporcionen resultados con el grado de fiabilidad requerido.

En ausencia de normativa específica se usarán:

- las normas UNE.
- las guías del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, del Instituto Nacional de Silicosis y protocolos y guías del Ministerio de Sanidad y Consumo, así como de Instituciones competentes de las Comunidades Autónomas.
- normas internacionales.
- guías de otras entidades de reconocido prestigio.

Las mediciones se pueden clasificar conforme a distintos criterios:



2. MEDICIONES PUNTUALES Y PROMEDIO

Las mediciones proporcionan el valor medio de la concentración del contaminante durante el tiempo que se ha realizado dicha medición. Atendiendo a la duración de la medición, las mediciones pueden ser puntuales o promediadas.

La medición puntual se limita a la determinación de la concentración en un periodo de tiempo muy corto (de manera instantánea o en pocos minutos). El valor de la concentración que se

¹ <https://www.advancedreachtool.com/>

² <https://stoffmanager.com/en/>

³ <https://www.insst.es/documents/94886/96076/Herramientas+para+la+gestion+del+riesgo+quimico.pdf/ca44ff68-bde2-4b96-af67-1477f9f0bf76?t=1527065689115>

⁴ <https://trexmo.unisante.ch/home/>

obtiene de este modo puede asimilarse al valor instantáneo de la misma en el momento de la medición. Estas mediciones son adecuadas para determinar:

- Picos de concentración en situaciones concretas.
- La presencia de agentes químicos en zonas donde se sospecha que puede haber liberación de sustancias químicas al lugar de trabajo.

Las mediciones puntuales se suelen hacer con instrumentos de lectura directa.

La medición promediada abarca un periodo de tiempo más largo, y es adecuada para la determinación de concentraciones medias a lo largo de la jornada laboral o parte de ella o de una actividad en concreto. Se suele realizar con un sistema de captación del contaminante en un soporte que después se analiza.

3. MEDICIONES PERSONALES Y AMBIENTALES

Según donde se coloque el instrumento de medida, las mediciones pueden ser ambientales o personales.

Las mediciones personales, permiten obtener valores de las concentraciones de los contaminantes en la zona de respiración del trabajador/a. Este tipo de mediciones precisa la utilización de instrumentos de tamaño y peso reducidos y funcionamiento autónomo, ya que acompañan a la persona durante la realización de su trabajo, normalmente van situados en la solapa del trabajador/a.

Los resultados de estas mediciones dan una idea más exacta de la exposición real de las personas trabajadoras a los contaminantes, aunque la exposición de una persona en particular también depende de sus hábitos de trabajo. Para la comparación con los VLEP se usan mediciones personales.

Las mediciones ambientales (en puntos fijos o de área) permiten la determinación de las concentraciones de contaminantes en zonas de trabajo concretas o bien representativas de la composición del ambiente general de una zona de trabajo. Este tipo de mediciones no suele tener limitaciones en cuanto al tamaño y peso de los instrumentos que se utilizan, que suelen colocarse en sitios fijos. Se suelen definir dos zonas, el campo cercano y el campo lejano (near field, NF y far field, FF por sus siglas en inglés). El campo cercano es una zona a un metro en cualquier dirección de la fuente (aunque algunas publicaciones científicas también la definen a un metro alrededor de la zona de respiración del trabajador) y el campo lejano sería la zona a más de un metro en cualquier dirección de la fuente.

4. INSTRUMENTOS DE LECTURA DIRECTA

Estos instrumentos se caracterizan porque indican de forma inmediata el resultado de la medición. Su principal ventaja es precisamente la inmediatez con la que se obtiene el resultado de la medición, sin embargo, suelen ser menos precisos que los métodos de toma de muestra. Según el tipo de contaminante puede diferenciarse sistemas para:

- análisis de gases y vapores (monitores e instrumentos colorimétricos).
- sistemas para la medición de aerosoles (instrumentos ópticos y eléctricos).

4.1. Medidores de gases y vapores

Instrumentos colorimétricos: Se basan en el cambio de color que sufre un reactivo específico al reaccionar con un contaminante determinado. La concentración se indica por el cambio de color por comparación con una escala en el propio dispositivo. Existen varios tipos:

- papeles reactivos
- líquidos reactivos
- tubos colorimétricos con reactivos sólidos: son los más comunes, se acoplan a una bomba de aspiración de aire. Aunque la aplicación principal de estos tubos se centra en la obtención de valores de las concentraciones de aire correspondientes a periodos de corta duración, también hay disponibles tubos para su utilización en muestreos de larga duración que permiten obtener concentraciones medias durante la jornada laboral o ciclos de trabajo determinados.

Pueden determinarse más de cien contaminantes diferentes con tubos colorimétricos específicos existentes en el mercado.

Ventajas de los instrumentos colorimétricos:

- rapidez en la respuesta, no necesitan análisis posterior.
- no necesitan calibración.
- simples de usar y de bajo coste.

Inconvenientes de los instrumentos colorimétricos:

- precisión variable.
- pueden sufrir interferencias por otros contaminantes.
- les afecta la temperatura: las bajas temperaturas provocan variaciones de color.

Monitores de gases y vapores: Contienen un sensor que genera una señal instantánea proporcional a la concentración del gas o vapor. Según la naturaleza física de la señal que detectan para la determinación cuantitativa del contaminante pueden ser.

- **Eléctricos:** cuando las propiedades físicas o químicas del contaminante introducen cambios en los parámetros eléctricos de un sensor, de forma que los valores de salida son proporcionales a la concentración del compuesto a medir.
- **Térmicos:** detectan las variaciones en las propiedades térmicas de los compuestos a medir.
- **Electromagnéticos:** la energía electromagnética, en forma de radiación ultravioleta (UV), visible o infrarroja (IR), se absorbe por el medio contaminado a frecuencias características del contaminante y con una intensidad que depende de su concentración.
- **Químio-electromagnéticos:** se basan en el análisis de un gas en el que se produce una reacción química acompañada de una radiación electromagnética, que es la que se mide.
- **Espectroscopios fotoacústicos.** Se basan en la medición de la onda acústica generada por un gas cuando absorbe luz modulada. La longitud de onda de la luz determina de

qué gas se trata, mientras que la magnitud de la absorción, medida como aumento de presión periódica (onda acústica), consecuencia de un aumento presión por aumento de temperatura, medida por un micrófono, es proporcional a la concentración del gas.

La precisión de este tipo de equipos viene determinada por el fabricante, y su utilización exige, por otra parte, calibraciones periódicas por medio de atmósferas o mezclas de gases de composición conocida. Pueden medir concentraciones puntuales, o bien tomar medidas durante un cierto periodo de tiempo.

Ventajas de los monitores de gases y vapores:

- rapidez de respuesta, por lo que están particularmente indicados para conocer la presencia de un compuesto que puede ocasionar daños agudos.
- capacidad para medir concentraciones puntuales.
- no precisar análisis posterior.
- posibilidad de conectar el equipo a una alarma o cualquier otro tipo de indicador o controlador.

Inconvenientes de los monitores de gases y vapores:

- necesitan calibración, normalmente bastante complicada, aunque vengan calibrados por el fabricante, fundamentalmente porque:
 - el elemento sensible puede envejecer, dando otra respuesta diferente a cuando es nuevo.
 - después de determinadas mediciones, cuando la concentración medida ha sido muy elevada, puede haber sobresaturación.
- inespecificidad, ya que no son selectivos para el compuesto para el que están pensados, sino que pueden presentar ciertas interferencias. En general el grado de inespecificidad disminuye de los eléctricos a los quimi-electromagnéticos.

Las principales aplicaciones de los monitores de lectura directa para gases son la determinación de diversos compuestos químicos, entre ellos ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros gases tóxicos o combustibles.

4.2. Medidores de aerosoles

Los medidores de aerosoles constan de un selector de tamaño de partícula, de modo que solo partículas inferiores a cierto tamaño entren en la zona de medición.

Actualmente estos instrumentos permiten medir concentraciones de hasta 10^6 partículas/cm³, 1000 mg/m³, y distribuciones de tamaño de partícula en el rango de los 10 nm a los 20 µm. Los monitores de lectura directa de aerosoles son los instrumentos más utilizados para medir concentraciones de nanomateriales.

Se distinguen cuatro grupos fundamentales, aunque los más utilizados en higiene ocupacional son los monitores ópticos y eléctricos:

Monitores ópticos: miden la extinción o la dispersión de la luz al atravesar las partículas del aerosol un haz de luz. Son sensibles para medir partículas de tamaño de más 100 nm. Los monitores más comunes son los contadores de partículas y los nefelómetros.

Monitores eléctricos: se basan en suministrar una carga eléctrica proporcional al tamaño de la partícula que llega al instrumento para posteriormente medir esa carga cuyo valor es proporcional a la concentración de partículas. Estos instrumentos pueden medir la distribución de tamaño del aerosol y son capaces de medir partículas de menos de 100 nm.

Microbalanza oscilatoria: el instrumento basado en este principio es conocido como TEOM (*Tapered Element Oscillating Microbalance*). Las partículas se capturan continuamente en un filtro montado en la punta de un elemento de vidrio hueco, el cual oscila en un campo eléctrico. La concentración de la masa de las partículas se calcula por medio de una relación calibrada entre la frecuencia de oscilación y la cantidad de partículas, tomando en cuenta el volumen del aire muestreado.

Microbalanza piezoeléctrica: en estos monitores las partículas se capturan por impactación inercial o por precipitación electrostática en la superficie de un disco de cristal de cuarzo piezoeléctrico. El cambio de frecuencia del cristal de muestreo es electrónicamente comparado con un cristal de referencia limpio, generando una señal que es proporcional a la masa recolectada.

4.3. Sensores

El uso de sensores se está incrementado en los últimos años. La transferencia inalámbrica de datos basada en redes de telefonía móvil está mejorando la adopción de esta técnica permitiendo la integración de sensores en distintos lugares de trabajo para producir mapas de exposición.

5. SISTEMAS ACTIVOS DE TOMA DE MUESTRAS

En general el objetivo en higiene es tomar muestras personales para su comparación con el VLEP. Los sistemas que se describen en esta sección son para la toma de muestras personales. Se clasifican en:

Sistema pasivo o muestreo pasivo: estos sistemas no usan bombas de aspiración de aire. El contaminante se difunde hasta el sistema de retención. Por ejemplo, tubos de difusión para BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno).

Sistema activo o muestreo activo: estos sistemas se basan en hacer pasar un volumen de aire contaminado, de manera forzada, a través de un medio de retención en el que queda retenido el contaminante presente en el aire que es posteriormente extraído de dicho medio y analizado para determinar su concentración.

Un sistema activo de toma de muestras está formado por:

- una bomba que aspira el aire con un caudal determinado y que está debidamente calibrada.
- un muestreador con un soporte donde se encuentra el medio de retención del contaminante.
- un captador o medio de retención del contaminante, que dependerá del estado del contaminante (partículas, gases o vapores).

5.1. Bombas de muestreo

Las bombas de muestreo que se utilizan habitualmente para la obtención de muestras son bombas de diafragma o de pistón, accionadas por un motor eléctrico alimentado por baterías. Con el objeto de que puedan tomarse muestras personales, las bombas están diseñadas para que puedan colocarse sobre la persona durante la realización de su trabajo. De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 13137:2022 se pueden establecer dos grupos de bombas para el muestreo personal.

- **Bombas tipo G:** funcionan con caudales normalmente inferiores a 0,3 l/min y se utilizan para el muestreo de gases y vapores.
- **Bombas tipo P:** funcionan con caudales normalmente de hasta 5 l/min y se utilizan para el muestreo de partículas en suspensión en el aire.

Las bombas con caudales superiores a los 5 l/min se suelen utilizar para tomar muestras estáticas, aunque también podrían utilizarse para tomar muestras personales. Su principal inconveniente a la hora de usarlas para muestras personales es el peso.

5.2. Muestreador o soporte de retención

El tipo de muestreador dependerá del estado del contaminante a muestrear (aerosoles, vapores o gases).

5.2.1. Muestreadores para aerosoles

Para la captación de aerosoles se utilizan filtros que se insertan en muestreadores diseñados de forma que simulan la penetración en el tracto respiratorio en función del tamaño de las partículas, en concreto en función de su diámetro aerodinámico. Hay tres fracciones relevantes desde el punto de vista de la salud definidas en la norma UNE-EN 481:1995 *Atmósferas en los puestos de trabajo: Definición de las fracciones por el tamaño de las partículas para la medición de aerosoles*.

La fracción inhalable: fracción másica del aerosol total que se inhala a través de la nariz y la boca.

La fracción respirable: fracción másica de las partículas inhaladas que penetran en las vías respiratorias no ciliadas. Para su captación se usan ciclones.

La fracción torácica: fracción másica de las partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe.

Esta convención se aplica a aerosoles sólidos y líquidos, pero no a fibras como el amianto o los nanotubos de carbono. Cada tipo de polvo se caracteriza por un tamaño de partícula, y para cada fracción hay muestreadores específicos: por ejemplo, la fracción inhalable se captura con muestreadores como IOM, GSP o Button, mientras que para la fracción respirable se usan ciclones como CIP-R o SIMPEDS. Para la fracción torácica, los muestreadores más comunes son CIP-T, GK2.69 y PEM200. Es importante utilizarlos siempre con el caudal recomendado por el fabricante.

5.2.2. Muestreadores para gases y vapores

Para gases y vapores se suelen usar tubos de vidrio que contienen el medio de retención. En el caso de los gases, sobre todo cuando no se conoce el tipo de gas también se suelen usar bolsas inertes.

5.3. Captador o medio de retención

Su misión es retener el contaminante que es transportado en el aire que llega aspirado por la bomba. Los medios de retención que se usan para contaminantes químicos en aire son:

- filtros, que pueden estar impregnados con sustancias que reaccionan con el contaminante para retenerlo.
- soluciones absorbentes (en *impingers* o borboteadores).
- sólidos adsorbentes (generalmente en tubos de vidrio), que pueden estar impregnados (por ejemplo, para captar formaldehído se utilizan tubos de silica gel impregnados con 2,4-dinitrofenilhidracina).

La elección de un tipo de soporte u otro va a depender de:

- estado de agregación del contaminante.
- características químicas del contaminante.
- técnica analítica que se va a emplear para su análisis.

Lo cual vendrá determinado según el método de toma de muestras y análisis correspondiente.

5.3.1. Toma de muestra con filtros

El sistema de captación sobre filtros se basa en hacer pasar un volumen de aire contaminado a través de un filtro. Los poros del elemento filtrante permiten el paso del aire mientras que retienen la materia particulada (polvos, fibras, humos metálicos y nieblas de aceites minerales).

La elección del tipo de filtro (naturaleza del material, diámetro y tamaño de poro) va a depender del contaminante que se vaya a muestrear, el análisis que se vaya a realizar, el muestreador a utilizar y el caudal de la bomba; en el método analítico de cada contaminante se especifica cómo debe ser el filtro. A continuación, se describen las principales características:

- tamaño: de 37 o 25 mm de diámetro.
- porosidad: entre 0,45 y 5 μm .
- naturaleza:
 - fibra de membrana, por ejemplo, los de éster de celulosa: son los elegidos cuando el análisis a realizar requiera la destrucción del filtro. Son los más utilizados para análisis de metales ya que son fácilmente atacables por ácidos y a temperaturas relativamente bajas. Los filtros de membranas de PVC son hidrófobos y se usan cuando el análisis a realizar sea gravimétrico. Se utilizan también en la determinación de sílice por difracción de rayos X.
 - fibra de vidrio: son resistentes a altas temperaturas, no les afecta la humedad y retienen partículas muy finas. Se utilizan para la toma de muestras de humos asfálticos.
 - membranas de teflón: se usan principalmente para muestreo de metales a bajas concentraciones ya que tiene un bajo nivel de contaminación de trazas.
 - membranas de plata: se suelen usar para la captación de materia orgánica.

- membranas de policarbonato: se usan cuando el contaminante se va a analizar por microscopia ya que tienen una superficie plana y uniforme.

5.3.2. Toma de muestra con soluciones absorbentes

Son soluciones de composición específica y determinada, contenida en un frasco borboteador o *impinger*. Al paso del aire, el contaminante queda retenido por disolución o reacción con la disolución absorbente.

Este sistema se solía usar para captar amoníaco o formaldehído, pero su uso ya no es muy común. Se han ido sustituyendo por tubos adsorbentes y hoy en día apenas se usan.

5.3.3. Toma de muestra con sólidos adsorbentes

Se basa en hacer pasar un volumen determinado de aire a través de un tubo, generalmente de vidrio o algún otro material inerte como acero inoxidable, relleno de un material sólido que retiene por adsorción superficial determinados gases o vapores. Posteriormente en el laboratorio es posible **recuperar el contaminante** adsorbido, mediante extracción con disolvente o mediante desorción térmica. El material adsorbente debe satisfacer varios requisitos:

- ser capaz de atrapar pequeñas cantidades del contaminante en el aire y retenerlo hasta su análisis.
- que no ocurran cambios químicos en las sustancias durante el periodo de almacenamiento.
- ser capaz de adsorber los contaminantes de interés en presencia de otros contaminantes.

Este método requiere de un procedimiento de desorción eficaz, mayor del 75% para desorción con disolvente y mayor del 95% para desorción térmica.

Los adsorbentes más utilizados son:

carbones activados. El carbón activo actualmente es el adsorbente más utilizado para la captación de vapores de disolventes si la desorción se va a realizar con disolvente.

polímeros porosos. La gran variedad de estos materiales presenta un amplio grado de selectividad para aplicaciones particulares. Algunos ejemplos son: Tenax GC (se utiliza cuando la desorción va a ser térmica); Chromosorb serie 100; Porapak.

gel de sílice. Se utiliza preferentemente en la captación de metanol, aminas, y derivados nitrados. Tiene como inconveniente principal que las captaciones con este adsorbente se ven afectadas por la humedad ambiental.

El modelo de tubo más corriente es el que dispone de dos secciones de adsorbente, la primera contiene doble cantidad de adsorbente que la segunda. La parte primera o frontal está destinada a retener la muestra, y la segunda o posterior actúa como testigo o control de que la primera sección ha retenido todo el contaminante y no se ha producido saturación o migración. Una de sus características fundamentales es el **volumen de ruptura** que se define para una determinada concentración de un contaminante en aire, como el volumen de aire que puede pasar por el tubo antes de que la concentración de vapor que sale del tubo alcance el 5% de la concentración muestreada.

5.3.4. Toma de muestras en bolsas inertes

En este sistema de captación, el volumen de aire contaminado se recoge directamente mediante una bolsa de naturaleza inerte.

Estas bolsas son generalmente de plástico aluminizadas con una capacidad que varía entre 1 y 5 litros. Disponen de válvula para llenado (normalmente empleando una bomba personal modificada para impulsión), así como de un septum para inyección directa al cromatógrafo de gases.

La principal ventaja es la facilidad de su utilización y los inconvenientes son su uso limitado a gases y vapores (no todos), la sensibilidad, reducida al no concentrarse el contaminante presente en el aire, y la contaminación residual.

6. CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS

Como establece el RSP se debe disponer de un sistema que garantice la calibración de los equipos que se utilizan para la toma de muestras y análisis, así como de un criterio de aceptación o rechazo de los equipos sometidos a calibración. Es importante también tener un plan de mantenimiento de los equipos utilizados.

Uno de los datos imprescindible para calcular la concentración en aire del contaminante muestreado es el volumen de aire muestreado. Este viene determinado por el tiempo de muestreo y el caudal de aspiración del aire. Se distinguen dos tipos de medidores de caudal: primarios y secundarios.

6.1. Medidores de caudal primarios

Son aquellos en los que la medición del caudal se fundamenta en la determinación directa de volúmenes y tiempos. Como las determinaciones de ambas magnitudes se realizan simultáneamente, la determinación del caudal es, a efectos prácticos, independiente de la temperatura y de la presión, cuando todos los elementos se encuentran en las mismas condiciones. Entre los medidores primarios los más utilizados son los de burbuja de jabón y los de pistón.

6.1.1. Medidores de burbuja de jabón

En estos medidores el caudal (ml/ min) se determina midiendo el tiempo que tarda una burbuja de jabón en desplazarse a través de un volumen determinado. Pueden ser manuales o electrónicos.

Manuales: consisten en una bureta graduada cuyo extremo inferior está sumergido en una solución jabonosa, mientras que el extremo superior está conectado a la bomba cuyo caudal se quiere verificar. Se genera una burbuja, y ésta por el efecto de aspiración de la bomba es arrastrada a lo largo de la bureta. Con un cronometro se mide el tiempo que tarda en recorrer una distancia determinada marcada en la bureta y que corresponden a un volumen conocido.

Electrónicos: el fundamento es el mismo que el de la bureta. La diferencia está en que ahora la medición del tiempo se realiza de forma automática. El propio equipo realiza los cálculos y proporciona el valor del caudal. Estos equipos son más cómodos de manejar y transportar.

6.1.2. Medidores secos de pistón

Miden electrónicamente el tiempo que tarda un pistón de baja resistencia al flujo en atravesar un volumen determinado y a partir de este dato calculan el caudal que circula.

6.2. Medidores de caudal secundarios

Los medidores secundarios son menos exactos que los primarios y deben ser calibrados frente a estos. Se distinguen dos tipos.

6.2.1. Rotámetros

Los rotámetros son medidores de caudal de área variable a los que afectan los cambios de temperatura y presión atmosférica. Por ello, sólo se utilizarán como indicadores de caudal y se deben calibrar frente a un medidor primario bajo las mismas condiciones de presión y temperatura en las que se van a utilizar. Si se calibran en condiciones diferentes a las que se van a utilizar, puede ser necesario realizar una corrección matemática del caudal.

Es frecuente que las bombas de muestreo vayan equipadas con este tipo de medidores.

6.2.2. Orificios calibrados

Estos medidores se basan en la medición de la presión diferencial. Si se hace pasar el flujo de aire a través de orificio de sección conocida y se miden las presiones antes y después del paso por este, se puede calcular el caudal aplicando la ecuación de Bernoulli.

6.3. Consideraciones

La verificación de las bombas debe hacerse inmediatamente antes de comenzar el muestreo e inmediatamente después de terminado para comprobar que el caudal de aire aspirado durante el muestreo se ha mantenido constante. Es importante realizar estas verificaciones con el mismo material utilizado durante el muestreo. En el caso de que no se hubiese mantenido constante el caudal, pero la desviación entre los valores inicial y final fuese inferior al 5%, se calculará el caudal medio mediante estos dos valores. Si la variación entre el caudal inicial y el caudal final es superior al 5%, la medición es considerada no válida. Es importante tomar nota de la temperatura y humedad a la que se ha verificado la bomba, ya que el muestreo se debe realizar en condiciones de temperatura y humedad similares.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la **pérdida de carga** generada por el conjunto muestreador – elemento de retención. La pérdida de carga depende de la geometría del muestreador, del caudal del mismo y del elemento de retención y puede influir en el caudal de la bomba (NTP 1168).

6.4. Cálculo de la concentración

La concentración de contaminante muestreado en aire (C) es el cociente entre la masa de contaminante muestreado (M) y el volumen de aire que se ha pasado por el soporte de retención (V) según la siguiente expresión:

$$C = M/V$$

Donde: C es la concentración del contaminante en el ambiente (mg/m³)

M es la masa de contaminante recogida en la muestra (mg)

V es el volumen de aire muestreado (m³)

El volumen de aire muestreado es el producto del caudal al que se ha calibrado la bomba y el tiempo de muestreo:

$$V = Q T$$

Donde: Q es el caudal (m³/ minuto)

T es el tiempo en minutos

7. SISTEMAS PASIVOS DE TOMA DE MUESTRAS

Los sistemas pasivos no usan bombas de aspiración. Estos sistemas se usan para gases y vapores.

Consisten en un tubo abierto por uno de sus extremos y cerrado por el otro. El extremo cerrado contiene el medio de retención. Al abrir el tubo las moléculas del contaminante difunden por el soporte hasta llegar al medio de retención. La cantidad de contaminante que llega a la sustancia absorbente (M) es proporcional a la concentración en el exterior del tubo (C) y al tiempo de duración del proceso, conforme a la Ley de Fick:

$$M = D \frac{A}{L} C t$$

La concentración del contaminante se calcula despejando C de la expresión anterior y ajustando las unidades:

$$C = \frac{M L 10^6}{D A t}$$

Donde: M = masa transferida total, que se determinará analíticamente (mg)

D = coeficiente de difusión, específico para cada gas o vapor, es función de la presión y la temperatura (cm²/segundo)

A = superficie de difusión (cm²)

L = longitud de difusión (cm)

C = concentración del contaminante (mg/m³)

t = tiempo de muestreo (segundos)

Las principales ventajas de los sistemas pasivos de toma de muestras son:

- simplicidad operativa y facilidad en su empleo al no ser necesario las actividades de mantenimiento y calibración de las bombas de aire.
- posibilidad de emplear tiempos de muestreo prolongados. Aunque el tiempo dependerá de la concentración ambiental ya que el sistema de retención se puede saturar si la concentración ambiental es alta y se muestrea durante periodos largos.
- mínima posibilidad de cometer errores personales.
- sostenibilidad al no necesitar de una fuente de energía.

Los principales inconvenientes son:

- necesidad de tener un conocimiento exacto del coeficiente de difusión del contaminante a la temperatura de muestreo y características del captador.
- invariabilidad del caudal de muestreo y su valor relativamente bajo.
- sensibilidad del sistema pasivo ante factores ambientales (humedad, temperaturas elevadas, velocidad del viento, otros contaminantes).

8. TRANSPORTE Y CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS

El transporte y conservación de las muestras deberá realizarse de forma que se garantice la integridad tanto física como química de las mismas ya que si estas se ven afectadas la muestra queda invalidada teniendo que repetirse el muestreo.

El propio método de toma de muestras utilizado debe especificar las condiciones de transporte y conservación como son:

- margen de temperatura adecuado.
- protección de la luz necesaria.
- rango de humedad recomendado.
- tiempo máximo de almacenamiento. Es recomendable que tanto el tiempo de transporte como de almacenamiento antes del análisis sea lo más corto posible.

Las principales precauciones para el transporte y almacenamiento de las muestras son:

- cerrar, precintar y etiquetar las muestras inmediatamente después de su captación.
- colocarlas en contenedores adecuados para su transporte.
- incluir en cada lote "blancos de campo", tratados de la misma forma que la muestras, excepto que no han sido utilizados para recoger aire. De esta forma, se pueden identificar posibles contaminaciones que provengan de la manipulación en campo y durante el transporte.
- evitar exponer las muestras al calor excesivo o a la luz.
- no colocar en el mismo contenedor muestras ambientales y muestras de materias primas o productos.
- no almacenar las muestras, enviarlas inmediatamente al laboratorio por el procedimiento más rápido posible.
- una vez en el laboratorio conservarlas adecuadamente hasta el momento de su análisis.
- no abrir una muestra hasta el momento en que vaya a ser analizada.

9. REPRESENTATIVIDAD DE LAS MEDICIONES

Las mediciones realizadas para evaluar los riesgos por inhalación de agentes químicos deben representar fielmente la exposición que se quiere conocer.

Por lo que deben establecerse unos requisitos mínimos de representatividad de las mediciones.

- 1) Justificando los aspectos relativos a la estrategia de muestreo:** cuando las mediciones se van a comparar con el VLEP se deberá seguir las indicaciones de la norma UNE-EN 689:2019 + AC:2019 "Exposición en el lugar de trabajo. Medición de la exposición por inhalación de agentes químicos. Estrategia para verificar la conformidad con los valores límite de exposición profesional". Los aspectos más importantes son:

- el tipo de medición: preferentemente tienen que ser de tipo personal y si no se puede y deben hacerse mediciones ambientales habrá que justificarlo.

- número y tiempo de duración de las muestras.
- ubicación (en caso de mediciones ambientales).
- número de trabajadores/ras a muestrear.
- número de jornadas durante las que se van a realizar las mediciones.
- tratamiento de datos y posibles conclusiones de valoración.

2) Eligiendo el método de toma de muestra y análisis adecuado. Los métodos a utilizar deberán ser métodos validados que garanticen la obtención de resultados con el grado de fiabilidad requerido. Hay que tener en cuenta la:

- a. selectividad: es el grado de independencia del método frente a las posibles interferencias.
- b. especificidad: es la capacidad de un método para obtener una respuesta debida únicamente al analito de interés y no a otros componentes de la muestra.
- c. sensibilidad: es la capacidad de un método para discernir pequeñas variaciones de la concentración del analito.
- d. límite de detección: es la menor concentración de un analito, que se puede distinguir (o discernir) de una muestra en blanco con una confianza razonable.

La página web del INSST tiene una lista de métodos de toma de muestras y análisis validados por el propio INSST⁵.

3) Estimando la incertidumbre asociada a la medición:

- error asociado a los instrumentos utilizados en la medición.
- error de la técnica analítica.
- indeterminación en el resultado. La medida corresponde a un día y momento determinados, tomada en un trabajador/a concreto pero lo que realmente interesa es saber si la exposición se mantendrá dentro de los límites permitidos no sólo el día de la medición, sino cualquier otro día y en cualquier otro momento. Aunque las tareas sean repetitivas a lo largo del tiempo, siempre existen variaciones de la concentración entre diferentes días, lo cual supone también una indeterminación en el resultado. La forma de cuantificar estas indeterminaciones es mediante la estimación de los llamados límites de confianza superior e inferior. Los límites de confianza de un resultado indican el intervalo de valores entre los que se encuentra el verdadero valor de una magnitud medida experimentalmente con una probabilidad elevada (normalmente se calculan los límites de confianza con un 95% de probabilidad).

10. ESTRATEGIAS DE MUESTREO

La estrategia de muestreo dependerá del motivo por el que se realizan las mediciones. Se puede medir por ejemplo para comprobar la eficacia de las medidas de protección implementadas o

⁵ <https://www.insst.es/contenido-mta-introduccion>

para comprobar que el personal trabajador no está expuesto a concentraciones superiores al VLEP. En este último caso habrá que emplear la estrategia descrita en la norma UNE-EN 689:2019 + AC:2019 Exposición en el lugar de trabajo. Medición de la exposición por inhalación de agentes químicos. Estrategia para verificar la conformidad con los valores límite de exposición profesional.

La estrategia de muestreo tiene como objeto asegurar la representatividad de las mediciones al menor coste posible. A continuación, se exponen los aspectos más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar la estrategia de muestreo.

10.1. Selección de puesto de trabajo y personas a muestrear

En la práctica a veces no es posible medir la exposición en todo el personal trabajador. La existencia de varias personas que realizan tareas similares, con frecuencias parecidas y en condiciones parecidas, permite asumir que todas tienen el mismo perfil de exposición y realizar mediciones sólo a una parte de ellas para ahorrar medios, considerando que la exposición es común a todas. Este grupo de trabajadores/ras se denomina Grupo Homogéneo de Exposición (GHE).

La norma UNE-EN 689:2019 + AC:2019 requiere entre 3 y 5 muestras de trabajadores/ras de un mismo GHE para realizar la comparación con el VLEP.

10.2. Momento y duración de la toma de muestras

La definición de los valores límite incluye el tiempo de referencia para el que están establecidos. La mayoría de las veces el valor límite está definido para un periodo de 8 horas y no debe superarse en ninguna jornada de trabajo. La confirmación de que no se supera el valor límite en ninguna jornada de trabajo exigiría la realización de mediciones de forma continuada. Como este procedimiento es irrealizable en la práctica, se recurre a modelos estadísticos para determinar la probabilidad de superar el valor límite en cualquier jornada de trabajo y se admite que no se superará dicho valor si esta probabilidad es muy pequeña.

En general si no hay diferencias considerables en las tareas que puedan causar diferentes niveles de exposición entre unos días y otros se puede muestrear a todo el personal en un mismo día (dependiendo de la disponibilidad de los equipos). En el caso que si existan diferencias en las tareas se deberá muestrear en los días que se estime que la exposición es más elevada, puesto que la normativa exige que no se supere el valor límite en ninguna jornada. Si en esos días con condiciones más desfavorables no se superan los valores límite se puede concluir que en general no se superan los valores límite.

En el caso de medidas de corta exposición, el momento depende de la duración de las actividades o ciclos de trabajo. Si la exposición se caracteriza por la presencia de picos de concentración, será necesario medir durante los periodos en los que puedan presentarse estos picos.

En cuanto a la duración de la toma de muestras, esta debe ser similar al tiempo de referencia establecido en el valor límite con el que se va a comparar la muestra, normalmente 8 horas o 15 minutos.

La norma UNE-EN 689:2019 + AC:2019 detalla todos los aspectos a tener en cuenta durante la estrategia de muestreo.

11. CONDICIONANTES DE LA TOMA DE MUESTRAS

Las condiciones de la toma de muestras vienen establecidas por el propio método analítico, que define aquellos aspectos relativos al muestreo como son:

- tipo de muestreador.
- soporte de retención.
- caudal de captación.
- volumen de aire a muestrear o tiempo de muestreo.

En la práctica, el método disponible puede presentar diferencias con respecto a las características de la exposición y del criterio de valoración a aplicar. En estos casos puede ser necesario introducir alguna modificación en la toma de muestras. Algunas de estas causas son:

- nivel de concentración ambiental que no permite obtener la cantidad de muestra adecuada para el método disponible o nivel de concentración ambiental muy alto que produce la colmatación del medio de retención y consecuente pérdida de carga de la bomba
- necesidad de determinar distintos contaminantes en una misma toma de muestras.
- presencia de interferencias con otros contaminantes.
- grandes variaciones de concentración en el puesto de trabajo a lo largo del tiempo.
- aplicación a ciclos de trabajo de duración muy diferente a la establecida para el tiempo de muestreo.
- existencia de elevada humedad ambiental que puede condicionar el comportamiento del soporte de retención.

Cuando sea necesario modificar el caudal, volumen de aire muestreado o, lo que es lo mismo el tiempo de muestreo preestablecido, deberá tenerse muy en cuenta algunas de las características específicas del método, como son:

- el límite de detección del método analítico.
- las limitaciones en el equipo de muestreo.
- las limitaciones del soporte de captación.

Cada lote de muestras irá acompañado de los correspondientes blancos. El criterio general aplicado en higiene industrial supone adjuntar un blanco por cada 10 muestras, pero hay métodos de análisis que establecen otro número de blancos.

12. CONTROL DE CALIDAD DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA

La calidad de los resultados que se obtengan con un determinado equipo de medición dependerá, entre otros factores, del buen estado de cada una de sus partes y de su correcto funcionamiento. Los equipos de medida deberán ser conformes con las especificaciones que se indiquen en los métodos de medición y cumplir con los requisitos indicados en las normas que sean de aplicación. Por ello conviene tener un registro con todos los equipos y establecer un sistema de control que asegure:

- su mantenimiento, calibración y verificación de su correcto funcionamiento.
- un diario de su uso, averías y fechas de calibración.

En el caso de los equipos de lectura directa, la calidad de las mediciones también se apoyará en el establecimiento de un plan de mantenimiento y de calibración interno y/o externo adecuado.

La norma UNE-EN 482:2021 especifica los requisitos generales para la determinación de agentes químicos en aire de los lugares de trabajo. Estos requisitos son aplicables a todos los procedimientos de medida de agentes químicos cualquiera que sea la naturaleza química o estado físico del agente (gas, vapor, aerosol) e independientemente del método de toma de muestra o de análisis utilizado. Según se indica en la propia norma, es aplicable a los procedimientos de medida con etapas separadas de toma de muestra y análisis, a todas las etapas del procedimiento de medida, incluyéndose el transporte y el almacenamiento de la muestra y, también, a los equipos de lectura directa.

Las normas específicas incluyen requisitos adicionales para el procedimiento o equipo. Se han desarrollado normas específicas para:

- Muestreadores de aerosoles (UNE-EN 13205:2015).
- Muestreadores por difusión o pasivos para gases y vapores (UNE-EN ISO 23320:2023).
- Muestreadores por aspiración para gases y vapores (ISO 22065:2021).
- Tubos detectores de corta duración (UNE-EN ISO 17621:2016).
- Bombas de muestreo personal y ambiental (UNE-EN ISO 13137:2022).
- Medidas de metales y no metales en aire (UNE-EN ISO 21832:2021).
- Mezclas de partículas y vapores (UNE-EN ISO 23861:2023).

A su vez el laboratorio tendrá establecidos procedimientos de control de la calidad para realizar el seguimiento de la validez de los resultados que obtenga. La Norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 "Requisitos generales relativos a la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración" contiene los requisitos que un laboratorio tiene que cumplir si desea demostrar que es técnicamente competente y que es capaz de producir resultados técnicamente válidos.

El control de la calidad de los equipos de medida debe enmarcarse dentro un sistema general de gestión de la calidad que permita asegurar y demostrar, con la confianza adecuada, el cumplimiento de los requisitos de todos los métodos empleados. Hay que considerar por tanto todas las etapas realizadas en la medición y análisis incluyendo todos los factores (o agentes) humanos y materiales que intervienen en ellas y que, directa o indirectamente, pueden afectar a su calidad.

La necesidad de consideración de todos los factores y etapas implicadas en las mediciones pone de manifiesto la conveniencia de utilizar un marco de referencia amplio para la calidad en las actividades de medición. En este sentido, la norma UNE-EN ISO/CEI 17025 sería la más adecuada. Esta norma es aplicable a todas las organizaciones o laboratorios que realicen cualquier tipo de ensayos (incluido el muestreo) o de calibraciones, independientemente de su tamaño y del alcance de las actividades de ensayo o de calibración y a todas o parte de las actividades contempladas en ella. Tiene por objeto, entre otros, su utilización por los laboratorios en el desarrollo de los sistemas de gestión para sus actividades de la calidad, administrativas o técnicas. Asimismo, puede ser utilizada por los clientes del laboratorio, las autoridades reglamentarias y los organismos de acreditación cuando confirman o reconocen la competencia de los laboratorios.