



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**GUIÓN EXPERIMENTAL PARA EL MUESTREO DE
PARTÍCULAS EN CALDERA (MÉTODO
ISOCINÉTICO)**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA
PERLA EDITH ORDAZ SÁNCHEZ**



MÉXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: María Rafaela Gutiérrez Lara
VOCAL: Néstor Noé López Castillo
SECRETARIO: José Agustín García Reynoso
1er. SUPLENTE: Alfonso Durán Moreno
2° SUPLENTE: Sergio Adrián García González

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

Centro de Ciencias de la Atmósfera

Universidad Nacional Autónoma de México

Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Colonia Copilco

Coyoacán, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México D.F.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. José Agustín García Reynoso

Firma

SUSTENTANTE:

Perla Edith Ordaz Sánchez

Firma



ÍNDICE

	PÁGINA
I. Introducción	1
II. Generalidades	2
a) Contaminantes Atmosféricos	2
b) Emisiones	7
c) Efectos de Contaminantes a la Salud	8
d) Fundamento Legal	16
e) Fundamento Teórico (Teorema de Bernoulli)	17
III. Alcances	22
IV. Metodología	23
a) Objetivo académico del guión	23
b) Objetivo del Guión	24
c) Descripción del Muestreo Isocinético	24
d) Guión Experimental	26
V. Resultados	30
VII. Conclusiones	36
a) Recomendaciones	37
VIII. Apéndices	38
a) Guión Experimental	38
b) Hojas de Campo	68
IX. Referencias	73



I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene el fin de presentar un guión experimental detallado para el muestreo de partículas en chimeneas. La característica más importante del mismo es mostrar las principales variables que afectan el muestreo isocinético y mostrar los parámetros empíricos para cada una de ellas.

Se mencionan brevemente los contaminantes que podemos encontrar durante el proceso y las normas que rigen los niveles máximos permisibles para cada uno, al igual que sus efectos nocivos para la salud.

Este proceso se encuentra normado, por lo que existen documentos que describen, casi en su totalidad, los pasos a seguir para realizar un muestreo isocinético; lo que se pretende con este trabajo es personalizar dicha información para el equipo y condiciones con las que se cuenta actualmente. Existen ciertas condiciones con las que el laboratorio de ingeniería química (LIQ) no cuenta, por lo que se sugieren ciertos cambios para poder llevar a cabo el muestreo en su totalidad.

En este trabajo también se toca el punto del fundamento teórico del Muestreo Isocinético, el Teorema de Bernoulli para ser exactos, con esto se explican los cálculos y las variables que afectan en mayor o menor medida al procedimiento.

Los datos experimentales obtenidos fueron comparados a fin de identificar variables importantes y el modo en el que se comportan los valores de los contaminantes cambiando dichas variables. Estos datos fueron obtenidos en muestreos reales en campo, utilizando el método descrito.



II. Generalidades

a) Contaminantes Atmosféricos

El método de muestreo en chimeneas consta de tres componentes básicos; el método isocinético, la determinación de gases y la determinación de humedad. Los cuales, son utilizados para detectar los niveles de emisión de humo, partículas, monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO₂), bióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) los cuales en niveles elevados pueden resultar muy perjudiciales a la salud. Además de determinar el exceso de aire y el porcentaje de oxígeno (%O₂).

El límite establecido para dichos contaminantes lo establecen las siguientes normas:

- **NOM-085-SEMARNAT-2011** “Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.” La cual establece los límites máximos permisibles de emisión de humo, partículas monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂), y óxidos de nitrógeno (NO_x) de los equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas con el fin de proteger la calidad del aire.
- **NOM-043-SEMARNAT-1993** que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas provenientes de fuentes fijas.

A continuación se describirán brevemente los tipos de contaminantes antes mencionados.



- **Partículas Sólidas**

En contaminación atmosférica se reconoce como partícula a cualquier material sólido o líquido con un diámetro que oscila entre 0.0002 y 500 micrómetros (μm). En conjunto se designan como partículas suspendidas totales (PST).

Las fuentes de emisión de partículas pueden ser naturales o antropogénicas. Entre las fuentes naturales se encuentran: erosión del suelo, material biológico fraccionado, erupciones volcánicas, incendios forestales, entre otras. Las fuentes antropogénicas más comunes son las que se producen en la combustión de productos derivados del petróleo, por la quema en campos agrícolas o en diversos procesos industriales.

- **Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido, poco soluble en agua. Está formado por un átomo de carbono ligado covalentemente a un átomo de oxígeno. Es poco soluble en agua y su densidad es ligeramente menor que la del aire. En la figura 1 se muestra su representación tridimensional y algunas de sus características básicas.

Ficha Técnica	
$\text{C}=\text{O}$ 	
Representación tridimensional	
Nombre IUPAC:	Monóxido de carbono
Nombre común:	Monóxido de carbono
Otros nombres:	Óxido carbónico, óxido de carbono
Fórmula:	CO
Masa molar:	28.0101 g/mol
Apariencia:	Gas incoloro e inoloro

Figura 1. Características básicas y representación tridimensional del CO.



- **Dióxido de carbono (CO₂)**

El dióxido de carbono es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Su importancia radica en que es considerado un gas de efecto invernadero. Forma parte de la composición de la tropósfera (capa de la atmósfera más próxima a la Tierra) actualmente en una proporción de 350 ppm (partes por millón). Su ciclo en la naturaleza está vinculado al del oxígeno. En la figura 2 se muestra su representación tridimensional y algunas de sus características básicas.

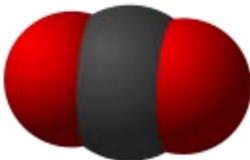
Ficha Técnica	
$O=C=O$	
	
Representación tridimensional	
Nombre IUPAC:	Dióxido de carbono
Nombre común:	Dióxido de carbono
Otros nombres:	Óxido de carbono (IV) Anhídrido carbónico Gas carbónico
Fórmula:	CO ₂
Masa molar:	44.0 g/mol
Apariencia:	Gas incoloro e inoloro

Figura 2. Características básicas y representación tridimensional del CO₂.



- **Bióxido de azufre (SO₂)**

El bióxido de azufre es un compuesto producido durante la oxidación del azufre en presencia de oxígeno. El dióxido de azufre pertenece a la familia de los óxidos de azufre (SO_x = SO₂ + SO₃). Estos gases tienen una gran afinidad con el agua y se disuelven fácilmente. En soluciones acuosas, el dióxido de azufre forma ácidos e interactúa con otros gases y partículas en el aire y suelen formar sulfatos y otros productos que pueden ser peligrosos para el hombre y el medio ambiente.

El azufre se encuentra disponible en materias primas como el petróleo crudo, el carbón, en las menas de algunos minerales como el aluminio, cobre, zinc, hierro y plomo. Los SO_x se forman cuando se queman combustibles que contienen azufre, tales como carbón o aceite, durante el proceso de refinamiento del petróleo para extraer gasolina o cuando los metales son extraídos de las menas. En la figura 3 se muestra su representación tridimensional y algunas de sus características básicas.

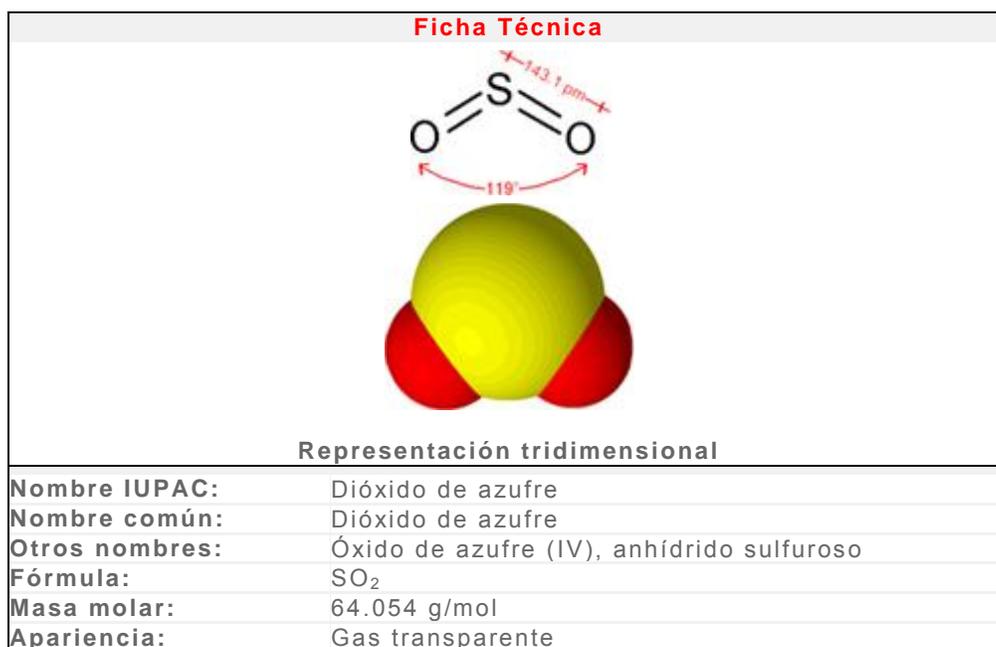


Figura 3. Características básicas y representación tridimensional del SO₂.



- **Óxidos de nitrógeno (NO_x)**

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un compuesto químico formado por un átomo de nitrógeno y dos de oxígeno. Es un gas de color rojo pajizo y tiene un olor irritante. El NO₂ es un gas de particular importancia en la atmósfera, no sólo por sus efectos en la salud, sino también porque absorbe luz visible y contribuye a la disminución de la visibilidad, tiene un resultado directo en el efecto de cambio climático y junto con el óxido nítrico participa en la capacidad oxidativa de la atmósfera controlando la producción de radicales incluyendo el radical hidroxilo y desempeña un papel crítico en la producción de ozono en la tropósfera debido a que la fotólisis del NO₂ es el factor inicial de la formación fotoquímica del ozono en ambientes contaminados y no contaminados; este conjunto de gases en ocasiones es denominado NO_x.

El dióxido de nitrógeno está involucrado en la formación de nuevos contaminantes que contribuyen a la producción de aerosoles ácidos, nitratos, y diversos compuestos orgánicos nitrogenados. En la figura 4 se muestra su representación tridimensional y algunas de sus características básicas.

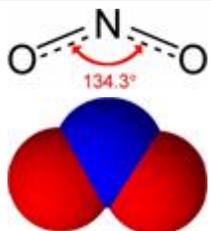
Ficha Técnica	
	
Representación tridimensional	
Nombre IUPAC:	Dióxido de nitrógeno
Nombre común:	Dióxido de nitrógeno
Otros nombres:	Óxido de nitrógeno (IV)
Fórmula:	NO ₂
Masa molar:	46.0055 g/mol
Apariencia:	Gas tóxico de olor irritante, de color café-rojizo

Figura 4. Características básicas y representación tridimensional de los óxidos de nitrógeno (NO_x).



b) Emisiones

Las emisiones al medio ambiente dependerán casi en su totalidad de las características del equipo que se muestrea, así como del combustible que se emplee y las características del mismo y se definen como la masa del compuesto de interés en un periodo de tiempo determinado. De igual modo es importante el proceso al cual pertenezca la chimenea o extractor en el que se realiza el muestreo.

Existen diferentes criterios dependiendo de la zona en donde se realice el muestreo, ya que los límites máximos permisibles varían dependiendo de su ubicación geográfica.

En tabla 1 se especifican dichos criterios:

Tabla 1. Criterio para determinar la zona a la cual pertenece cualquier equipo que se pretenda analizar.

Denominación		Áreas Afectadas
RP	Resto del País (RP)	Para efectos de esta norma oficial mexicana, es toda la extensión territorial nacional excluyendo las Zonas Críticas.
ZC	Zonas Críticas (ZC)	Aquellas en las que por sus condiciones topográficas y meteorológicas se dificulte la dispersión o se registren altas concentraciones de contaminantes a la atmósfera.
	Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)	El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Jalisco: Guadalajara, El Salto, Tlajomulco de Zúñiga, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan.
	Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM)	El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Nuevo León: Apodaca, Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García y Santa Catarina.
	Zona del Valle de	Para efectos de esta norma es el área integrada por las 16 Delegaciones Políticas del Distrito Federal y



México (ZVM)	los siguientes 18 municipios del Estado de México: Atizapán de Zaragoza, Coacalco, Cuautitlán de Romero Rubio, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Chalco Solidaridad, Chimalhuacán, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, San Vicente Chicoloapan, Nicolás Romero, Tecámac, Tlalnepantla y Tultitlán.
Corredor industrial Coatzacoalcos-Minatitlán	Municipios de Coatzacoalcos, Minatitlán, Ixhuatlán del Sureste, Cosoleacaque y Nanchital, en el Estado de Veracruz.
Corredor Irapuato-Celaya-Salamanca	Municipios de Celaya, Irapuato, Salamanca y Villagrán, en el Estado de Guanajuato.
Corredor industrial Tula-Vito-Asasco	Municipios de Tula de Allende, Tepeji de Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan y Apaxco, en los estados de Hidalgo y Estado de México.
Corredor industrial de Tampico-Madero-Altamira	Municipios de Tampico, Altamira y Cd. Madero, en el Estado de Tamaulipas.
N.A.	El Municipio de Ciudad Juárez en el Estado de Chihuahua.
N.A.	El área integrada por los municipios de Tijuana y Rosarito en el Estado de Baja California.

N.A. = *No Aplica*

c) Efectos de Contaminantes a la Salud

- **Partículas Sólidas**

El riesgo a la salud por partículas lo constituyen su concentración en el aire y el tiempo de exposición; sin embargo, el tamaño es la característica física más importante para determinar su toxicidad y efectos en la salud humana.



Las partículas mayores a 10 micrómetros son retenidas básicamente por las vías respiratorias superiores y eliminadas en su mayor parte por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, por lo que no son consideradas significativamente dañinas para la salud, sin embargo, la exposición continua a altas concentraciones puede causar irritación de garganta y mucosas.

Por su parte, las partículas menores a 10 micrómetros (fracción respirable) no son retenidas en las vías respiratorias superiores, cerca de un tercio penetra hasta los pulmones. Su efecto va a depender de su composición química, pero pueden producir irritación de las vías respiratorias, agravar el asma y favorecer las enfermedades cardiovasculares. Se relacionan con la enfermedad de los pulmones negros en mineros, silicosis y asbestosis.

En el corto plazo, la contaminación por este tipo de partículas, puede causar el deterioro de la función respiratoria. En el largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, el cáncer o la muerte prematura. A nivel mundial se han realizado más de 30 estudios de series de tiempo, habiéndose realizado cinco de ellos en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En la mayoría de estos estudios, en el análisis estadístico al controlar por contaminantes gaseosos, la asociación se mantenía o se fortalecía para las partículas, sugiriendo el efecto de esta fracción independientemente de la presencia de los otros contaminantes. Los resultados de los estudios hechos en México muestran una asociación significativa entre partículas y mortalidad total, estimando en conjunto un incremento de la mortalidad diaria de 1.4% por un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones de PM 10 (Evans et al. 2002).

Los grupos de la población con mayor susceptibilidad a los efectos de las partículas son:

- Niños
- Adultos mayores



- Personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares previas
- Fumadores

El riesgo asociado con las partículas que se depositan en pulmones es mayor en comparación con el depósito en garganta. Los estudios recientes demuestran que las $PM_{2.5}$ tienen la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo, incrementando el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura.

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 establece los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación.

Para efectos de esta Norma, se deben tomar como referencia los siguientes valores límite para PM_{10} y $PM_{2.5}$:

Partículas menores a 10 micrómetros PM_{10} :

Límite de 24 horas: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de 24 horas.

Límite anual: $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual.

Partículas menores a 2.5 micrómetros $PM_{2.5}$:

Límite de 24 horas: $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de 24 horas.

Límite anual: $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual.

- **Monóxido de carbono (CO)**

La intoxicación por monóxido de carbono es uno de los tipos de envenenamiento más común en el mundo, tan solo en los Estados Unidos alrededor de 40,000 personas al año requieren de atención médica.



El CO es altamente tóxico para los seres humanos y otras formas de vida aeróbicas, inhalado en pequeñas cantidades puede producir hipoxia, daño neurológico y posiblemente la muerte. Aún en concentraciones pequeñas como de 400 ppm en el aire, el CO puede ser mortal. Una característica peligrosa está relacionada con la carencia de olor, lo cual da lugar a no ser detectado por el olfato del ser humano. Los primeros síntomas del envenenamiento por CO pueden ser mareo y dolor de cabeza, seguidos de inconsciencia, falla respiratoria y muerte.

Lo anterior se explica porque el oxígeno se distribuye en el cuerpo gracias a la hemoglobina de la sangre, la hemoglobina tiene una gran afinidad con el monóxido de carbono más que con el oxígeno, por lo que, en presencia de monóxido de carbono, se inhibe el transporte, liberación y uso de oxígeno que a su vez interfiere con la liberación normal del oxígeno a las células.

Una exposición prolongada al monóxido de carbono puede reducir la cantidad de oxígeno usado por el cerebro hasta el punto en que la víctima queda inconsciente y puede sufrir daño cerebral o muerte por hipoxia. Los efectos del CO se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Efectos del CO expresados en relación a la concentración y el tiempo de exposición.

Concentración de CO	Tiempo de Exposición	Daños a la Salud
35 ppm	6-8 hrs	Dolor de cabeza y mareo.
100 ppm	1-2 hrs	Dolor de cabeza leve.
200 ppm	1-2 hrs	Dolor de cabeza leve.
400 ppm	1-2 hrs	Dolor frontal de cabeza.
800 ppm	45 minutos	Mareo, náuseas y convulsiones.
1600 ppm	20 minutos	Dolor de cabeza, mareo y nausea.
	2 hrs	Muerte.
3200 ppm	5-10 min	Dolor de cabeza, mareo y nausea.
	30 min	Muerte.
6400 ppm	1-2 min	Dolor de cabeza, mareo y nausea.
	<20 min	Muerte.

ppm: Partes por millón.



Las altas concentraciones de CO pueden existir en ciudades con mucho tráfico. Las personas que pasan los días en las calles (conductores de autobuses, camiones y patrullas, inspectores de vehículos, encargados de estacionamientos, peatones y ciclistas, trabajadores que reparan las calles y vendedores ambulantes) respiran más CO. Los conductores de automóviles también están expuestos al CO proveniente de las emisiones de los escapes de los otros autos, y posiblemente de las emisiones de su vehículo o del humo de cigarro. Cuando el automóvil está detenido, los niveles de CO dentro del vehículo pueden incrementarse.

Individuos con enfermedades cardiovasculares o respiratorias, anemia o hemoglobina irregular pueden experimentar efectos de salud más severos o pueden padecer efectos a niveles de exposición más bajos en comparación con individuos menos susceptibles. Los niños pueden ser más vulnerables debido a que sus pulmones no están completamente desarrollados, respiran más rápido y pasan más tiempo al aire libre. En personas sanas la exposición a CO puede afectar la visión o la agilidad mental.

En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993 establece un límite máximo permisible de 11.0 partes por millón (ppm) en un promedio móvil de 8 horas, lo cual no debe excederse más de una vez al año.

Comparativamente con Estados Unidos, el estándar federal establece un valor de 9 ppm para 8 horas y de 35 ppm para el promedio de 1 hora.

- **Dióxido de carbono (CO₂)**

En altas concentraciones el dióxido de carbono puede afectar al inhalarlo, el contacto con el mismo puede irritar y quemar la piel y los ojos. El contacto directo con él en forma líquida o sólida (hielo seco) puede causar congelamiento.



La exposición prolongada al dióxido de carbono en altas concentraciones puede causar dolor de cabeza, mareo y dificultad para respirar, temblores, confusión y tintineo en los oídos. A niveles mayores, la exposición puede causar convulsiones, coma y muerte.

La intoxicación grave puede afectar al cerebro y causar cambios de la personalidad y daños de visión.

- **Dióxido de azufre (SO₂)**

En altas concentraciones el dióxido de azufre puede ocasionar dificultad para respirar, humedad excesiva en las mucosas de las conjuntivas, irritación severa en vías respiratorias y al interior de los pulmones por formación de partículas de ácido sulfúrico, ocasionando vulnerabilidad en las defensas.

El dióxido de azufre es causante de enfermedades respiratorias como bronco constricción, bronquitis y traqueítis, también puede causar broncoespasmos en personas sensibles como los asmáticos, agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares existentes, incluso la muerte. Si bien los efectos señalados dependen en gran medida de la sensibilidad de cada individuo, los grupos de población vulnerables al dióxido de azufre son los niños y adultos mayores, principalmente personas que padecen asma y enfermedades pulmonares crónicas como bronquitis y enfisema.

La combinación de óxidos de azufre y partículas suspendidas actúan sinérgicamente produciendo un efecto combinado mucho más nocivo que el efecto individual. Experimentos realizados en animales expuestos a concentraciones de SO₂ de 9 a 50 partes por millón (ppm), muestran cambios morfológicos y funcionales permanentes similares a los que se presentan con bronquitis crónica.



La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración de 100 a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y de 40 a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual. La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010, “Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO_2). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.” Establece que:

La concentración de dióxido de azufre como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 288 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 0.110 ppm promedio en 24 horas, una vez al año, para protección a la salud de la población.

La concentración de dióxido de azufre como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o 0.025 ppm promedio anual, para protección a la salud de la población.

La concentración del promedio de ocho horas de dióxido de azufre (SO_2), como contaminante atmosférico, debe ser menor o igual a 524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o 0.200 ppm promedio horario para no ser rebasado dos veces al año.

Para los efectos de la norma oficial mexicana NOM-022-SSA1-2010; ppm: Partes por millón (1 ppm SO_2 = 2620 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) a condiciones de referencia 298.16 K de temperatura y 101.3 kPa (kilopascal) de presión.

- **Óxidos de nitrógeno (NO_x)**

El dióxido de nitrógeno está fuertemente relacionado a partículas finas porque proviene de las mismas fuentes de combustión. Diferentes estudios muestran una correlación alta entre el dióxido de nitrógeno, el carbono orgánico y elemental, los ácidos inorgánicos, partículas menores a 2.5 micrómetros y partículas ultra finas, por lo que el dióxido de nitrógeno es un buen indicador de la mezcla gas-partícula que se origina del tráfico vehicular.



De acuerdo a modelos matemáticos, la deposición del dióxido de nitrógeno dentro del tracto respiratorio de roedores (ratas, cuyos y conejos) y de humanos parecen ser similares, pero la información es insuficiente para determinar la respuesta de los tejidos de varias especies a diferentes concentraciones. Con base en lo anterior, los resultados obtenidos en experimentos con animales, permiten conocer los efectos tóxicos potenciales del dióxido de nitrógeno en humanos, pero no se logra deducir las concentraciones que los producen en un nivel confiable.

Estudios clínicos controlados con humanos indican que las personas con asma, representan el grupo más vulnerable a los efectos del dióxido de nitrógeno. Sin embargo, los resultados obtenidos de voluntarios son contradictorios e inciertos y pueden deberse a diferencias en los métodos de análisis, a estudios estadísticos insuficientes y a la susceptibilidad de cada individuo de acuerdo a sus variaciones genéticas.

También se observó que el impacto del dióxido de nitrógeno fue más fuerte en ciudades con climas calurosos, principalmente durante el verano.

En México, la norma oficial mexicana NOM-023-SSA1-1993 establece un límite máximo permisible de 0.210 ppm promedio horario, el cual no debe excederse más de una hora al año.

Comparativamente, en los Estados Unidos el estándar federal establece un valor de 0.053 ppm promedio anual. La Organización Mundial de la Salud recomienda un valor de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.021 ppm) para el promedio anual y de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.106 ppm) para el promedio de una hora.

Para los efectos de la norma oficial mexicana NOM-023-SSA1-1993; ppm: Partes por millón ($1 \text{ ppm NO}_2 = 1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a condiciones de referencia 298.16 K de temperatura y 101.3 kPa (kilopascal) de presión.



d) Fundamento Legal

De acuerdo a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, y al Reglamento correspondiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, todas las empresas de jurisdicción federal deberán de entregar a la Secretaría, una vez al año, un inventario de emisiones.

En México existe un formato que todas las industrias se ven obligadas a entregar año con año, esta es la cedula de operación anual (COA) en donde deben registrarse diversos factores como la emisión de partículas, diagramas de proceso, características de productos y reactivos, entre otras.

La Norma NOM-085-SEMARNAT-2011 establece que para todo equipo de combustión de calentamiento indirecto con combustibles convencionales mayores a 530 MJ por hora es necesario realizar un estudio en el que se midan los niveles de emisión de humo, partículas, monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Lo cual debe de estar reflejado en la cedula de operación anual (COA), este es uno de los motivos por los cuales es importante realizar el muestreo isocinético.

La Norma NOM-043-SEMARNAT-1993 establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas, esta norma se aplica para equipos en los cuales no se realice una combustión, como extractores, secadores, etc.

La Norma NMX-AA-009-1993-SCFI, Contaminación Atmosférica-Fuentes-Fijas Determinación de Flujo de Gases en un Conducto por Medio de Tubo Pitot, esta norma mexicana, establece el método para determinar el flujo de gases en un conducto por medio del tubo Pitot.



La Norma NMX-AA-010-SCFI-2001, Contaminación Atmosférica-Fuentes-Fijas Determinación de Flujo de Gases en un Conducto – Método Isocinético, esta norma mexicana establece el procedimiento para determinar por el método isocinético, la emisión y concentración de partículas totales contenidas en los gases que fluyen por un conducto.

La Norma NMX-AA-054-1978, Contaminación Atmosférica – Determinación del Contenido de Humedad en los Gases que Fluyen por un Conducto – Método Gravimétrico. Esta norma mexicana establece el procedimiento para determinar la humedad contenida en los gases que fluyen por un ducto, esto se basa principalmente en una comparación de pesos, antes y después, es decir por gravimetría.

La Norma NMX-AA-035-1976, Determinación de Bióxido de Carbono (CO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Oxígeno en los Gases de Combustión. Esta norma establece el método para determinar por absorción las proporciones de bióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y oxígeno contenidos en los gases de combustión. Es importante para el muestro isocinético ya que estos datos son fundamentales para calcular el isocinetismo durante el muestreo.

e) Fundamento Teórico

El principio consiste en que la muestra debe tomarse cumpliendo con el requisito de no generar una separación mecánica de los contaminantes con respecto al gas portador, en otras palabras, la toma de la muestra debe realizarse a la misma velocidad en que son transmitidos los contaminantes en el ducto de muestreo; es debido al cumplimiento de este requisito que se le denomina Muestreo Isocinético.



- **Teorema de Bernoulli**

El teorema de Bernoulli es una forma de expresar la aplicación de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos en una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad, es decir:

$$Z + \frac{P}{\rho g_n} + \frac{v^2}{2g_n} = H \text{ (Sistema Internacional)}$$

$$Z + \frac{144 P}{\rho} + \frac{v^2}{2g} = H \text{ (Sistema Inglés)}$$

Dónde:

Z = Altura o elevación potencial sobre el nivel de referencia en metros (ft)

P = Presión manométrica en Newtons por metro cuadrado (Pa) $\left(\frac{lb}{in^2}\right)$

ρ = densidad del fluido en kilogramos por metro cúbico $\left(\frac{lb}{ft^3}\right)$

g_n = Aceleración de la gravedad = 9,81 metros por segundo cuadrado $\left(32.2 \frac{ft}{s^2}\right)$

v = velocidad media del flujo en metros por segundo $\left(\frac{ft}{s}\right)$

H = Altura total expresada en metros de columna del fluido (ft)

Si las pérdidas por fricción se desprecian y no se aporta o se toma ninguna energía del sistema de tuberías (bombas o turbinas), la altura total H en la ecuación anterior permanecerá constante para cualquier punto del fluido. Sin embargo, en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía que deben incluirse en la ecuación de Bernoulli. Por lo tanto, el balance de energía puede escribirse para dos puntos del fluido, según se indica en el ejemplo de la figura 5.

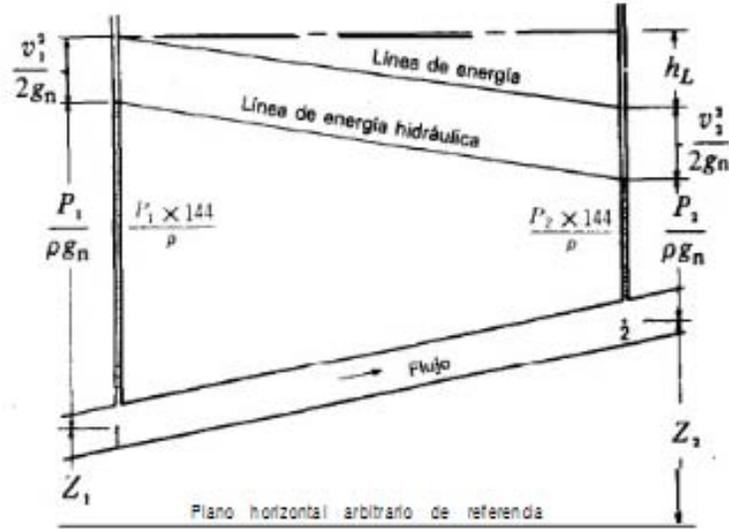


Figura 5. Balance de Energía para dos puntos de un fluido

La pérdida por rozamiento en la tubería desde el punto uno al punto dos (h_L) se expresa como la pérdida de altura en metros de fluido (pies de fluido). La ecuación puede escribirse de la siguiente manera:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g_n} + \frac{v_1^2}{2g_n} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g_n} + \frac{v_2^2}{2g_n} + h_L \text{ (Sistema Internacional)}$$

$$Z_1 + \frac{144 P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{144 P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \text{ (Sistema Inglés)}$$

Dónde:

Z = Altura o elevación potencial sobre el nivel de referencia en metros (ft)

P = Presión manométrica en Newtons por metro cuadrado (Pa) $\left(\frac{lb}{in^2}\right)$

ρ = densidad del fluido en kilogramos por metro cúbico $\left(\frac{lb}{ft^3}\right)$

v = velocidad media del flujo en metros por segundo $\left(\frac{ft}{seg}\right)$

g_n = Aceleración de la gravedad = 9.81 metros por segundo cuadrado $\left(32.2 \frac{ft}{s^2}\right)$

h_L = Pérdida de carga debido al flujo del fluido, en metros de columna del fluido (ft)



Todas las fórmulas prácticas para el flujo de fluidos se derivan del teorema de Bernoulli, con modificaciones para tener en cuenta las pérdidas debidas al rozamiento.

Este teorema es la base teórica para la determinación de la velocidad de un fluido por un ducto mediante la medición de las diferencias de presión.

- **Tubo Pitot**

El fundamento teórico por el cual se utiliza el tubo Pitot-manómetro, es debido a que este es capaz de medir las presiones totales, dinámica y estática del gas en el conducto, las cuales resultan necesarias para poder calcular la velocidad del fluido y junto con el área del ducto poder así calcular el flujo. Ver figura 6.

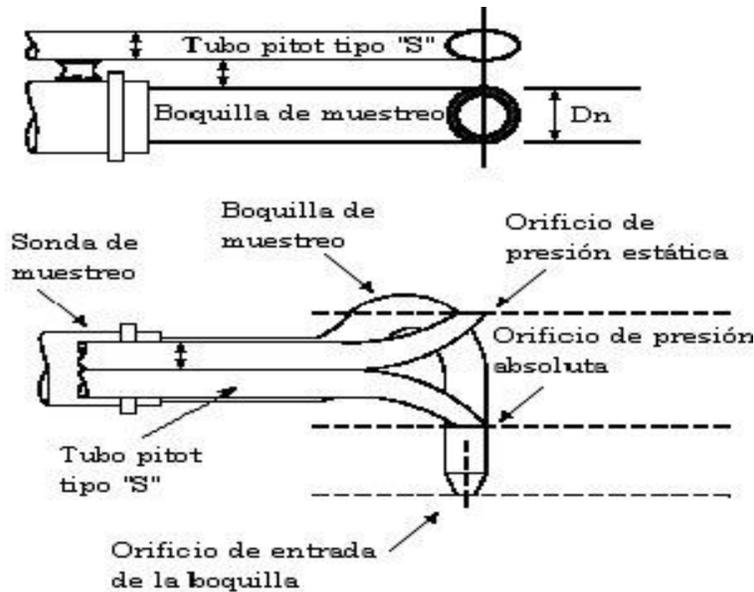


Figura 6. Descripción de los elementos en un tubo Pitot de muestreo.

El flujo de un gas (F) a través de un conducto, es función directa de la velocidad promedio del gas (V) y del área de la sección transversal del conducto (A).

$$F = V * A$$



Dónde:

$$F = \text{Flujo} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$V = \text{Velocidad} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$A = \text{Área} (m^2)$$

Siendo la velocidad (V) función directa de la presión dinámica (ΔP) y la densidad del fluido (ρ).

$$V = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

Dónde:

$$V = \text{Velocidad} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$\Delta P = \text{Presión Dinámica} (Pa)$$

$$\rho = \text{Densidad del Fluido} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$



III. Alcances

Redactar un guión experimental detallado para realizar la experimentación del método Isocinético dentro de un laboratorio. El guión experimental establece todos los pasos a seguir para realizar la experimentación antes mencionada, así como el material a utilizar y las especificaciones del mismo, incluyendo los reactivos y la calidad de los mismos para obtener resultados confiables.

Mediante la experimentación se establecerán las variables que afectan principalmente los resultados del método Isocinético y la importancia de las mismas.

El guión experimental estará basado en las normas mexicanas que atañen al Método Isocinético, donde se mencionan brevemente las variables de dicho método, ya que es posible determinar una serie de contaminantes por dicho procedimiento.

Con respecto a los contaminantes determinados por el método se mencionan los daños a la salud que estos conllevan, así como los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad mexicana con respecto a cada uno de ellos y de este modo se señalará si se encuentran dentro o fuera de norma.

Tener la capacidad de definir claramente los objetivos y el fundamento teórico del muestreo Isocinético, también es de gran importancia poder conservar y reproducir el factor isocinético durante el muestreo.

Observar el comportamiento de los gases de combustión dependiendo de la dimensión de la chimenea y qué tanto afecta esta variable al muestreo.



IV. Metodología

a) Objetivo académico del guión

Este guión tiene como objetivo que los alumnos comprendan en qué consiste el muestreo isocinético y los fundamentos teóricos del mismo, donde se aplica la ley general de los gases, la ley de Dalton y el teorema de Bernoulli.

El procedimiento del método isocinético abarca diversas materias y diversos temas como:

- **Cálculo de humedad:** Termodinámica, ecuación de estado del gas ideal. Protección Ambiental I, determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto, método gravimétrico.
- **Disposición del punto de muestreo:** Transferencia de Momentum, flujo laminar en un ánulo.
- **Porcentajes y equivalencias de contaminantes:** Química General, leyes ponderales y volumétricas.
- **Cálculo del gasto volumétrico y velocidades:** Ingeniería de Fluidos, medidor venturi, medidor de orificio y tubo pitot. Ecuaciones de los medidores de flujo.
- **Normatividad:** Protección Ambiental I, Normas Técnicas Mexicanas para cuantificación de emisiones gaseosas.
- **Determinación de un Flujo de Gases:** Protección Ambiental I, determinación de flujo de gases en un conducto por medio de tubo pitot.
- **Determinación de contaminantes mediante un analizador de gases:** Protección Ambiental I, determinación de bióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.



El guión ayudará a establecer el método para conocer la concentración de contaminantes en un ducto, dependiendo del flujo y de la velocidad de los gases que salgan por el mismo, pero además de ello reforzará, por medio de la práctica, los conocimientos acerca de la manera en la que se comporta un gas en un ducto a cierta velocidad y con determinadas características.

b) Objetivo del Guión

- Identificar la emisión de Partículas en un Conducto.
- Establecer las instrucciones para realizar el monitoreo de partículas sólidas en los conductos donde fluyen gases, por el método isocinético.
- Cumplir con los parámetros de calidad, lo que incluye obtener como valores límite para el isocineticismo puntual de un 90 a un 110%.

c) Descripción del Muestreo Isocinético

Es un Método en el cual se toma la muestra de partículas en suspensión en una corriente de gas para determinar su concentración, de tal modo que la velocidad de muestreo (velocidad y dirección del gas entrando a la tobera o conducto de toma de muestra) sea la misma que la de la corriente gaseosa en el punto de muestreo. Para ello es necesario medir la velocidad del gas.

Un poco más conciso, este método consiste en tomar una muestra de la emisión que permita determinar la concentración de partículas y el flujo del gas portador, con el fin de calcular el flujo másico del contaminante. Este muestreo se realiza con un muestreador de chimenea.

El objetivo del Muestreo Isocinético es tomar una parte proporcional de la corriente dispersada por un ducto, a fin de poder determinar los contaminantes que posee, sin la necesidad de analizar la emisión completa y de esta manera apegarse lo más posible a lo que en realidad esta emite.



El isocinetismo es importante para que la muestra tomada sea realmente representativa, ya que si se realiza erróneamente puede darse el subsocinetismo, que es cuando el flujo del gasómetro es menor al flujo de la chimenea, por lo que no se colecta la misma cantidad de partículas que debería colectarse, también se puede presentar el sobreisocinetismo, que sería el caso contrario, cuando el gasómetro colecta un flujo mayor al de la chimenea, lo que puede provocar que se colecte un mayor número de partículas, como se observa en la Figura 7.

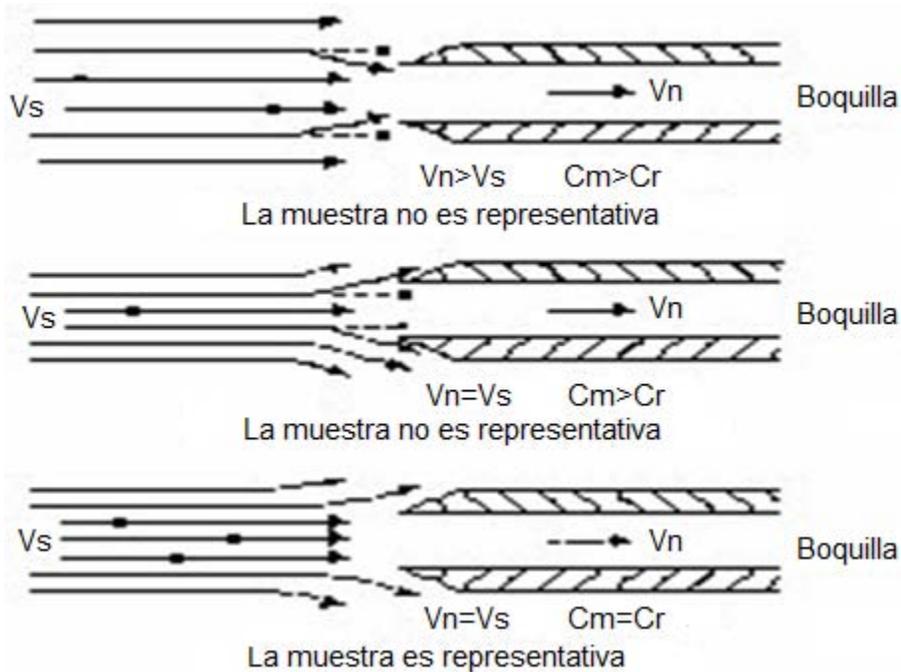


Figura 7. Subisocinetismo (Superior), Sobreisocinetismo (Centro) y Muestreo Isocinético (Inferior).

En la industria este tipo de muestreos son necesarios para dar cumplimiento a la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, Contaminación atmosférica “Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición”, y también resulta indispensable para el llenado de la Cédula de Operación Anual (COA), la cual debe presentarse para los establecimientos que presenten las siguientes condiciones: Considerados fuentes fijas de jurisdicción federal en atmósfera (segundo párrafo del artículo 111 Bis de la Ley General de Equilibrio Ecológico y



Protección al Ambiente), las industrias: química, petróleo y petroquímica, pinturas y tintas, automotriz, celulosa y papel, metalúrgica, vidrio, generación eléctrica, asbesto, cementera y calera y tratamiento de residuos peligrosos y los responsables de fuentes fijas de jurisdicción federal que cuenten con licencia ambiental única o licencia de funcionamiento otorgada por la SEMARNAT.

Es por esto que en algunas empresas se adquiere el equipo para así realizar ellos mismos sus muestreos, si es que lo creen conveniente o se contrata a un laboratorio externo avalado por la EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) para que lo realice.

Además de la detección de partículas suspendidas y gases de combustión, con la misma metodología del muestreo isocinético se pueden detectar una serie muy variada de contaminantes, como neblinas de ácido sulfúrico (H_2SO_4), dióxido y trióxido de azufre e incluso en casos muy especiales material biológico.

d) Guión Experimental

Los muestreos se pueden realizar en cualquier época del año, preferentemente en la temporada de mayor producción de los procesos de la empresa. Esto permite que los muestreos puedan planearse con anticipación, evitando así demoras en cumplimiento por paros de planta, saturación de trabajo de los laboratorios y otros imponderables.

Para obtener una medición representativa de las emisiones de contaminantes en una fuente, se selecciona un sitio de medición en la chimenea en donde la corriente fluye en una dirección conocida. Se divide la sección transversal de la chimenea en un número de áreas iguales; para mayor información acerca de la división de los puntos y el sitio para muestrear en la chimenea, consultar en los apéndices el inciso “a) Guión Experimental”.



Los pasos generales a seguir para realizar el muestreo isocinético son los siguientes (para información detallada consultar en los apéndices el inciso “a) Guión Experimental”):

- Condiciones Previas, todo el material a utilizar debe de encontrarse acondicionado para intentar igualar las condiciones de pesado del inicio con las del final. Se debe verificar que el puerto de muestreo se encuentre debidamente posicionado.
- Datos Iniciales, se toman todos los datos del equipo del cual proviene la emisión, como tipo de combustible utilizado, marca, etc.
- Dimensiones del conducto, se toman todas las dimensiones de la chimenea a muestrear, de modo que se pueda definir el número de puntos a evaluar. En el apéndice 1 se representa a mayor detalle la manera de calcular dicho número.
- Medición de la presión estática, con la consola (gasómetro) aun apagada, se determinan las presiones estáticas y dinámicas de la chimenea.
- Ensamble del tren de muestreo. El cual se muestra en la figura 8.

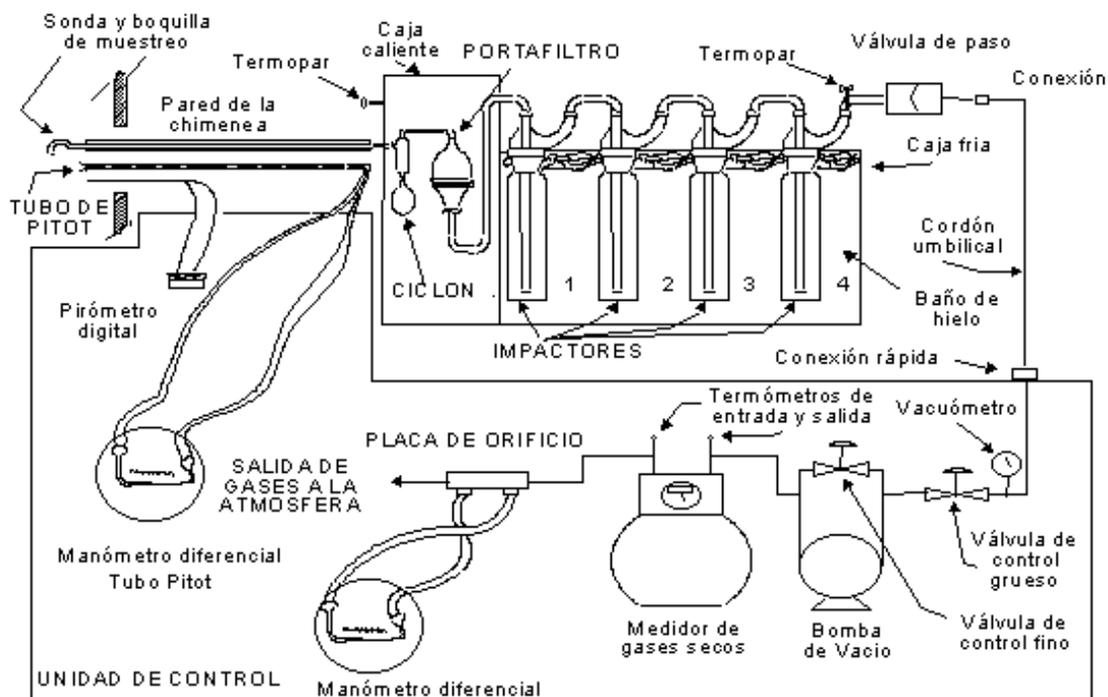


Figura 8. Tren de Muestreo



El tren de muestreo se compone por la Unidad de control o gasómetro en donde se encuentra la bomba de vacío, con la cual controlamos el flujo colectado, además de eso se miden las temperaturas y presiones de todo el proceso.

Una Caja Fría, en donde se localizan cuatro impactores, en un baño de hielo, los cuales contiene agua y sílice, estos deben de pesarse antes y después del muestreo y de este modo, con base en gravimetría será posible calcular la humedad. El baño de hielo es para asegurar de que toda el agua condense en este punto.

Una Caja Caliente, que es la que contiene el portafiltros y por ende el filtro, además de un termopar, esto para evitar que parte del agua del proceso condense en este punto y dañe la muestra colectada.

Una Sonda, la cual se introduce en la chimenea para colectar la muestra, se compone por un tubo Pitot de acero inoxidable, un termopar, un calentador o resistencia y una boquilla, el tamaño de la boquilla dependerá de los cálculos realizados durante el muestreo preliminar. En la figura 9 se muestra una sonda.

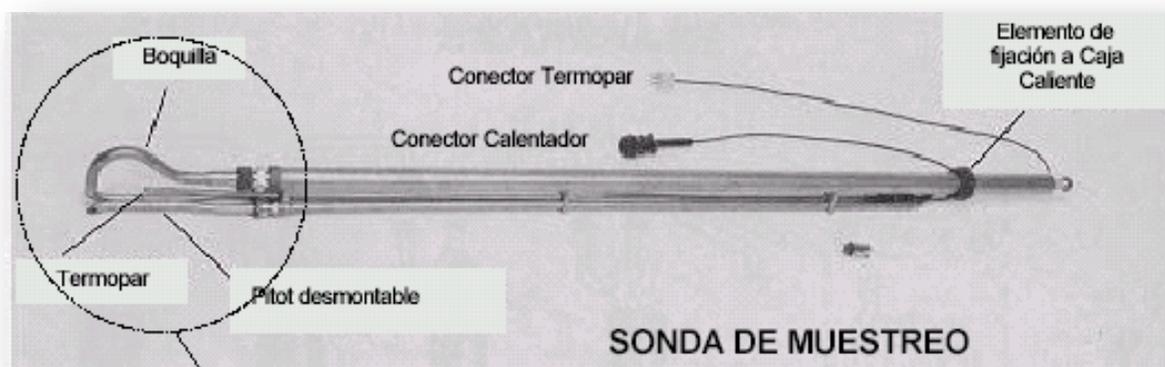


Figura 9. Sonda de Muestreo. Se muestra el tubo de pitot S y la boquilla de muestreo así como también el sensor de temperatura.

El tren de muestreo se coloca según la figura 8, y se debe verificar que no existan infiltraciones, en el apéndice 1 se describe como se realiza este proceso.



- **Muestreo Preliminar:** En este muestreo se obtiene la información básica que debe utilizarse en el muestreo definitivo, por lo que se deben determinar presiones, temperaturas, se calcula el área de la boquilla y el factor K de isocinetismo, que es la constante isocinética, la cual depende de muchas otras variables y es adimensional, en el apéndice 1 se explica detalladamente como obtenerla y como utilizarla durante el muestreo.
- **Primer definitivo:** Para este punto ya se conoce el factor isocinético y el objetivo es manipular el gasómetro a modo que obtengamos valores muy cercanos al 100% de isocinetismo, sin embargo, se tiene un margen de error del 10%.
- **Segundo Definitivo:** Teóricamente los valores obtenidos deben de resultar muy similares a los del primer definitivo, cualquier anomalía con respecto al anterior debe de ser analizada.
- **Análisis:** Se obtiene el peso de los impactores, los cuales pertenecen al tren de muestreo para determinar la humedad, se vuelven a acondicionar los filtros y se determina su peso, al igual que el de los restos de partículas obtenidos por el lavado de la sonda.
- **Cálculos:** Por último se realiza una serie de cálculos para determinar si la chimenea se encuentra dentro o fuera de norma, según las leyes que le apliquen.



V. Resultados

En la tabla 3 se presentan los datos obtenidos en equipos reales los cuales operan en la industria, la capacidad del equipo se tomó directamente de las placas de cada caldera, la temperatura, %O₂, %CO, EA (Exceso de Aire), NO_x y %N fueron obtenidos con un equipo Testo y el %CO₂ es calculado por el mismo equipo.

Tabla 3. Relación de diversas variables de acuerdo al tipo de combustible utilizado.

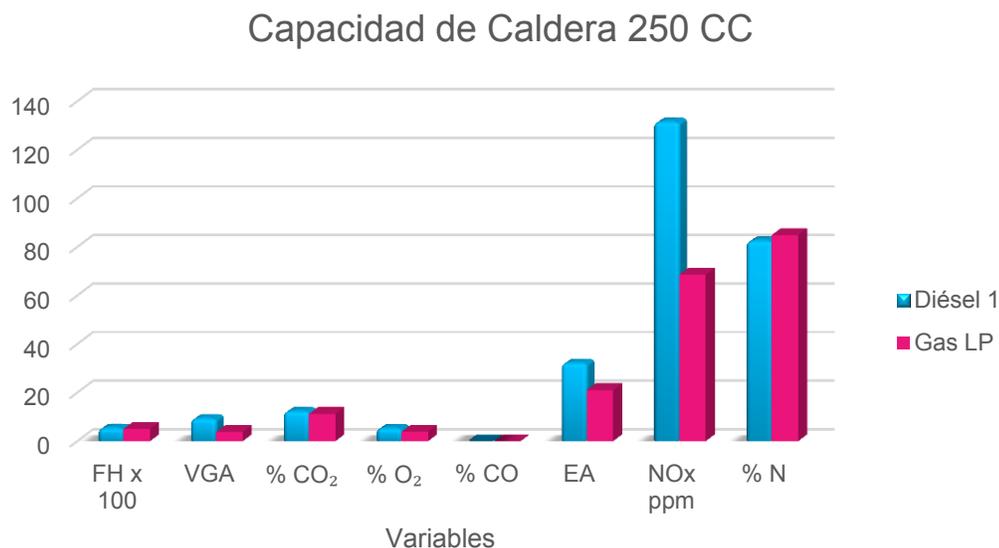
Combustible	Diésel 1	Diésel 2	Gas Natural	Gas LP
Capacidad del Equipo (CC)	250	600	800	250
Temperatura Gases de salida [°F]	332	342	392	378
Fracción Húmeda	0.0534	0.0328	0.0336	0.0509
Velocidad Gases actuales m/s	9.30	19.36	9.41	3.73
% CO ₂	12.26	9.9	9.2	11.2
% O ₂	5.3	3.4	4.7	3.9
% CO	0.0085	0.0179	0.0096	0.0049
EA	32.16	17.39	26.03	21.05
NO _x ppm	131.42	42.32	71.77	68.55
% N	82.44	86.70	86.10	84.90
Partículas	148	275	NA	NA
SO ₂ ppm _v	480	723	NA	NA

CC = Caballo Caldera; **N.A.** = No Aplica; **ppm** = partes por millón; **ppm_v** = partes por millón volumen.

Las gráficas 1 y 2 fueron realizadas con los datos de la tabla 3 y se describe la interacción entre sus variantes.



Gráfica 1. Comparación de resultados de calderas con la misma capacidad pero diferente combustible (250 CC)



FH = Fracción Húmeda; **VGA** = Velocidad de gases actuales m/s

Se pueden observar los factores que dependen directamente del tamaño del equipo y los que dependen del tipo de combustible, aunque hay que resaltar que ambos influyen en mayor o menor medida todos los parámetros.

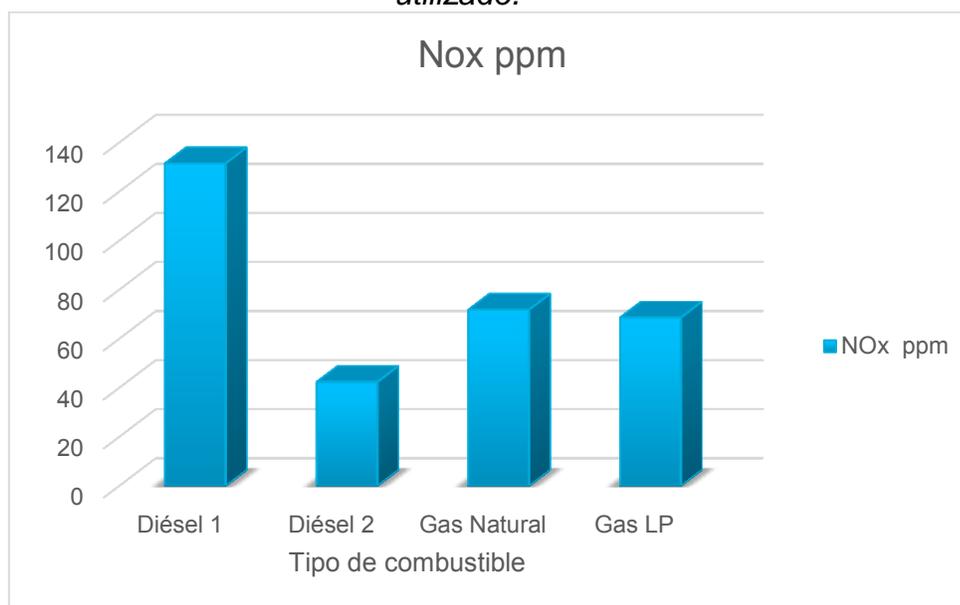
Se observa que tanto la fracción húmeda como la velocidad de los gases resultan ser prácticamente las mismas para ambos combustibles.

Los valores de CO₂, O₂ y CO resultan ser muy similares, sin embargo, estos dependen un poco más del tipo de combustible utilizado, por lo que los valores para el diésel resultan ligeramente mayores a los valores presentados por el Gas LP. Tanto el exceso de aire como el N₂ son parámetros calculados, por lo que dependen directamente de los valores antes mencionados.

Por último podemos ver que los valores de NO_x están muy ligados al tipo de combustible que se utilice y dependerán en mucha menor proporción de la capacidad del equipo.



Gráfica 2 Comparación de ppm de NOx dependiendo del combustible utilizado.



ppm = partes por millón.

En la gráfica 2 se compran los valores de NOx obtenidos en equipos de diferentes proporciones observando de este modo la variación de la concentración dependiendo del tipo de combustible utilizado.

Debido a la composición de cada combustible se pueden deducir las emisiones que respectan a cada uno. La cadena de carbonos del diésel es mucho más larga que la del Gas Natural o la del Gas LP, por lo que naturalmente las emisiones obtenidas serán mayores, sin embargo, en lo que respecta a la segunda medición de diésel (Diésel 2), la emisión es mucho menor lo que puede estar relacionado a la capacidad del equipo en el cual fue obtenido este dato, el primer valor corresponde a un equipo de 250 CC, mientras que el segundo corresponde a uno de 600 CC, por tanto se puede concluir que el valor de NOx no resulta independiente de las proporciones del equipo.

En la tabla 4 se establece si los valores obtenidos se encuentran dentro o fuera de norma de acuerdo a lo establecido anteriormente dentro del fundamento legal, para esta evaluación es necesario conocer la zona a la que pertenece cada



equipo, pues de esto depende si se encuentran fuera o dentro de norma por lo que este parámetro se agrega en la tabla.

Tabla 4. Análisis de resultados con respecto a los LMP estipulados en la NOM-085-SEMARNAT-2011

Combustible	Diesel 1	Diesel 2	Gas Natural	Gas LP
Capacidad del Equipo (CC)	250	600	800	250
NOx ppm	DN	DN	DN	DN
Partículas	FN	DN	NA	NA
SO ₂ ppm _v	DN	DN	NA	NA
Ubicación	ZC	ZVM	ZC	ZVM

NA= No Aplica; FN = Fuera de Norma; DN= Dentro de Norma.

Velocidad de Gases Actuales

La velocidad del gas depende de la capacidad a la que se encuentra trabajando la caldera, es decir, si una caldera alimenta a tres equipos, pero en cierto momento solo dos de ellos se encuentran en operación, la velocidad de los gases que salgan por esa chimenea será menor que cuando se encuentra alimentando tres equipos a la vez.

Otro factor que afecta ligeramente son las dimensiones de la chimenea, ya que si no posee las dimensiones adecuadas para el muestreo puede provocar un flujo turbulento y esto afecta directamente la velocidad del gas, ya que presentaría una variación en cada punto.

Fracción Húmeda

Este factor es muy importante ya que es necesario calcular la humedad para poder así calcular el factor de corrección y poder realizar adecuadamente el muestreo.



Este factor va a depender directamente de la operación de donde provienen los gases en la chimenea, es decir, si se trata de la chimenea de una caldera, esta lleva a cabo un proceso de combustión, por lo que la fracción húmeda será mucho mayor que la de un extractor, por ejemplo.

Porcentaje de Oxígeno (%O₂)

El porcentaje de oxígeno depende directamente de la eficiencia de la caldera, una caldera que está funcionando ineficientemente tendrá altos valores de oxígeno, por tanto, un exceso de aire elevado provoca que el combustible no se queme del todo y parte de este se libere al medio ambiente en forma de contaminantes.

Al adicionar más aire se pierde calor, lo cual hace que se disminuya la eficiencia de transferencia de calor entre la flama y el fluido a calentar.

Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Este contaminante se relaciona directamente al combustible utilizado, la técnica por la cual se miden sus emisiones es infrarrojo no dispersivo y también se ve afectado por la eficiencia de la caldera que se esté muestreando.

Otro contaminante que está directamente relacionado con el tipo de combustible es el dióxido de azufre, muchas veces este se calcula con el porcentaje que el proveedor proporciona, sin embargo, existe una variante del método isocinético para determinarlo.

Exceso de Aire

Anteriormente el exceso de aire se consideraba el factor para determinar si el equipo se encontraba dentro de norma, sin embargo, los parámetros cambiaron a partir del 2011 ya que existen equipos cuyo exceso de aire es adecuado, más



sus emisiones de monóxido de carbono son demasiado elevadas y son estas últimas las que realmente contaminan.

Capacidad del Equipo

La capacidad del equipo, calderas en específico, se determina como MJ/h (Mega Joules por hora) o CC (Caballos Caldera), un CC está definido como la producción de 15.64 Kg/hr (34.5 Lb/hr) de vapor saturado desde 100°C (212°F) y a una presión de una atmósfera, utilizando agua de alimentación (en el tanque de condensados) de la misma temperatura. Esto es igual a la transmisión de calor de 8436.56 Kcal/hr ó 33,479 BTU/hora lo que también se puede expresar en 9.81 kW.

Dada la definición anterior, se sabe que mientras más CC posea un equipo su capacidad energética será mayor al igual que su producción de vapor, por lo que requerirá una mayor cantidad de combustible para que este pueda funcionar adecuadamente, lo que a su vez generará una mayor cantidad de contaminantes, dependiendo del combustible utilizado.



VI. Conclusiones

Gran parte de los equipos que se muestrearon se encuentran en empresas, las cuales a su vez se localizan dentro de complejos industriales, lo que las coloca casi inmediatamente dentro de otro rango permisible de emisión, por considerar la mayor parte de estas zonas como zonas críticas; sin embargo, existe un problema grave y en aumento, ya que estos complejos a pesar de ser pensados para encontrarse relativamente aislados, al ser una gran fuente de trabajo, los terrenos aledaños son poblados con gran rapidez. Pocas veces, la gente que habita estos sitios es verdaderamente consciente del peligro que representa para su familia vivir ahí y se torna en sólo una comodidad por encontrarse cerca del lugar de trabajo.

Se espera que los datos obtenidos y el trabajo realizado con los mismos se utilicen para disminuir el tiempo de trabajo en futuros muestreos, teniendo ciertos parámetros previamente establecidos.

Con los datos obtenidos por la experimentación, algunos procesos se podrían optimizar para disminuir así su nivel de emisión.

Se presentó un método de muestreo basado en la normatividad actual, el cual puede emplearse en el laboratorio de ingeniería química para que los estudiantes que cursen la materia de protección ambiental puedan adquirir conocimiento práctico del uso de este procedimiento.

Se aplicó y se obtuvieron resultados en equipos de operación real donde se obtuvieron los intervalos de las diferentes variables requeridas para el muestreo.



a) Recomendaciones

Se recomienda instalar en el laboratorio un sistema que considere un puerto de muestreo en donde se pueda realizar esta práctica. Puede estar conformado por un tubo de PVC y un extractor, no se podrán realizar las mismas pruebas que en una caldera; sin embargo, resultará bastante útil para practicar el proceso de medición de humedad y el método isocinético.

Los cálculos realizados en este trabajo pueden ser de gran utilidad para dar a conocer tanto las variables como los valores que normalmente se obtienen en equipos reales así como explicar la importancia de este procedimiento en la industria.

También es un ejemplo para que los estudiantes comprendan la importancia de la normatividad y su uso en el ámbito laboral ya que toda empresa se encuentra bajo este régimen, y es un campo laboral bastante amplio por lo que el conocimiento del mismo es una muy buena herramienta.



VIII. Apéndices

a) Guión Experimental

1. OBJETIVO

Establecer las instrucciones para realizar el monitoreo de partículas sólidas en los conductos donde fluyen gases, por el método isocinético.

2. ALCANCE

Se aplica obligatoriamente para las personas físicas o morales responsables de las fuentes fijas de jurisdicción federal y local que utilizan equipos de combustión de calentamiento indirecto con combustibles convencionales o sus mezclas en la industria, comercios y servicios.

No aplica en los siguientes casos: Equipos con capacidad térmica nominal menor a 530 megajoules por hora (≈ 15 CC), equipos domésticos de calefacción y calentamiento de agua, turbinas de gas, equipos auxiliares y equipos de relevo.

Tampoco aplica para el caso en que se utilicen bioenergéticos.

3. RESUMEN

Se determinará la cantidad de partículas que fluyen por un conducto igualando la velocidad de salida de los gases con la velocidad de succión del muestreador universal para que el monitoreo sea isocinético.

4. DEFINICIONES

- Condiciones estándar: Son aquellas en que la temperatura es de 293 K (20°C) y la presión de 101 325 Pa (760 mmHg).
- Condiciones normales: Son aquellas en que la temperatura es de 298 K (25°C) y la presión de 101 325 Pa (760 mmHg).



- Condiciones reales: Son los valores de los parámetros sujetos a medición en un conducto en el momento del muestreo.
- Contenido de humedad en los gases: Es la cantidad de vapor de agua, expresada en por ciento base volumen.
- Humedad relativa: Es la relación del peso de vapor de agua de un metro cúbico de aire y el peso del vapor de agua contenida en un metro cúbico de aire saturado a la misma temperatura y presión.
- Medio filtrante: Sistema de colección (filtros) empleado para la retención de las partículas emitidas por el sistema o proceso monitoreado, los cuales son contruidos de diferentes materiales (ver 4 Reactivos y materiales).
- Muestra representativa: Es una porción de un universo que cumple con todas y cada una de las características y condiciones del mismo.
- Muestreador: Es el conjunto formado por la boquilla muestreadora, portafiltros, medio filtrante y sonda.
- Muestreo isocinético: Es la técnica de tomar una muestra representativa en condiciones reales en un conducto, por medio de la igualación de velocidades, entre la velocidad lineal del flujo y la velocidad de succión en la entrada de la boquilla de la sonda de muestreo.
- Partícula: Fragmentos de materia que se emiten a la atmósfera en fase sólida y/o líquida que sean condensables a la temperatura de filtrado $307.2 \text{ K} \pm 14 \text{ K}$ ($14 \text{ }^\circ\text{C} \pm 120 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Peso Constante: Es el peso registrado con una variación máxima de $\pm 0.002 \text{ g}$ en relación al registro anterior.
- Prueba: Conjunto de mediciones y cálculos necesarios para la determinación de concentración de partículas.
- Punto de prueba: Es cada uno de los puntos de la sección transversal del conducto establecido para el muestreo de partículas.



Simbología y abreviaturas

Símbolo	Descripción	Unidades
A	# Diámetros corriente arriba.	
Ab	Área de boquilla deseada.	m ² o ft ²
Abe	Área de boquilla estándar.	m ² o ft ²
B	# Diámetros corriente abajo.	
C	Cálculo de la constante para determinar el área de boquilla.	
Cb	Consumo de combustible.	
Ccp	Concentración de partículas base seca y condiciones estándares.	mg/m ³
Cp	Concentración de partículas base seca y condiciones normales.	mg/m ³
C _{PE}	Concentración permisible de emisión.	mg/m ³
DI	Diámetro interior o equivalente del conducto.	m o in
Dn	Diámetro de la boquilla estándar.	m o in
E	Emisión en base seca.	kg/hr
Ep	Extensión del puerto.	M, cm o in
Et	Emisión total.	kg/hr
Fc	Factor de calibración del tubo pitot.	adimensional
FCG	Factor de calibración del gasómetro seco. (Es proporcionado por una entidad acreditada para calibrar la consola)	adimensional
Fe	Factor de emisión.	
Fgs	Fracción de gas seco.	
Fh	Fracción húmeda.	
Fhp	Fracción de humedad propuesta.	
G _{CNBS}	Gasto volumétrico a condiciones normales en base seca.	m ³ /seg
Gd	Gasto deseado para el muestreo.	m ³ /seg
Gvc	Gasto volumétrico a condiciones del conducto.	m ³ /seg
K	Constante isocinética	adimensional
KL	Factor de longitud.	



Kp	Constante de conversión para velocidad.	
K1 y K2	Constantes de adimensionamiento.	
Np	Número de puertos.	
Ntpm	Número total de puntos de muestreo.	
Pb	Presión barométrica.	mmHg o inHg
Pc	Presión del conducto.	mmHg o inHg
Pe	Presión estática	mmHg o inHg
Pm	Presión del medidor.	mmHg o inHg
PMH	Peso molecular de los gases húmedos.	g/g mol o lb/lb mol
PMS	Peso molecular base seca.	g/g mol o lb/lb mol
PTAC	Peso total del agua colectada.	g o lb
Ptp	Peso total de partículas.	g o lib
Pv	Presión de vacío.	mmHg o inHg
Ta	Temperatura ambiente.	°K o °R
Tc	Temperatura en el conducto.	°K o °R
Tm	Temperatura del medidor.	°K o °R
tmpp	Tiempo de muestreo por punto.	seg
ttm	Tiempo total de muestreo.	seg
V	velocidad promedio de los gases en el conducto.	m/seg
VCI	Volumen colectado en impactores.	mL o gal
V _{CNBS}	Volumen total a condiciones normales en base seca.	mL o gal
V _{mcs}	Volumen muestreado y corregido por el factor de calibración del gasómetro.	mL o gal
V _{tc}	Volumen muestreado corregido a condiciones de medidor.	mL o gal
V _{TC}	Volumen de agua condensada más el volumen de gas seco.	mL o gal
V _{TCC}	Volumen total a condiciones del conducto.	mL o gal
V _{TCN}	Volumen total corregido por gasómetro y gas seco.	mL o gal



V_{TM}	Volumen total de gas muestreado.	mL o gal
V_m	Volumen muestreado (preliminar)	mL o gal
WA	Peso de partículas en lavado de sonda y accesorios.	g o lb
WF	Peso final del filtro.	g o lb
WI	Peso inicial del filtro.	g o lb
a, b y $\Delta H@$	Constantes de la placa de orificio. (Es proporcionado por una entidad acreditada para calibrar la consola)	
ΔH	Diferencia de presión en la placa de orificio.	
$\overline{\Delta H}$	Promedio de la diferencia de presión en la placa de orificio.	mmHg
ΔP	Presión dinámica en el conducto.	mmHg
$\overline{\sqrt{\Delta P}}$	Promedio de la raíz de la presión dinámica en el conducto.	
in	Pulgadas.	

5. INTERFERENCIAS

- El muestreo debe realizarse durante la operación normal de los equipos de proceso o control.
- Se deben tomar en cuenta la información sobre consumo de combustible, temperatura y presiones de operación, cantidad de material procesado y si el proceso es continuo o discontinuo. Si el proceso es estable deben mantenerse las condiciones de operación durante el tiempo suficiente para que permita llevar a cabo el muestreo preliminar que permita determinar las variables necesarias y realizar dos muestreos definitivos con duración mínima de una hora.
- Si el ciclo es corto o intermitente, es conveniente muestrear durante varios ciclos para obtener una muestra lo suficientemente representativa y disminuir el margen de error.
- Al efectuarse muestreos cerca de precipitadores electrostáticos deben conectarse a tierra todas las sondas.



- En el acondicionamiento del filtro, durante cada pesaje, el filtro no puede dejarse expuesto por más de 2 min a la atmósfera del laboratorio y una humedad relativa mayor al 50 %.
- En caso de que la muestra filtrada pueda volatilizarse o presentar cambio significativo en su composición, el acondicionamiento de filtro se modifica.
- El volumen mínimo a muestrear en condiciones normales debe ser de 0.8466 m³ (30 ft³) corregido a condiciones normales base seca.
- Los puertos de muestreo deben ser por lo menos dos y situados a 90° uno con respecto al otro, y el diámetro del puerto no sea menor a 3 pulgadas para que la sonda de muestreo entre sin dificultad.
- Cuando no se cumple la distancia mínima de ocho diámetros de la última perturbación al puerto de muestreo, se deberán analizar un mayor número de puntos determinados por la gráfica escalonada en las hojas de campo.

6. MATERIALES Y REACTIVOS PARA EL MUESTREO

Reactivos

- Acetona: grado analítico que cumpla con el valor específico de residuo menor o igual a 0.001 % en peso.
- Sílica gel: tipo malla de 6 a 16, previamente secado a 175 °C, durante un mínimo de 2 h.
- Sustancias Refrigerantes: hielo o gel frío.
- Agua destilada: que cumpla con una especificación de 0,001 % como máximo en peso de impurezas. Si es para impactores o para los lavados de sonda de cualquier tipo.

Material

- Filtro: de microfibra de vidrio y/o de cerámica libre de material orgánico no higroscópico, resistente a la corrosión, a la temperatura y a la humedad de los gases. Con una eficiencia mínima de retención del 99.95 %.



- Grasa de silicón: para alto vacío insoluble en acetona y estable al calor.
- Paños de asbesto: para tapar los claros que quedan entre la sonda y la pared del puerto de muestreo.

7. MATERIALES Y REACTIVOS PARA EL ANÁLISIS

No aplica.

8. APARATOS, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS PARA EL MUESTREO

Equipo de muestreo universal para chimeneas, el cual se compone de lo siguiente:

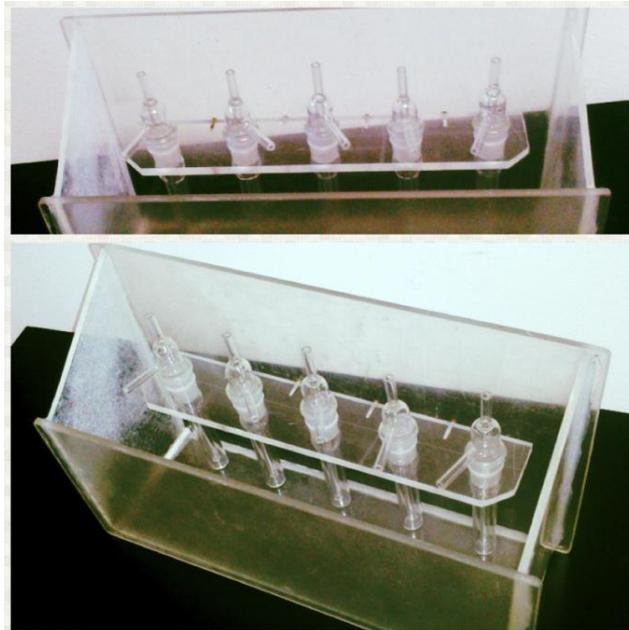
- Sonda de muestreo. Es un tubo de acero inoxidable que se encuentra cubierta por una chaqueta de calentamiento y, esta a su vez, protegida por una funda de acero inoxidable o porta sonda, cuenta con un termopar y el tubo de pitot.



NOTA: Si se utiliza un filtro tipo dedal al inicio de la sonda se puede NO utilizar la caja caliente ya que en este punto, no se tiene condensación.



- Caja fría. También se encuentra cubierta con un aislamiento térmico y es donde se colocan los impactores en baño de hielo para coleccionar la humedad de la muestra. Cuenta con una válvula check que se conecta al último impactor por un lado y al cordón umbilical por el otro; su función es no permitir el flujo al contrario de la toma de muestra.



- Unidad de control. Es una consola que contiene la bomba de vacío, el gasómetro y la placa de orificio. En la carátula cuenta con manómetro inclinado dual donde se mide la presión diferencial de la placa de orificio y la presión en el tubo de pitot, una válvula de control grueso y otra de control fino para controlar el flujo del gas. De la línea de muestreo, el gas fluye a través de una válvula de control de flujo primario (COARSE), de ahí a la bomba de vacío donde el flujo pasa por la válvula de control fino (FINE) cuya función es ajustar el flujo a través del sistema. Posteriormente, el gas pasa por el gasómetro seco donde dos termopares miden la temperatura de entrada y salida del gas y finalmente por la placa de orificio para liberarlo a la atmósfera.



- Cordón Umbilical. Es el elemento que conecta el tren de muestreo con la unidad de control. Contiene la línea por donde circulan los gases, las dos mangueras del tubo de pitot, un termocople múltiple que se conecta a la caja caliente y un conector de corriente eléctrica con control para la resistencia de la caja caliente y la chaqueta de calentamiento de la sonda.
- Caja caliente. Se encuentra cubierta con un aislamiento térmico y es donde se coloca el porta filtro que colecta las partículas contenidas en el gas, por lo que debe de ser capaz de mantener temperaturas por encima de la temperatura de rocío (120 °C). Se compone de una resistencia para el calentamiento de la caja, un termopar en el interior, otro más en el exterior para el último impactor, dos termocoples para los termopares de la sonda y la chaqueta de calentamiento, una extensión de corriente eléctrica para la chaqueta de calentamiento, y los puertos para las conexiones del cordón umbilical.
- Portafiltro.
- Impactores (dependiendo de la muestra a evaluar) y Vidriería para su conexión.



- Analizador de gases.
- Balanza granataria.
- Cronómetro.
- Probeta graduada 500 mL.
- Cajas petri.
- Pinzas para crisol.
- Matraces Erlenmeyer con tapón esmerilado de 250 y 500 mL.
- Boquillas de acero inoxidable de 1/2 , 1/4, 3/16, 5/8.
- Extensiones eléctricas.
- Regulador de voltaje 127 volts.
- Multímetro.
- Cinta métrica flexible.
- Transportador o medidor angular.
- Piceta 1 L.
- Estufa capaz de mantener 300 °C.

9. APARATOS, INSTRUMENTOS Y EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS

- Balanza analítica.
- Desecador.
- Termohigrómetro.
- Equipo y material para destilación.

10. PATRONES DE REFERENCIA

Criterios de aceptación o rechazo

El procedimiento es aplicable para velocidades de gases superiores a 3 m/s (9.84 ft/s) en promedio, y conductos con diámetro interior iguales o mayores a 10 cm (3.94 in).



Si existen infiltraciones, el gasto de infiltración no debe exceder a 0.00057 m³/min (0.02 ft³/min) o al 4 % del promedio del flujo total de muestreo (cualquier valor obtenido menor a éste debe ser anotado) si se presentan resultados mayores a este valor, la prueba debe ser invalidada, por lo que debe localizar y corregir las infiltraciones y realizar otra prueba. En caso de no pasar la prueba una segunda vez el muestreo se inválida y éstas deben de corregir.

11. MÉTODOS Y/O PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO

Condiciones previas

- Acondicionar los filtros y los matraces Erlenmeyer a peso constante en el laboratorio e identificarlos.
- Verificar que la chimenea o conducto cuente con plataforma y puertos de muestreo de acuerdo a lo establecido por la NOM-AA-09-1993-SCFI o con la infraestructura para acceder y operar en el lugar del muestreo.
- Comprobar con el multímetro que la corriente eléctrica donde conectará la unidad de control sea de 110 – 120 volts.
- Utilizar el regulador de voltaje entre la consola y el eliminador de corriente.

Datos iniciales

- 1) Determinar la presión barométrica del lugar en donde se localiza la chimenea y establecer si se trata de una zona crítica o del resto del país.
- 2) Tomar todos los datos del equipo del cual provenga la emisión a evaluar como: marca, modelo, No. de serie, capacidad, tipo de combustible utilizado, tipo de emisión, etc. Y registrar todo en la hoja de campo.

Dimensiones del conducto

- 1) Medir el diámetro interno (ductos circulares, fig. A1) o calcular el diámetro equivalente (ductos rectangulares, fig. A2), según sea el caso.



- 2) Medir las distancias desde el centro del puerto de muestreo hasta donde termina el ducto corriente arriba (L1), desde el centro del puerto de muestreo hasta la última perturbación corriente abajo (L2) y la extensión del puerto (Ep) considerando el ancho de la pared del ducto (Fig. A3).

- 3) Calcular el número de diámetros corriente arriba (A) y el número de diámetros corriente abajo (B).

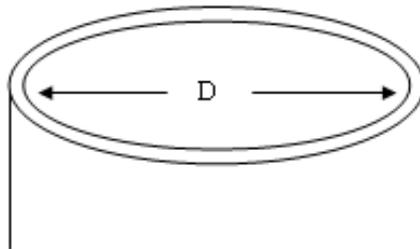


Figura A1. Ducto circular

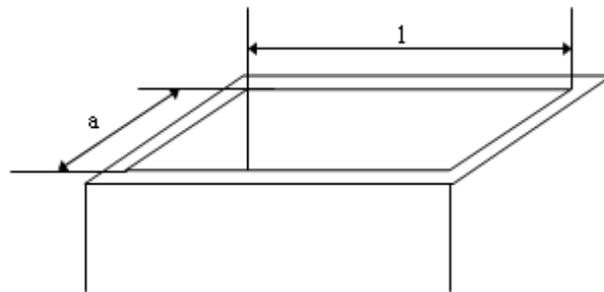


Figura A2. Ducto no circular

Diámetro equivalente para ductos rectangulares

$$D = \frac{a \times l}{2(a + l)}$$

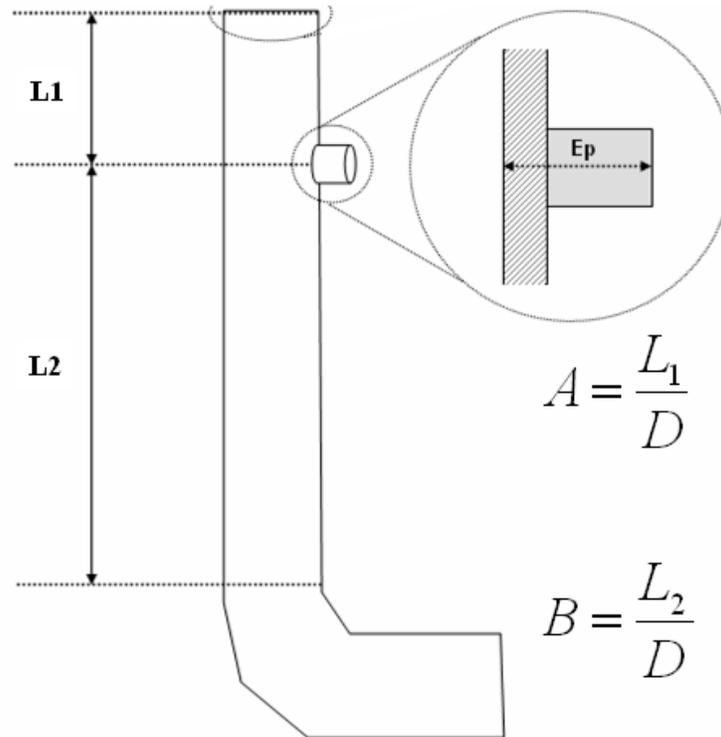


Figura A3. Dimensiones del ducto.

Dónde:

A=Número de diámetros corriente arriba.

L_1 =Distancia de la mitad del puerto hasta la primer perturbación en dirección del flujo de la chimenea.

B= Número de diámetros corriente abajo.

L_2 = Distancia de la mitad del puerto hasta la primer perturbación en dirección contraria del flujo de la chimenea.

D=Diámetro equivalente.



Determinación del número de puntos de muestreo

1) Para ductos circulares con diámetro mayor o igual 30 cm:

- Determinar el número de puntos para A y para B con ayuda de la gráfica escalonada (Gráfica 1): Trazar una línea perpendicular y determinar el número mínimo de puntos para cada uno. El número de puntos a muestrear estará determinado por el mayor de ellos.
- Dividir el número de puntos a muestrear entre el número de puertos para determinar el número de puntos por puerto.
- Con el número de puntos por puerto, localizar la columna a utilizar en la tabla 1 y calcular la distancia que tendrá cada punto multiplicando el factor KL de la tabla por el diámetro interno del ducto y después sumándole la extensión del puerto.
- Marcar las distancias en la sonda tomando como referencia la parte central de la boquilla.
- El punto más cercano a la pared del ducto deberá estar ubicado a no menos de 2.5 cm de la misma.

2) Para ductos circulares con diámetro menor a 30 cm:

- El muestreo debe hacerse en dos niveles con un solo puerto por nivel y deberá respetarse siempre la relación de 8 diámetros corriente abajo y dos diámetros corriente arriba para cada nivel (fig. A5).
- En el primer nivel se toma la muestra con la sonda y en el segundo nivel se mide la presión dinámica con el tubo de pitot.
- Para ductos mayores o iguales a 20 cm y menores a 30 cm de diámetro interno se deberán muestrear 12 puntos por sección.
- Para ductos mayores o iguales a 10 cm y menores a 20 cm de diámetro interno se deberán muestrear 8 puntos por sección.



- Seleccionar la columna a utilizar en la tabla 2 y determinar las distancias que tendrá cada punto multiplicando el factor de la tabla por el diámetro interno del ducto y después sumándole la extensión del puerto.
- Marcar las distancias en la sonda tomando como referencia la parte central de la boquilla.
- El punto más cercano a la pared del ducto deberá estar ubicado a no menos de 1.3 cm de la misma.

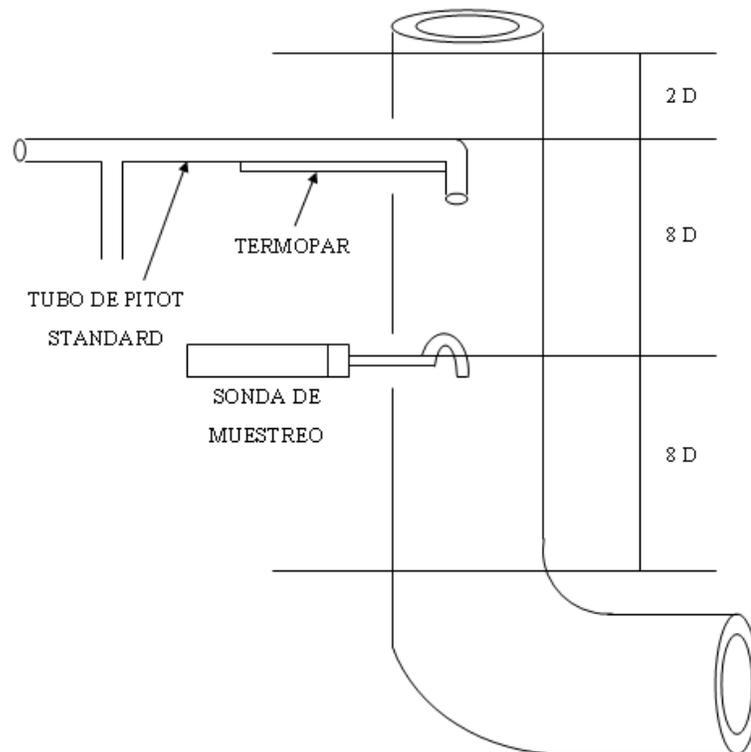


Figura A4. Disposición de tubo de Pitot y sonda de muestreo (para ductos de 10 a 30 cm).

- 3) Para ductos rectangulares con diámetro equivalente mayor o igual 30 cm:
- Determinar el número de puntos para A y para B con ayuda de la gráfica escalonada (Gráfica 1, hojas de campo): Trazar una línea perpendicular y determinar el número mínimo de puntos para cada uno. El número de puntos a muestrear estará determinado por el mayor de ellos.



- Dividir el número de puntos a muestrear entre el número de puertos para determinar el número de puntos por puerto y elaborar la matriz. En caso de que el resultado de la división no sea un número entero se tomará al número entero superior inmediato.
- Determinar la distancia de los puntos de muestreo de la siguiente manera:

$$P_1 = Ep + (0.5 \times W)$$

$$P_2 = P_1 + W$$

⋮

$$P_n = P_{n-1} + W$$

Dónde:

Ep = Extensión del Puerto

n = número de puntos por ducto

W = longitud del centroide = largo o ancho del ducto / n

- Marcar las distancias en la sonda tomando como referencia la parte central de la boquilla.
- El punto más cercano a la pared del ducto deberá estar ubicado a no menos de 2.5 cm de la misma.

4) Para ductos rectangulares con diámetro equivalentes menor a 30 cm:

- El muestreo debe hacerse en dos niveles y deberá respetarse siempre la relación de 8 diámetros corriente abajo y dos diámetros corriente arriba para cada nivel.
- Para conductos de diámetro equivalente mayor o igual a 20 cm y menor a 30 cm se deberá contar, de acuerdo a la NMX-AA-009-SCFI-1993, con tres puertos de muestreo de 4 cm por nivel, y se muestrearán tres puntos por puerto en cada nivel (Fig. A5).
- Para conductos de diámetro equivalente mayor o igual a 10 cm y menor a 20 cm se deberá contar, de acuerdo a la NMX-AA-009-SCFI-1993, con dos



puertos de muestreo de 4 cm por nivel, y se muestrearán cuatro puntos por puerto en cada nivel (Fig. A5).

- Las distancias se determinan de igual manera que en el inciso anterior.
- Marcar las distancias en la sonda tomando como referencia la parte central de la boquilla.
- El punto más cercano a la pared del ducto deberá estar ubicado a no menos de 1.3 cm de la misma.

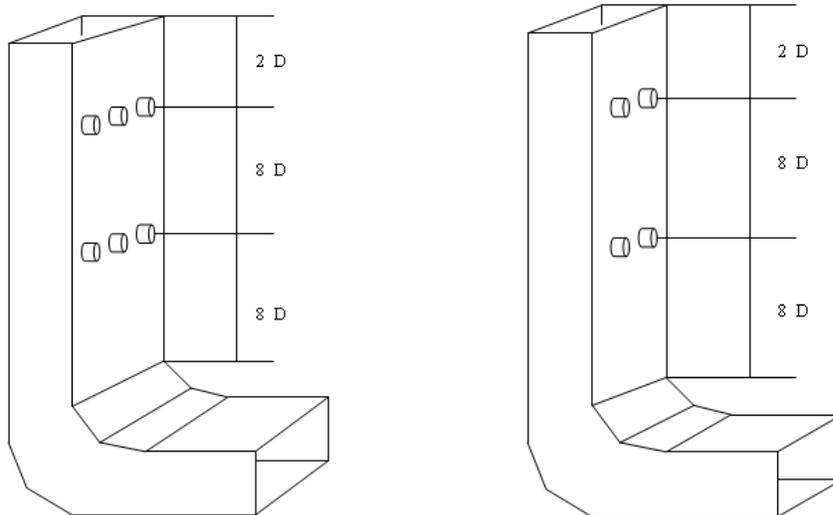


Figura A5. Arreglo para ductos rectangulares de 20 a 30 cm (izq) y de 10 a 20 cm (der) de diámetro equivalente.

Medición de la presión estática

- 1) Marcar las distancias de cada punto en la línea del tubo de pitot tomando como referencia la parte central de la boquilla.
- 2) Conectar solo una manguera del cordón umbilical a la línea del tubo de pitot y las dos mangueras del cordón umbilical en la unidad de control.
- 3) Introducir el tubo de pitot hasta el primer punto a muestrear con las boquillas en posición horizontal, perpendicular al flujo de los gases.
- 4) Anotar la caída de presión registrada en una columna de presión estática en el punto o los puntos más representativos.



Ensamble del tren de muestreo

- 1) Revisar las condiciones de los 4 impactores antes del ensamble.
- 2) Agregar 100 mL de agua destilada en el 1er impactor con difusor de plato y determinar su peso inicial utilizando la balanza granataria.
- 3) Pesar el 2° Impactor con difusor recto vacío.
- 4) Colocar 200 g de sílica gel con indicador de humedad en el 3° y 4° impactor con difusor recto y pesar.
- 5) Anotar los pesos de los impactores en la hoja de campo correspondiente.
- 6) Colocar los impactores ya pesados en la caja fría y conectarlos con las uniones de vidrio en “U”. Aplicar grasa de silicón en cada una de las uniones o cinta teflón y fijar con las pinzas para evitar infiltraciones. Cuidar que se conecten correctamente los impactores (la salida de un impactor con la entrada del siguiente).
- 7) Instalar la válvula check a la caja fría y conectarla al último impactor. Aplicar grasa de silicón o cinta teflón en la unión y fijar con la pinza para evitar infiltraciones.
- 8) Agregar hielo en la caja fría.
- 9) Ensamblar la caja fría con la caja caliente. Conectar el termopar que viene de la caja caliente a la parte superior de la válvula check.
- 10) Colocar el filtro en el portafiltro, instalarlo en la caja caliente y conectarlo al primer impactor con la unión de vidrio “S”. Aplicar grasa de silicón o cinta teflón en la unión y fijar con las pinzas para evitar infiltraciones.
- 11) Instalar la sonda en la caja caliente y conectarla al portafiltro utilizando la unión de vidrio “L”. Aplicar grasa de silicón o cinta teflón en la unión y fijar con las pinzas para evitar infiltraciones. Conectar el termocople que viene de la caja caliente al termopar de la sonda.
- 12) Conectar el cordón umbilical al tren de muestreo: las mangueras del tubo de pitot, la conexión con control de la resistencia a la caja caliente, la conexión de los termopares, de la caja caliente y del último impactor, y el conector de acero inoxidable a la salida de la válvula check.



- 13) Conectar el cordón umbilical a la unidad de control: las mangueras del tubo de pitot, la línea de conducción del gas y el termocople múltiple en las conexiones correspondientes.

Dado que el sistema se maneja a una presión de vacío o negativa, la válvula check evita que haya un regreso de los gases hacia los impactores, en caso que esto ocurra, el muestreo deberá ser invalidado.

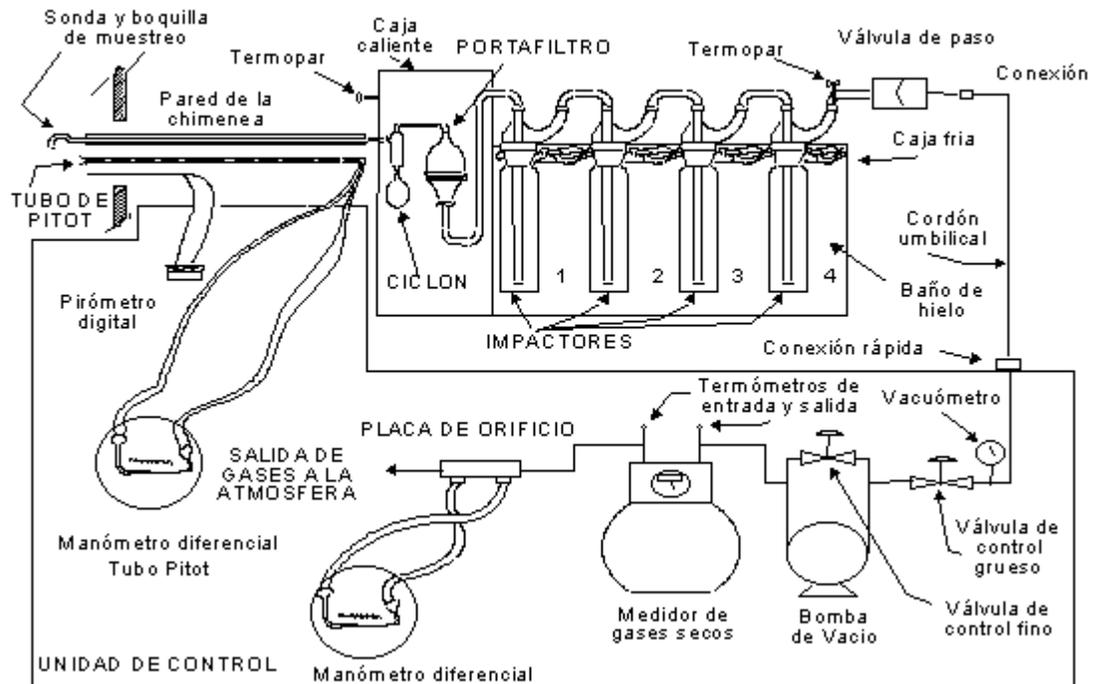


Figura A6. Diagrama del tren de muestreo.

Conexiones de la consola

- Abrir la válvula de control grueso.
- Cerrar la válvula de control fino.
- Conectar las mangueras del manómetro inclinado siguiendo la secuencia indicada el uno con el uno, el dos con el dos y así sucesivamente.



- Colocar la burbuja de nivel del manómetro inclinado en la posición central ya que de lo contrario se pueden tener errores en la lectura de las caídas de presión, para ello se utiliza el tornillo sujetador que se encuentra en la parte interior del mismo, se afloja, se traslada la burbuja al centro del nivel y se aprieta el tornillo.
- Verificar que el recipiente del aceite de la bomba de vacío esté lleno, de lo contrario agregar el faltante. Este debe ser especial para bombas de vacío.

Operación del muestreador universal de chimeneas

- Encender el equipo poniendo el interruptor de POWER en posición ON.
- Colocar el botón de encendido del manómetro en posición de operación ON.
- Encender el interruptor de calentamiento de la sonda (PROBE HEAT) y caja caliente (OVEN HEAT). La temperatura de cada uno debe estar por arriba del punto de condensación del vapor (aproximadamente 250 °F)
- Encender la bomba de vacío poniendo el interruptor VACUM PUMP en posición ON.
- Colocar las columnas del manómetro en ceros con la ayuda de las perillas situadas en la parte interior, aflojando o apretando hasta lograr que el nivel del aceite de las columnas se sitúen en cero.

Prueba de infiltraciones

- Utilizar un tapón o una cubierta de plástico en la punta de la sonda para evitar el paso del aire. Mantener el tapón hasta que la prueba termine.
- Abrir la válvula COARSE CONTROL lentamente hasta que la presión del vacuómetro sea de 12 inHg.
- Girar la válvula FINE CONTROL hasta que el vacuómetro marque 15 inHg.
- Observar el gasómetro, la infiltración máxima permitida es de 0.02 ft³/min a 15 inHg.



- Si las infiltraciones exceden los 0.02 ft³/min localizar la infiltración removiendo progresivamente los componentes desde la unidad de control hasta terminar en la punta de la sonda y eliminarla sellando con grasa de silicón o cinta teflón.
- Una vez eliminada toda infiltración relevar lentamente la presión en la bomba de vacío antes de apagarla.
- Apagar la bomba de vacío.
- Cerrar las válvulas COARSE CONTROL Y FINE CONTROL hasta que se inicie el muestreo.

Muestreo preliminar

- 1) Realizar el análisis de la composición de los gases en el conducto, al inicio, a la mitad y al final del muestreo.
- 2) Medir la presión estática en los puntos de muestreo más representativos (a la mitad de la chimenea) y registrar el promedio. Asegurándose de que la burbuja del manómetro se encuentre alineada y ambos manómetros estén calibrados a cero.
- 3) Montar el tren de muestreo en el riel e instalar la boquilla de ½ “.
- 4) Realizar prueba de infiltraciones hasta eliminarlas, en caso de que existieran.
- 5) Introducir la sonda hasta el primer punto. Si la temperatura de los gases en el conducto son muy altas (arriba de 170 °F), el primer punto será el que se encuentra más alejado del puerto.
- 6) El tiempo de muestreo en cada punto se determina dividiendo 30 minutos entre el número total de puntos a muestrear.
- 7) Encender la bomba de vacío y luego ajustar el ΔH a 1.0 inH₂O con la válvula FINE CONTROL. Lo cual nos asegura que aproximadamente obtendremos un flujo de 0.75 ft³/min límite establecido en la NMX-AA-010-SCFI-2001.
- 8) Realizar, enseguida del ajuste, los registros requeridos para cada punto (hora, lectura del gasómetro, presión diferencial, presión de vacío de la



- bomba y las siguientes temperaturas: ducto o chimenea, sonda, caja caliente, salida de los impactores y entrada y salida del gasómetro).
- 9) Mover la sonda al siguiente punto cuando ha transcurrido el tiempo del punto anterior.
 - 10) Ajustar el ΔH a 1.0 inH₂O en cada punto hasta terminar todos los puntos del puerto y realizar los registros requeridos para cada punto.
 - 11) Desmontar la caja fría y la sonda de la caja caliente para montar el tren de muestreo en el riel del siguiente puerto. Realizar prueba de infiltraciones una vez montado el tren de muestreo hasta eliminarlas o que no excedan de 0.02 ft³/min, en caso de que existan.
 - 12) Introducir la sonda hasta el primer punto a muestrear. Si la temperatura de los gases en el conducto son muy altas (arriba de 170 °F), el primer punto será el más alejado del puerto.
 - 13) Repetir las instrucciones indicadas en los incisos del 7 al 11
 - 14) Diez segundos antes de terminar la corrida preliminar, recorrer el tren de muestreo hasta sacar la boquilla del conducto. Una vez realizado esto, apagar las resistencias de calentamiento y la bomba justo a los 30 minutos de la corrida preliminar.
 - 15) Desmontar la caja fría: desconectar la unión en S, la conexión de transición de acero inoxidable y cada unión en U.
 - 16) Pesar cada uno de los impactores de la misma manera que lo hizo antes de iniciar el muestreo.
 - 17) Registrar los pesos en la bitácora.
 - 18) Desmontar la sonda y la parte superior del portafiltro.
 - 19) Guardar el filtro para después pesarlo.
 - 20) Lavar la sonda, la boquilla y la parte superior del portafiltro con acetona hasta que el líquido de lavado sea totalmente claro, transferir el líquido a un frasco de vidrio, taparlo y etiquetarlo.
 - 21) Realizar los cálculos pertinentes para la obtención del diámetro de la boquilla y de la constante K, (descritos al final del documento).



Primer definitivo

- Realizar el análisis de la composición de los gases en el conducto, al inicio, a la mitad y al final del muestreo.
- Medir la presión estática en los puntos de muestreo más representativos (a la mitad de la chimenea) y registrar el promedio.
- Instalar la boquilla con el diámetro nominal más cercano al calculado.
- Colocar un filtro nuevo.
- Preparar los impactores de la misma manera que se hace para el preliminar.
- Ensamblar el tren de muestreo y realizar prueba de infiltraciones. Eliminarlas, en caso de que existieran.
- El tiempo de los muestreos definitivos son de 60 minutos. Por lo tanto, el tiempo de muestreo en cada punto se determina dividiendo 60 minutos entre el número total de puntos a muestrear.
- Encender la bomba de vacío.
- Realizar rápidamente los registros requeridos para cada punto (hora, lectura del gasómetro, presión diferencial, presión de vacío de la bomba y las siguientes temperaturas: ducto o chimenea, sonda, caja caliente, salida de los impactores y entrada y salida del gasómetro).
- Ajustar inmediatamente el ΔH que se reporta en los cálculos preeliminares.
- Mover la sonda al siguiente punto cuando ha transcurrido el tiempo del punto anterior.
- Repetir lo indicado en los incisos 9, 10 y 11 del muestreo preliminar hasta terminar todos los puntos del primer puerto.
- Desmontar la caja fría y la sonda de la caja caliente para montar el tren de muestreo en el riel del siguiente puerto. Realizar prueba de infiltraciones una vez montado el tren de muestreo hasta eliminarlas o que no excedan de $0.02 \text{ ft}^3/\text{min}$, en caso de que existan.
- Repetir lo indicado en los incisos 8 al 11 de los pasos a seguir para el muestreo preliminar.



- Diez segundos antes de terminar el muestreo, recorrer el tren de muestreo hasta sacar la boquilla del conducto. Una vez realizado esto, apagar las resistencias de calentamiento y la bomba justo a los 30 minutos de la corrida preliminar.
- Realizar prueba de infiltraciones.
- Desmontar la caja fría: desconectar la unión en S, la conexión de transición de acero inoxidable y cada unión en U.
- Pesar cada uno de los impactores de la misma manera que lo hizo antes de iniciar el muestreo.
- Registrar los pesos en la bitácora.
- Desmontar la sonda y la parte superior del portafiltro.
- Guardar el filtro para después pesarlo.
- Lavar la sonda, la boquilla y la parte superior del portafiltro con acetona hasta que el líquido de lavado sea totalmente claro, transferir el líquido a un frasco de vidrio, taparlo y etiquetarlo. Registrar en las hojas de campo el número de frasco utilizado.

Segundo definitivo

- El segundo muestreo definitivo se realiza de la misma manera que el primer muestreo definitivo.

12. Análisis

Pesos de los filtros

- 1) Secar los filtros en la estufa a una temperatura de 100 °C durante 60 min.
- 2) Pasar posteriormente los filtros al desecador por tiempo de una hora o hasta que se encuentren a temperatura ambiente.
- 3) Pesar cada filtro y registrar su peso en la bitácora técnica. Volver a guardar los filtros al desecador después de cada pesada.
- 4) Pesar los filtros nuevamente, después de una hora de haber estado en el desecador hasta obtener peso constante.



5) Registrar en las hojas de campo el valor de la última pesada.

13. Frascos con solución de lavado y blanco

- 1) Evaporar la solución de lavado en baño maría hasta sequedad evitando la ebullición.
- 2) Pasar los frascos a la estufa por tiempo de una hora.
- 3) Dejar enfriar los frascos en el desecador una hora o hasta que se encuentren a temperatura ambiente.
- 4) Pesar los frascos y registrar su peso en la bitácora técnica. Volver a guardar los filtros al desecador después de cada pesada.
- 5) Pesar los frascos nuevamente, después de una hora de haber estado en el desecador hasta obtener peso constante.
- 6) Registrar en las hojas de campo el valor de la última pesada.

14. Cálculos

Relación de Fórmulas

- Temperatura del gasómetro.

$$T_m [^{\circ}R] = T_m [^{\circ}F] + 460$$

- Temperatura de la chimenea o ducto.

$$T_{ch} [^{\circ}R] = T_{ch} [^{\circ}F] + 460$$

- Presión del gasómetro.

$$P_m [inHg] = P_b + \frac{\Delta H [inH_2O]}{13.6}$$



- Presión de la chimenea o ducto.

$$P_{ch} [inHg] = P_b + \frac{P_e [inH_2O]}{13.6}$$

- Volumen muestreado.

$$V_m [ft^3] = F.C.G. \times (V_f - V_i) - Inf$$

- Volumen muestreado en condiciones normales.

$$V_{mStd} [ft^3] = V_m \times \frac{P_m}{29.92 inHg} \times \frac{537^\circ R}{T_m}$$

- Volumen de humedad muestreado a condiciones normales.

$$V_{wStd} [ft^3] = 0.04715 \frac{ft^3}{g} \times (W_f - W_i)$$

- Fracción húmeda y seca.

$$F_h = \frac{V_{wStd}}{V_{mStd} + V_{wStd}}$$

$$F_s = 1 - F_h$$

- Porcentaje en volumen de nitrógeno.

$$\% N_2 = 100 - \left(\% O_2 + \% CO_2 + \frac{ppm CO}{10,000} \right)$$



- Peso molecular base húmeda y base seca.

$$PM_s \left[\frac{lb}{lbmol} \right] = (0.44 \times \%CO_2) + (0.32 \times \%O_2) + \left[0.28 \times \left(\frac{ppmCO}{10,000} + \%N_2 \right) \right]$$

$$PM_h \left[\frac{lb}{lbmol} \right] = (18 \times F_h) + (PM_s \times F_s)$$

- Cálculo de la velocidad promedio de los gases en la chimenea o ducto.

$$V_g \left[\frac{ft}{s} \right] = 85.49 \times F.C.P. \times \sqrt{\frac{T_{ch}}{PM_h \left[\frac{lb}{lbmol} \right] \times P_{ch} \left[inHg \right]}} \times \sqrt{\Delta P}$$

- Cálculo de C (velocidad en *ft/min* a condiciones normales). Exceso.

$$C \left[\frac{ft}{min} \right] = V_g \left[\frac{ft}{s} \right] \times 60 \frac{s}{min} \times F_s \times \frac{P_{ch}}{29.92 inHg} \times \frac{537^\circ R}{T_{ch}}$$

- Área de la boquilla.

$$A_b \left[ft^2 \right] = \frac{0.75 \frac{ft^3}{min}}{C}$$

- Diámetro de la boquilla.

$$D_b \left[in \right] = \sqrt{\left(\frac{144 \times A_b}{0.785} \right)}$$

- Constante isocinética K.

$$K = 849.8 \times (F.C.P.)^2 \times D_n^4 \times F_s^2 \times \Delta H_{@} \times \frac{PM_s}{PM_h} \times \frac{T_m}{T_{ch}} \times \frac{P_{ch}}{P_m}$$



- Porcentaje de isocinetismo puntual.

$$\dot{I} = \frac{\dot{T}_{ch} \times \dot{V}_{mStd} \times P_{std} \times 100}{T_{std} \times \dot{v}_g \times t \times A_b \times \dot{P}_{ch} \times F_s \times 60}$$

- Área del ducto.

$$A_{ch} [ft^2] = \frac{\pi}{4} \times (D[m])^2 \times 10.764 \frac{ft^2}{m^2}$$

- Gasto volumétrico del gas.

$$Q = 60 \times v_g \times A_{ch}$$

- Gasto volumétrico en base seca a condiciones normales.

$$Q_{std} = Q \times \frac{537^\circ R}{T_{ch}} \times \frac{P_{ch}}{29.92 inHg}$$

- Isocinetismo global.

$$I = 100 \frac{T_{ch} V_m P_{std}}{T_{std} \cdot t \cdot v_g \cdot A_b \cdot 60 \cdot P_{ch} \cdot F_s}$$

- Concentración de partículas.

$$Cp = \frac{PCM}{V_{mStd}}$$



- Emisión de partículas a la atmósfera.

$$Ep \left[\frac{kg}{h} \right] = Cp \times Q_{std} \times 6 \times 10^{-5}$$

- Límite máximo permisible NOM-043-SEMARNAT-1993.

- Zonas Críticas

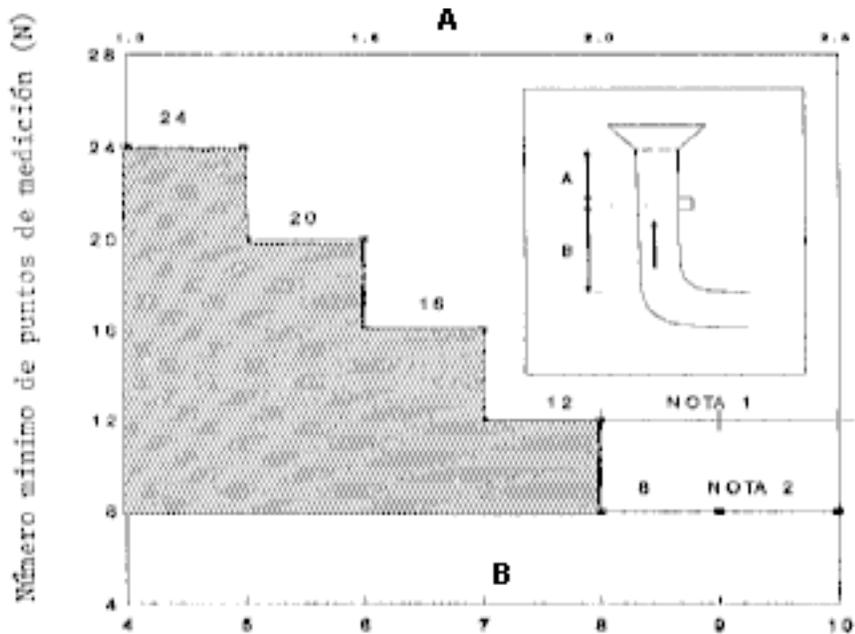
$$E_{LMP} = \frac{3020}{Q_{std}^{0.42}}$$

- Resto del País

$$E_{LMP} = \frac{4529.7}{Q_{std}^{0.42}}$$

El exceso de aire es calculado con la siguiente ecuación, la cual corresponde al por ciento en volumen de oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno, respectivamente contenidos en los gases de combustión en base seca:

$$EA = (\%O_2 * 0.5 * CO) * 100 / (0.264 * N_2 - \%O_2 + 0.5 * CO)$$



Número de diámetros del conducto en el sentido del flujo.

Figura A7. Determinación de número de puntos de muestreo.

Tabla A1. Factores de Longitud

No. De Pto. Trans.	Factores de Longitud, K_L (Fracción del diámetro del Conducto) NÚMERO DE PUNTOS TRANSVERSALES EN UN DIÁMETRO											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
	1	0.148	0.067	0.044	0.033	0.025	0.021	0.018	0.016	0.014	0.013	0.011
2	0.854	0.250	0.147	0.105	0.082	0.067	0.057	0.048	0.044	0.038	0.035	0.032
3		0.750	0.295	0.194	0.146	0.118	0.099	0.085	0.075	0.067	0.060	0.055
4		0.933	0.705	0.323	0.226	0.127	0.146	0.125	0.109	0.097	0.087	0.078
5			0.853	0.677	0.342	0.250	0.201	0.165	0.146	0.129	0.116	0.105
6			0.956	0.806	0.658	0.355	0.269	0.220	0.186	0.165	0.146	0.132
7				0.895	0.774	0.645	0.366	0.263	0.236	0.204	0.180	0.161
8				0.967	0.854	0.750	0.634	0.375	0.296	0.250	0.218	0.194
9					0.918	0.823	0.731	0.625	0.362	0.306	0.281	0.230
10					0.975	0.882	0.788	0.717	0.618	0.380	0.315	0.272
11						0.833	0.854	0.760	0.704	0.612	0.393	0.323
12						0.979	0.901	0.831	0.764	0.694	0.507	0.388



b) Hojas de Campo

HOJAS DE CAMPO ELECTRONICAS (1-2)

Razón social :		Fecha :	
Dirección :		Operador :	
Equipo :	Combustible: Diesel	No. de proyecto:	
Capacidad:	Cp:		No. de Filtro:
Longitud y Tipo de Sonda: ACERO, INOX, DE 3 FT	Adim.		Temp. Amb. : °C
DH Medidor 2.2258	Flujo Inf.: ft3/min	Presión Barométrica : inHg	FGS 1.0269
No. de puntos :	Diam. de Chim.: mt		
Hora inicial : Hrs.	Hora Final : Hrs.	Tiempo total : min.	Vol. Mues. ft3

No. de Punto	Presión Dinámica (DP) In H2O	Raíz (DP) In H2O	Presión Estática Pe in H2O	Temp. de Chimenea °C
1		0.000		
2		0.000		
3		0.000		
4		0.000		
5		0.000		
6		0.000		
7		0.000		
8		0.000		
9		0.000		
10		0.000		
11		0.000		
12		0.000		
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
Suma	0.00	0.000	0.0	0.0
Prom.	0.00	0.000	0.00	0.0

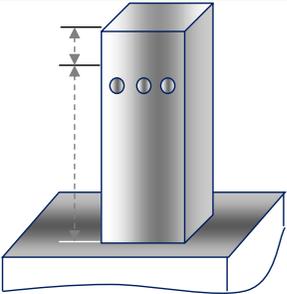
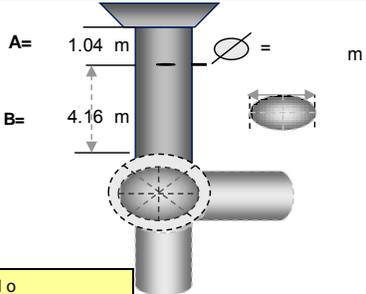
COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN (% VOLUMEN).

COMPONENTE	MUESTRA			
	1	2	3	PROMEDIO
%CO2				0.0
%O2				0.0
%CO				0.0000
%N2	100.0	100.0	100.0	100.0

EA = ((%O2)-(0.5 * %CO) * 100) / (0.264 * % N2 - (%O2) + (0.5 * %CO))



RAZÓN SOCIAL : 0 _____
 DIRECCIÓN : _____ 0 _____
 EQUIPO : 0 _____

Cuadrada o Rectangular		Circular		X	
					
		Diámetro nominal o			
No. Puertos		equivalente(m)		No. Puertos:	
No. de puertos utiles		Ext. del puerto de muestreo (cm):		Puntos por eje:	
L=	m	Número de puntos totales:			
B _i =	m	Distancia A (m):	1.04	# Diametros A:	#¡DIV0!
No. puntos por eje		Distancia B (m):	4.16	# Diametros B:	#¡DIV0!

DATOS DEL MUESTREO

IMPACTOR	DIFUSOR	SOLUCION	PESO INICIAL	PESO FINAL	W GANADO
1	PLATO	AGUA			0.0
2	RECTO	VACIO			0.0
3	RECTO	SILICA			0.0
4	RECTO	SILICA			0.0
TOTAL (gr.)					0
%HUMEDAD					0.00

GASOMETRO

TEMPERATURA °C

LECTURA	ENTRADA	SALIDA	VACIO
1			
2			
3			
SUMA	0	0	0
PROMEDIO	0.0	0.0	0

TM= 0.0



MEMORIA DE CALCULO Y GRAFICAS - MUESTREOS DE Nox

RAZON SOCIAL : 0 _____
 DIRECCION : 0 _____
 EQUIPO : 0 _____

PUNTOS DE MUESTREO		
No. De Puntos	Factor de Longitud	Longitud x Punto (cm)
1	0.956	0.00
2	0.853	0.00
3	0.705	0.00
4	0.295	0.00
5	0.147	0.00
6	0.044	0.00
7	0.956	0.00
8	0.853	0.00
9	0.705	0.00
10	0.295	0.00
11	0.147	0.00
12	0.044	0.00

DATOS	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	VALOR.
Dich	Diámetro de la Chimenea.	m.	0
N	Número de Puntos.		0
Vh	Volumen de Humedad Colectada.	ml.	0.0
Vm	Volumen de Gas Muestreado.	ft ³	0.00
Ttm	Tiempo Total del Muestreo.	min.	0
Tm	Temperatura del medidor	°F	32.0
Tg	Temperatura de los Gases en la Chimenea.	° F	32.0
Pb	Presión Barométrica.	Plg. Hg.	0
Pep	Presión Estática Promedio.	Plg. H2O	0.00
DPdp	Diferencial de Presión Dinámica Promedio.	Plg. H2O	0.0000
Hg	Contenido de humedad en el gas	%	0.0
FCG	Factor de Corrección del Gasómetro.	Adimensional	1.0269
Hc	Humdad Colectada	gr	0.00
Ftp	Factor del Tubo de Pitot.	Adimensional	0
Finf	Flujo de infiltracion	ft ³ /min	0.000



INGENIERIA
y SINTESIS, S.A. de C.V.

EQUIPO : _____ 0 _____

**CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD, PESO MOLECULAR,
VELOCIDAD DE LOS GASES, GASTO VOLUMETRICO, CONCENTRACIÓN Y EMISIÓN.**

1.- Obtención de datos	
$T_m = T_{mp} + 460$	
$T_m =$	492.00 ° R
$T_{ch} = T_g + 460$	
$T_{ch} =$	492.00 ° R
$P_m = D_{Hm} / 13.6 + P_b$	
$P_m =$	0.164 Plg. Hg.
$P_{ch} = P_{ep} / 13.6 + P_b$	
$P_{ch} =$	0.00 Plg. Hg.
$V_{tc} = (V_m * FCG) - (F_{in} * T_m)$	
$V_{tc} =$	0.00 ft ³

4. Velocidad de los Gases.	
$vg = 85.48 * FCTP * ((T_{ch}/P_{mt} * P_{ch})^{0.5}) * DPdp^{0.5}$	
$vg =$	0.000 ft/seg.
$vg =$	0.0000 m/seg.
$V_{gn} = 17.95 * V_c * (P_b + D_{Hp} / 13.6) / (T_m + 460)$	
$V_{gn} =$	0.0000 ft ³

6.- GASTO VOLUMÉTRICO DEL GAS (G)	
$G = 60 * v_g * Ach$	
$G =$	0.00 ft ³ /min = 0.00 m ³ /min

GASTO VOLUMÉTRICO DEL GAS SECO A CONDICIONES NORMALES (G _{sn})	
$G_{sn} = [(100 - H_g) / 100] * G_{hn}$	
$G_{sn} =$	0.00 ft ³ /min = 0.0000 m ³ /min

2.- Fracción de Humeda y Seca.	
$F_h = V_h * 1.359 / (V_h * 1.359 + V_c * P_m * 508.23 / T_m)$	
$F_h =$	0.0000
$F_s = 1 - F_h$	
$F_s =$	1.0000

3.- Peso Molecular Húmedo y Seco del Gas.	
$P_{Ms} = (\%CO_2 * 0.44 + \%O_2 * 0.32 + \%CO * 0.28 + \%N_2 * 0.28) * F_s$	
$P_{Ms} =$	28.0000 gr/gmol
$P_{Mh} = F_h * 100 * 0.18$	
$P_{Mh} =$	0.0000 gr/gmol
$P_{Mt} = P_{Mh} + P_{Ms}$	
$P_{Mt} =$	28.0000 gr/gmol

5.- ÁREA DE LA CHIMENEA (Ach)	
$Ach = 0.785 * D^2 / 0.3048^2$	
$Ach =$	0.0000 ft ²
$Ach =$	0.0000 m ²

7.- GASTO VOLUMÉTRICO DEL GAS HUMEDO (G _{hn})	
$G_{hn} = 17.95 * [P_{ch} / (T_{ch} + 460)] * G$	
$G_{hn} =$	0.00 ft ³ /min = 0.00 m ³ /min



CUADRO DE RESULTADOS Y COMPARATIVO

DATOS	DESCRIPCION	UNIDADES	1 ER. DEF.
Vgn	Volumen de gas muestreado	ft ³	0.000
Hg	Contenido de humedad en el gas	%	0.000
PMh	Peso molecular del gas húmedo	g/gmol	0.000
vg	Velocidad del gas	ft/s	0.000
Gsn	Gasto volumétrico del gas seco	m ³ N/min	0.000
CNOx	Concentración de Oxidos de Nitrogeno	ppm	43.35
CNOx	Concentración de Oxidos de Nitrogeno	mg/m ³ (a 760 mmHg, 25°C)	81.56
CNOx	Concentración de Oxidos de Nitrogeno	Kg /hr	0.0000

CUADRO COMPARATIVO

PARAMETROS	NOM-085-SEMARNAT-2011	RESULTADOS
	(ppm a.c.n., base seca)	(ppm a.c.n., base seca)
NOx (ppm)	375	43.35
Exceso de Aire	NO APLICA	0.00
Monóxido de Carbono (ppm)	500	0.00

LMP de acuerdo a la Tabla 1 de la Norma, considerado como Resto del País

NOM-085-SEMARNAT-2011, Contaminación atmosférica -Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.



IX. Referencias

- NOM-085-SEMARNAT-2011, “Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de Febrero de 2012.
- NOM-043-SEMARNAT-1993, “Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas provenientes de fuentes fijas.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 1993.
- PROY-NOM-025-SSA1-2014, “Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de Mayo de 2014.
- NOM-021-SSA1-1993. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de Agosto de 1994.
- NOM-022-SSA1-2010, “Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de Agosto de 2010.
- NOM-023-SSA1-1993, “Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente



como medida de protección a la salud de la población.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de Diciembre de 1994.

- NMX-AA-009-1993-SCFI, “Contaminación atmosférica fuentes fijas – Determinación de flujo de gases en un conducto por medio de tubo pitot.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de Diciembre de 1993.
- NMX-AA-010-SCFI-2001, “Contaminación Atmosférica-Fuentes-Fijas determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto – Método Isocinético.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de abril de 2001.
- NMX-AA-054-1978, “Contaminación Atmosférica – Determinación del Contenido de Humedad en los Gases que Fluyen por un Conducto – Método Gravimétrico.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de Agosto de 1978.
- NMX-AA-035-1976, “Determinación de bióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y oxígeno en los gases de combustión.”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de Junio de 1976.
- Luis Eduardo García Sánchez, Jair Fernando Angarita, Omar Antonio Naranjo, "La Velocidad en Gases: Aspectos Metrológicos" En: Colombia. 2010. Revista Met y Flu: Ciencia, Tecnología, Innovación. ISSN: 2145-5716 p.14 - 23 v.3. Disponible en:
http://www.cdtdegas.com/descargas/Edicion%203/met&flu_No3-2.pdf
- Manuel Puigcerver Zanón and M. Dolors Carrascal Triola 2008 Medio atmosférico, El. Meteorología y contaminación p248 disponible en:
<http://books.google.com.mx/books?id=cPYrHVmslewC&pg=PA227&dq=muestreo+isocinetico&hl=es&sa=X&ei=GyjrT->



2MC6Si2gWtgqDQAQ&ved=0CEgQ6AEwBA#v=onepage&q=muestreo%20i
socinetico&f=false

- Carlos Alberto Echeverri Londono, "Determinación de la emisión de material particulado en fuentes fijas". En: Colombia Revista Ingenierías Universidad De Medellín ISSN: 1692-3324 ed: Sello Editorial Universidad De Medellin v.3 fasc.5 p.31 - 61 ,2004 disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/determinacion.pdf>
- Restrepo, Iván (Coord.), Comisión Nacional de los Derechos Humanos. La Contaminación Atmosférica en México. Sus causas y sus efectos en salud. Dirección de Publicaciones. México D. F., Agosto 1992
- World Health Organization. WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen, Dioxide and Sulfur Dioxide. Global Update 2005. Summary of Risk Assessment. Report No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02. Geneva, 2006. Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Wright, J. Environmental Chemistry. 1th Edition. Routledge. London, 2003.
- Brown, Leyma. Química de la Ciencia. Séptima Edición. Prentice Hall. 1998.
- Leiva y Nuncio , Miguel A. y Nicolás Rodríguez Martínez. Propiedades del Diesel publicación digital disponible en: <http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>
- Evans , et al . 2002. Health Benefits of Air Pollution Control. En: Air Quality in the Mexico Megacity. An Integrated Assessment . Molina M and L Molina, editors. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.