

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

“MONITOREO CONTINUO DE EMISIONES INDUSTRIALES”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A:

Germán Aguilar Martínez

MÉXICO, D.F.

2007



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: Prof. MENDEZ FREGOSO HECTOR GERARDO
Vocal: Prof. TORRES BARRERA RODOLFO
Secretario: Prof. BAEZ PEDRAJO ARMANDO
1er. Suplente: Prof. CHAVEZ ESPIN JUANA JUDITH
2do. Suplente: Prof. LOPEZ CASTILLO NESTOR NOE

Sitio donde se desarrollo el tema:

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Ciudad Universitaria UNAM.

Asesor del Tema: M.I. Armando Báez Pedrajo._____

Sustentante: Germán Aguilar Martínez._____

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por darme vida y salud, por conservar a mis padres Gloria y Rogelio a ellos infinitas gracias por apoyarme e impulsarme a superarme siempre.

A mis hermanos Rogelio, Susana y Antonio, a mi Cuñada Estela y mis sobrinos José de Jesús, Natalia Andrea y Miguel Ángel,

Por su apoyo y comprensión.

A la Universidad y en especial a la Facultad de Química por la oportunidad brindada, de haber realizado mis estudios profesionales en sus aulas.

A todos mis profesores de la Facultad de Química que con esfuerzo y ejemplo contribuyeron a mi formación profesional.

A mis amigos de la universidad: Blanca, Delia, Jorge, Alejandro, Alberto, Omar, Sonia, por compartir grandes momentos conmigo en la Facultad y alentarme a seguir siempre adelante.

A la familia Mejía Coronado, en especial a Rosa María, por apoyarme e impulsarme a seguir siempre adelante en mi etapa de estudiante y cuando mas lo necesite.

A mis tíos (as) y primos (as) gracias por su inmensa motivación y apoyo a seguir adelante.

GRACIAS

Agradezco especialmente al Mc. Armando Báez Pedrajo por toda la ayuda y asesoría proporcionada, para la realización de este trabajo.

Muchas Gracias Maestro Báez por ser tan paciente y buena persona.

A la Mc. Rocío García Martínez y la QBF. María del Carmen Torres Barrera, por su ayuda y observaciones en la realización de este trabajo, así como de su infinita paciencia y apoyo.

A todas las personas del departamento de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósferas Gracias.

Agradezco al Ing. Héctor Méndez Fregoso y al Ing. Rodolfo Torres Barrera, por su asesoría, ayuda y recomendaciones en la realización de este trabajo.

GRACIAS

Dedico mi trabajo especialmente a mi madre Gloria

Gracias Mami

Por tu infinito amor

Tu inquebrantable paciencia

Y toda tu confianza

Que siempre me haz dado

“Lo que se deja de hacer en el instante, se vera reflejado en tu futuro y de alguno
forma te afectara en la vida”

Gracias a ti hoy entiendo esta frase que con tanta frecuencia me mencionabas y
comprendo que no hay mejor herencia que el estudio, gracias por todo tu apoyo
mamita.

INDICE	Página
INDICE	1
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	7
CAPITULO I DESCRIPCIÓN Y PROPIEDADES DE LA ATMOSFERA	8
1.1 CAPAS ATMOSFERICAS	9
1.2 COMPOSICIÓN QUIMICA DE LA ATMÓSFERA	11
CAPITULO II CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA	14
2.1 DEFINICIÓN DE CONTAMINACIÓN	15
2.2 CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	15
2.2.1 FUENTES DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS	16
2.3 DEFINICIÓN DE EMISIÓN	17
2.4 CALIDAD DEL AIRE	20
2.5 UNIDADES DE CONCENTRACIÓN	21
CAPITULO III MUESTREO DE CHIMENEAS	23
3.1 DEFINICION DE CHIMENEA	24
3.2 COSTITUCIÓN DE UNA CHIMENEA	24
3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA CHIMENEA	26
3.2.2 VELOCIDAD NATURAL DE UNA CHIMENEA	28
3.2.3 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DINÁMICA	30
3.2.4 DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN	32
3.2.5 DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR ACCESORIOS	33
3.2.6 COMPROBACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TIRO	34
3.2.7 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES A LO LARGO	

DE LA CHIMENEA	35
3.3 DEFINICION DE MUESTREO	38
3.3.1 METODOLOGIA DE MUESTREO EN CHIMENEAS	38
3.3.2 METODOS DE MUESTREO EN FUENTES FIJAS	39
3.3.3 MUESTREO DE FUENTES MOVILES	41

CAPITULO IV DISEÑO DE SISTEMAS EXTRACTIVOS PARA MEDICION DE EMISIONES DE UNA CHIMENEA 42

4.1 SISTEMAS DE FUENTE A NIVEL	43
4.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA EXTRACTIVO DE FUENTE A NIVEL	46
4.2.1- SONDAS DE MUESTREO	46
4.2.2.- LÍNEA DE MUESTREO	49
4.2.3.- MÉTODOS DE REMOCIÓN DE HUMEDAD	51
4.2.3.1- SISTEMAS DE CONDENSACIÓN	52
4.2.3.2.- SECADORES DE PERMEACIÓN	53
4.2.4.- LAS BOMBAS	54
4.2.4.1 BOMBA DE DIAFRAGMA	54
4.2.4.2 BOMBA DE EYECCIÓN	56
4.2.5.- FILTROS FINOS	57
4.2.5.1 FILTROS DE SUPERFICIE	57
4.2.5.2 LOS FILTROS DE PROFUNDIDAD	57
4.3 SISTEMAS DE DILUCION	58
4.3.1.- SONDAS DE DILUCIÓN	58
4.3.2 SISTEMAS DE DILUCIÓN FUERA DE LA CHIMENEA	59
4.4 TOMA DE MUESTRA EN LA INTERFASE Y CALIBRACIÓN DEL MONITOR	60

CAPITULO V SISTEMAS IN-SITU DE MONITOREO PARA MEDIR CONCENTRACIONES DE GAS Y FLUJO EN CHIMENEAS 61

5.1.- ANALIZADORES PUNTUALES	62
5.2.- ANALIZADORES DE TRAYECTORIA A DE LUZ EMITIDA Y RECIBIDA	63

5.2.1 ANALIZADORES DE UN SOLO PASO	63
5.2.2 ANALIZADORES DE DOBLE PASO	64
5.3 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD O FLUJO DE GAS	64
5.3.1 DIFERENCIA DE PRESIÓN	65
5.3.2 SISTEMAS TERMALES	67
5.3.3 VELOCIMETRO ACÚSTICO	68
CAPITULO IV METODOS ANALITICOS	71
6.1.- LEY DE LAMBERT-BEER	73
6.2 ANALIZADOR DE QUIMILUMINISCENCIA PARA MEDIR NO Y NO _x	75
6.3 ANALIZADOR ELECTROCATALITICO PARA MEDIR OXIGENO (O ₂)	78
6.4 ANALIZADOR DE CORRELACION DE UN FILTRO DE GAS (GFC)	80
6.5 TECNICA DE ABSORCIÓN DIFERENCIAL	81
6.6 ESPECTROSCOPIA DE SEGUNDA DERIVADA	82
CAPITULO VII NORMAS DE CALIDAD EN CHIMENEAS	86
7.1 REQUISITOS EN FUENTES FIJAS	87
7.2 LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES	88
CAPITULO VIII CONCLUSIONES	96
CAPITULO IX BIBLIOGRAFIA	99
ANEXOS	103

INTRODUCCIÓN

A partir de la revolución industrial que se inicio a principios del siglo XVIII, significó un gran avance hacia la actividad industrial y comercial, principalmente en los países considerados del primer mundo, como Inglaterra, Francia y Alemania y posteriormente se inicio en Norte América, Canadá y principalmente Estados Unidos. Donde el desarrollo y el progreso han sido mucho muy importantes hasta la fecha

La meta principal de la planta industrial fue producir al menor costo posible con máximas ganancias para la empresa. Desafortunadamente esta política se realizo a un costo muy alto como fue la contaminación del aire, el agua y del suelo, cuyos efectos se reflejaron en la salud de los habitantes de las ciudades, en el deterioro de sus propiedades y así como a la biota¹ acuática como terrestre.

La literatura reporta el dramático impacto en la atmósfera y en las aguas de los ríos y lagos; uno de los efectos mas importantes de la contaminación del aire que se observó; fue en las emisiones de humo de las chimeneas que produjo una reducción de la visibilidad de tal forma que la observación a mas de cien metros era difícil, además tuvo efectos en el deterioro de la ropa de los habitantes incrementando el costo de la limpieza y el decremento de su duración además y el mas importante fue el incremento de las enfermedades respiratorias. Uno de los casos típicos de los que se tiene un amplio conocimiento fue²: un episodio severo de contaminación que ocurrió en Londres en 1952 en el que hubo un exceso de muertes arriba de lo esperado estadísticamente y que según reportan fue cerca de 4000 muertos. Las condiciones atmosféricas que prevalecieron durante esos días con un aire muy contaminado por partículas y humo que posteriormente se conoció como smog¹.

¹ Biota: Conjunto de seres vivos de una región (combinación de fauna y flora). Smog: Término derivado de humo y niebla: Contaminación atmosférica extensa proveniente en parte de procesos naturales y parcialmente de actividades humanas. Fuente: NMX-AA-023-1986. "PROTECCIÓN AL AMBIENTE-CONTAMINACION ATMOSFÉRICA-TERMINOLOGIA"

Los contaminantes responsables del exceso de muertes se atribuyen a una mezcla de humo, partículas y bióxido de azufre.

La ocurrencia de este trágico episodio hizo que las autoridades emitieran un acta de aire limpio con el fin de reducir las emisiones en la ciudad de Londres. Esta medida tuvo un efecto positivo por la aplicación de esta Acta, ya que se habían dado los pasos para reducir la emisión de partículas y de CO. En 1956 y 1962 se repitieron condiciones similares a las ocurridas en 1952, en lo que se observó que el número de muertes habían declinado dramáticamente.

Estas medidas ponen de manifiesto que desde 1952 ya las autoridades tenían un claro concepto de que era necesario proteger a la población en ciudades con alto índice de contaminación del aire.

Otro caso muy notable se observó por primera vez en 1944 en la ciudad de Los Ángeles, donde observaron daños extensivos a la vegetación sobre todo a las verduras que se cultivaban en los Ángeles. Los Patólogos Middleton, Kendrick y Schwalm de la Universidad de California establecieron que existían agentes foto tóxicos diferentes del bióxido de azufre y de compuestos de flúor y que este nuevo tipo de contaminante dañaba en forma intensa a los vegetales, esto condujo a Haagen-Smitt y colaboradores a realizar estudios en cámaras controladas donde pusieron a los vegetales en atmósferas sintéticas que contenían mezclas de olefinas y NO_2 y se encontraron que este contaminante que producía tantos daños se debió a la formación de un compuesto que posteriormente se identificó como ozono (O_3), a este tipo de contaminación que prevalecía en Los Ángeles se le llamo smog foto químico (atmósfera oxidante) a diferencia de la atmósfera de Londres formada principalmente de partículas de SO_2 que se le conoce como atmósfera reductora.

Tanto lo que sucedió en Los Ángeles y la época de los 50s a 60s como lo que sucedió en Londres en 1952 hizo que se crearan organismos gubernamentales que se dedicaran a estudiar los métodos y leyes para controlar la emisión de contaminantes atmosféricos, habiéndose creado normas y reglamentos que se fueron aplicando paulatinamente a la planta industrial.

En México de 30 años a la fecha se observó que debido al desarrollo industrial del país, sobre todo en ciudades como Guadalajara, Monterrey y la Ciudad de México hubo un incremento en los niveles de contaminación, por lo que se comenzaron a desarrollar las primeras normas en cuestiones ambientales; con la finalidad de tener un control de emisiones y evitar una atmósfera fotoquímica con niveles muy altos de ozono.

Uno de los primeros contaminantes, por cierto muy importantes que se controló en sus emisiones fueron las partículas, cuyo resultado se ha visto en una baja emisión de contaminantes en fábricas de cal, cemento, asbestos, cerámicos, etc. por la aplicación de sistemas de control como son los sistemas de filtro, ciclones múltiples y siendo el más efectivo pero el más costoso de instalar y operar el precipitador electrostático.

Esta tesis se ha enfocado precisamente a estudiar una serie de métodos de control de contaminantes emitidos por chimeneas y sus principales normas de regulación en México.

OBJETIVOS.

Definir los conceptos Teóricos que se involucran en el estudio de emisiones industriales, provenientes de las chimeneas, así como las técnicas que existen para llevar a cabo el monitoreo continuo de emisiones industriales.

Describir los equipos y técnicas analíticas que se emplean, en el monitoreo continuo de emisiones industriales, provenientes de las chimeneas de los procesos de manufactura.

Mencionar las normas que rigen el monitoreo continuo de emisiones en fuentes fijas (chimeneas), provenientes de los procesos industriales, en los niveles de contaminantes permitidos de acuerdo al proceso industrial y las técnicas analíticas.

CAPITULO I

DESCRIPCIÓN Y PROPIEDADES

DE LA ATMOSFERA

Atmósfera es la masa total de gases que rodea a la tierra y que está compuesta principalmente de oxígeno y nitrógeno.

1.1 CAPAS ATMOSFERICAS

La atmósfera esta constituida por una serie de capas en función de la temperatura (tabla 1), algunas más estudiadas que otras, a las que se les ha determinado los siguientes espesores:

Tabla 1.1. Capas Atmosféricas

Capa	Espesor Aproximado (km)
Troposfera	16
Estratosfera	34
Mesosfera	35
Termosfera	Que se extiende desde la mesosfera Al espacio exterior

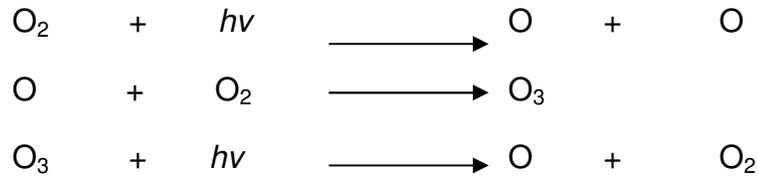
Fuente: Air Quality, Thad Goodish³

Entre cada una de las capas de la atmósfera existe una especie de frontera, las cuales se denominan: Tropopausa, Estratopausa y Mesopausa, en la figura 1.1 se muestran las capas atmosféricas mencionadas anteriormente.

Troposfera: Es la capa más baja de la atmósfera y comprende unos 16 km de altura, abarcando desde la superficie terrestre hasta su límite con la estratosfera llamada tropopausa, región donde no hay cambio de temperatura con la altura La troposfera se caracteriza por tener un descenso en la temperatura con respecto a la altitud, este cambio de temperatura con respecto a la elevación es llamado gradiente de temperatura.

Estratosfera: Es la capa que se extiende de la tropopausa hasta una capa conocida como estratopausa, capa en la que la temperatura permanece constante, que se encuentra alrededor de 50 km de altura; esta capa se caracteriza a diferencia de la tropopausa en que la temperatura se

incrementa con la altura debido a la adsorción de la radiación ultravioleta que como resultado genera la formación de ozono de acuerdo con la reacción de Chapman:



Mesosfera: La estratosfera se extiende desde la estratopausa hasta un límite superior llamado mesopausa (85 km aproximadamente).

Termosfera: En esta capa la temperatura se incrementa rápidamente con la altura, debido a la absorción de energía solar, dependiendo del cuerpo absorbedor. En la termosfera las relaciones de N_2 / O_2 ya no se mantienen constantes debido al escape hacia el espacio exterior de los gases más ligeros como son el hidrógeno y el helio, por otro lado empiezan los fenómenos de ionización y disociación de las especies moleculares.^{2,3,4}

El aire es uno de los factores importantes de la vida en la Tierra, los seres humanos necesitamos filtrar a nuestros pulmones un promedio de 15 kg de aire atmosférico al día.

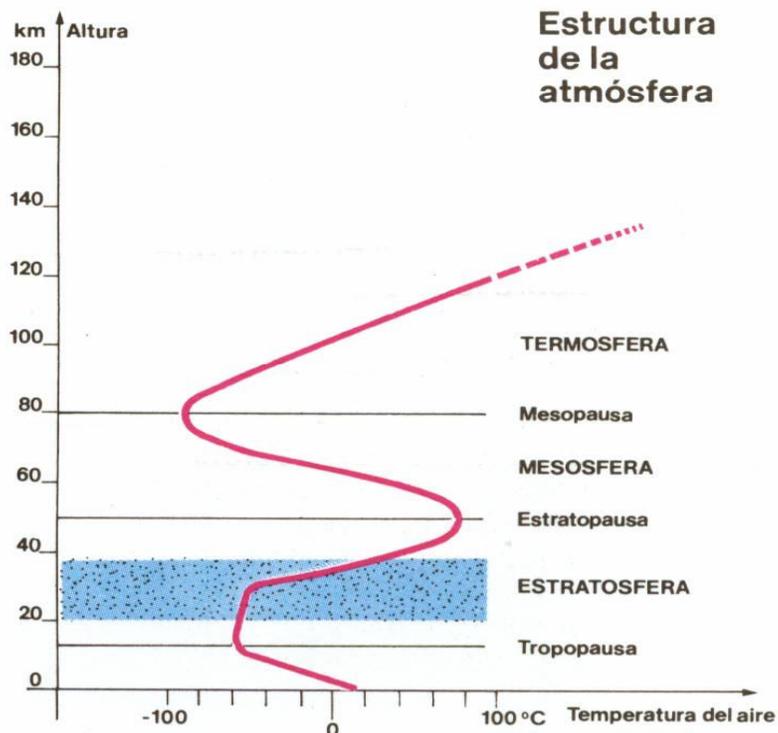


Figura 1.1 Composición Atmosférica. Fuente: Air Quality, Thad Goodish.³

1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA

La atmósfera contiene una variedad de gases cuya concentración principal es de nitrógeno molecular (N_2), el cuál comprende 78 % de la masa atmosférica, 21 % de oxígeno (O_2), mientras que el restante 1 %, se compone de Argon (Ar), Neón (Ne), Helio (He), Kriptón (Kr), Hidrógeno (H_2) y Xenón (Xe). La composición gaseosa de la atmósfera puede ser descrita en términos de aquellos constituyentes que permanecen constantes (Tabla 1.1) y aquellos que varían dentro del transcurso del tiempo de la experiencia humana (Tabla 1.2). La atmósfera también contiene trazas de gases producidos por procesos biológicos o geológicos. Estos incluyen: amonio (NH_3), metano (CH_4), sulfuro de Hidrógeno (H_2S), monóxido de carbono (CO), y bióxido de sulfuro (SO_2^{-3}).

Tabla 1.2 Constituyentes Atmosféricos- concentraciones constantes.

Constituyente	Fórmula Química	Concentración (ppm)
Nitrógeno	N ₂	780 840,00
Oxígeno	O ₂	209 460,00
Argón	Ar	9 340,00
Neón	Ne	18,18
Helio	He	5,24
Kriptón	Kr	1,14
Hidrógeno	H ₂	0,50
Xenón	Xe	0,09

Fuente: Air Quality, Thad Goodish.³

Tabla 1.3. Constituyentes atmosféricos- Concentraciones variables.

Constituyente	Fórmula Química	Concentración (ppm)
---------------	-----------------	---------------------

Vapor de Agua	H ₂ O	0,1-30,000.00
Bióxido de Carbono	CO ₂	350,00
Metano	CH ₄	1,67
Oxido Nitroso	N ₂ O	0,30
Monóxido de Carbono	CO	0,19
Ozono	O ₃	0,04
Amonio	NH ₃	0,004
Bióxido de Nitrógeno	NO ₂	0,001
Bióxido de Azufre	SO ₂	0,001
Oxido Nítrico	NO	0,0005
Ácido Sulhídrico	H ₂ S	0,00005

Fuente: Air Quality, Thad Goodish.³

CAPITULO II
CONTAMINACIÓN
ATMOSFERICA

En e
atmós
el cuá

2.1 DE

La contaminación se define como la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos, que perjudique o resulte nocivo

a la vida, la flora o la fauna o que degrade la calidad de la atmósfera, del agua, del suelo o de los bienes y recursos naturales en general.¹

2.2 CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La variedad de sustancias presentes en el aire es muy grande por lo que tentativamente se pueden clasificar de la siguiente manera:

- A) **Composición Química:** La primera clasificación se basa de acuerdo a la composición química, en esta se encuentran compuestos con: azufres, nitrógeno, carbono, halógenos, y compuestos radioactivos.
- B) **Estado Físico:** Los contaminantes se clasifican de acuerdo a su estado de agregación, gas, líquido ó sólido, el último de estos dos estados implica que el material se presenta en la atmósfera en forma de partícula.
- C) **Origen:** Esta clasificación es de acuerdo a la forma en que alcanzan la atmósfera y puede ser de: fuentes identificables, o por interacción química de contaminantes y gases atmosféricos.

El tipo de contaminantes atmosféricos es función de la región geográfica afectada, la influencia de las fuentes de emisión y las características físicas del área.

2.2.1 FUENTES DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Existen cuatro tipos de fuentes fijas generadoras de emisiones⁶:

- a) Fuentes Puntuales. Derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales como son: la química, textil, alimentaría, maderera, metalúrgica, metálica, manufacturera y procesadora de productos vegetales y animales, entre otras. Las emisiones derivadas de la combustión utilizada para la generación de energía o vapor, depende de la calidad de los combustibles y de la eficiencia de los quemadores,

mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso (filtros, precipitadores y lavadores, entre otros). Los principales contaminantes asociados a la combustión son partículas (SO_2 , NO_x , CO_2 , CO e Hidrocarburos).

- b) Fuentes de Área. Incluyen la generación de aquellas emisiones inherentes a actividades y procesos, tales como el consumo de solvente, artículos de limpieza y equipos, recubrimiento de superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes graficas, panadería y distribución y almacenamiento de gas LP, principalmente. Esta fuente también incluye las emisiones de actividades como son: el tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo, rellenos sanitarios, entre otros. Este tipo de emisión causa un impacto en la salud, principalmente en las vías respiratorias, proveniente de contaminantes como: los compuestos orgánicos volátiles (COV'S).
- c) Fuentes móviles. Estas fuentes están constituidas por el parque vehicular que comprende automóviles, camiones, autobuses, motocicletas, los cuales desprenden contaminantes a través de los escapes como: SO_2 , NO_x , CO_2 , CO e Hidrocarburos
- d) Fuentes Naturales. Se refiere a la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensiones de suelo, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. En particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, que se les denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono (O_3). Las emisiones biogénicas incluyen oxido de nitrógeno, hidrocarburo no metanogénicos, metano, bióxido y monóxido de carbono y compuestos nitrogenados y azufrados.

2.3 DEFINICIÓN DE EMISIÓN

Emisión es la descarga directa o indirecta a la atmósfera de toda sustancia o energía incluida, pero no limitándose a olores, partículas, vapores, gases o

cualquiera de sus combinaciones.¹ La emisión de los contaminantes se dispersa por difusión y transporte, la rapidez del fenómeno depende del contaminante a si como de las condiciones metereologicas Figura 2.1.

La emisión de contaminantes (E) obtenidas en un muestreo de chimenea, se reportan en unidades de (masa por unidad de tiempo (kg / h)).

A lo largo de la historia del hombre, éste ha buscado técnicas para producir alimentos, servicios, vivienda, etc. Sin embargo estos procesos, arrojan materiales que pueden considerarse como contaminantes atmosféricos (humo, vapores y partículas), figura 2.1, sin embargo, es a partir del desarrollo industrial que esta acción adquiere proporciones considerables, no sólo por la cantidad de emisiones contaminantes que llegan al aire, sino por la naturaleza y tipo de éstos.

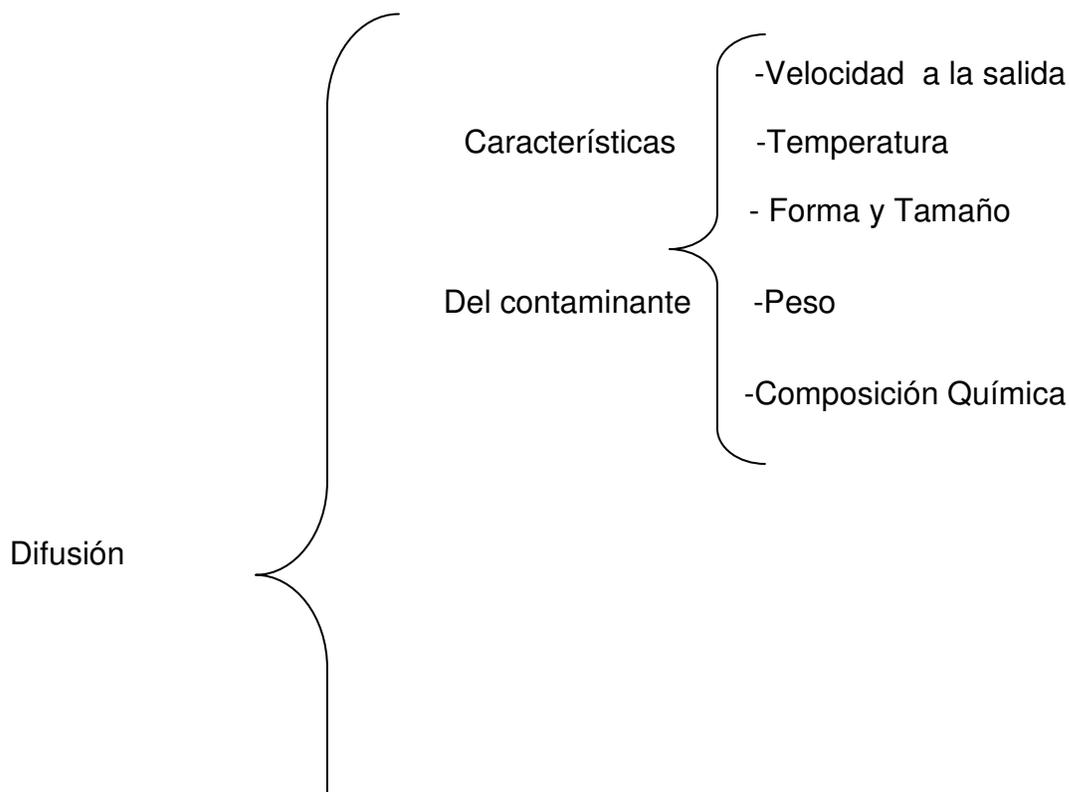
La ecuación 2.1 indica como se calcula la emisión de una fuente

$$E = CQ = \left(\frac{m}{v}\right)\left(\frac{v}{t}\right) \text{ (Ecuación 2.1)}$$

Donde: C: Concentración (masa / volumen)

Q: Flujo volumétrico del gas (volumen / tiempo)

E: Emisión del contaminante (masa / tiempo)



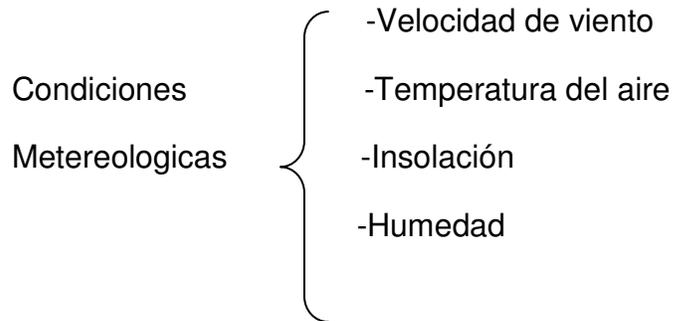
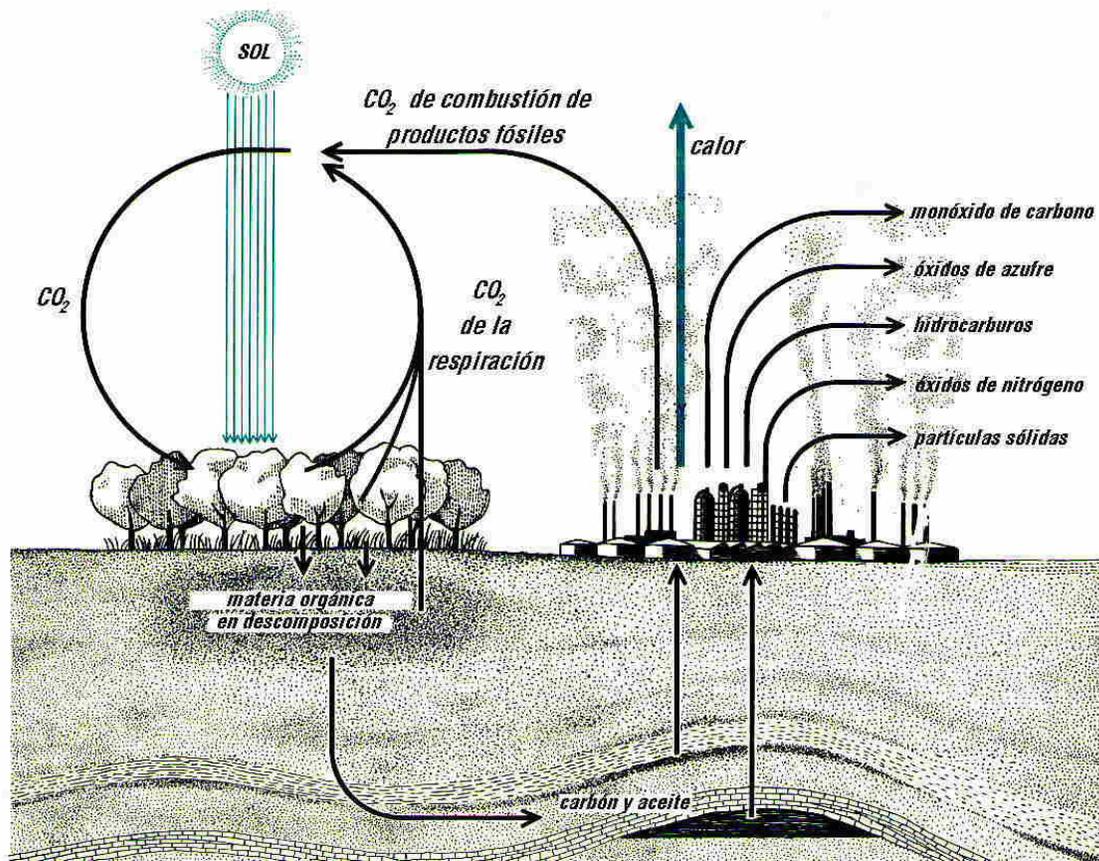


Figura 2.1 Factores causantes de la dispersión de contaminantes en el aire

Las principales fuentes de emisión de contaminantes en nuestro medio provienen de:

- Emisiones industriales ya sean por la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, diesel, gasolinas) para realizar los diferentes procesos.
- Emisión de productos o desechos químicos volátiles (ácidos, solventes, catalizadores).
- Calor y liberación de partículas, que modifican la visibilidad y la penetración de la luz.

Se considera que se producen más de 70 000 compuestos químicos diferentes que se utilizan tanto en la industria como en otras actividades humanas y que, de manera ineludible, van a parar tarde o temprano a nuestro medio, a nuestra atmósfera, muchos de estos contaminantes producen importantes daños al ambiente y a la salud (figura 2.2).



Fig

ura 2.2 Los principales contaminantes del aire.

2.4 CALIDAD DEL AIRE

Es la medida de la concentración de contaminantes en el aire en un punto alejado de la fuente que no permiten distinguir de donde provienen, otra definición es la suma de las características relacionadas entre sí del estado del aire exterior.¹

Para medir los contaminantes se requieren:

- a) Colectar una muestra: Es llamada fase de muestreo ó colección.
- b) Fase de análisis: Determina cuanto y cual es el contaminante presente en la muestra.

Las concentraciones de calidad de aire son:

- Índice de Contaminación del Aire: Es una combinación matemática de la concentración de los contaminantes del aire que da un número único, con la finalidad de describir la calidad del aire ambiental.¹
- Concentración de Contaminantes: El cociente de la cantidad de contaminantes entre la cantidad total del gas considerado. Se deben indicar las unidades en que se expresan la cantidad del contaminante y del gas¹.
- IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del aire, señala valores comprendidos de 0 a 500. Según estos valores, las autoridades pueden recomendar u ordenar acciones para proteger a la población¹.

2.5 UNIDADES DE CONCENTRACIÓN

a) Partes por millón, cien millones, billón y trillón: En especies de fase gaseosa, lo mas común o frecuente es usar unidades en partes por millón (ppm), partes por cien millones (pphm), partes por billón (ppb) y partes por trillón (ppt). Estas unidades expresan el número de moléculas del contaminante en un millón (10^6), cien millones (10^8), un billón (10^9) o un trillón (10^{12}), de moléculas en el aire respectivamente.

Para calcular el número de moles o moléculas de los gases se emplea la ecuación de los gases ideales.

b) Centímetros Cúbicos: Estas unidades de concentración son empleadas principalmente en especies que contienen radicales libres (OH^\cdot), y obtener bajos valores de ppt, al emplear la ecuación de gas ideal, por lo que se realiza la conversión de unidades de litros a cm^3 (Tabla 2.1).

c) Microgramos por metro cúbico: Esta medida se emplea en la determinación de masa por unidad de volumen en especies gaseosas, usualmente 10^{-6} microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g m}^{-3}$).

Para convertir las ppm en $\mu\text{g m}^{-3}$, se emplea el factor de 40.9 mol/ L, que se encuentra en una ppm y se multiplica por el peso molecular del gas (**MW**) el cuál tiene unidades de g/ mol

Tabla 2.1 Conversión de unidades de concentración en ppm, pphm, ppb y ppt a cm^3 a 25° C y 1 atm.

Partes por	Unidad	Moléculas, átomos o radicales por cm^3
10^6	1 ppm	$2.46 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
10^8	1 pphm	$2.46 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
10^9	1 ppb	$2.46 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
10^{12}	1 ppt	$2.46 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$

CAPITULO III
MUESTREO DE CHIMENEAS

En la
gases
sistem

3.1 DE

La chimenea es un conducto por donde se desprende una serie de gases mezclados que provienen de un proceso⁷, es decir es una dilución de

contaminantes los cuales son emitidos hacia la atmósfera a una altitud suficiente para asegurarse de una dilución completa, sin que estos gases puedan causar daño a la salud de los seres vivos.

3.2 COSTITUCIÓN DE UNA CHIMENEA

El diseño de una chimenea depende de diversas variables, que se pueden agrupar en tres grupos⁸:

- a) Características del Foco Emisor: Dependientes, por ejemplo, del tamaño y diseño del equipo de proceso, por ejemplo una caldera.
 - Caudal de gases derivados de la combustión y evacuados a la atmósfera.
 - Temperatura de los gases a la salida de la caldera.
 - Tamaño y porcentaje de las partículas evacuadas al exterior.
- b) Características de la chimenea.
 - Altura geométrica de la chimenea.
 - Tiro disponible en la chimenea, que condiciona la velocidad de salida de los gases.
 - Sección recta de la boca de salida.
- c) Características meteorológicas y topográficas de la zona.
 - velocidad del viento.
 - Temperatura del aire exterior.
 - Condiciones atmosféricas.
 - Características del terreno (rugosidad, obstáculos ,etc)

Los cálculos consisten básicamente en determinar la evaluación ΔH del penacho de humos sobre la chimenea, de altura efectiva de la chimenea H_o (figura

3.1), con la finalidad de determinar la altura real de la chimenea H^1 , mediante el uso de la ecuación 3.1

$$H = H_o + \Delta H \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

H = Altura real de chimenea en m

H_o = Altura efectiva chimenea en m

ΔH = Altura del penacho de chimenea en m

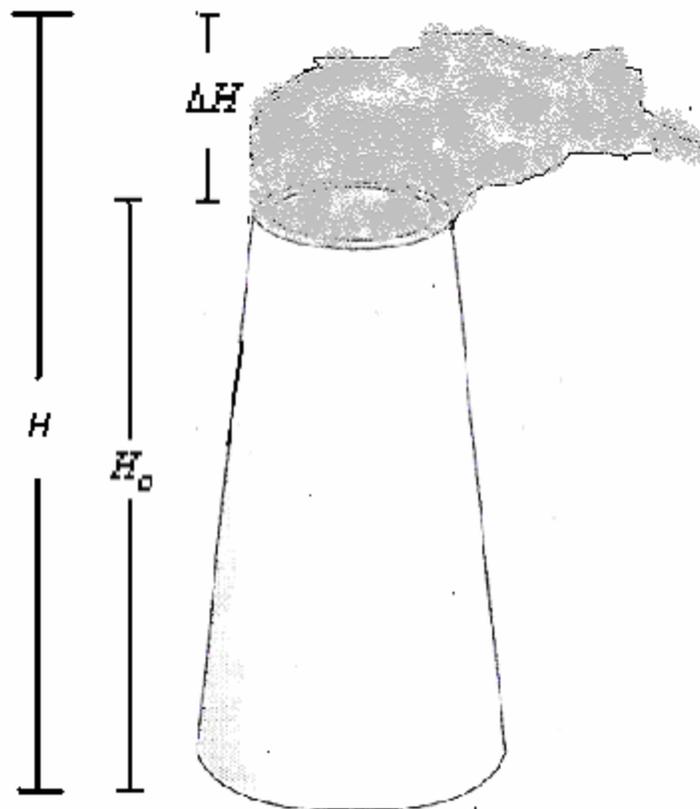


Figura 3.1 Alturas de chimenea

3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE UNA CHIMENEA

¹ Altura efectiva de chimeneas: Altura utilizada para el propósito de calcular la dispersión de los gases emitidos por una chimenea y que difiere de la altura real de la chimenea por una cantidad que depende de factores tales como la velocidad de salida, efectos de flotación, velocidad del viento y puede ser afectada por la topografía.

Altura del penacho de chimenea: Forma visible que adquiere la emisión de una chimenea debido al polvo, vapor, gases o humo. Fuente: NMX-AA-023-1986 "PROTECCIÓN AL AMBIENTE-CONTAMINACION ATMOSFERICA-TERMINOLOGIA"

La relación entre el combustible consumido y el aire necesario vendrá condicionado por la estequiometría de la combustión, dando como resultado un flujo de calor y un caudal de gases calientes producto de dicha combustión. Estos gases cederán calor a la caldera, de manera que a la salida de la misma nos encontraremos con un caudal de gases Q_e , a una temperatura T_e , que habrá que evacuar a través de la chimenea. Estos datos deben ser proporcionados por el fabricante de dicha caldera.

La velocidad de salida de los gases, V_s , es un parámetro fundamental en el diseño de la chimenea. Un valor muy bajo puede ocasionar que el efluente sea succionado por la estela que se crea en la chimenea, proyectándose hacia el suelo en las proximidades de la misma. Es lo que se conoce como “down wash”. Un segundo efecto, altamente indeseable, puede ser debido a una baja velocidad de salida: que el aire frío externo llegue a entrar en la chimenea, disminuyendo la temperatura de salida T_s con todos los efectos negativos que ello conlleva, un aumento excesivo en la velocidad de salida puede ocasionar una rápida mezcla entre gases y aire atmosférico. Las velocidades o tiros de las chimeneas son:⁹

1.- Tiro Natural: Es la corriente de un fluido producida por la diferencia de presiones de una convección térmica, entre los gases que fluyen en un conducto y el aire.

2.- Tiro Inducido: Es la corriente de un fluido generada por la presión negativa de un sistema mecánico.

3.- Tiro Forzado: Es la corriente de un fluido ocasionada por la presión positiva de un sistema mecánico.

Se recomienda que la velocidad de salida en los conductos sea de 6 a 15 m/s, esta velocidad dependerá de la relación que se obtenga de la altura H_o y D_{em} (Diámetro exterior del ducto). La expresión que se emplea comúnmente es la ecuación 3.2.

⁹ Tiro: Es la corriente de un fluido provocada por diferencia de presiones. Fuente: NMX-AA-009-1993-SCFI “Contaminación Atmosférica- Fuentes Fijas- Determinación de Flujo de Gases en un Conducto por Medio de Tubo Pitot”

$$\frac{H_o}{D_{em}} = \text{valores de 15 a 20} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde:

H_o : Altura efectiva de chimenea en m

D_{em} : Diámetro exterior del ducto en m

Si aumenta esta relación se desprecia el tipo de estructura del ducto, por lo que no es tan sencillo asignar un valor de tiro, si el valor disminuye se tendrá una visión poco agradable de la chimenea.

Si llamamos G al caudal másico de la sustancia contaminante a evacuar y que asciende por la chimenea, la concentración (C) de este contaminante que alcanza el suelo se puede poner como se muestra en la ecuación 3.3.

$$CQ = \left(\frac{G}{H^2} \right) = \frac{G}{H_o + \Delta H} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde:

C : Concentración (masa/ volumen)

Q : Flujo Volumétrico (volumen/ tiempo)

G : Flujo Másico (masa/ Tiempo)

H = Altura real de chimenea en m

H_o = Altura efectiva de chimenea en m

ΔH = Altura del penacho de chimenea en m

Que nos indica con claridad cómo esta concentración viene afectada mucho más por la altura efectiva de emisión que por el caudal de contaminantes emitidos, de tal forma que es importante que la altura de la chimenea sea lo bastante alta, pero dicha altura esta asociada con costos, diseño estructural, espacio, etc.

3.2.2 VELOCIDAD NATURAL DE UNA CHIMENEA

La velocidad natural de una chimenea es un gradiente de presiones suficiente como para vencer las pérdidas a lo largo del sistema de evacuación, y proporcionar una energía cinética residual en el flujo de salida de los gases que se

denomina velocidad de salida V_s . Este gradiente de presiones se debe a la diferencia de densidad entre la columna de gases de la chimenea, ρ_e , y la columna de aire atmosférico, ρ_a , su calculo siempre se efectúa en condiciones hidrostáticas.

La columna de gas exterior de la chimenea genera una cota de diferencias entre la boca de entrada y salida en la chimenea (H_c), siendo en general H_c y H_o diferentes. La fuerza ascensional (F) que posee esta columna de gases dentro de la chimenea esta descrita por la ecuación 3.4.^A

$$F = g(\rho_a - \rho_e)H_c A_m \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Donde:

A_m : Es el área interna del conducto de la chimenea en m^2

g : Constante de gravedad en m / s^2

ρ_a : Densidad del aire en kg / m^3

ρ_e : Densidad del gas o contaminante en kg / m^3

H_c : Cota de diferencias en m

F : Fuerza Ascensional en N

Esta fuerza ascensional se traduce en un gradiente de presiones (ΔP_m) que provoca el tiro natural y se describe mediante la ecuación 3.5.

$$\Delta P_m = g(\rho_a - \rho_e)H_c \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Donde:

ΔP_m : Gradiente de presión en el conducto en N / m^2

Considerando una densidad ρ_e constante. Esta expresión puede escribirse en función de las temperaturas del gas, T_e , y del aire atmosférico, T_a , (ecuación 3.6), si aplicamos la ecuación de los gases perfectos en el supuesto de que Δp_m es

^A La deducción de las ecuaciones de Fuerza Ascensional se describen en el anexo, al igual que las ecuaciones de Presión.

pequeño respecto de la presión atmosférica como se manifiesta en la ecuación 3.7:

$$\rho_e = \rho_a \left[\frac{T_a}{T_e} \right] \text{ (Ecuación 3.6)}$$

Donde:

T_a : Temperatura del aire atmosférico en °K

T_e : Temperatura del gas o contaminante en °K

Resultando:

$$\Delta P_m = gH\rho_a \left[1 - \frac{T_a}{T_e} \right] \text{ (Ecuación 3.7)}$$

Una vez que se conoce el valor de la velocidad en el ducto, debemos comprobar si es suficiente para vencer las pérdidas de carga a lo largo de la chimenea y dejar una presión dinámica en la boca de salida de la chimenea que garantice al menos la velocidad deseada V_s .

3.2.3 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DINÁMICA

Si la temperatura es constante a lo largo de la chimenea, permite mantener uniforme la densidad y, en consecuencia, el caudal volumétrico de gases a la entrada y salida es el mismo, por lo que se cumple con la ecuación 3.8.

$$\rho_e = \rho_s \rightarrow Q_e = Q_s = Q \text{ (Ecuación 3.8)}$$

Donde:

Q_e : Flujo Volumétrico de entrada en la chimenea en m^3 / s

Q_s : Flujo Volumétrico a la salida de la chimenea en m^3 / s

Q : Flujo Volumétrico en m^3 / s

Y en consecuencia la presión dinámica (P_d) en la boca de salida de la chimenea se expresa de la siguiente manera (ecuación 3.9):

$$P_d = \rho_e \left(\frac{V_s^2}{2} \right) \text{ (Ecuación 3.9)}$$

Donde:

P_d : Presión Dinámica en N / m^2

V_s : Velocidad Deseada en el ducto de chimenea en m / s

Sustituyendo el valor de ρ_e por la ecuación (3.6) y el valor V_s de la ecuación de continuidad (ecuación 3.10):

$$V_s = \frac{4Q}{\pi D_s^2} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Donde:

Q: Flujo Volumétrico en m^3 / s

D_s : Diámetro promedio del ducto de la chimenea en m ⁷

V_s : Velocidad Deseada en el ducto de chimenea en m / s

De estas sustituciones obtenemos la siguiente expresión, para determinar la presión dinámica (ecuación 3.11).

$$P_d = \rho_a \left(\frac{8T_a}{\pi^2 D_s^4 T_e} \right) Q^2 \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

Donde:

Q: Flujo Volumétrico en m^3 / s

D_s : Diámetro promedio del ducto de la chimenea en m

T_a : Temperatura del aire atmosférico en $^{\circ}K$

T_e : Temperatura del gas o contaminante en $^{\circ}K$

ρ_a : Densidad del aire en kg / m^3

P_d : Presión Dinámica en N / m^2

3.2.4 DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

⁷ El diámetro promedio del ducto de chimenea se obtiene al sumar el diámetro exterior (D_e) y el Diámetro Interior (D_i) del ducto de la chimenea, i dividirlo entre dos. Fuente: "Dispersión de contaminantes en la atmósfera" Amparo López J.

Las altas velocidades que alcanza el flujo de gases a lo largo de los conductos de evacuación (entre 10 y 20 m/s) pueden dar lugar a pérdidas de carga relativamente importantes. Entendemos por pérdidas de cargas mayores las ocasionadas por el rozamiento o fricción del fluido con las paredes interiores de estos conductos. El flujo a través de los mismos es altamente turbulento, tales pérdidas serán proporcionales al cuadrado de la velocidad, a partir de la ecuación 3.12 que se conoce como expresión de Darcy- Weisbach¹⁰:

$$\Delta P_{my} = \rho_e \sum_i f_i \left(\frac{L_i V_{mi}}{2D_{mi}} \right) \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

Donde:

f_i : Es el factor de fricción adimensional

L_i : Longitud de tubería en m

D_{mi} : Diámetro interior del tubo en m

V_{mi} : Velocidad del fluido en m/s

i : Tramo de tubería seleccionado para evaluar la fricción

ρ_e : Densidad del gas en kg/m³

ΔP_{my} : Presión por fricción en N /m²

La ecuación 3.12 es valida cuando los conductos son de sección circular. Para el caso de que la sección no sea circular, se calcula el área del conducto y después se obtiene el diámetro al emplear la ecuación 3.13. ⁹

$$A = \frac{(\pi D^2)}{4} \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

Donde:

A: Área del conducto en m²

D: Diámetro del tubo de la sección no circular en m

La combinación de las ecuaciones 3.6 y 3.12 nos permiten obtener una función definida en cuanto a los datos (ecuación 3.14), a excepción del factor de fricción

f_i ¹¹ que puede determinarse haciendo uso del diagrama de Moody o por la aplicación de la fórmula de Colebrook¹².

$$\Delta P_{my} = \rho_a \left(\frac{8Q^2 T_a}{\pi T_e} \right) \sum_i f_i \left(\frac{L_i}{D_{mi}^5} \right) \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

3.2.5 DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR ACCESORIOS

Las pérdidas menores son las que tienen lugar en codos, estrangulamiento, bifurcaciones, cambios de dirección, etc. Cada accesorio que debe atravesar el flujo de gases se caracteriza mediante un coeficiente de pérdidas por accesorios k^{11} , adimensional, por lo que la expresión que proporciona estas pérdidas es la ecuación 3.14.

$$\Delta P_{mn} = \rho_e \sum_j k_j \left(\frac{V_j^2}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

Donde:

V_j : Velocidad del fluido en m/s²

k_j : Coeficiente de pérdida del accesorio (codo, Te, válvula, etc), adimensional

ρ_e : Densidad del gas en kg/m³

j : Tipo de accesorio evaluado

ΔP_{mn} : Presión por accesorios en N /m²

Si consideramos la ecuación de la presión dinámica (ecuación 3.9), semejante a la de presión por accesorios (ecuación 3.15), y sustituimos a ρ_e por ρ_a (ecuación 3.6), y V_j por V_s (ecuación 3.10), y dejando los subíndices en j y no en s . Por lo que la ecuación 3.15 se puede escribir de la siguiente manera. (Ecuación 3.16).

$$\Delta P_{mn} = \rho_a \left(\frac{8Q^2 T_a}{\pi T_e} \right) \sum_j \left(\frac{k_j}{D_j^4} \right) \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

¹¹ El factor de fricción (f) que se usa en el método racional para resolver problemas de flujo de fluidos, es función del número de Reynolds, así como el material y condición de la pared del tubo.

El coeficiente de pérdidas por accesorios (k), se obtiene de tablas como: Crane, ASTM, AWWA, Chemical Engineering, etc. Fuente: "Tubería Industrial" Charles T Littleton.

3.2.6 COMPROBACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TIRO

El tiro disponible debe ser suficiente para vencer las pérdidas por fricción y accesorios y dejar una expresión dinámica en la boca de salida de la chimenea. Por ello se debe cumplir la siguiente ecuación (3.17).

$$\Delta P_m \geq P_d + \Delta P_{my} + \Delta P_{mn} \quad (\text{Ecuación 3.17})$$

Sustituyendo en (3.17) las expresiones (3.7), (3.11), (3.14), y (3.16), y realizar algunas simplificaciones, obtenemos la ecuación 3.18.

$$gH_c \left[\frac{T_e}{T_a} - 1 \right] \geq \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{1}{D_s^4} + \sum_i f_i \frac{L_i}{D_{mi}^5} + \sum_j \frac{k_j}{D_j^4} \right) Q^2 \quad (\text{Ecuación 3.18})$$

En donde, la temperatura y el caudal volumétrico de gases se suponen constantes a lo largo de toda la chimenea. A su vez, el sumatoria en i está extendido a todos los conductos atravesados por el flujo de gases a evacuar, el sumatoria en j a todos los accesorios.

Si la desigualdad se cumple será prueba inequívoca de que, con el tiro natural, se puede conseguir una velocidad de salida superior a V_s inicialmente estimada, y un caudal de gases superior o igual al del fabricante del equipo a Q_e .

Una cuestión a tener en cuenta es que si el caudal Q obtenido como solución de la ecuación (3.18), es apreciablemente mayor que el caudal Q_e indicado por el fabricante del equipo de proceso, la estequiometría de la combustión podría verse alterada, así como la temperatura de los gases T_e a la salida de la caldera. Ello obligaría a un proceso de cálculo iterativo.

3.2.7 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES A LO LARGO DE LA CHIMENEA

La temperatura es importante en los gases para la determinación del tiro de una chimenea. Mayor trascendencia tiene la temperatura de salida de gases en el

cálculo de ΔH , para este caso se toma un valor medio de temperatura, T_m , de los gases (ecuación 3.19)^B.

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (\text{Ecuación 3.19})$$

Donde:

T_m : Temperatura media de los gases en °K ó °C

T_e : Temperatura del gas a la entrada en °K ó °C

T_s : Temperatura del gas a la salida en °K ó °C

Visto el interés que presenta el estudio de la caída térmica a lo largo de la chimenea, procedamos a su análisis efectuando el correspondiente balance térmico: la pérdida de calor de los gases es igual al flujo térmico que escapa a través de las paredes de la chimenea.

La pérdida de calor por unidad de tiempo, ΔQ_H , se puede expresar como se indica en la ecuación 3.20.

$$\Delta Q_H = \rho_e Q_e C_p (T_e - T_s) = G_e C_p (T_e - T_s) \quad (\text{Ecuación 3.20})$$

Donde.

Q_e : Caudal volumétrico de gases a evacuar en m³/h

C_p : Calor específico de los gases a presión constante en kcal /kg °C

G_e : Caudal másico de gases a evacuar en kg/h

ρ_e : Densidad de los gases a evacuar en kg/ m³

ΔQ_H : Perdida de calor en kcal/h

El cálculo del flujo térmico a través de las paredes se efectúa bajo la hipótesis de transmisión por convección y conducción¹³, despreciándose la radiación. El

^B La deducción de las ecuaciones del balance de energía de la chimenea y temperatura se describe en los anexos.

coeficiente de transferencia total, (C_t), para una superficie lateral de chimenea compuesta por tres materiales se describe mediante la ecuación 3.21.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_e} \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

Donde:

C_t : Coeficiente global de transmisión de calor en kcal / (m² s °K)

h_i y h_e : Coeficientes de transmisión de calor por convección interno y externo, del espesor de cada una de las paredes en kcal/(m² s °K)

λ : Coeficiente de conductividad térmica correspondiente a cada uno de los materiales en kcal/(m s °K)

d : Diámetro interior de las regiones en m

El cálculo del flujo de calor que escapa a través de las paredes se efectuará suponiendo una diferencia de temperatura media entre el interior y el exterior de la chimenea, debido a la transferencia de energía y se evaluará por medio de la ecuación 3.22:

$$\Delta T_m = T_m - T_a = \frac{T_e + T_s}{2} - T_a \quad (\text{Ecuación 3.22})$$

Donde:

T_a : Temperatura del aire exterior de la chimenea en °K ó °C

De manera que, si llamamos A_i a el área de la chimenea, el balance energético quedará como se muestra en la ecuación 3.23.

$$G_e C_p (T_e - T_s) = C_t A_i \left[\frac{T_e + T_s}{2} - T_a \right] \quad (\text{Ecuación 3.23})$$

Ecuación en donde conocemos la totalidad de valores a excepción de T_s . Sin embargo, la solución, requiere un proceso iterativo al depender los coeficientes h_i y h_e de las temperaturas a determinar. Para un primer tanteo se supone un h_i en función de T_e (posteriormente la haremos depender de T_m), y se estima un último valor térmico por convección externa (ΔT)_{ce} para el valor de h_e .

Calculado T_s , y conocido por tanto T_m , se renuevan los coeficientes h_i y h_e , este ultimo a partir de

$$(\Delta T)_{ce} = \frac{C_t}{h_e} (T_m - T_a) \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

Donde:

$(\Delta T)_{ce}$: Temperatura por convección externa en °K ó °C

En donde el h_e de la ecuación (3.24) es el que nos ha servido para la anterior estimación. Dos iteraciones acostumbran a ser suficientes para la completa resolución.

Si el valor de T_s es muy inferior al de T_e debe replantearse la ecuación tal y como se ha dicho, comprobando el tiro.

Cuando la chimenea tiene una altura H_0 pequeña, los cálculos de pérdida de calor no van a ser muy significativos, por lo que se puede considerar una pérdida de 0,07°C por metro de altura de chimenea, debido a que la transferencia de energía es mínima.

3.3 DEFINICION DE MUESTREO

El muestreo es la recolección de un contaminante que proviene de una fuente. El muestreo proporciona información, sobre si una industria cumple con sus parámetros de descarga, si el equipo es eficiente, si el rendimiento de combustión en el proceso es adecuado¹⁴.

El muestreo en una fuente fija o móvil, permite calcular los factores de emisión para un proceso industrial, mientras que el muestreo atmosférico nos da información de calidad de aire, lo que permite desarrollar estrategias de control y evitar accidentes.

3.3.1 METODOLOGIA DE MUESTREO EN CHIMENEAS

En la captación de las muestras deben considerar los siguientes aspectos debido a que es una operación delicada⁶:

- Elección del punto o puntos de muestreo (alejados de zonas de turbulencia de la corriente gaseosa).
- Determinación del área transversal del conducto o efluente y elección de los puntos representativos en la superficie.
- Medición de parámetros de la corriente gaseosa (Temperatura, Velocidad y Presión).
- Instalación del aparato en la punta de muestreo.
- Captación de la muestra.

3.3.2 METODOS DE MUESTREO EN FUENTES FIJAS

METODO I. Localización de puertos y determinación del número de puntos transversos.

Se ocupa el método conocido como Isocinético para establecer los criterios y localizar los puertos de muestreo y número de puntos de tomas de lecturas representativas sobre la base de presiones, velocidades y partículas. El método se basa en la división transversal del conducto en un número de áreas iguales, cuando las dimensiones del conducto o chimenea lo permiten, los puertos de muestreo deben colocarse, por lo menos a 8 diámetros corriente arriba del último cambio de dirección y como mínimo a 2 diámetros antes de un cambio de dirección a su desfogue a la atmósfera.

En caso de que el conducto de la chimenea sea cuadrado o rectangular se trabaja con el diámetro equivalente, el cuál se calcula a partir de la siguiente ecuación 3.25.

$$D_E = \frac{2LW}{L+W} \quad (\text{Ecuación 3.25})$$

Donde:

L: Largo en m, ft, in

D_E: Diámetro Equivalente en m, ft, in

W: Ancho en m, ft, in

El número de puntos transversos se determina a partir de graficas (Anexo 1).

Método II: Determinación de la velocidad y flujo de gases.

El método establece la medición de presiones de velocidad mediante el uso de un tubo Pitot y un manómetro inclinado. El tubo empleado es de tipo “S” (Stasscheibe o reverso) del que **C_p** es de 0.85 - 0.1, y presenta la ventaja de no obstruirse ante la presencia de partículas en la corriente gaseosa y una mayor sensibilidad para la detección de velocidades, a esto se le denomina presión dinámica⁹ (**PV**)^{1/2}.

El tubo de Pitot estándar cuyo **C_p** es de 1.0 - 0.12, se emplea para calibrar los tubos tipo “S”, como patrón de referencia y para medir corrientes en donde las concentraciones de partículas son moderadas o nulas, también se emplea en conductos menores a 10 pulgadas. Se procede al registro de las presiones y conociendo la presión barométrica del sitio, se genera la información de la composición volumétrica de los gases en base seca y su respectivo contenido de humedad. La velocidad (**V_s**)⁹ de los gases está dada por la ecuación 3.26:

$$V_s = k_p C_p (PV)_{prom}^{1/2} \sqrt{\frac{T_{s_{prom}}}{P_s M_s}} \quad (\text{Ecuación 3.26})$$

Donde:

C_p: Factor de calibración del tubo Pitot (adimensional)

K_p: Constante del tubo Pitot $128.77 \frac{m}{s} \left[\frac{g}{gmolK} \right]^{1/2}$

(PV)^{1/2}_{Prom.}: Promedio de Presión dinámica en kPa^{1/2}.

T_s: Temperatura promedio de la chimenea en °K.

P_s: Presión en el conducto (absoluta) en kPa

⁹ La Presión Dinámica: Es la suma de las raíces cuadradas de cada una de las presiones dinámicas en los puntos seleccionados divididos entre el número de puntos totales.

⁹ La ecuación de velocidad de gases se determino experimentalmente y es la empleada por la autoridad en materia ambiental, esta ecuación se tomo de la NMX-AA-009-1993-SCFI

$P_s M_s$: Peso molecular en base húmeda en g/gmol

V_s : Velocidad en m/s

3.3.3 MUESTREO DE FUENTES MOVILES

Los contaminantes emitidos por los transportes son un número reducido y bien definido entre los cuales se encuentran el dióxido y monóxido de carbono, hidrocarburos poli aromáticos hidrocarburos ligeros, aldehídos, óxidos de nitrógeno, plomo y partículas en suspensión. Los que con frecuencia se emplean como índices de control son el monóxido de carbono para los motores que funcionan con gasolina y diesel.

El control del monóxido de carbono se realiza con el motor al ralentí o con el vehículo efectuando un recorrido normal. La medida se efectúa por combustión o por absorción en infrarrojo:

1. **Método por Combustión:** Se realiza una post-combustión de los gases de escape y a partir del aumento de temperatura originado determina él por ciento en volumen de monóxido de carbono
2. **Método por Infrarrojo:** Se basa en que la absorción del compuesto por rayos infrarrojos y es proporcional al contenido del contaminante.

CAPITULO IV

**DISEÑO DE SISTEMAS
EXTRACTIVOS PARA MEDICION
DE EMISIONES DE UNA
CHIMENEA**

Actualmente por las normas de emisiones de chimeneas en función del gasto se tienen que emplear sistemas automáticos de monitoreo de chimeneas como el que se va a describir.

El diseño de sistemas de analizadores del tipo extractivo depende de las condiciones de la chimenea y la humedad del gas. En el mercado se diseñan principalmente sistemas de extracción del tipo: Sistemas de Fuente a nivel y de Sistemas de dilución.

4.1 SISTEMAS DE FUENTE A NIVEL

Este sistema analiza la muestra del gas, en un analizador de manera directa en el conducto de la chimenea. Dentro del mercado se tienen tres tipos¹⁵:

a) El sistema Húmedo-Caliente

Este sistema extrae una muestra del conducto de la chimenea de forma húmeda y /o caliente, la cual atraviesa un filtro ubicado en la parte interna de la sonda de análisis, figura 4.1, esta técnica es de gran utilidad en análisis de gases solubles en agua como: el HCl y NH₃, al emplearse esta técnica se deben de tener cuidado de que la muestra no se condense, por lo que es muy importante controlar el sistema calorífico, para evitar condensaciones e incrustaciones de corrosión en el analizador.

Esta técnica se usa actualmente con analizadores ultravioletas, para la medición de SO₂ y NO.

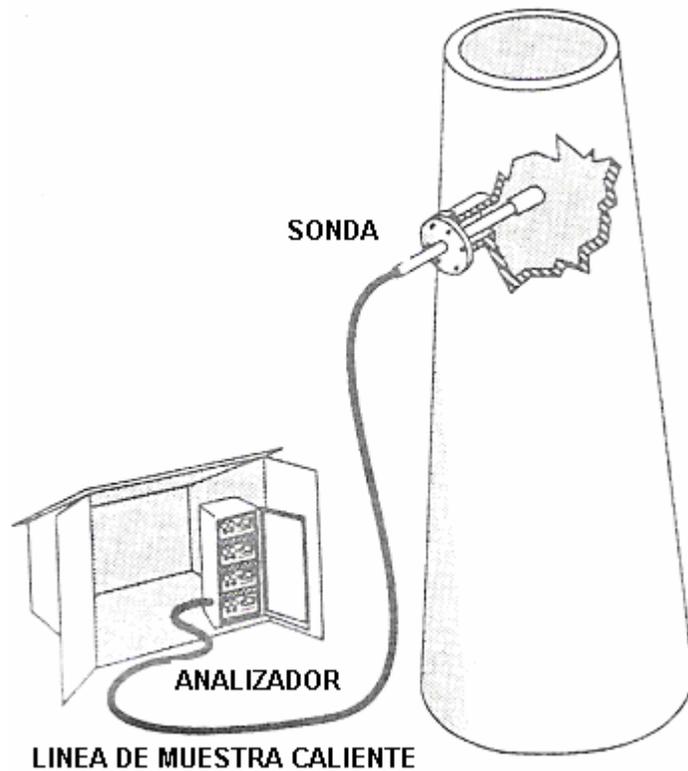


Figura.4.1 Sistema Húmedo-Caliente

b) Sistema Frió- Seco con Acondicionamiento en la Sonda.

Para este sistema el gas analizado se condiciona antes de entrar al analizador, la muestra se obtiene del conducto de la chimenea, pero se reduce su temperatura original hasta la temperatura ambiente, por lo que la muestra pierde humedad. La muestra se introduce en la sonda (figura 4.2) o en el analizador (figura 4.3), con lo que se realiza el análisis, este sistema extractivo es el más empleado, pero presenta el inconveniente del mantenimiento preventivo diario de la sonda.

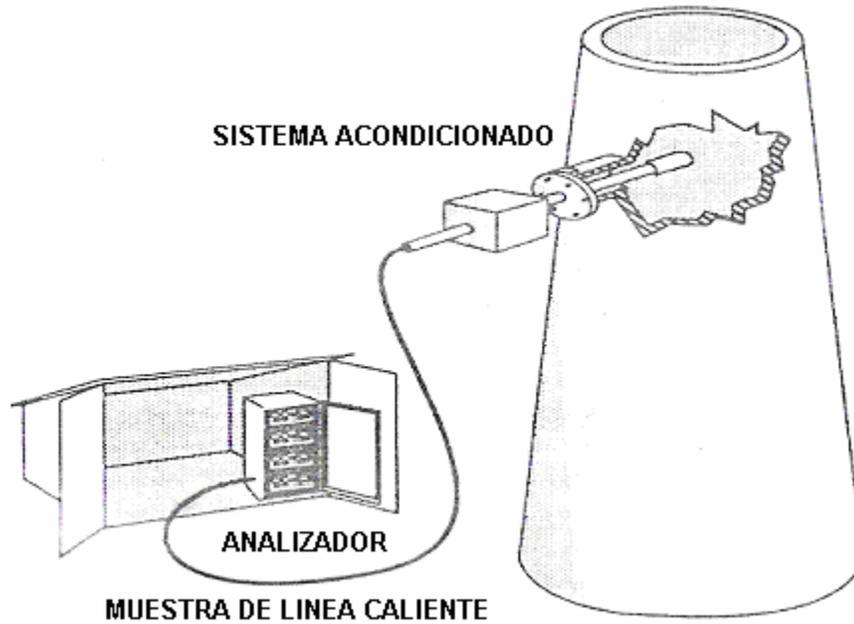


Figura 4.2 Sistema Frío-Seco con Acondicionamiento en la Sonda

c) Sistema Frío- Seco Con Acondicionamiento en el analizador CEM

El sitio donde se encuentra la sonda ofrece la ventaja de usar una línea sin calentar , a esta línea se le debe dar mantenimiento del diario .En este sistema el analizador CEM (Monitoreo Continuo de Emisiones), se encuentra en un cuarto para resguardarlo con la finalidad de operar y verificar la actuación del sistema en el momento del análisis, con la finalidad de mantener la temperatura constante, con lo cual se acondiciona al gas proveniente de la chimenea y le permite tener mayor flexibilidad en el análisis, esto se aprecia en cálculos de emisiones en base seca o al analizar varios gases diferentes.

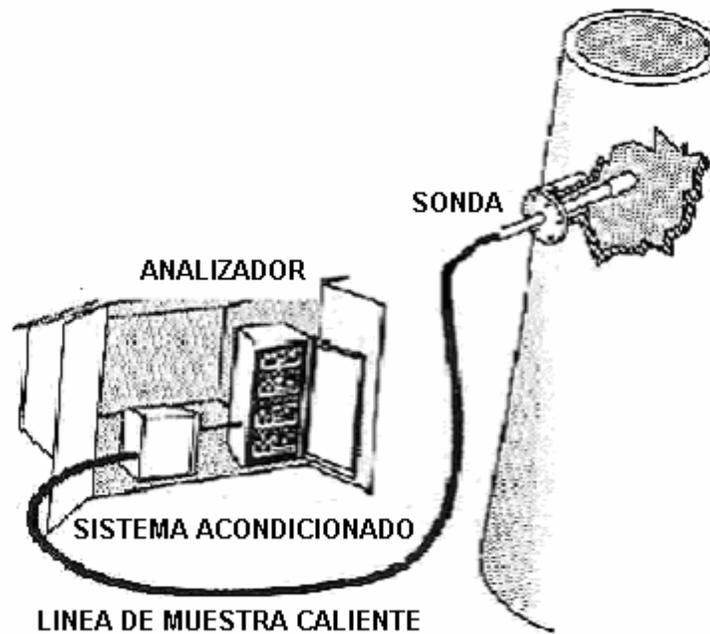


Figura 4.3 Sistema Frió-Seco con Acondicionamiento en el analizador CEM

4.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA EXTRACTIVO DE FUENTE A NIVEL

Un sistema Extractivo de fuente nivelada esta constituido principalmente de un diseño y de una calidad en sus componentes básicos, los cuales son: sondas, líneas de toma de muestras, filtros, sistemas de humedad y bomba¹⁶

4.2.1- SONDAS DE MUESTREO

La sonda es un tubo de metal con un filtro en su parte final (Fig. 4.4 a-c), el cual se instala en el conducto de la chimenea para recoger la muestra a través de un orificio o tubo abierto de la sonda, este es adecuado en situaciones de muestreo, el filtro empleado esta constituido de un material sinterizado, el cual consiste de un metal fundido que adquiere una porosidad, la cual depende de la presión de condensación, este filtro, filtra partículas de 10 a 50 μm en tamaño y frecuentemente se usa como filtros de la sonda. Se emplean filtros de cerámica y sinterizados, para reducir el taponamiento se coloca una placa en el filtro para desviar las partículas de su superficie figura 4-4b, otra técnica es emplear una cubierta cilíndrica alrededor del filtro como se muestra en la figura 4-4c, la finalidad de la cubierta cilíndrica es permitir la difusión del gas.

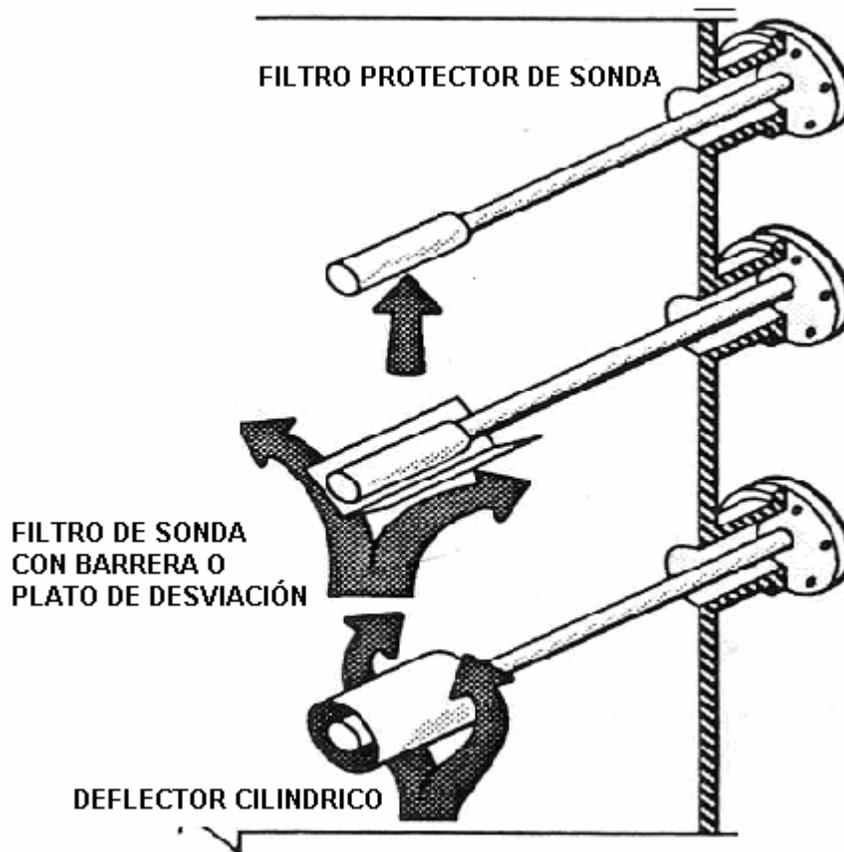


Fig.4.4 Tipos de Sonda de Muestreo

- a) filtro de sonda simple, b) filtro de acero con un plato deflector o de desviación, c) filtro de acero con deflector cilíndrico

El filtro es externo a la sonda, por lo que el filtro es colocado fuera de la chimenea, figura 4.5. Por lo que este esta sostenido por la línea de calor, y tiende a absorber al gas, la porosidad de este filtro va desde 10- 50 μm de porosidad, pero cuenta con un filtro interno de una porosidad de 1 μm

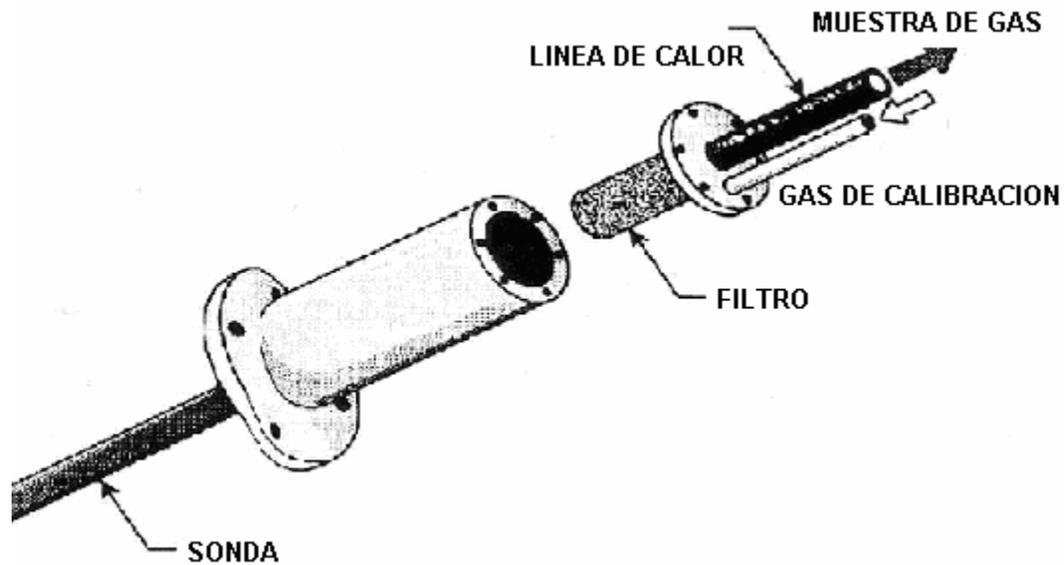


Fig.4.5 Estructura interna de un filtro

Existe otro filtro en el mercado llamado filtro inercial figura 4.6, este diseño de filtro se emplea de manera interna o externa en la sonda, este filtro requiere de una bomba, para introducir el gas de la chimenea en un filtro interno de porosidad de $2,5\mu\text{m}$, la velocidad del gas oscila entre los 70 y 100 ft/s en el conducto de la chimenea.

Los filtros al taparse son un problema en cualquier sistema extractivo, para evitar este problema, se sopla la parte trasera del filtro mediante el gas de alta presión, el cual proviene del aire de la planta, o del vapor de las calderas a una presión de 60 a 100 libras por pulgada cuadrada (psia), en intervalos de 15 minutos a 8 horas y en periodos de 5 a 10 segundos.

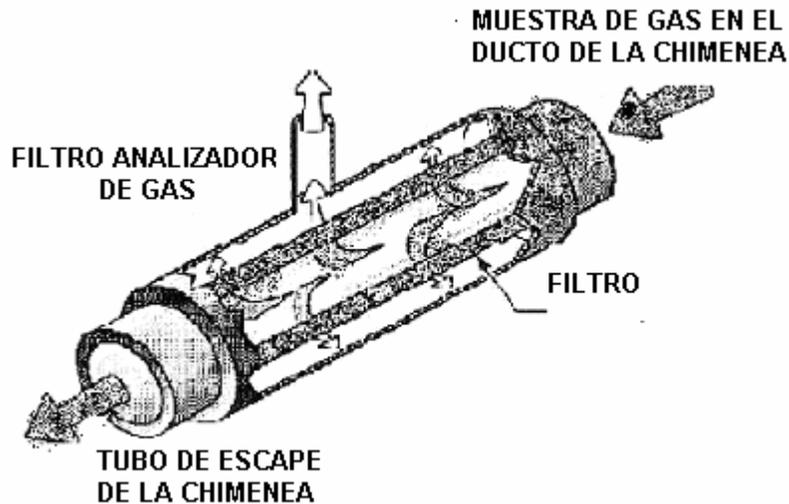


Figura 4.6 Filtro Inercial

4.2.2.- LÍNEA DE MUESTREO

Una línea de muestra se usa para transportar la muestra de la sonda a otros elementos en el sistema acondicionado o al analizador. Sin embargo, es más común el uso de una línea caliente para enviar el gas a un sistema removedor de humedad que enfría el gas y remueve el agua contenida en la corriente del gas muestreado. La remoción de humedad puede realizarse en la sonda o en el analizador. Si la remoción se hace en la sonda, la línea de muestreo, puede usarse para transportar la muestra al analizador. Si la humedad es removida en el lugar donde se encuentra el analizador, una línea caliente debe estar a todo lo largo o sea desde la sonda hasta el sistema de remoción de humedad. El tiempo que toma el gas para fluir a través de una línea con la muestra depende del diámetro del tubo, su longitud, y la rapidez del flujo, el tiempo en llegar el gas a la línea de muestreo se calcula mediante la ecuación 4.1.^{17,18}

$$t = \frac{V}{Q_{sl}} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde:

t = Tiempo de retraso (min)

V = Volumen de línea de muestra (L)

Q_{sl} = Flujo volumétrico del gas a través de la línea (L/min)

Esta expresión se simplifica si se considera que no hay fricción en la pared, ni restricción del flujo. Sin embargo, si la longitud de la línea aumenta, el tiempo de retraso aumentará de acuerdo al volumen de la muestra. Por ejemplo: un flujo de 1 litro por minuto (l/min.), el tiempo de retraso para una sección de 100 pies y 0,25 pulgadas de diámetro en el tubo interior a una presión de 152 mmHg, el tiempo es de 30 s

Las líneas de muestreo pueden contaminarse con condensable o reaccionar con materiales del sistema. La totalidad de la línea necesitará ser reemplazada, porque estos problemas no pueden resolverse. Es evidente, que un sistema extractivo tipo fuente a nivel se diseñara para disminuir la longitud de la línea de muestreo.

La línea de muestreo está generalmente colocada en un punto del tubo, o umbilical. Un ensamble del tubo umbilical típico se muestra en la figura 4.7 Pueden operarse líneas de muestreo a una densidad de constante o pueden ser autolimitadas (se autorregulan). Las líneas auto limitadas son más apropiadas en las aplicaciones CEM (Monitoreo Continuo de Emisiones), porque la línea mantendrá un mínimo de especificaciones de operación de la temperatura, la línea de muestreo esta constituida por: cables eléctricos en el tubo umbilical, termopares en intervalos a lo largo de la línea para medir la temperatura y advertir de cualquier reducción de temperatura y esta constituida por un sistema de calibración el cuál puede contribuir al gasto de un sistema extractivo. Actualmente el sistema usa teflón de PFA o acero No.316 limpio para evitar ataque químico y efectos de adsorción en la pared. Se tienen problemas con el Teflón, debido a su temperatura de ablandamiento es cercana a los 250 °C

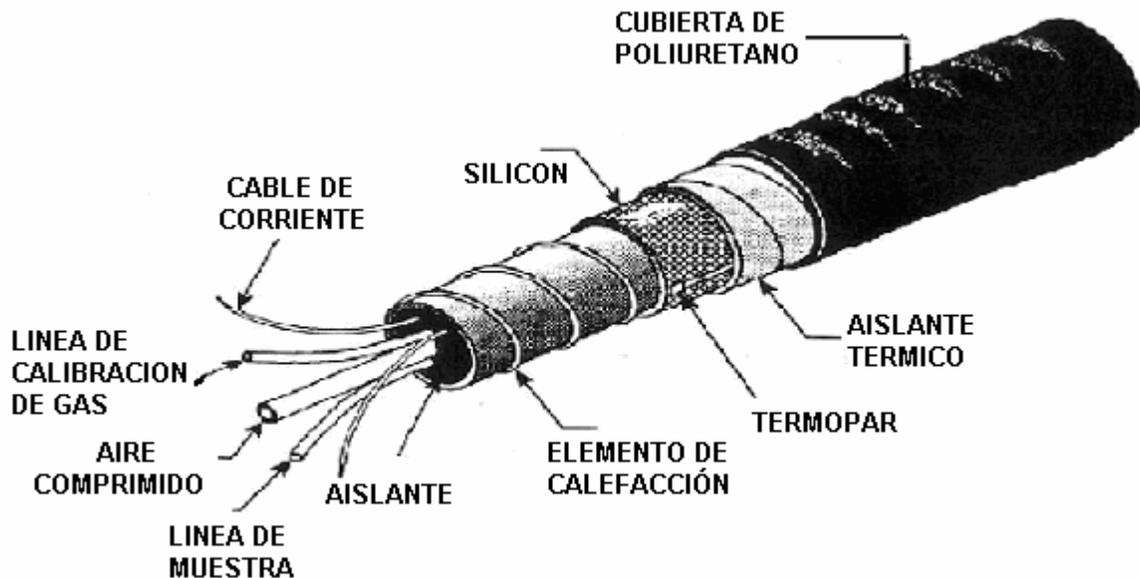


Figura 4.7 Estructura de un tubo umbilical

4.2.3.- MÉTODOS DE REMOCIÓN DE HUMEDAD

La humedad generalmente se remueve antes que el flujo caliente del gas entre a una bomba de muestreo, debido a que el vapor de agua y los gases ácidos pueden condensarse fácilmente en una bomba fría y corroerse en el interior. El enfriamiento abajo del punto de rocío¹⁹, causara que la humedad se condense, y bastantes de los sistemas de remoción de humedad se diseñan a reducir la temperatura de la muestra debajo de este punto. Sistemas de condensación y secadores de permeación son los más comúnmente usados para este propósito de sistemas extractivos. Un sistema exitoso es aquel que esta correctamente dimensionado para las velocidades de flujo en la muestra de gas y el contenido de humedad en el gas de la chimenea. El sistema deberá remover el agua condensada de la corriente del gas para hacer más pequeño su contacto con el gas seco.

¹⁹ Punto de Rocío: Es un punto en un equilibrio Vapor-Líquido (VL), donde las últimas gotas de líquido (rocío) desaparecen. Fuente: "introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química" Smith- Van Ness

4.2.3.1-SISTEMAS DE CONDENSACIÓN

Un sistema típico para la remoción de la humedad consiste en el uso de un condensador refrigerado mecánicamente, este sistema de condensación consiste de un serpentín de teflón o de vidrio, colocado en un líquido (el líquido puede ser agua o una solución anticongelante y en algunos caso aire, enfriados por un sistema de refrigeración). Para evitar que el agua se congele en el serpentín no se permite que la temperatura baje de los 35 °F, una trampa líquida se usa para coleccionar el agua condensable del vapor y este líquido es periódicamente o continuamente removido usando una bomba peristáltica. Otro serpentín se puede añadir para reducir el contenido de agua, es eficaz colocar la bomba de la muestra después del primer serpentín y transportar el gas para que se enfríe, bajo presión, en un segundo enfriador como el que se ilustra en la figura 4.8

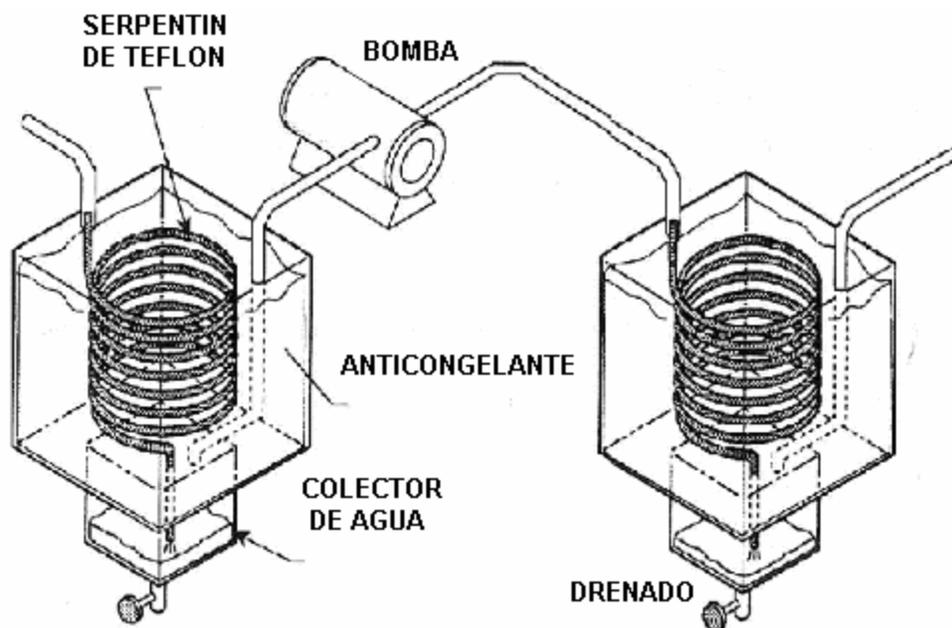


Figura 4.8 Sistema Típico de condensación

Un problema en este sistema es que los gases contaminantes son absorbidos en el condensador. Esto puede ocurrir fácilmente para gases como HCl y NH₃ que tienen solubilidad alta en el agua, gases como SO₂ y NO que son menos solubles son más difíciles de absorber¹⁷.

4.2.3.2.-SECADORES DE PERMEACIÓN

Los secadores de permeación usan membranas de intercambio iónico, la cuál permite el transporte de especies moleculares específicas. Un secador de permeación típico²⁰ usa una serie de tubos de Nafion como se muestra en la figura 4.9. En este arreglo el gas de muestra húmeda entra en los tubos y los flujos de gas de purga secos por fuera en dirección opuesta a los tubos. La fuerza en este intercambio de secador es proporcionada por la purga del gas seco a la salida del tubo. El secador de infiltración requiere que el gas entre en su punto de rocío en el secador, la eficiencia del secador depende de la longitud de los tubos en la entrada de la muestra y la presión del gas en la purga, la capacidad puede aumentar de acuerdo al número de tubos en serie.

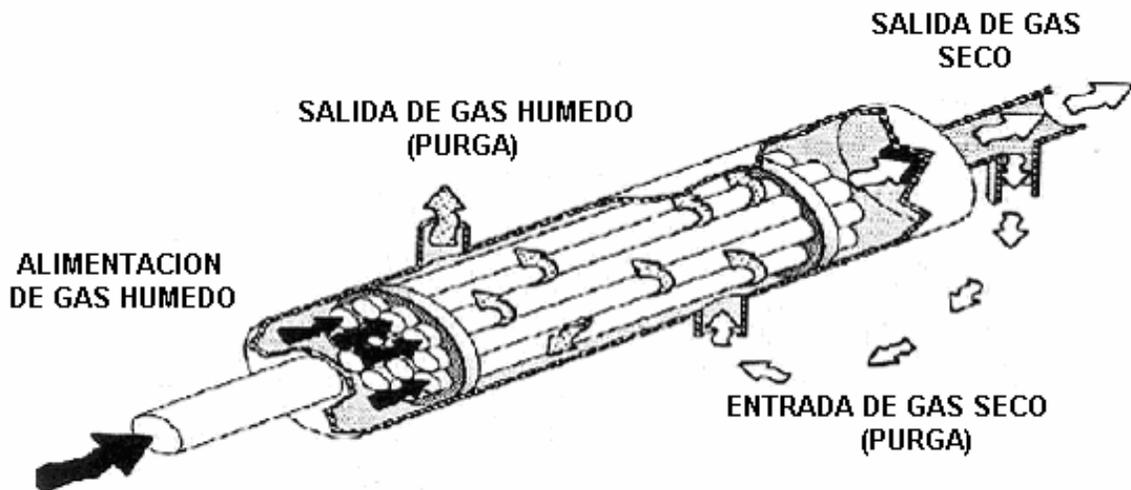


Figura 4.9 Secador de Permeación

El secador de permeación ofrece varias ventajas por encima de sistemas de refrigerantes, debido a que ninguna parte mecánica está incorporada en el sistema, no se requiere ninguna trampa en el condensador, por lo que la contaminación por absorción de agua se evita. Sin embargo, el sistema se puede tapar debido a las gotas de material condensado o de partículas de materia que se introducen de las muestras filtradas de manera inadecuada. Los problemas de líquidos condensados pueden ser mínimos al calentar el lado de la entrada del secador.

4.2.4.- LAS BOMBAS

La bomba es un elemento importante en el sistema extractivo y se usa para transportar la muestra de la chimenea al analizador. Una bomba debe clasificarse según su tamaño de acuerdo a la demanda del analizador de gas y se debe diseñar para evitar que cavite (Fenómeno en donde se generan burbujas de vapor en un fluido que se acelera, es decir, la presión de vapor impide que la presión aumente en una región de la tubería)²¹. Se debe evitar que se introduzcan contaminantes y lubricantes de la bomba.

Dos tipos de bomba que cumplen con estos criterios son (1) la bomba de diafragma y (2) la bomba de eyección. Estas bombas normalmente se usan en fuentes monitoreadas

4.2.4.1 BOMBA DE DIAFRAGMA

La bomba de diafragma es un sistema mecánico en donde el pistón golpea a el diafragma (figura.4.10). El diafragma es redondo de metal flexible, teflón, poliuretano, u otro tipo de elastómero. La acción reciproca del diafragma mueve al gas en estallidos cortos. Cuando el diafragma se levanta, el gas es arrastrado a través de la válvula a la bomba. Cuando el diafragma empuja hacia abajo, la válvula de succión cierra y la válvula de descarga abre. El gas es desplazado fuera de la línea de muestreo. El gas solo tiene contacto con la cámara, diafragma, y válvulas, por lo que la contaminación del gas se reduce.

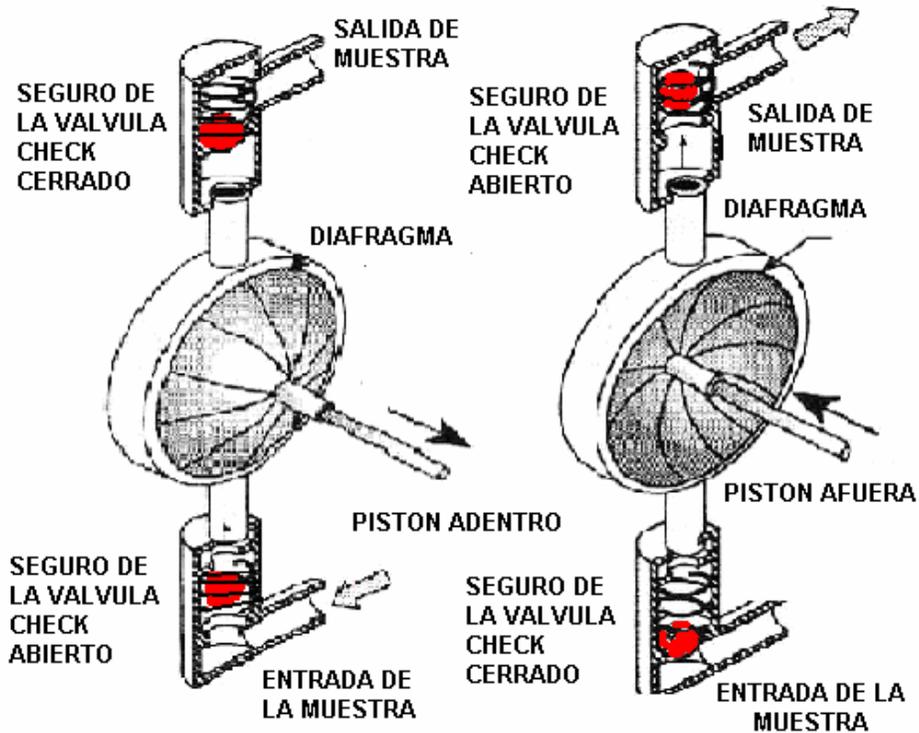


Figura 4.10 Bomba de Diafragma

En las bombas de diafragma, las partículas y el ácido condensado pueden debilitar la cabeza de la bomba por abrasión de la partícula o ataque químico, provocando que la bomba cause en el diafragma una rasgadura o ruptura. La velocidad de flujo de una bomba de diafragma puede controlarse poniendo una válvula en la línea de descarga de la bomba o instalando una línea de desviación y una válvula en la succión de descarga. Si la bomba está operando a una menor capacidad, se controla el flujo con la válvula para evitar grandes caídas de presión en la descarga, lo que dañaría considerablemente a la bomba. Por esta razón, es bueno controlar el flujo en la válvula.

4.2.4.2 BOMBA DE EYECCIÓN

La bomba de eyección (también llamada aspirador de aire) aprovecha la ventaja del efecto Bernoulli (El efecto Bernoulli es una consecuencia directa que surge a partir de la ecuación de Bernoulli: en el caso de que el fluido fluya en horizontal un aumento de la velocidad del flujo implica que la presión estática decrecerá)²¹.

(figura.4.11), para hacer un vacío a través del sistema. En el efecto de Bernoulli, el chorro en movimiento de aire reduce la presión normal del aire con respecto a su flujo. Éste reduce la presión y sirve para que el gas de la muestra entre en la línea; si la velocidad del chorro aumenta, aumenta el vacío. Típicamente una planta con aire filtrado o un cilindro de gas a presión se usa para obtener flujos de gas de alta velocidad.

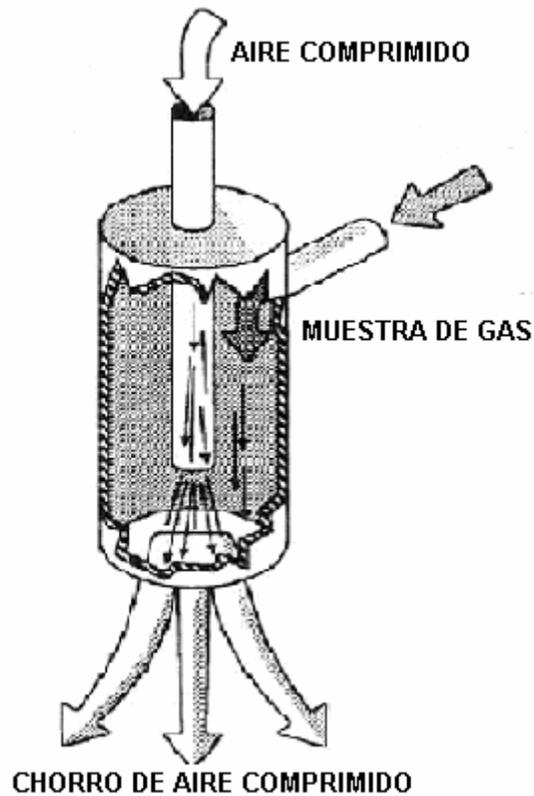


Figura 4.11 Bomba de Eyección

La bomba de eyección en el diseño puede incorporarse como la parte de una sonda del filtro o instalarse fuera de la chimenea como se muestra en la figura.4.12. La bomba pasa la muestra a través de un filtro que se instala fuera de la chimenea.

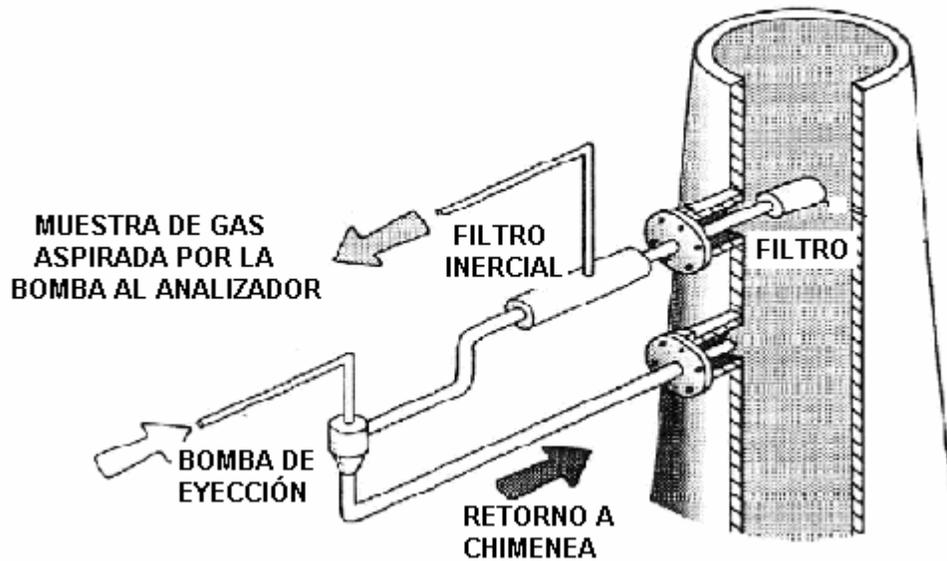


Figura 4.12 Bomba de Eyección montada externamente a la chimenea

4.2.5. FILTROS FINOS

El filtro fino se emplea para eliminar partículas grandes que se encuentran en la muestra del gas. Hay dos grupos de filtros finos: los filtros de superficie y filtros de profundidad.²⁰

4.2.5.1 FILTROS DE SUPERFICIE

Un filtro de superficie simplemente excluye partículas de un cierto tamaño. El material del filtro es poroso al gas, los poros son de tal tamaño que previenen la penetración de partículas de materia fina, los filtros de superficie pueden quitar las partículas más pequeñas que el tamaño de poro del filtro real.

4.2.5.2 LOS FILTROS DE PROFUNDIDAD

Los filtros de profundidad coleccionan partículas dentro del filtro. El filtro esta elaborado de fibras flojamente condensadas de lana de cuarzo o de material del filtro, con un grosor suficiente para eliminar las partículas finas. Se utilizan principalmente para partículas sólidas que contienen aerosoles. Un filtro de profundidad puede usarse como un filtro de sonda.

4.3 SISTEMAS DE DILUCION

El sistema de extracción con dilución se diseña para evitar los problemas de filtración y acondicionamiento del volumen, como ocurre en el sistema de fuente a nivel, este sistema consiste en diluir la muestra de gas, con lo que se reduce la humedad y la cantidad de partículas en el filtrado, debido a que el flujo es mas bajo y las partículas del gas siguen un perfil aerodinámico y entran a la sonda. Se diseñan dos tipos de sistemas de dilución: El sistema de dilución de gas en la sonda o sondas de dilución y el sistema de dilución fuera de la chimenea.²³

4.3.1.- SONDAS DE DILUCIÓN

Una sonda de dilución diluye el gas de la chimenea, mediante aire, esta dilución se presenta en la bomba de eyección y se pueden medir las velocidades en el orificio del tubo venturi. Como se muestra en la figura 4.13. El valor de la proporción de la dilución **R** debe ser menor o igual a 0,53, este valor nos indica que tenemos una buena dilución, las velocidades de dilución comunes son de 100 a 1 m/s ,la sonda de dilución es sensible a los cambios de presión y temperatura en la chimenea.^{24,25} Para determinar la proporción de dilución se emplea la ecuación 4.2, mientras que para determinar el flujo del aire **Q₁** y el del gas **Q₂** utilizamos la ecuación 4.3, la velocidad la obtenemos de la ecuación 3.26.

$$R = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_2} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

$$Q = V * A \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Donde: **Q₁** = Flujo del aire en m³/s

Q₂ = Flujo de la muestra de gas en m³/s

R: Proporción de dilución, adimensional

V: Velocidad en m/s

A: Área de conducto⁹ en m²

⁹ El área en conductos circulares se obtiene de la siguiente forma : $A = \frac{(\pi D^2)}{4}$, y en conductos

rectangulares de la siguiente manera : $A = B * L$; Donde: D es el diámetro en m , B es el ancho del conducto en m y L es el largo del conducto en m

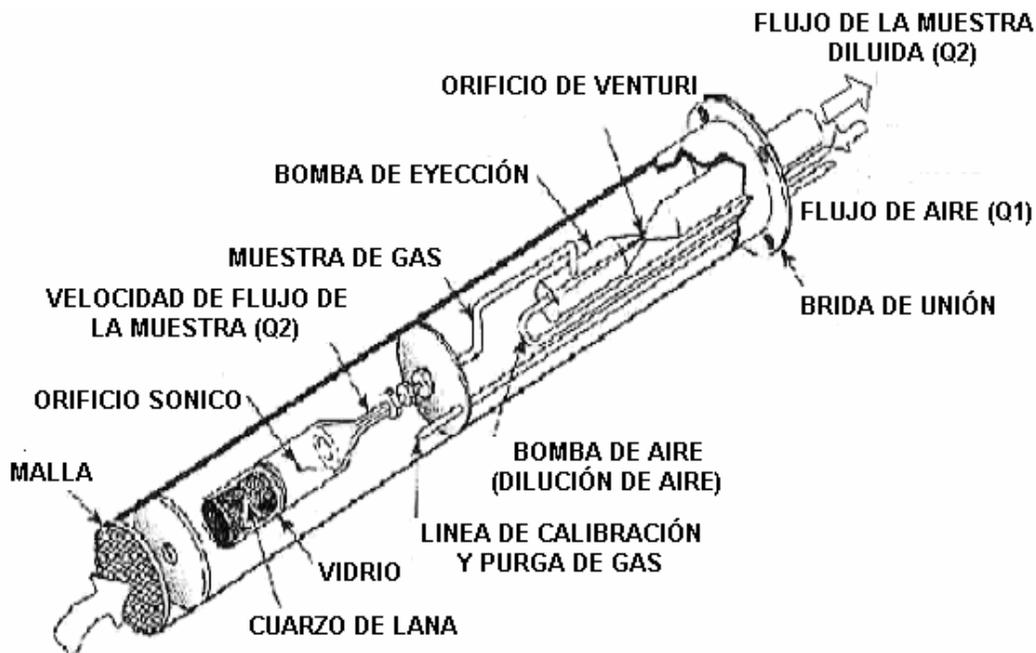


Figura 4.13 Sonda de Dilución

4.3.2 SISTEMAS DE DILUCIÓN FUERA DE LA CHIMENEA

Una alternativa a la dilución es diluir el gas en un ensamble montado después de la sonda, a un costado de la chimenea, o en la caseta de resguardo de CEM (figura.4.13) en esta configuración, el gas se puede diluir usando una u otra bomba que indique el flujo o orificio crítico. Una de las ventajas de este acercamiento es que la muestra no diluida se puede enviar a un analizador de oxígeno antes de que este proceda al sistema de dilución, esto proporciona la alternativa de usar un analizador de CO₂ para el monitor del diluyente, lo cual es necesario en una sonda de dilución, en un sistema de sondas. Si el gas se diluye en el albergue, una línea de muestra es calentada para transportar el gas. Esto significa que una de las principales ventajas de usar el sistema de dilución se pierde. Los valores de un sistema de dilución se reportan en base húmeda o en base seca.

4.4 TOMA DE MUESTRA EN LA INTERFASE Y CALIBRACIÓN DEL MONITOR

La toma de muestra en el sistema extractivo y el sistema de análisis de gas deben ser capaces de ser calibrados como una unidad. En el diseño del sistema, los gases se inyectan para su calibración en una sonda, en la cual se verifica que no tenga fugas; el sistema debe comprobar la calibración de manera directa en el equipo, esto ocurre cuando se tiene una lectura en el instrumento. Los gases de calibración normalmente se inyectan automáticamente cada 24 h, aunque algunos operadores prefieren realizar la calibración manualmente de tal forma que el sistema sea observado continuamente.

CAPITULO V

SISTEMAS IN-SITU DE

MONITOREO PARA MEDIR

CONCENTRACIONES DE GAS Y

FLUJO EN CHIMENEAS

Los sistemas de análisis de concentraciones de las chimeneas, medidos directamente en el puerto de muestreo son ampliamente conocidos como sistemas In-Situ. Estos sistemas consisten principalmente de un analizador que emplea un sensor para medir el gas de forma directa en el conducto de la chimenea, al realizar la medición se tienen dos tipos de analizadores In-Situ:²⁶

- a) Analizadores Puntuales.
- b) Analizadores de Trayectoria de Luz emitida

5.1.- ANALIZADORES PUNTUALES

Los analizadores puntuales consisten de sensores electromecánicos ó electro-ópticos montados al final de la sonda que es insertada en el conducto de la chimenea, la medición puntual en las chimeneas es usualmente hecha por los sensores sobre una distancia de solo unos cuantos centímetros como se ilustra en la figura 5.1.

Este analizador realiza una medida en un punto del conducto, a través de sondas, sin embargo este punto se extiende de 5 a 10 cm en sistemas electro-ópticos, en los casos donde las concentraciones de los gases son bajas, las distancias oscilan hasta 1 m

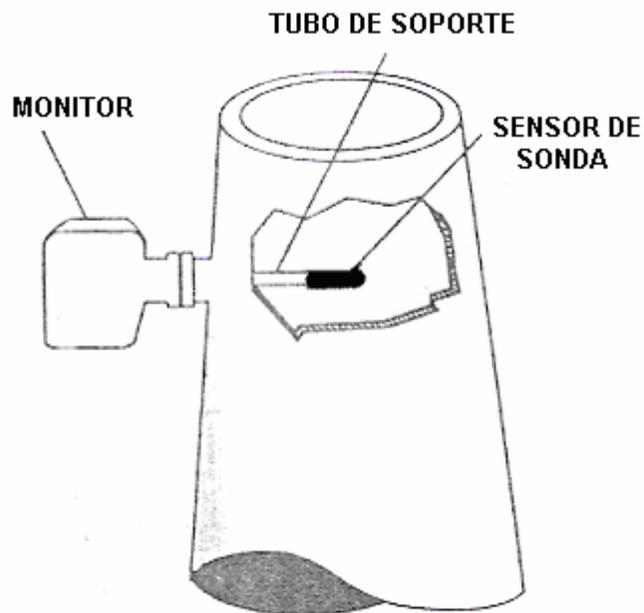


Figura 5.1 Analizador Puntual del Tipo in-situ

5.2.- ANALIZADORES DE TRAYECTORIA A DE LUZ EMITIDA Y RECIBIDA

Los analizadores de trayectoria miden a través de la trayectoria de un haz de luz que se trasmite a lo largo del diámetro de la chimenea y que lógicamente pasa a través de la nube de gases que se despiden y la interrelación de la luz transmitida con el flujo del gas, son usados para obtener un valor cuantitativo de la concentración de la contaminación emitida.

El principio de medición de este tipo de analizadores es en la actualidad ampliamente usado para la medición de la humedad y la concentración de contaminantes de los gases de combustión, en este trabajo analizaremos a los analizadores de un solo paso y los analizadores de doble paso.

5.2.1 ANALIZADORES DE UN SOLO PASO

En el caso de los analizadores de un solo paso, la luz es transmitida de la unidad que se encuentra de un lado de la chimenea a un detector que se encuentra en el lado opuesto de la chimenea, haciendo solo un paso a través de la chimenea, este sistema es empleado para medir las concentraciones de los gases, la velocidad del gas y la humedad del mismo, este sistema se ilustra en la figura 5.2.²⁷

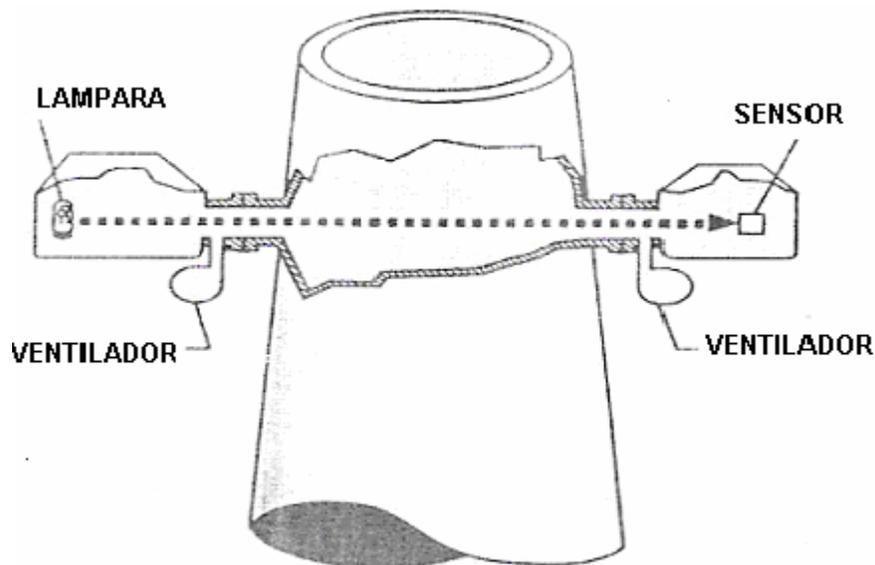


Figura 5.2 Analizador in-situ de tipo CEM de un Solo Paso

5.2.2 ANALIZADORES DE DOBLE PASO

En los sistemas analizadores de doble paso la luz emitida es reflejada por un espejo que se encuentra del lado opuesto de la fuente transmisora haciendo una doble medición, la cuál es detectada por un transductor, como se ilustra en la figura 5.3, este sistema es empleado principalmente para medir las concentraciones y humedad del flujo de gas, este sistema cuenta con una sonda de calibración en el equipo analítico.

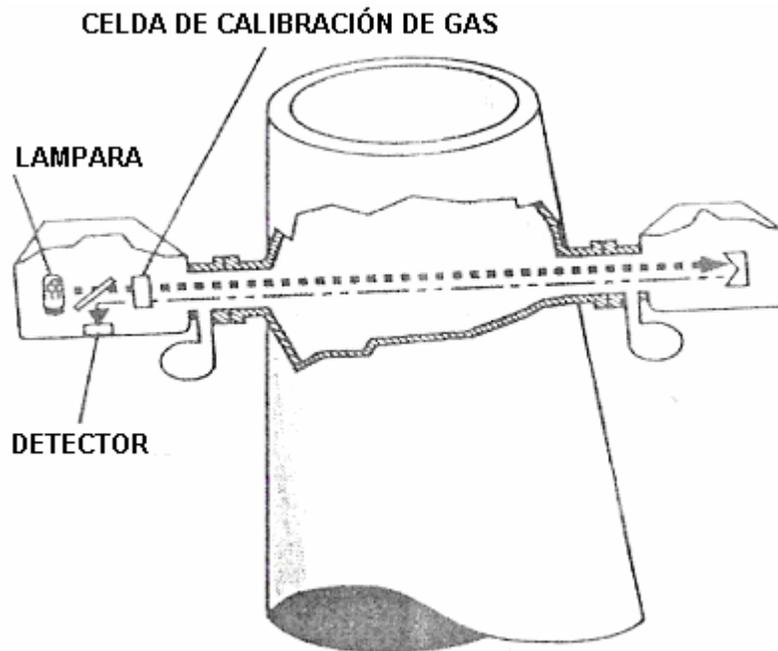


Figura 5.3 Analizador in-situ de tipo CEM de Doble Paso

5.3 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD O FLUJO DE GAS

La medida de la velocidad de los gases en sistemas CEM, esta controlada por estándares de acuerdo con las siguientes ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$Pmrs = C_s Q_s \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

$$Q = A_s V_s \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

Donde:

$Pmrs$: Flujo masico del contaminante en kg/h

C_s : Concentración del contaminante en kg/m^3

Q_s : Flujo volumétrico del contaminante en m^3/h

A_s : Área de conducto de chimenea en m^2

V_s : Velocidad de gas en el conducto de la chimenea en m/h

Los métodos empleados para medir un flujo volumétrico, varían de acuerdo al tipo de tubo Pitot empleado, para determinar la velocidad se requiere conocer la presión dinámica⁹, la temperatura del conducto de la chimenea, la densidad del gas.²⁸

Las Técnicas más comunes para medir la velocidad de flujo se muestran en la tabla 5.1

Tabla 5.1 Técnicas para medir velocidades en chimeneas

Técnica	Instrumento o Sensor
Diferencia de Presión	Tubo de Pitot , annubar
Sistemas Termales	Sensores de Calor
Velocímetro Acústico	Transductor Ultrasónico

Fuente: Utility Boiler parameter ²⁸

5.3.1 DIFERENCIA DE PRESIÓN

Para medir la diferencia de presiones de un gas en un conducto de chimenea se emplea: el tubo de Pitot y el tubo annubar

a) Tubo de Pitot

El tubo de Pitot es el instrumento más empleado en la técnica de medición de flujo de gases y esta especificado por la EPA (figura 5.4). El tubo de Pitot es quizá la forma más antigua de medir la presión diferencial y también conocer la velocidad de circulación de un fluido en una tubería. Es un pequeño tubo con la entrada orientada en contra del sentido de la corriente del fluido. La velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula, al ser un punto de estancamiento,

⁹ Presión Dinámica: Es la suma de las raíces cuadradas de cada una de las presiones dinámicas en los puntos

seleccionados divididos entre el numero de puntos totales. $\Delta P^{1/2} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta P_i)^{1/2}}{n}$; donde $\Delta P^{1/2}$ en $kPa^{1/2}$.

Fuente: NMX-AA-009-1993-SCFI "CONTAMINACION ATMOSFERICA-FUENTES FIJAS- DETERMINACION DE FLUJO DE GASES EN UN CONDUCTO POR MEDIO DE TUBO PITOT"

convirtiéndola su energía cinética en energía de presión, lo que da lugar a un aumento de presión dentro del tubo de Pitot. El interior que actúa de tubo de Pitot y el exterior como un medio de medir la presión estática.

Los tubos de Pitot son instrumentos sencillos, económicos y disponibles en un amplio margen de tamaños. Si se utilizan adecuadamente pueden conseguirse precisiones moderadas y, aunque su uso habitual sea para la medida de la velocidad del aire, se usan también, con la ayuda de una técnica de integración, para indicar el caudal total en grandes conductos y, prácticamente, con cualquier fluido. Probablemente la principal desventaja sea su dificultad para medir bajas velocidades del aire. Para líquidos quizás el principal problema sea la rotura de la sonda.

La presión estática del fluido se mide mediante un manómetro, y al emplear esta presión en la ecuación 3.26, se obtiene la velocidad del gas.²⁹

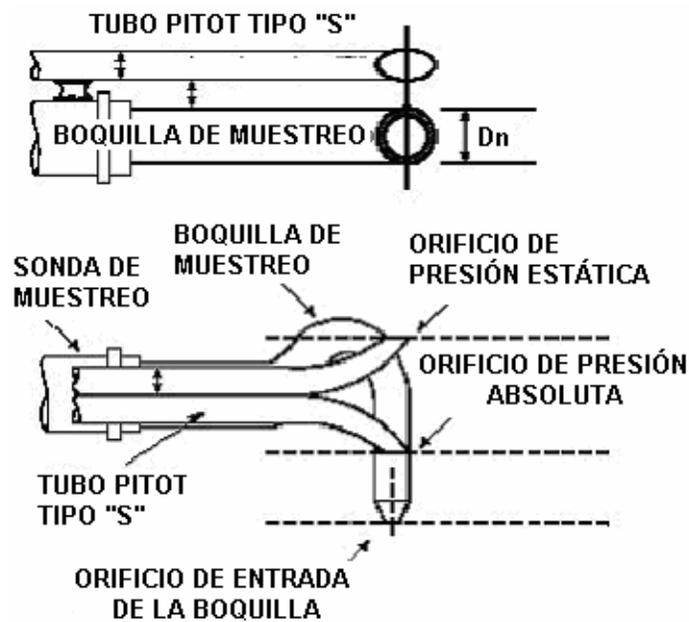


Figura 5.4 Tubo Pitot tipo "S"

b) El Annubar

El tubo Annubar es una innovación del tubo de Pitot., en este tubo se aprecia un tubo exterior, situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería, y dos tubos interiores. El tubo exterior presenta cuatro orificios en la cara aguas arriba

de la corriente, que se utilizan para interpolar los perfiles de velocidad y realizar un promedio, y otro orificio en el centro del tubo pero en la cara aguas abajo de la corriente. De los dos tubos que están en su interior, uno sirve para promediar las presiones obtenidas en los cuatro orificios, midiendo la presión total, mientras que el otro tubo, que se encuentra en la parte posterior, mide la presión estática en el orificio central aguas abajo de la corriente.

Existen diferentes tipos de tubos Annubar, cuya selección depende del tamaño de la línea y su aplicación. El tubo Annubar tiene mayor precisión que el tubo de Pitot, así como una baja pérdida de carga, utilizándose para la medida de pequeños y grandes caudales de fluidos. El tubo de Pitot y annubar son sensibles a bajos y altos flujos debido a bajas diferencias de presión (ΔP) por lo que las mediciones no son tan precisas en esas condiciones.³⁰

5.3.2 SISTEMAS TERMALES

Los sistemas termales están constituidos por instrumentos de transferencia de calor a lo largo del flujo del gas, este sistema emplea principalmente dos sensores, uno con termopar y otro sin termopar como se ilustra en la figura 5.5, donde un alambre de resistencia de platino se enreda en un cilindro de cerámica el cuál esta protegido por un tubo de acero inoxidable, el sensor mas grande mide la velocidad, mientras que el corto mide la temperatura, estos dos elementos de resistencia se conectan a un circuito para mantener la temperatura del sensor . Como el movimiento del gas en la chimenea enfría al sensor, la corriente a través del elemento se incrementa para mantener la temperatura constante. Esta corriente y la señal resultante de este voltaje que es generado se relacionan al calor perdido por el sensor. Este dispositivo se emplea en el control de procesos industriales y se debe tener cuidado cuando las temperaturas aumentan de forma considerable, debido a que afectan la calibración del sensor, estos sistemas miden el flujo masico y no el volumétrico, por lo que la velocidad en el sensor depende de la conductividad térmica del gas y esta a su vez depende de la viscosidad y el calor especifico, debido a que la viscosidad del gas depende de la

velocidad y la densidad. El instrumento reporta un flujo masico de acuerdo con la ecuación 5.4.

$$\{señal\} \propto \left\{ \begin{array}{l} perdida \\ de \\ calor \end{array} \right\} \alpha \rho v_s A_s \text{ (Ecuación 5.4)}$$

Donde:

ρ : Densidad del gas en kg/m^3 .

V_s : Velocidad del gas en m/h

A_s : Área del conducto de la chimenea en m^2

De esta expresión el flujo masico no corresponde al flujo de un contaminante en específico, cabe mencionar que con el conocimiento adecuado de la densidad del gas se puede conocer el flujo volumétrico del gas a lo largo del conducto de la chimenea.

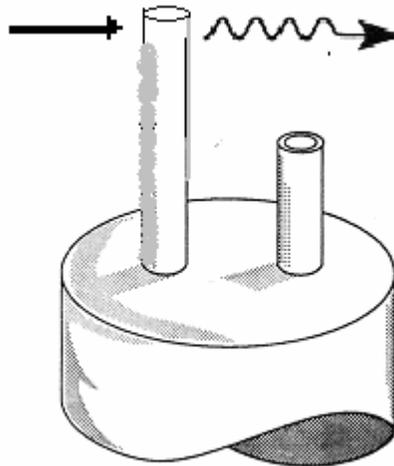


Figura 5.5 Sensor Termal

5.3.3 VELOCIMETRO ACÚSTICO

Este método mide el tiempo que toman los pulsos reales del flujo de gas en la dirección de la chimenea, contra la dirección del flujo de gas en el conducto, como se ilustra en la figura 5.6 y se basa principalmente en pulsos ultrasónicos de acuerdo con criterios de la EPA y la supervisión de un fluido líquido.

$$v_s = \frac{l}{2 \cos \alpha} \left[\frac{1}{t_A} - \frac{1}{t_B} \right]$$

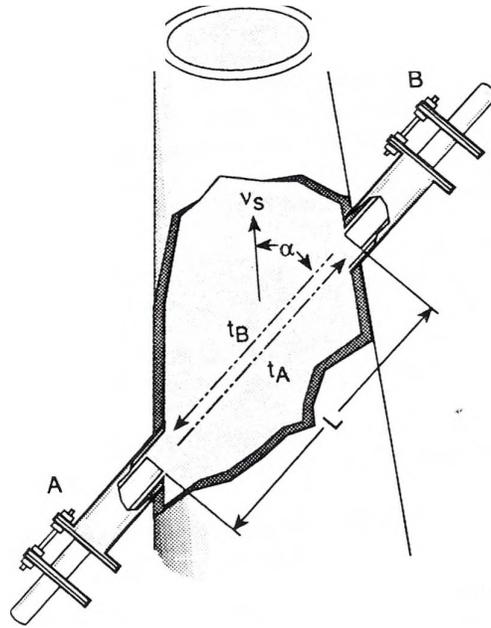


Figura 5.6 Velocímetro acústico para determinar el flujo de un gas

El sistema transmite pulsos ultrasónicos en un rango de 50 khz, en ambas direcciones del flujo (hacia arriba y hacia abajo) a lo largo del conducto, los pulsos son recibidos en dos transductores ultrasónicos opuestos al conducto con un ángulo de inclinación de 45° comúnmente, en cada transductor hay sistema eléctrico el cual transmite una pulsación ultrasónica (l) opuestos al transductor, los transductores convierten la señal eléctrica en acústica y de acústica a eléctrica, la velocidad a la que la pulsación atraviesa el conducto depende de si es en la dirección o contra el flujo, por lo que se tienen dos expresiones para determinar la velocidad: Velocidad en dirección del flujo (ecuación 5.5) y Velocidad contra la dirección del flujo (ecuación 5.6).³¹

a) Velocidad en dirección del flujo

$$v_A = \frac{l}{t_A} = c + v_s \cos \theta \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Donde:

l : Pulsación ultrasónica entre A y B en m

t_A : Tiempo de transmisión de A a B en s

V_A : Velocidad de A a B en m/s

C: Velocidad de sonido en m/s

V_s : Velocidad del gas en el ducto m/s

Θ : Angulo entre ducto y pulsación adimensional

b) Velocidad contra la dirección del flujo

$$v_B = \frac{l}{t_B} = c - v_s \cos \theta \quad (\text{Ecuación 5.6})$$

Donde:

t_B : Tiempo de transmisión de B a A en s

V_B : Velocidad de B a A en m/s

Se considera que $\pm V_s \cos \theta$ es una contribución de un vector en la dirección de l , de la dirección de la velocidad del flujo y el transito de la pulsación, si ambas ecuaciones se restan, se obtiene una expresión para determinar la velocidad del gas en la chimenea (ecuación 5.7).

$$v_s = \frac{l}{2 \cos \theta} \left[\frac{1}{t_A} - \frac{1}{t_B} \right] \quad (\text{Ecuación 5.7})$$

Esta ecuación es independiente de la velocidad del sonido, de la densidad, presión y temperatura del gas.

CAPITULO VI

METODOS ANALITICOS

Las técnicas analíticas empleadas en los sistemas de monitoreo CEM son diversas como se ilustran en la tabla 6.1, para cada tipo de sistema, en este capítulo sólo se analizan las mas empleadas para cada sistema.

Tabla 6.1 Técnicas Analíticas usadas en sistemas de monitoreo de emisiones continuas

Sistema Extractivo	Sistema In-Situ	
	Gases	Partículas
Espectroscopia de Absorción: -Espectrofotometría -Absorción Diferencial -Correlación de un Filtro de Gas Transformada de Fourier en Infrarrojo	Punto: Espectroscopia de Absorción -Segunda Derivada de Espectroscopia Electro analíticas: -Polarografía -Electro catálisis	Punto: -Transformación de Intercambio iónico -Radiación Nuclear
Métodos de Luminiscencia -Fluorescencia (SO ₂) -Quimicolumiscencia (NO _x) -Fotometria de Flama (SO ₂)	Trayectoria: Espectroscopia de Absorción -Absorción Diferencial -Correlación de Filtro de un Gas	Trayectoria (opacidad): -Absorción y Dispersión de Luz
Métodos Electro analíticos -Polarografía -Potenciometria -Electro catálisis (O ₂)		
Método Paramagnético		

Fuente: Continuos Emisión Monitoring¹⁵

6.1.- LEY DE LAMBERT-BEER

En el análisis de emisiones de monitoreo continuo es fundamental el uso de la ley de Lambert-Beer, esta ley es empleada para relacionar la cantidad de luz absorbida en la determinación de la concentración del contaminante. Para emplear esta ley se considera un sistema en donde se tenga una sonda de luz, un flujo de gas y un sensor para medir la intensidad de la luz, por ejemplo un conducto de chimenea como el que se ilustra en la figura 6.1, la ley de Lambert-Beer en el estado de transmitancia de luz directa, disminuye exponencialmente por el producto $\alpha c l$ de acuerdo a la ecuación 6.1.³²

$$T_r = \frac{I}{I_o} = e^{-\alpha c l} \text{ (Ecuación 6.1)}$$

Donde:

T_r = Transmitancia de la luz directa del flujo de gas

I_o = Intensidad de luz de entrada del gas por segundo

I = Intensidad de luz de salida del gas por segundo

α = Coeficiente de Absorción molecular en L /g cm

c = Concentración del contaminante en g/L

l = Distancia de la trayectoria de luz al flujo de gas en cm

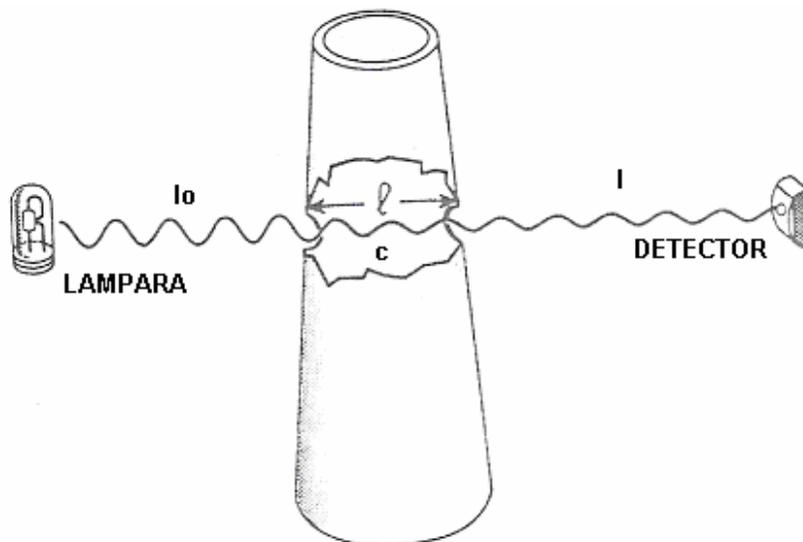


Figura 6.1 Sistema de medición de concentración de un gas contaminante

El coeficiente de absorción (α) es dependiente de la longitud de onda de la luz y las propiedades del contaminante, el coeficiente es una expresión cuantitativa.

La concentración de un gas se obtiene de la expresión de la ley de Lambert-Beer si α y l son conocidos, cuando se tiene una curva de calibración como se ilustra en la figura 6.2, la cuál muestra una curva de calibración típica para un instrumento de absorción de luz. En esta grafica se traza $\ln(1/Tr)$ contra la concentración del gas (c) en lugar de la transmitancia contra la concentración, esto permite generar una línea recta, la cuál es de gran ayuda para la calibración del instrumento.

La curva de calibración se obtiene al emplear 3 normas de calibración ó al conocer la concentración. La intensidad (I_0) se determina al emplear un detector de gases como nitrógeno o aire, debido a que estos gases no presentan contaminantes, la calibración del instrumento comienza cuando se inyecta el gas en el detector en intervalos de tiempo y concentraciones conocidas, por lo que esto nos permite registrar valores de intensidad (I_1, I_2, I_3), por lo que la relación I_n/I_0 son calculadas para obtener los valores de $\ln(1/Tr)$ y al conocer las concentraciones podemos graficar y obtener la curva de calibración.

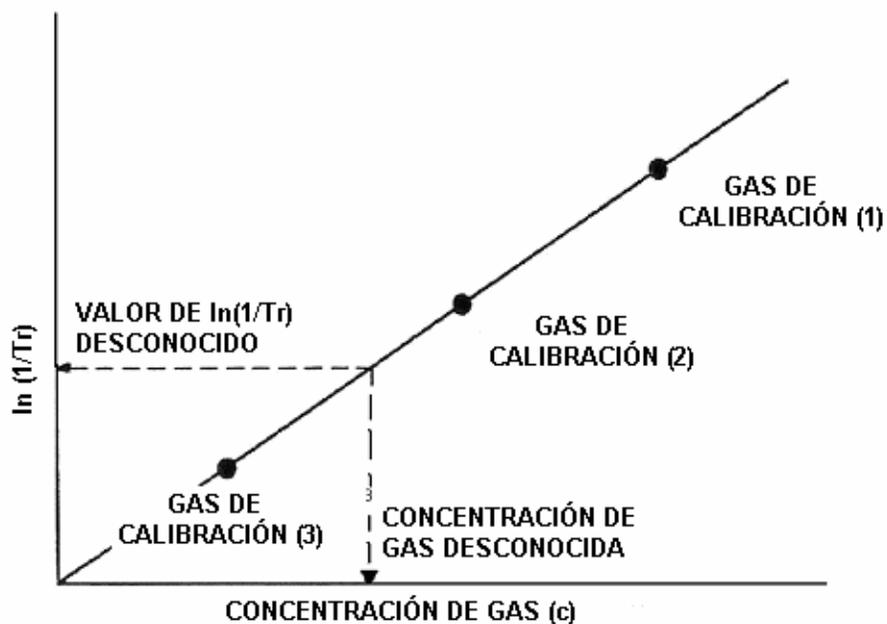
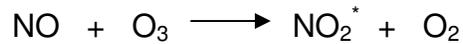


Figura 6.2 Curva de calibración de la Ley de Lambert-Beer

6.2 ANALIZADOR DE QUIMILUMINISCENCIA PARA MEDIR NO Y NO_x

La quimiluminiscencia se presenta cuando la luz genera una reacción química, en 1960 se encontró que la relación de NO y O₃ (ozono) produce una radiación infrarroja de 500 a 3000 nm, esta reacción es la siguiente:



En donde se observa la radiación de quimiluminiscencia por encima de una región estrecha de la emisión total, esto nos permite determinar la concentración del óxido nítrico, mediante el uso de un filtro con el cuál se selecciona una región de 600 a 900 nm de acuerdo con la figura 6.3.

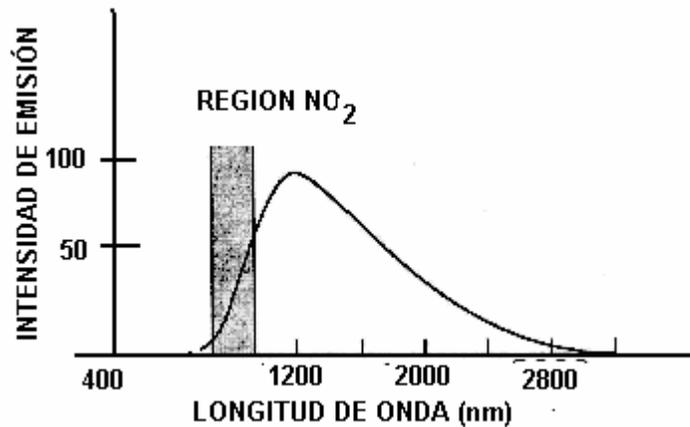


Figura 6.3 Espectro de emisión para el NO₂ en Quimiluminiscencia

En un analizador de NO_x de quimiluminiscencia el O₃ (ozono) es generado por la irradiación de UV (ultra violeta) en el oxígeno efectuada en el tubo de cuarzo, con la finalidad de que la reacción ocurra por completo el O₃ se encuentra en exceso en la cámara, mediante una dilución se minimiza el efecto de amortiguamiento, el resultado registrado en el fotomultímetro es proporcional al número de moléculas de NO, en lugar de la concentración de NO, es muy importante controlar el flujo

de la muestra, como se ilustra en la figura 6.4, en donde se muestran las características del analizador.²⁹

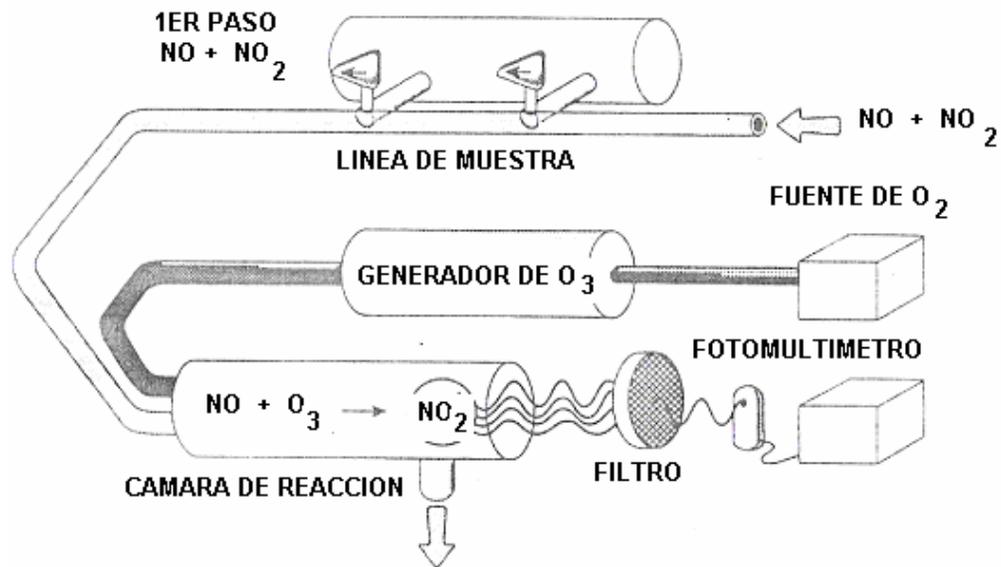
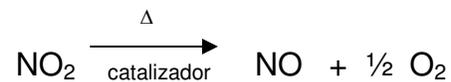


Figura 6.4 Analizador de Quimiluminiscencia para medir NO

El NO₂ no reacciona por lo que se debe reducir a NO antes de que se tenga una lectura por este método, actualmente los analizadores emplean un catalizador para efectuar este proceso (reducción de NO₂ a NO), en base a la siguiente reacción.



La reacción se lleva a cabo en una cámara hecha de acero inoxidable, se emplea comúnmente como catalizador al Molibdeno ó Carbón Activado, con la finalidad de que el proceso se desarrolle a bajas temperaturas.

El NO producido reacciona con el O₃, por lo que la quimiluminiscencia mide la lectura de NO + NO₂ ó NO_x como se muestra en la figura 6.5.

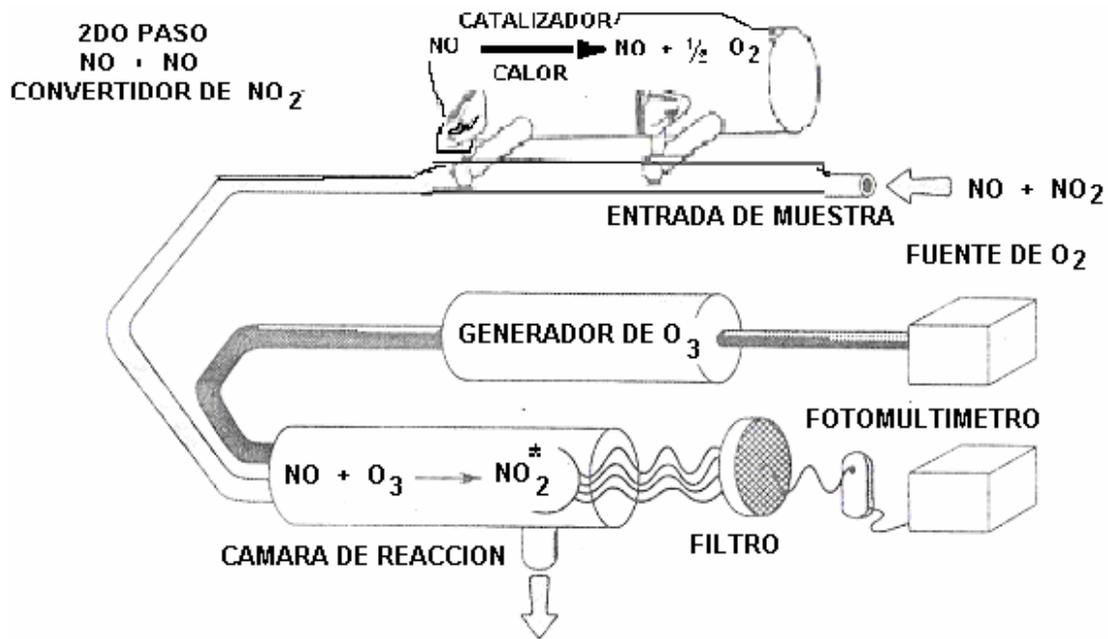


Figura 6.5 Analizador de Quimiluminiscencia para medir NO + NO₂

Un primer paso del sistema es la lectura de la muestra de gas en el convertidor o baypass, es decir donde ocurre el cambio de la reacción.

Primer paso: [NO] + NO₂

Un segundo paso ocurre cuando el gas de la muestra entra a la cámara de reacción y el NO₂ es reducido a NO, el proceso es el siguiente:

Segundo paso: [NO] + [NO (convertido por NO₂)] = [NO_x]

Para obtener la cantidad de NO₂ de la muestra, se realiza la diferencia del segundo paso con el primer paso.

$$[\text{NO}_2] = (\text{paso 2}) - (\text{paso 1})$$

En algunos equipos la lectura del gas de muestra de NO puede pasar a NO₂ de manera automática, se ha demostrado que el empleo de este método analítico es confiable.

6.3 ANALIZADOR ELECTROCATALITICO PARA MEDIR OXIGENO (O₂)

El avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de celdas de combustible para determinar el oxígeno (O₂). Los analizadores que emplean celdas de combustible, consisten de celdas que contienen concentraciones electrolíticas simples y emplean un electrolito como catalizador sólido para permitir el flujo de electrones.

Este método emplea un material cerámico especial (Óxido de circonio (ZrO₂) cubierto con una capa delgada de platino), el cuál es empleado como electrolito, para permitir la transferencia de oxígeno de una celda a otra (figura 6.6). En la celda la concentración de oxígeno de referencia es de un 21%, mientras que la concentración de oxígeno de la muestra es menor entre un 3 y 6 % con respecto al oxígeno de referencia. Cuando el óxido de circonio se calienta a 850 ° C, los iones de oxígeno (O⁻²) fluyen a través del material, mientras se emplea la película de platino como catalizador, es decir que permite el paso de los iones de oxígeno (O⁻²) de una región a otra. Esto ocurre debido a que el ion de circonio forma una capa de cristal delgada en la cuál retiene a los iones de oxígeno (O⁻²), mientras se genera un espacio en la celda, esto se presenta cuando el electrolito se encuentra caliente, este proceso continua hasta que se determina en la celda la presión parcial o la concentración de oxígeno en ambos lados del instrumento. Esto ocurre cuando ambos lados tienen el mismo potencial químico y se encuentran en equilibrio, en la practica no es muy frecuente alcanzar el equilibrio, debido al constante flujo de electrones de oxígeno en el óxido de circonio.³⁴

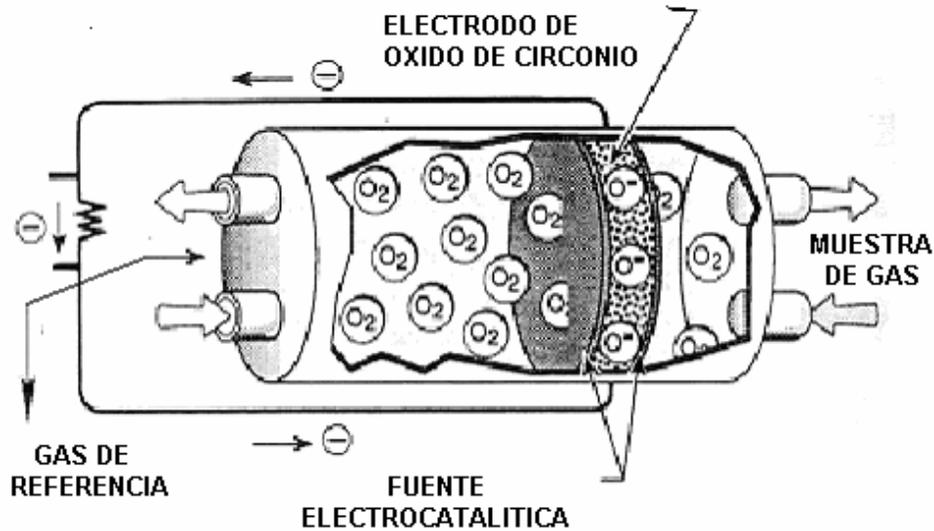


Figura 6.6 Analizador Electrocatalítico para medir O_2

En esta técnica lo que se mide es la fuerza electromotriz (**emf**) y se obtiene de la ecuación 6.2, la cuál esta expresada en términos de la presión parcial del oxígeno.

$$emf = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{ref}(O_2)}{P_{muestra}(O_2)} \quad (\text{Ecuación 6.2})$$

Donde:

$R = 8,314 \text{ J/mol } ^\circ\text{K}$, constante de gases

$F = 96\,487 \text{ C}$ (coulombs), constante de Faraday

T = temperatura de la celda en $^\circ\text{K}$

$P_{ref}(O_2)$ = presión parcial de O_2 de referencia de la celda en N/m^2

$P_{muestra}(O_2)$ = presión parcial de O_2 de muestra de la celda en N/m^2

emf :Fuerza electromotriz en J/C ó volt

La fuerza electromotriz se mide cuando la temperatura es estable y la presión parcial del oxígeno en la zona de referencia de la celda es conocida, por lo que el porcentaje de la muestra es fácil de obtener. Esta técnica se emplea tanto en analizadores in-situ como en sistemas extractivos de tipo CEM.

6.4 ANALIZADOR DE CORRELACION DE UN FILTRO DE GAS (GFC)

Esta técnica de análisis emplea una célula de referencia que contiene un 100% de concentración del contaminante, este método se emplea para medir SO_2 , NO , CO_2 , CO , NH_3 , H_2O , HCl y Hidrocarburos, principalmente se emplea en sistemas extractivos, las características principales de este analizador se muestran en la figura 6.7.

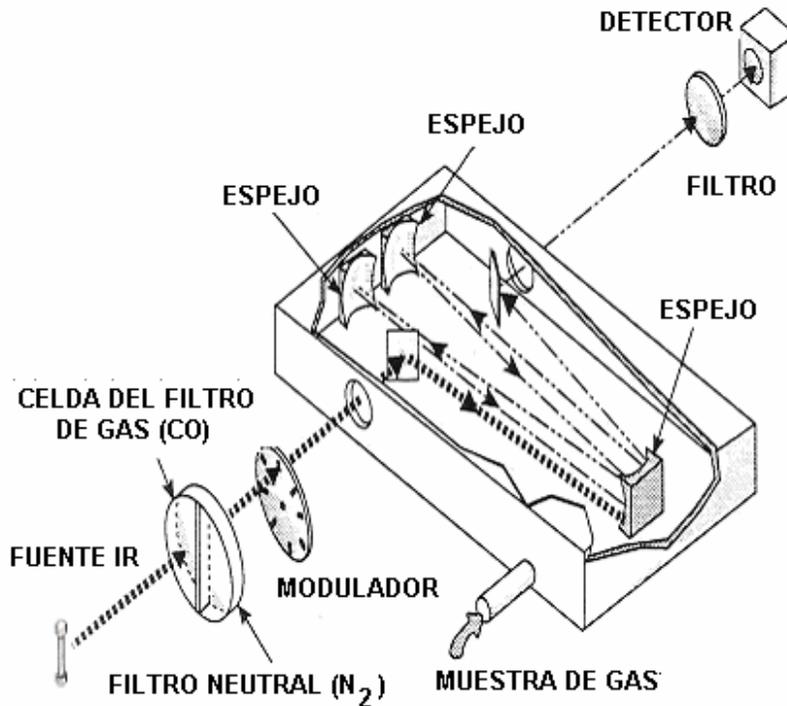


Figura 6.7 Filtro de Correlación para un sistema extractivo para medir CO

Un analizador del tipo GFC para analizar CO, es atravesado por una radiación de infrarrojo, en el filtro el cuál contiene un gas neutro como N_2 en un lado y en el otro extremo CO, la luz pasa a través de un modulador el cuál crea una señal alterna, la luz se introduce en la celda de la muestra y se refleja en los espejos para tener diversos pasos en el gas, por lo que se incrementa a lo largo de la trayectoria (l) de la longitud e incrementa la sensibilidad del instrumento. Una porción de la luz es absorbida por las moléculas de CO, en la celda de muestra la radiación permite medir el IR.³⁵

La técnica de GFC ofrece varias ventajas a diferencia de los métodos de celdas en donde el gas vale cero, esto debido a que el instrumento no se limita a un

máximo de absorción es decir que se puede emplear a diversos rangos de longitudes sin ningún problema de detención, además porque una medida se obtiene de un extremo y otra de uno de referencia, lo que permite, variaciones de intensidad de luz y fluctuaciones en el infrarrojo, además de suciedad en los espejos por fuera y no por dentro, este equipo se puede emplear de manera directa en los conductos de las chimeneas para medir de uno a ocho gases sin problemas.

6.5 TECNICA DE ABSORCIÓN DIFERENCIAL

La técnica de Absorción Diferencial se emplea con frecuencia en sistemas in-situ, esta técnica mide a lo largo de la trayectoria la absorción de la luz, características presentes en algunos gases, considerando una selección adecuada de la medida de la longitud de onda¹⁵. En regiones espectrales donde la absorción de la luz es alta, la luz puede absorberse por encima de la chimenea (en algunos casos mayores a 10 m y en sistemas de doble paso a 20 m). Un poco de energía de luz necesita alcanzar el detector para que una región espectral con un coeficiente de absorción débil, genere el sistema adecuado.

En los analizadores in-situ, las partículas y las gotas de agua en los flujos de los gases esparcen la luz, reduciendo la cantidad de luz que atraviesa por el espejo óptico del detector, por lo que los problemas de opacidad deben ser menores a un 20 ó 30%, debido a que el instrumento esta diseñado para opacidades menores, estas fluctuaciones de opacidad no deben interferir en la medida del instrumento cuando se emplea la técnica de Absorción Diferencial.

Si la intensidad de energía de luz de la longitud de onda medida es igual a la longitud de onda de referencia, cada una de estas intensidades es reducida por un factor constante y la reducción afuera como se indican en las ecuaciones 6.3 y 6.4

$$I = KI_{WP} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

$$I = KI_{OWP} \quad \text{Ecuación 6.4}$$

Donde:

I = Intensidad de luz medida a una longitud de onda.

I_0 = Intensidad de luz medida a una referencia de longitud de onda.

K = Fracción de luz asociada a partículas y gas de la línea

I_{wp} = Intensidad de luz hipotética medida a una longitud de onda con una partícula presente

I_{owp} = Intensidad de luz hipotética de referencia de una longitud de onda con una partícula presente

Por lo que se puede tener la siguiente relación (I / I_0) (ecuación 6.5).

$$\frac{I}{I_0} = \frac{KW_{WP}}{KI_{OWP}} = \frac{I_{WP}}{I_{OWP}} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

Al combinar las ecuaciones 6.3 y 6.4. Por lo que esta técnica es adecuada en analizadores in-situ, porque las partículas no interfieren en el método analítico, sin embargo las interferencias en esta técnica se generan por absorción de vapor de agua y otras especies sin que estas afecten a la medida de la longitud de onda de manera significativa.

6.6 ESPECTROSCOPIA DE SEGUNDA DERIVADA

La técnica de Espectroscopia de Segunda Derivada³⁶ es empleada por los químicos analíticos, para medir absorciones bajas, que se generan por concentraciones bajas de los gases en trayectorias cortas, esta técnica se emplea en sistemas in-situ, debido a que permite medir el gas en regiones pequeñas de longitud (5 a 10 cm). La Espectroscopia de Segunda Derivada, emplea una región de espectro de absorción de la cual se obtiene una segunda derivada con respecto al pico máximo de la longitud de onda. Al obtener la segunda derivada de la curva de absorción de la ley de Lamber-Beer, se observa que esta es proporcional a la concentración del gas de acuerdo con la ecuación 6.6

$$I = I_0 e^{-\alpha c l} \quad \text{Ecuación 6.6}$$

Donde:

I_0 = Intensidad de la luz en la entrada de la sonda

I = Intensidad de la luz en la salida de la sonda

α = coeficiente de absorción molecular L/g cm

c = concentración del gas g/L

l = Longitud de la trayectoria del gas en cm

Obteniendo la segunda derivada de la ecuación 6.6 con respecto a una longitud de onda, se obtiene la ecuación 6.7.

$$\frac{\partial^2 I}{\partial \lambda^2} = -cl \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} I \quad \text{Ecuación 6.7}$$

En esta expresión se observa que la intensidad es proporcional a la concentración, el espectrofotómetro de segunda derivada produce una señal que es proporcional a la ecuación 6.8

$$\frac{\partial^2 I}{\partial \lambda^2} \text{ at } \lambda_0 \quad \text{Ecuación 6.8}$$

Donde: λ_0 es el centro de la curva de absorción

Si se tiene una señal **S**, esta es proporcional a la segunda derivada a su vez es proporcional a la concentración del gas, esta señal se produce en el instrumento y se asocia con la ecuación 6.9

$$S = \frac{\delta}{4} \frac{\partial^2 I}{\partial \lambda^2} \quad \text{Ecuación 6.9}$$

Donde: δ es la distancia de exploración (frecuentemente 1.8 nm)

Sustituyendo en la ecuación 6.9 la segunda derivada por la ley de Lambert-Beer, se obtienen las ecuaciones 6.10 y 6.11

$$S = \frac{\delta^2}{4} \left[-cl \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} I \right] \quad \text{Ecuación 6.10}$$

$$\frac{S}{I} = Kcl \quad \text{Ecuación 6.11}$$

Donde: K es una constante, la cual representa el rendimiento del instrumento y es proporcional a la concentración del gas con respecto a su longitud de trayectoria óptica.

Dividiendo **S** entre **I**, por problemas causados por variaciones de intensidad de la fuente, absorción de los gases y partículas. La técnica de segunda derivada funciona, cuando la luz entra en una lámpara de UV (ultra violeta) por debajo de la sonda de medición y retorna al reflejarse en un retroreflector de forma cúbica, el

receptor difracta la señal de la absorción para seleccionar la longitud de onda. Un movimiento del lente o espejo oscilante refracta la señal de absorción para obtener una mejor lectura en el instrumento, como se ilustra en la figura 6.8.

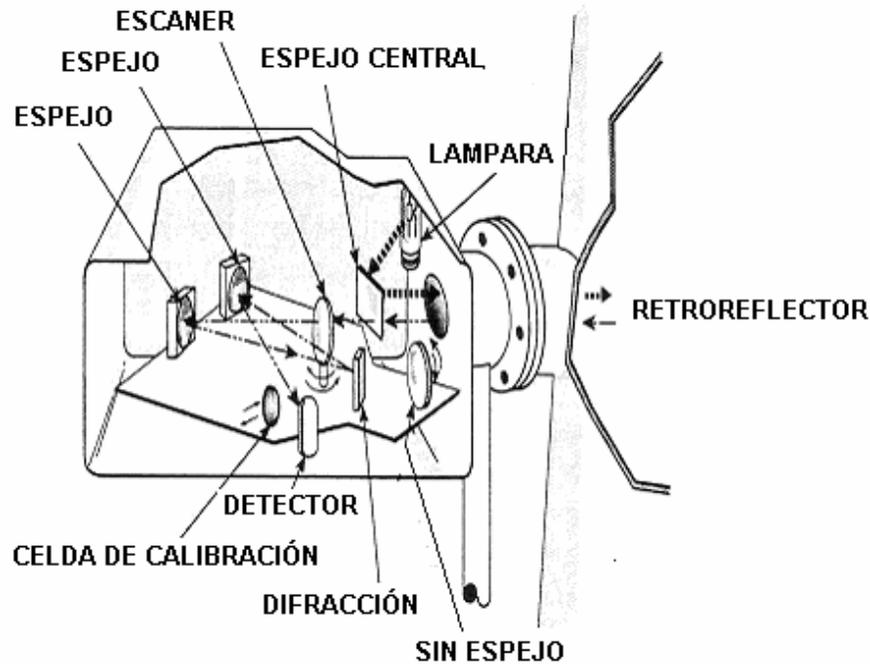


Figura 6.8 Equipo de Segunda Derivada para sistemas in-situ

El funcionamiento adecuado de este instrumento se verifica de 3 formas: En la celda del gas interior, la celda del gas externo y en la calibración del gas.

- a) Celda del gas interior: La celda del gas interior se coloca en ceros, después del movimiento del espejo, la celda contiene SO_2 y NO , en este sistema electro-óptico emite una señal al transductor, para un funcionamiento adecuado de este equipo es importante calibrar el equipo diario.
- b) Celda de gas Externa: Las celdas de calibración independientes siguen la longitud de trayectoria del gas por encima del instrumento, esta celda reporta una lectura, pero no es muy confiable, por lo que no se emplea con frecuencia.

- c) Calibración del gas: Para un funcionamiento adecuado del instrumento este se calibra cuando se inyecta gas en la zona de medición (por un orificio) como se ilustra en la figura 6.9, este gas entra en la línea de calibración, hasta llegar a la lente y de ahí pasar al orificio de la chimenea hasta obtener un valor en el transductor constante o estable, una vez obtenido este valor se purga la sonda, para efectuar los análisis, la temperatura es controlada al emplear un filtro cerámico en la sonda, cuando hay variaciones de lecturas es recomendable limpiar el filtro de la sonda y la lente.

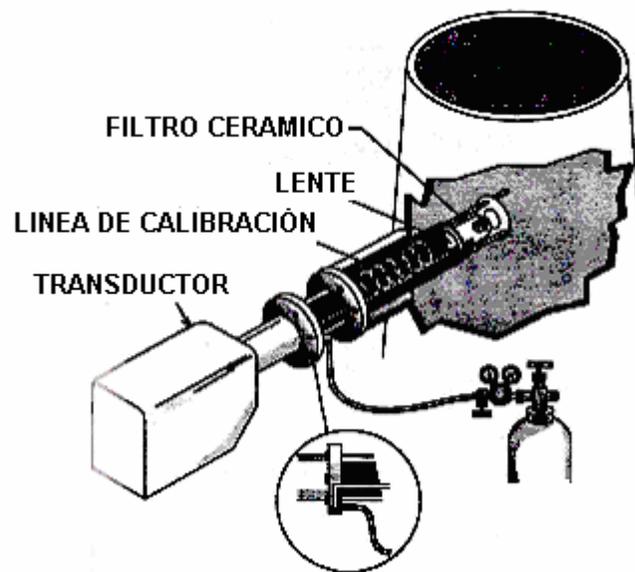


Figura 6.9 Calibración de gas de un sistema in-situ

CAPITULO VII

**NORMAS DE CALIDAD EN
CHIMENEAS**

Las normas se establecen para proporcionar un margen adecuado de seguridad en la protección a la población. Durante el diseño de la Norma Oficial para la Emisión de Contaminantes a la Atmósfera, los aspectos de economía y tecnología no fueron tomados en cuenta como determinantes; ya que la decisión se debía basar exclusivamente en consideraciones sobre la salud de la población.

Las normas deben proveer un grado razonable de protección a la salud contra aquellos riesgos que la investigación aún no ha definido completamente de los que no se tienen evidencia suficiente para sospechar que existen³⁷.

A continuación se presentan los valores normados para los contaminantes publicados en el Diario Oficial de la Federación del 3 de diciembre de 1994.³⁸

7.1 REQUISITOS EN FUENTES FIJAS

De acuerdo con el Art. 17 del reglamento de LGEEPA⁶ los responsables de las fuentes fijas están obligados a:

- I. Emplear equipos y sistemas de control.
- II. Integrar un inventario de emisiones.
- III. Instalar plataformas y puertos de muestreo.
- IV. Medir sus emisiones contaminantes a la atmósfera.
- V. En ciertos casos, realizar muestreos perimetrales.
- VI. Llevar bitácora de equipos de proceso y control.

Todas las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan o puedan emitir olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera requieren de licencia de funcionamiento expedida por la Semarnap de vigencia indefinida.

En la licencia de funcionamiento se especifica: el periodo con que debe presentarse el inventario de emisiones; el periodo para realizar la evaluación de sus emisiones y monitoreo perimetral; las medidas y acciones que deberán

realizarse en caso de una contingencia y el equipo requerido para prevenir y controlar la contaminación de la atmósfera.

La secretaria podrá fijar en la licencia de funcionamiento los niveles máximos de emisión específicos para fuentes fijas cuyos procesos particulares no pueden encuadrarse dentro de los comprendidos por las normas oficiales mexicanas.

7.2 LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES

Existe una gran cantidad de contaminantes en el aire, en este capítulo solo se describen a los más importantes: ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, las partículas suspendidas menores a 10 micras de diámetro y los hidrocarburos.³⁹

- a) Ozono (O_3). El ozono no es emitido directamente a la atmósfera a partir de una fuente directa identificable; se forma en el aire, cuando los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno reaccionan bajo la luz del sol. Estos últimos, se originan de fuentes tan variadas como: vehículos de motor, refinamiento y comercialización de combustibles, tanques de almacenamiento de gasolina, productos para el hogar, industria química, superficies pintadas e industrias de impresión y de lavado en seco.
- b) Óxidos de Nitrógeno (NO_x). Se producen cuando se queman combustibles fósiles en vehículos de motor, plantas de poder, hornos y turbinas. Esta categoría incluye el óxido nitroso (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2).
- c) Monóxido de Carbono (CO). Es un derivado de la combustión y proviene casi enteramente de los vehículos de motor.
- d) Partículas Suspendidas Menores a 10 Micras de Diámetro (PM_{10}). Son más finas que un cabello humano, del tamaño del polvo fino, de la neblina o del humo del cigarrillo. Las PM_{10} pueden estar tanto en forma de aerosoles (en pequeñísimas gotas), de sólidos, o en una mezcla de sustancias artificiales y naturales incluyendo sulfatos, nitratos, metales, carbón, sal de mar, tierra y materia orgánica. Las PM_{10} provienen de una variedad de

fuentes industriales y móviles, y pueden ser emitidas directamente o formarse en el aire mediante transformaciones de gases.

- e) Hidrocarburos. Son una clase específica de compuestos exclusivamente derivados del hidrógeno y el carbono. No existen normas oficiales en relación con el nivel máximo permisible de hidrocarburos en la atmósfera, pero a diferencia de otras clases de gases orgánicos reactivos están sujetos a regulación debido a que contribuyen en la formación de ozono. Las emisiones de hidrocarburos provienen de la combustión incompleta de la gasolina y de la evaporación de combustibles derivados del petróleo, solventes industriales, de pinturas y de líquidos para el lavado en seco.

En la tabla 7.1 se indican las normas que deben cumplir las fuentes fijas y en la tabla 7.2 se indican para fuentes móviles, de acuerdo con los órganos gubernamentales de México.

Tabla 7.1. Normas de emisión para fuentes fijas.

NORMA DE EMISION	INSTALACION AFECTADA	CONTAMINANTES REGULADOS
NOM-039-ECOL-1993	Plantas de ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄ /SO ₃ y SO ₂
NOM-040-ECOL-1993 NOM-PA-005/93	Plantas de cemento combustión en carboeléctricas	Partículas Partículas, NO _x , SO ₂ , y CO
NOM-085-ECOL-1994	Sistemas de combustión indirecta operados con combustibles líquidos y gaseosos	Partículas, opacidad, H ₂ SO ₄ /SO ₃ , SO ₂ , NO _x , CO
NOM-043-ECOL-1993	Cualquier equipo de proceso con emisiones potenciales de partículas sólidas	Partículas
NOM-046-ECOL-1993	Plantas de ácido dodecibencen-sulfónico	H ₂ SO ₄ /SO ₃ y SO ₂

NORMAS PARA COMBUSTIBLE		
MONITOREO AMBIENTAL	FECHA DE EXPEDICION	¿QUE ESTABLECE?
NOM-051-ECOL-1993	18/OCT/93	Establece el nivel máximo permisible en peso de azufre en el combustible liquido, gasóleo industrial que se consume por las fuentes fijas en la zona metropolitana de la ciudad de México
NOM-075-ECOL-1993	26/DIC/95	Establece los niveles máximos de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores de agua – aceite de las refinerías de petróleo
NOM-085-ECOL-1993	02/DIC/94	Contaminación atmosférica para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólido , líquidos o gaseosos o cualquiera de sus condiciones que establece los niveles máximos permisibles de emisión ala atmósfera de humos , particular suspendidas totales ,

		<p>bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión .</p>
NOM-086-ECOL-1993	02/DIC/94	<p>Contaminación atmosférica. Especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.</p>
NORMAS QUE MANEJAN COMBUSTIBLE		
NOM-092-ECOL-1993	06/SEP/95	<p>Regula la contaminación atmosférica y establece requisitos y parámetros para la instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y de autoconsumo</p>

		ubicadas en el valle de México.
NOM-093-ECOL-1993	06/SEP/95	Establece el método de prueba para determinar la eficiencia de laboratorio de sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y de autoconsumo.
NOM-097-ECOL-1993	01/FEB/96	Establece los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país (1ª aclaración, 01-Julio-1996, 2ª aclaración, 16-October-1996).

Fuente: La contaminación Ambiental en México⁶

Las industrias de acuerdo a la legislación en materia ambiental requieren instalar equipos de control, para no rebasar los límites permitidos de contaminantes y ser sancionados por las autoridades correspondientes, en la tabla 7.3 se indican las cantidades de contaminantes permitidas de acuerdo a las normas mencionadas arriba y en la tabla 7.4 se indican los equipos de control recomendados para los diversos procesos de producción.

Tabla 7.3 Valores Normados para los contaminantes

Contaminantes	Valores Limite		
	Exposición Aguda		Exposición Crónica
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Para protección de la salud de la población susceptible
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 hora)	1 vez cada 3 años	
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm (8 horas)	1 vez al año	
Partículas Suspendidas totales (PST)	260µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	75 µg/ m ³ media aritmética anual
Partículas fracción respirable (PM10)	150µg/m ³ (24 horas)	1 vez al año	50µg/m ³ media aritmética anual
Plomo (Pb)			1.5µg/m ³ promedio aritmético en 3 meses

Fuente: Diario Oficial de la Federación 3 de Diciembre de 1994³⁵

Tabla 7.4. Métodos de control de la contaminación del aire en las principales industrias

INDUSTRIA O PROCESO	FUENTE DE EMISIÓN	CONTAMINANTES	TRATAMIENTO
Siderurgias (fierro y acero)	Altos hornos. Hornos de acero	Óxido de fierro, polvo y humo	Ciclones filtro precipitación electrostática y colectores húmedos.
Fundición de fierro gris	Cubilotes. Mezcladores	Óxido de hierro, humo, aceite en polvo, humos de metal	Lavadores y colectores centrífugos
Industria metalúrgica no ferrosa	Fundidores y hornos	Humo y humos de metal, aceite y grasa	Precipitadores electrostáticos y filtros
Refinerías de petróleo	Regeneración de catalizadores. Incineración de lodos	Catalizadores en polvo, cenizas de los lodos	Ciclones, Precipitadores electrostáticos, lavadores y filtros
Fabricación de cemento Pórtland	Hornos, secadores, Manejo de materiales	Álcalis y polvos del proceso	Filtro, Precipitadores electrostáticos y colectores mecánicos
Proceso kraft para producción de papel	Hornos de recuperación, Secadores, Tanques de fundición	Polvos químicos	Precipitadores electrostáticos lavadores tipo Ventura

Fabricación de ácido sulfúrico y fosfórico	Procesos térmicos, Acidificación, Tamizado	Niebla ácida y polvo	Precitadores electrostáticos y lavadores de niebla, tamizado
Procesamiento del coque	Horno, Templado, Manejo del material	Polvo de carbón y de coque, Hidrocarburos	Diseño y mantenimiento cuidadosos
vidrio y fibra de vidrio	Hornos, Moldeado, y curado, Manejo de material	Niebla ácida, polvos alcalinos, polvos y aerosoles	Filtros y quemadores

Fuente: La contaminación Ambiental en México⁵

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

Todas las industrias de proceso requieren de regiones de desfogue conocidas como chimeneas, estas instalaciones industriales tienen una tarea muy importante, debido a que cuentan con equipos de control, los cuales ayudan en gran medida a disminuir las emisiones contaminantes, es por eso que se instalan equipos automáticos de monitoreo como los CEM, en ambos tipos ya sean extractivos o in-situ, ambos equipos son buenos ya que cuentan con diversas técnicas analíticas para realizar el análisis, desde un laboratorio, hasta el lugar en donde fluyen los gases dentro de las chimeneas, siempre y cuando estos tengan flujos de 6 m/s, que es la velocidad recomendada para realizar las determinaciones de contaminantes en el conducto.

Depende del tipo de proceso la instalación de un sistema de monitoreo, esto no quiere decir que los sistemas son exclusivos de algún proceso en específico, por el contrario existen procesos en los cuales se pueden instalar ambos. La instalación de equipos de monitoreo permite al sector industrial conocer las cantidades de emisiones y de esta manera tener un conocimiento amplio y claro para tomar decisiones cuando se encuentren fuera de las normas y aun cuando no se encuentren fuera.

El adecuado funcionamiento de ambos equipos de monitoreo dependerá en el sistema extractivo de: La calibración del gas y la sonda a emplear, el tiempo de la toma de muestra, las condiciones de presión, temperatura y calidad del filtro empleado así como de la longitud de la línea que se tome de muestreo y el adecuado mantenimiento y manejo del equipo por parte de los técnicos responsables.

Mientras que en el sistema in-situ depende del equipo empleado, ya sea de trayectoria o de punto, en ambos instrumentos se debe considerar: Las condiciones del medio ambiente en donde se toma la muestra, la dificultad de reparar los equipos ópticos con los que cuenta, la adecuada calibración de la sonda en donde se realiza la toma de muestra y posteriormente emite un resultado del análisis, la temperatura de compensación que se requiere, las condiciones de operación de los puertos de muestreo, y sobre todo se debe considerar que el

tiempo es muy pequeño en la toma de muestra, el sistema in-situ requiere de personal altamente calificado para operar debido a sus componentes electro-ópticos, los cuales se dañan con gran facilidad.

A grandes rasgos y comparando ambos sistemas es más delicado el sistema in-situ, otro criterio importante a considerar es el número de puertos de muestreo, ya que este depende de el diámetro y la altura de la chimenea, por eso hoy en día es común emplear el método Isocinético para llevar a cabo el muestreo en fuentes fijas y además que es el recomendado por las normas de calidad de aire en México.

En el diseño de una chimenea es importante considerar la altura del penacho, para poder determinar una altura adecuada, además de el tipo de material a emplear en su construcción, debido a que este no debe reaccionar con la mezcla de gases que provienen de los procesos, para evitar su corrosión o deterioro, es importante considerar la temperatura interna de la chimenea para su diseño, al igual que la velocidad de los gases, ya que de esta velocidad dependerá la altura de la misma.

CAPITULO IX

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- SCFI. NMX-AA-023-1986 “Protección al Ambiente-Contaminación Atmosférica” Terminología”
- 2.- Raúl A., B. Bhappu, A. Báez. “ The Environment and its resources “ Gordon and Breach, Scince Publishers, 1972
- 3.- Thad Godish, “Air Quality”, Editorial. Lewis Publisher 1991.
- 4.- D.J. Spedding, “Contaminación Atmosférica “, Editorial Reverte S.A. Barcelona España, 1981
- 5.- John H. Seinfeld, “ Atmospheric Chemistry and Physics of Air pollution “, New York, J Wiley-Interscience publication ,1986
- 6.-Blanca E. J. “La Contaminación Ambiental en México “Editorial Limusa, México 1993.
- 7.-Kenneth Wark. “Contaminación del aire origen y control”. Editorial Limusa. México 1990.
- 8.-Amparo López J. “Dispersión de contaminantes en la atmósfera”. Editorial Alfa omega. Valencia España 2004
- 9.- SCFI. NMX-AA-009-1993- “Contaminación Atmosférica- Fuentes Fijas- Determinación de Flujo de Gases en un Conducto por Medio de Tubo Pitot”
- 10.-John H Seinfeld., “ Contaminación Atmosférica, fundamentos físicos y químicos”..Editorial Madrid, 1ra Edición, Madrid España 1978.
- 11.- Charles T Littleton. “Tubería Industrial” Compañía Editorial Continental, S.A. , México 1964, 2da Edición.
- 12.- Karl B. Schelle , Jr, Charles A. Brown., “ Air Pollution Control Technology HandBook”. Editorial crepress, Estados Unidos de America 2002.
- 13.- Cecil F. Warner.,”Air Pollution Control”. Noriega Editores 1ra Edición, Estados Unidos de América, New York, 1989.
- 14.-Rao C.S.”Environmental Pollution Control Engineering”. Editorial. J.Wiley. New York U.S.A 1991
- 15.- Jahnke. James A. Van Nostrand Reinhold.” Continuous Emisión Monitoring”. New York U.S.A, 1993.

- 16.-Chapman, R.L "Continuous stack monitoring". Environ Scince Technol. New York U.S.A ,1974.
- 17.- McNulty, K.J. McCoy, J.F "Investigation of Extractive Sampling Interface Parameters". EPA New York U.S.A, 1974.
- 18.- Podlenski, J.Peduto, E. "Feasibility study for Adapting Present Combustión Source Continuous Monitoring Systems to Hazardous Waste Incinerators" Vol. I. EPA. New YorK U.S.A. 1984.
- 19.-Smit- Van Ness. "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química" Editorial Mc Graw Hill 5ta Edición, México 1999.
- 20.- Kertzman, J . "Continuous drying of process simple streams" . ISAM U.S.A 1973.
- 21.- Rafael Beltrán P., "Introducción a la Mecánica de Fluidos", Mc Graw Hill, Bogota, Colombia, 1990.
- 22.- Irving H. Shames., "La Mecánica de los Fluidos", Mc Graw Hill, México, 1979.
- 23.-Bergshoeff, G., and Van Ijssel, F. W. "Monitoring gases a new stack sampler. Vol. 1 and 2 Internat. Environ Safety, Boston U.S.A. 1978.
- 24.-Maurice, R. L., Robertson, J." Design, specification, and installation of a replacement CEM at Apache Station " Air Pollution Control Association, Pittsburgh U.S.A. 1986.
- 25.-Myers, R.L " Field experiences using dilution probe techniques for continuous source emisión monitoring" Air Pollution Control Association, U.S.A 1986.
- 26.-Verónica Andrade Muñoz. Tesis "Sistema Automático de Monitoreo Continuo de Emisiones Contaminantes en Fuentes Fijas (CEM)" Facultad de Ingeniería UNAM. México D.F 2002.
- 27.-Vaughan, W. M. "Remote sensing terminology" J. Air and Waste Mgmt. Assoc. U.S.A. 1991.
- 28.-Richards, J "Utility bolier parameter monitoring for determination of flue gas flow rates" Unpublished contract report, Richards Engineering (Raleigh, NC) 1989.
- 29.-ASME. "Fluid Meters Their Theory and Application" The American Society of Mechanical Engineers, New York , U.S.A. 1959.

- 30.-Ginesi, D., and Grebe, G. "Flow a performance review" Chem. Eng. 6:102-118 U.S.A. 1987.
- 31.-Brooks, E. F., and Williams, R.L. "Flow and Gas Sampling Manual" EPA-600/2-76-203 ,U.S.A. 1976.
- 32.-Skook, Douglas Arvid., "Fundamentos de Química Analítica" Editorial Mc Graw Hill. México 2005
- 33.-Instruction Manual "Model 42 Chemiluminescence NO-NO₂-NO_x Analyzer". Thermo Environmental Instruments Inc. U.S.A. 1995.
- 34.- Bobeck, R.F. " Electrochemical sensors for oxigen analysis" Chem. Eng. 7:113-117 U.S.A. 1980.
- 35.-Instruction Manual "Model 48 GFC Ambient CO Analyzer". Thermo Environmental Instruments Inc. U.S.A. 1995.
- 36.-Hager, R. N. " Derivative spectroscopy with emphasis on trace gas analysis". Anal. Chem. 45(13):1131A-1138A, U.S.A. 1973
- 37.-SEMARNAP "Respuestas a preguntas sobre contaminación y salud" GDF, México ,1991.
- 38.- SEGOB "Diario oficial de la Federación del 13 de diciembre de 1994", Talleres Gráficos de México, 1994.
- 39.-Beatriz Cárdenas González, Sergio Revah Moiseev "Tratamiento Biológico de Compuestos Orgánicos Volátiles de Fuentes Fijas", INE-SEMARNAT, México. D.F. Agosto 2003.

ANEXOS

Para conductos rectangulares se divide el ducto en áreas iguales (mínimo 9) y se muestrea en los puntos medios de dichas áreas. Para conductos rectangulares se recomienda construir la plataforma según las normas de montaje ya establecidas. El total de puntos a muestrear se determina a través de la figura A.1.

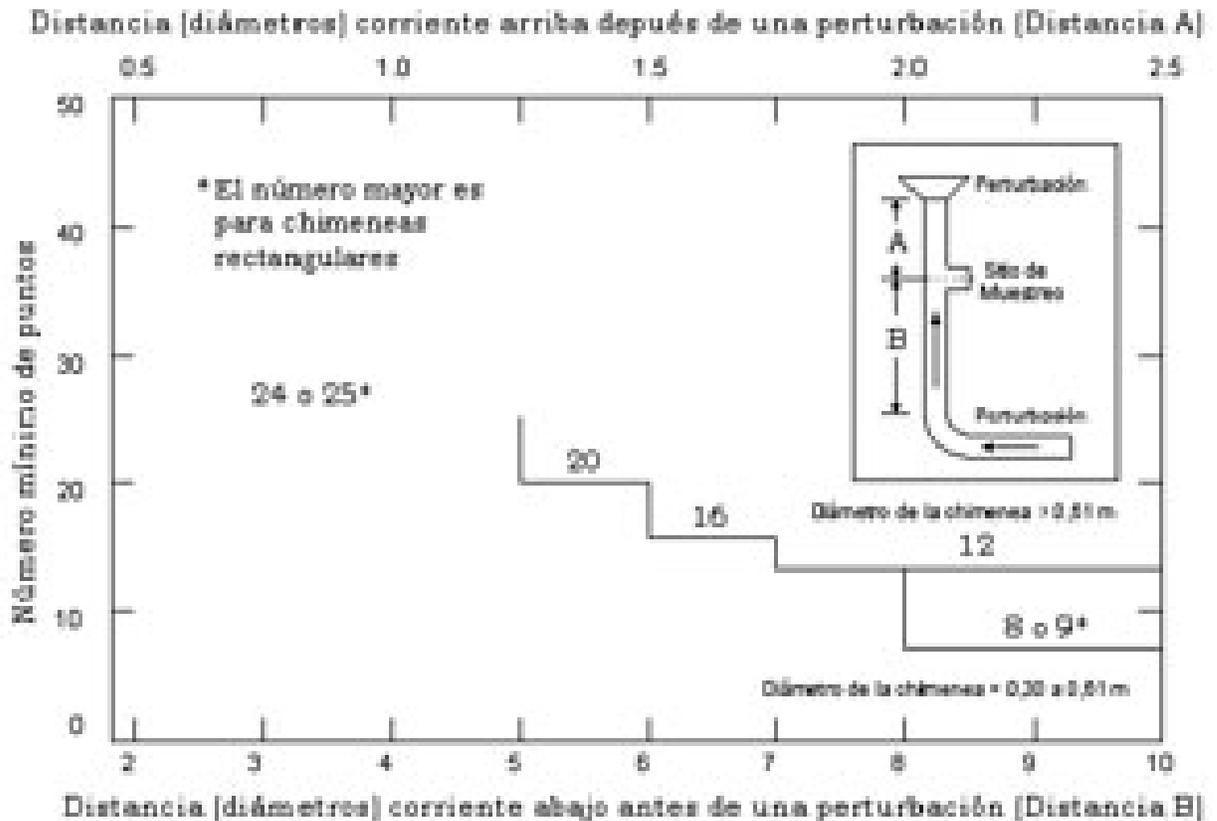


Figura A.1. Número mínimo de puntos de muestreo.

Para usar la figura A.1 se debe calcular la distancia (en números de diámetros de chimenea) antes y después de la perturbación más cercana al punto de medición. Para eso, se debe determinar la distancia desde el lugar de medición hasta las perturbaciones corriente arriba y corriente abajo más cercanas, y dividir cada distancia por el diámetro de la chimenea o diámetro equivalente para determinar la distancia en términos de número de diámetros. Las perturbaciones pueden ser cualquier tipo de curvas, expansiones, contracciones, entradas, etc.

Tabla A.1. Número de puntos de travesía sobre el diámetro.

Numeración del punto de muestreo en un Diámetro	Número de puntos de muestreo en un Diámetro					
	2	4	6	8	10	12
1	14,60	6,70	4,40	3,20	2,60	2,10
2	85,40	25,00	14,60	10,50	5,20	6,70
3		75,00	29,60	19,40	14,60	11,50
4		93,30	70,40	32,30	22,60	17,70
5			85,40	57,70	34,20	25,00
6			95,60	80,60	65,80	35,60
7				82,50	77,40	64,40
8				86,80	85,40	75,00
9					91,80	82,30
10					97,90	88,20
11						93,30
12						97,90

Nota: Los puntos de muestreo no podrán estar localizados a una distancia inferior de 1,3 cm, de la pared de la chimenea para chimeneas con diámetros menores o iguales a 0,61 m, y a una distancia de 2,5 cm, para chimeneas con diámetros mayores de 0,61 m, ajustar la ubicación del primero y último punto según este criterio.

La ubicación de los puntos de muestreo en conductos y chimeneas circulares (porcentaje del diámetro a partir de la pared interna) se determina a través de la tabla A.1.

Para chimeneas rectangulares, se debe dividir la sección transversal en tantas áreas rectangulares como puntos de muestreo, con el propósito de obtener el arreglo de las matrices de la tabla A.2. La relación entre la longitud y el ancho de cada área elemental debe estar entre uno y dos.

Para chimeneas con diámetros menores a 0,3 m, el sitio de muestreo se debe ubicar a diez (10) diámetros después de una perturbación y ocho (8) diámetros antes de la siguiente. Cuando lo anterior no puede cumplirse, se debe localizar el sitio de muestreo por lo menos a dos (2.5) diámetros de chimenea o ducto corriente abajo y por lo menos a dos y medio (2.5) diámetros corriente arriba después de una perturbación, con el propósito de aumentar el número de puntos de muestreo en la sección transversal y obtener un muestreo más representativo. Este método no se puede aplicar cuando el flujo es turbulento.

Tabla A.2. Arreglo de la sección transversal para chimeneas rectangulares.

Número de puntos de muestreo	Matriz
9	3x3
12	4x3
16	4x4
20	5x4
25	5x5
30	6x5

Ejemplo A.1: Las figuras A.2 y A.3 presentan un ejemplo de una chimenea de 1.0 m de diámetro con una localización del punto de muestreo óptimo (8 diámetros después de una perturbación y 2 diámetros antes de la siguiente). Hallar el número de puntos de muestreo y la ubicación de los puntos de travesía sobre el diámetro.

Solución: Trazando una línea vertical sobre el número 8 (Distancia B) y sobre el número 2 (Distancia A) en la figura 5.9, encontramos que el número de puntos de muestreo está entre 12 y 8. El valor mayor, es decir 12, se utiliza para chimeneas circulares o rectangulares con diámetros (o diámetros equivalentes) mayores de 0.61 m y el valor menor, es decir 8, para chimeneas circulares con diámetros entre 0.30 y 0.61 m, para chimeneas rectangulares con diámetros equivalentes entre 0.30 y 0.61 m se escogen nueve puntos.

Por lo tanto, el número mínimo de puntos de muestreo son 12. Asumiendo el uso de dos puertos de muestreo, el número de puntos de travesía sobre un diámetro es de 6 ($12 \div 2$).

Para calcular la ubicación de cada uno de los puntos de muestreo, se lee en la tabla A.1 la columna con la etiqueta 6. El punto #1, deberá estar ubicado a 0,044 m (4.4 cm), distancia que se obtiene al multiplicar el diámetro de la chimenea, 1.0 m por 0.044 ó 4.4%.

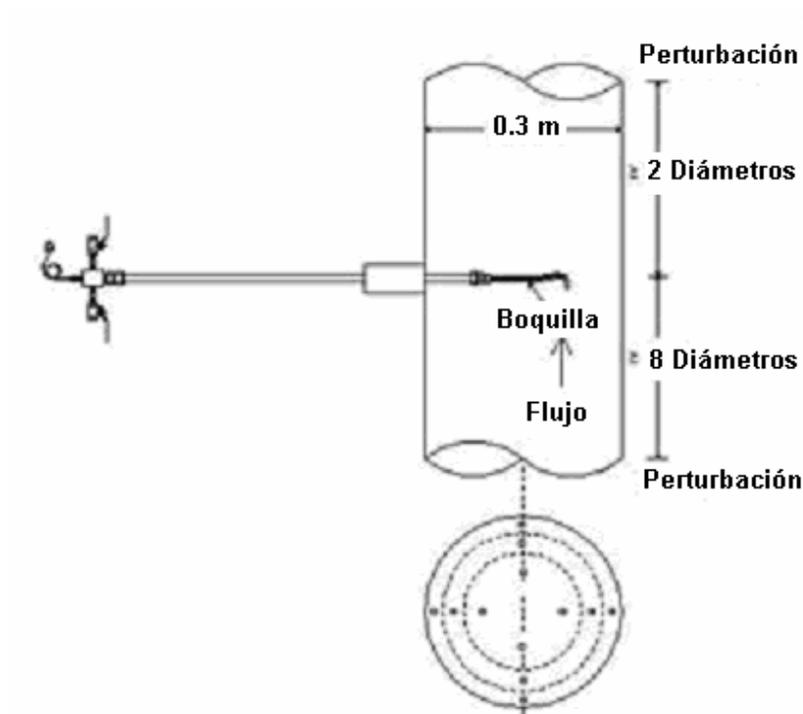


Figura A.2. Ubicación de los puntos de muestreo.

Punto de trayectoria	Porcentaje de diámetro	Ubicación al el punto de muestreo
1	4.4	0.044
2	14.6	0.146
3	29.6	0.296
4	70.4	0.704
5	85.4	0.854
6	95.6	0.956

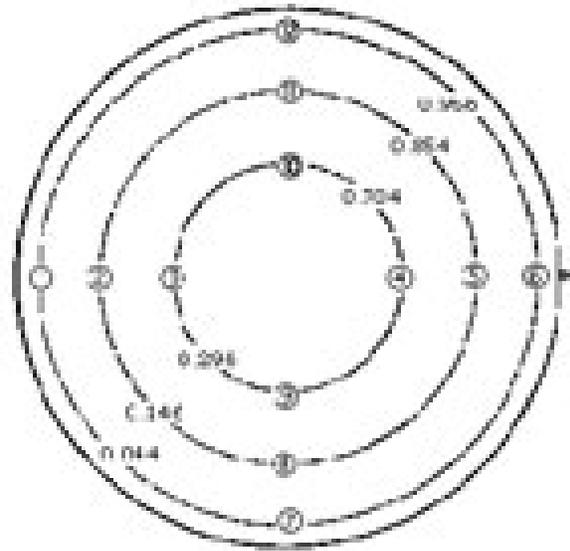


Figura A.3. Ubicación de los puntos de muestreo.

Determinación de la velocidad natural de una chimenea

$$F = g(\rho_a - \rho_e)H_c A_m \quad (\text{Ecuación 3,4})$$

Partiendo de la ecuación 3,4, se puede describir a F como ΔP_m , debido a que es una fuerza ascensional.

$$\Delta P_m = g(\rho_a - \rho_e)H_c \quad (\text{Ecuación 3,5})$$

Al emplear la ecuación de los gases perfectos, para el gas de salida de la chimenea y el gas a la entrada.

$$\rho_a = \frac{P'}{RT_a} \quad \text{y} \quad \rho_e = \frac{P'}{RT_e} \quad (\text{Ecuación a y b})$$

si consideramos a la P' como constante en el sistema y igualamos las ecuaciones a y b obtenemos la ecuación c, y al despejar a ρ_e , podemos escribir la ecuación 3.6.

$$\rho_a RT_a = \rho_e RT_e \quad (\text{Ecuación c}) \quad \rho_e = \rho_a \left[\frac{T_a}{T_e} \right] \quad (\text{Ecuación 3,6})$$

Al sustituir la ecuación 3,6 en la ecuación 3,5, obtenemos la ecuación 3,7, que representa un gradiente de presiones, además se considera la cota de chimenea (H_c), igual a la altura efectiva de chimenea.

$$\Delta P_m = gH_o\rho_a \left[1 - \frac{T_a}{T_e} \right] \quad (\text{Ecuación 3,7})$$

Determinación de la presión Dinámica

Combinando la ecuación 3,9 con la ecuación 3,10, obtenemos la ecuación 3,11, que es la ecuación de la presión dinámica.

$$P_d = \rho_e \left(\frac{V_s^2}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 3.9}) \quad V_s = \frac{4Q}{\pi D_s^2} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

$$P_d = \rho_a \left(\frac{8T_a}{\pi^2 D_s^4 T_e} \right) Q^2 \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

La obtención de las ecuaciones de perdidas de presión por fricción y accesorios es un proceso similar

Deducciones de las ecuaciones de energía en el ducto de la chimenea.

La chimenea es un sistema conducción-convección para el mecanismo de transferencia de Energía, para este caso consideremos tres materiales diferentes, donde d_1, d_2, d_3 , representan a los diámetros de las paredes y k_1, k_2, k_3 a la conductividad termica de los materiales figura ab.

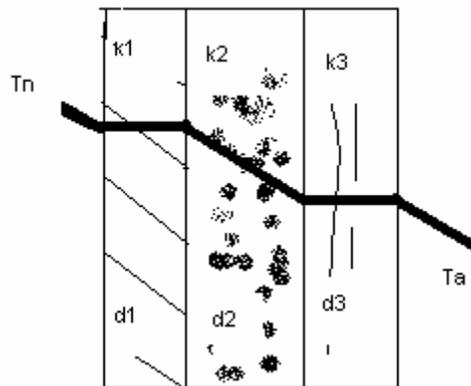


Figura ab. Corte de un ducto de chimenea de tres materiales diferentes

Si partimos de la ley de Fourier en base a las temperaturas y coeficientes de conductividad.

$$U_0 d_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{d_0} + \frac{\ln \frac{d_1}{d_0}}{k^{01}} + \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{k^{12}} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{k^{23}} + \frac{1}{d_3 h_3}\right)}, \quad d_o q = -\lambda_2^{12} d \frac{dy^{12}}{dx} \quad \text{y} \quad d_o q = -\lambda_3^{23} d \frac{dy^{23}}{dx}$$

$$Q_0 = U_0 (d\pi L)(T_n - T_a)$$

(ecuaciones ab- 1,2 y 3)

Integrando las ecuaciones para λ^{01} , λ^{12} y λ^{23} , constantes tenemos las siguientes expresiones, cambiando a λ por k.

$$T_0 - T_1 = d_0 q_0 \left(\frac{\ln \frac{d_1}{d_0}}{k^{01}} \right) \dots, T_1 - T_2 = d_0 q_0 \left(\frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{k^{12}} \right) \dots \text{y} \quad T_2 - T_3 = d_0 q_0 \left(\frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{k^{23}} \right)$$

Conociendo que en las dos interfases sólido-fluido se cumple

$$T_n - T_0 = \frac{q_0}{h_o} \quad (\text{ecuación ab-4}) \quad \text{y} \quad T_3 - T_b = \frac{q_3}{h_3} = \frac{q_0 d_0}{h_3 d_3} \quad (\text{ecuación ab-5})$$

Sumando estas 5 ecuaciones se obtiene una expresión para q_0 en función de $T_n - T_a$.

$$Q_0 = 2\pi L d_0 q_0 = \frac{2\pi L (T_n - T_a)}{\left(\frac{1}{d_0} + \frac{\ln \frac{d_1}{d_0}}{k^{01}} + \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{k^{12}} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{k^{23}} + \frac{1}{d_3 h_3}\right)} \quad (\text{ecuación ab-6})$$

Definiendo a un coeficiente global de Transmisión de calor basado en la superficie interna U_0 (C_t).

$$Q_0 = U_0 (d\pi L)(T_n - T_a) \quad (\text{ecuación ab-7})$$

Combinando las ecuaciones ab-6 y ab-7 se obtiene la siguiente expresión

$$U_0 d_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{d_0} + \frac{\ln \frac{d_1}{d_0}}{k^{01}} + \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{k^{12}} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{k^{23}} + \frac{1}{d_3 h_3}\right)} \quad (\text{ecuación ab-8})$$

Esta misma ecuación la podemos expresar como:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_n} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_a}$$

$$Q = h_{in}(\pi DL) \left[\frac{(T_{01} - T_{b1}) - (T_{02} - T_{b2})}{\ln \left[\frac{(T_{01} - T_{b1})}{(T_{02} - T_{b2})} \right]} \right] \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

Para la determinación de la ecuación 3.24, se parte del criterio de que para un flujo en conducción, para una superficie cilíndrica de diámetro D, en el que existe una porción de pared de longitud L que se calienta y cuya superficie de la temperatura interior T_o (Z) varia, suponemos que la temperatura global (temperatura global se considera a Cp y ρ constantes) del fluido, T_b aumenta de T_{b1} a T_{b2} en la zona caliente. Por lo que existen 3 definiciones convencionales de coeficientes de transmisión de calor para el fluido en la zona que se calienta.

$$Q = h_i(\pi DL)(T_{01} - T_{b1}) \quad (\text{ecuación A})$$

$$Q = h_a(\pi DL) \left[\frac{(T_{01} - T_{b1}) + (T_{02} - T_{b2})}{2} \right] \quad (\text{ecuación B})$$

$$Q = h_{in}(\pi DL) \left[\frac{(T_{01} - T_{b1}) - (T_{02} - T_{b2})}{\ln \left[\frac{(T_{01} - T_{b1})}{(T_{02} - T_{b2})} \right]} \right] \quad (\text{ecuación C})$$

Las expresiones de h_i dependen de la temperatura a la entrada $(T_{01} - T_{b1})$ y h_a de la media aritmética de la temperatura y h_{in} de la media logarítmica de la diferencia de temperaturas.