



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

25  
Zij

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ZARAGOZA"**

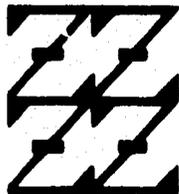
**EVALUACION DE LA CONCENTRACION  
DE PARTICULAS Y OXIDOS DE AZUFRE  
PROVENIENTES DE UNA FUENTE FIJA  
MEDIANTE UN MUESTREO ISOCINETICO**

**T E S I S**

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

**P R E S E N T A :**

**ALEJANDRO MORALES GONZALEZ**



**LO QUE VEEMOS ES  
LA REFLEXION DE NUESTRO**

**DIRECTOR DE TESIS:  
ING. RAUL MONTES DE OCA VARGAS**

**MEXICO, D. F.**

**1996**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES \*SARAGOSA\*

JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

OF/IQ/JU/002/057/95

SR. ALEJANDRO MORALES GONZALEZ  
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, les comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

PRESIDENTE: ING. ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ  
VOCAL: ING. LORENZO ROJAS HERNANDES  
SECRETARIO: ING. RAFAEL SANCHEZ DIRSO  
SUPLENTE: FIS. CARLOS J. MARTINEZ GOMEZ  
SUPLENTE: ING. MARTHA FLORES BECERRILL

A T E N T A M E N T E  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 14 de diciembre de 1995

  
ING. JOSÉ BENJAMÍN RANGEL GRANADOS  
JEFE DE LA CARRERA

<128

**A MI MADRE . . .**  
**CON ADMIRACION Y RESPETO**

**A MIS HERMANOS . .**  
**CON AFECTO**

**A MI FAMILIA . . .**  
**CON ESTIMACION**

**A TODOS MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS QUE SIEMPRE ME HAN  
APOYADO A LO LARGO DE MI EXISTENCIA . . .**

**A MIS MAESTROS . . .**

**GRACIAS .**

## **RESUMEN.**

La determinación de la concentración de un contaminante presente en una chimenea de extracción, requiere de mucha habilidad y cuidado, así como el uso adecuado de los equipos de medición que nos permitan la obtención de datos de concentración de contaminantes que sea confiables y representativos; además se requiere también el conocimiento de técnicas adecuadas de monitoreo.

El presente trabajo es de gran interés tanto para los profesionistas involucrados en el área de la contaminación ambiental, como para industriales que requieran de los conocimientos y técnicas para evaluar la cantidad de partículas y dióxidos de azufre expulsados a través de una fuente fija.

En el Capítulo 1 se estudian los principales contaminantes atmosféricos dividiéndolos en partículas y gases atmosféricos, así como, sus principales fuentes de contaminación ambiental y los efectos que causan en el hombre y a su medio. Al final de este capítulo se trata en forma general el aspecto legal ya que el problema de la contaminación trae consigo la necesidad de crear una legislación que proteja la salud y el bienestar de la población general.

En el Capítulo 2 se analiza la manera cualitativa el comportamiento termodinámico y cinético de los tres principales contaminantes atmosféricos, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno generados en los procesos de combustión, analizando tanto la velocidad de reacción como la constante de equilibrio de los contaminantes más importantes generados en el proceso de combustión.

La realización óptima y eficiente de un muestreo requiere que tanto el ducto o chimenea de extracción, los puertos de muestreo, así como las plataformas de muestreo cumplan con ciertas características técnicas y de seguridad para la protección del personal y del equipo empleado en los monitoreos. En el Capítulo 3 se establecen estas condiciones tanto de las plataformas y puertos de muestreo como de los equipos empleados.

En el Capítulo 4 se mencionan los procedimientos y métodos de muestreo para la determinación de la concentración de partículas y dióxido de azufre expulsados a través de una fuente fija. En éste Capítulo se establece un procedimiento general para la realización de un muestreo, la localización de los puntos de muestreo transversales al paso de la corriente gaseosa, un muestreo preliminar, determinación de la humedad presente en los gases, determinación del peso molecular, cálculo de la velocidad del flujo gaseoso, la

concentración de partículas, el muestreo de gases y el método para determinar la concentración de dióxidos de azufre.

En el Capítulo 5 se reportan las memorias de cálculo obtenidas en la evaluación de la concentración de partículas y de dióxido de azufre emitidos a través de una fuente industrial de extracción.

La muestra tomada para evaluar la concentración de estos contaminantes se realizó en una chimenea de un horno de fundición perteneciente a una empresa procesadora de Aluminio de la Cd. de Veracruz, Veracruz.

En el Anexo 1 se presentan los equipos de control de emisiones contaminantes, los cuales dependiendo de sus características propias del contaminantes, son empleados para abatir los niveles de contaminación generados a través de una fuente fija. En general si el contaminante se emite en forma de partículas puede ser removido mediante una serie de fuerzas físicas gravitacionales y/o electrostáticas y si el contaminante, el gaseoso se remueve por adsorción, absorción o incineración.

**EVALUACION DE LA CONCENTRACION DE PARTICULAS Y OXIDOS DE AZUFRE  
PROVENIENTES DE UNA FUENTE FIJA MEDIANTE UN MUESTREO  
ISOCINETICO.**

	PAG.
RESUMEN	i
INDICE	iv
NOMENCLATURA	vii
INTRODUCCION	ix

**CAPITULO 1 CONTAMINACION DEL AIRE**

1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICION DE LA CONTAMINACION DEL AIRE	2
1.2.1 PARTICULAS	5
1.2.2 GASES ATMOSFERICOS	7
1.3 FUENTES DE CONTAMINACION AMBIENTAL	12
1.3.1 CONTAMINACION POR FUENTE INDUSTRIAL Y DE SERVICIOS	13
1.3.2 CONTAMINACION POR TRANSPORTE	16
1.3.3 CONTAMINACION POR GENERACION DE ENERGIA	18
1.4 EFECTOS DEL LA CONTAMINACION ATMOSFERICA	20
1.4.1 PARTICULAS	21
1.4.2 OXIDOS DE AZUFRE	25
1.4.3 MONOXIDO DE CARBONO	27
1.4.4 OXIDOS DE NITROGENO	28
1.4.5 HIDROCARBUROS	28
1.5 ASPECTO LEGAL	29

**CAPITULO 2 COMPORTAMIENTO QUIMICO DE LOS CONTAMINANTES  
ATMOSFERICOS GENERADOS EN EL PROCESO DE COMBUSTION.**

2.1 GENERALIDADES	32
2.2 MONOXIDO DE CARBONO	33
2.2.1 TERMODINAMICA DEL MONOXIDO DE CARBONO	34
2.2.2 CINETICA DEL MONOXIDO DE CARBONO	37
2.3 DIOXIDO DE AZUFRE	40
2.3.1 TERMODINAMICA DEL DIOXIDO DE AZUFRE	41
2.3.2 CINETICA DEL DIOXIDO DE AZUFRE	43
2.4 OXIDOS DE NITROGENOS	48
2.4.1 TERMODINAMICA DE LOS OXIDOS DE NITROGENO	49
2.4.2 CINETICA DE LOS OXIDOS DE NITROGENO	52

**CAPITULO 3 FACILIDADES TECNICAS, DE SEGURIDAD Y EQUIPO DE MONITOREO PARA LA REALIZACION DE UN MUESTREO EN FUENTES FIJAS**

	PAG.
3.1 PUERTOS DE MUESTREO Y PLATAFORMAS	56
3.2 PUERTOS DE MUESTREO	56
3.2.1 LOCALIZACIÓN	56
3.2.2 TIPOS DE PUERTO	57
3.2.3 INSTALACION DEL PUERTO	57
3.2.4 NUMERO DE PUERTOS REQUERIDOS	58
3.2.5 RESISTENCIA DE LOS PUERTOS	58
3.3 PLATAFORMAS DE MUESTREO	58
3.3.1 FORMA Y EXTENSION DE LAS PLATAFORMA	58
3.3.2 RESISTENCIAS DE LAS PLATAFORMAS	58
3.3.3 ACCESO A LA PLATAFORMA	59
3.3.4 FUENTE ELECTRICA	59
3.4 CARACTERISTICAS FISICAS DE LA CHIMENEA	59
3.5 EQUIPO INVOLUCRADO EN EL MUESTREO	60
3.5.1 UNIDAD DE CONTROL	61
3.5.2 CORDON UMBILICAL	66
3.5.3 TREN DE MUESTREO	66
3.5.4 CAJA CALIENTE DE MUESTREO	68
3.5.5 CAJA FRIA DE MUESTREO	68
3.5.6 SONDA DE MUESTREO	69
3.5.7 RIEL Y ABRAZADERA	69

**CAPITULO 4 PROCEDIMIENTOS Y METODOS DE MUESTREO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS Y DIOXIDO DE AZUFRE EN UNA FUENTE FIJA**

4.1 PROCEDIMIENTO GENERAL DE UN MUESTREO	73
4.2 LOCALIZACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	76
4.3 MUESTREO PRELIMINAR	81
4.3.1 METODO DE CONDENSACION	81
4.3.2 DETERMINACION DEL PESO MOLECULAR DEL GAS QUE FLUYE POR LA CHIMENEA	82
4.3.3 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CHIMENEA	86
4.3.4 DETERMINACION DEL DIAMETRO DE LA BOQUILLA Y EL FACTOR K	88
4.4 MUESTREO ISOCINETICO DEFINITIVO	89
4.5 MUESTREO DE GASES EN FUENTES FIJAS	92
4.6 METODO PARA LA DETERMINACION DEL SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO GENERADOS A PARTIR DE UNA FUENTE DE EMISION INDUSTRIAL	93

	PAG.
4.6.1 APLICABILIDAD	93
4.6.2 EQUIPOS Y REACTIVOS EMPLEADOS	94
4.6.3 MUESTREO Y ANALISIS DE LABORATORIO	95
4.6.4 CALCULOS	96
<b>CAPITULO 5 EVALUACION DE LA CONCENTRACION DE PARTICULAS Y OXIDOS DE AZUFRE EN UNA FUENTE FIJA</b>	
5.1 DATOS GENERALES DE LA EMPRESA Y EL PROCESO	100
5.2 MUESTREO ISOCINETICO PRELIMINAR	102
5.3 MUESTREO ISOCINETICO DEFINITIVO 1	105
5.3.1 MEMORIAS DE CALCULO	
5.3.2 CONCENTRACION DE PARTICULAS	107
5.3.3 CONCENTRACION DE DIOXIDO DE AZUFRE	108
5.4 MUESTREO ISOCINETICO DEFINITIVO 2	109
5.4.1 MEMORIAS DE CALCULO	
5.4.2 CONCENTRACION DE PARTICULAS	111
5.4.3 CONCENTRACION DE DIOXIDO DE AZUFRE	112
5.5 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	113
<b>CONCLUSIONES</b>	115
<b>ANEXO 1</b>	117
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	138

## NOMENCLATURA

A	= Distancia resultante al dividir a/D (m)
B	= Distancia resultante al dividir b/D (m)
La	= Distancia del puerto de muestreo a la primera perturbación en contra flujo (m)
Lb	= Distancia del puerto de muestreo a la primera perturbación en dirección al flujo (m)
AB	= Area de boquilla (Pulg)
Bd	= Area teórica de la sección transversal de la boquilla (ft <sup>2</sup> )
C	= Constante C de velocidad (ft/min)
CP	= Concentración de partículas (gr/m <sup>3</sup> )
CTP	= Constante de calibración del tubo pitot
D	= Diámetro de la chimenea (m)
DBN	= Diámetro nominal de la boquilla (pulg)
Db	= Diámetro de la boquilla (plg)
DP	= Presión de velocidad promedio (pulg c.a.)
DH	= Presión promedio de la placa de orificio (pulg c.a.)
DH@	= Constante de la placa de orificio
DW	= Diferencia entre el peso inicial y el peso final de los impactores (gr)
E	= Emisión de partículas (Kg/hr)
Et	= Emisión de dióxido de azufre (Kg/hr)
F	= Factor de aforo
FCG	= Constante del gasómetro
%Gi	= Porcentaje de cada uno de los componentes analizados en el equipo ORSAT
H	= Altura de la chimenea (m)
I	= Porcentaje de isocinético.
K	= Factor K
Kp	= Constante de equilibrio químico
L	= Longitud del puerto de muestreo (cm)
M	= Concentración del dióxido de azufre (gr/m <sup>3</sup> )
N	= Normalidad
PB	= Presión barométrica (pulg c.a.)
PCH	= Presión de chimenea (in Hg)
PEST	= Presión estática (pulg c.a.)
Peq	= Peso equivalente
PPF	= Peso final de filtro acondicionado (gr)
PIF	= Peso inicial del filtro acondicionado (gr)
PM	= Presión del medidor (in Hg)
PMH	= Peso molecular del gas de la chimenea base húmeda (gr)
PMi	= Peso molecular de cada uno de los componentes (gr)
PMS	= Peso molecular base seca de los gases de chimenea (grs.)
PP	= Peso neto de las partículas (gr)
ppm	= Partes por millón
QCH	= Flujo volumétrico a condiciones normales.
SQR	= Raíz cuadrada

T = Tiempo de muestreo  
TA = Temperatura ambiente (°C)  
TCH = Temperatura de chimenea (°R)  
TM = Temperatura del medidor (°R)  
V = Diferencia entre el volumen gastado del titulador en la muestra y del volumen gastado del titulador en el blanco. (ml)  
VCH = Velocidad de gases de chimenea (ft/min)  
VC = Volumen de control (ft<sup>3</sup>)  
VF = Lectura final del gasómetro (ft<sup>3</sup>)  
VI = Lectura inicial del gasómetro (ft<sup>3</sup>)  
VINF = Volumen de infiltraciones (ft<sup>3</sup>)  
VMS = Volumen total de muestreo a condiciones normales (m<sup>3</sup>)  
VR = Volumen de los gases de chimenea (ft<sup>3</sup>)  
VT = Volumen total de muestreo (ft<sup>3</sup>)  
YH = Fracción humedad  
YG = Fracción seca de los gases de chimenea  
µm = micrómetro

## INTRODUCCION

Con la apertura del Tratado de Libre Comercio entre México-Estados Unidos de America-Canadá, no sólo se incrementaron los flujos de intercambio comercial, sino que además se dispone de los recursos necesarios para implementar medidas adicionales de protección ambiental, debido a que este tema se encuentra contemplado en la agenda de las actuales negociaciones trilaterales. En lo que respecta al sector privado de estos tres países, estos han participado activamente en el cuidado del medio ambiente, así mismo, los esfuerzos realizados por el gobierno de México en la aplicación de programas para el combate de la contaminación tiene como logro la restauración de la legislación ambiental mexicana y de su reglamentación (Ley Federal de Ecología), obteniéndose resultados positivos en este rubro.

Esta política ecológica aplicada por el actual gobierno ha generado que el sector industrial tenga mayor énfasis en el cuidado del ambiente. El problema del envenenamiento del aire en las grandes ciudades y la demanda de la población en general ha enfocado el combate de la contaminación a las emisiones contaminantes. La medición de la concentración de los contaminantes en su fase de emisión es también un requisito obligado en la preservación y protección al ambiente, por lo que es de suma importancia la realización de muestreos en la valorización de una fuente emisora para determinar si esta se encuentra fuera o dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad establecida. Los datos obtenidos

servirán además para implementar estrategias de control de la contaminación del aire y para establecer estándares de la calidad del mismo. Las concentraciones encontradas de los contaminantes emitidas por una fuente fija, frecuentemente se emplean para autorizar o revocar cualquier permiso para operar un equipo de proceso o de control, que sea una fuente potencial de emisiones contaminantes; estas concentraciones obtenidas también nos proporcionan información sobre las pérdidas excesivas de productos o materias primas, y son de gran valor en la selección o diseño de los equipos de control, así como en los cálculos de la eficiencia de los mismos, ya instalados.

La finalidad inmediata de un muestreo es la de obtener datos fidedignos sobre la composición del efluente y el flujo de las emisiones contaminantes expulsados a través de las chimeneas de extracción de los diferentes procesos industriales; para lograr este objetivo se aplica una de las técnicas más completas y depuradas existentes, en los trabajos realizados por la "Environmental Protection Agency" (EPA) y en las Normas Oficiales Mexicanas publicadas en este sentido.

En el presente trabajo se desarrolla la cuantificación de la concentración de las partículas y del dióxido de azufre provenientes de un horno de fundición ejemplificando así de manera práctica la aplicación de los procedimientos de muestreo, los datos obtenidos de estos muestreos son comparados contra la Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-019-ECOL/93 que establece los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas y óxidos de azufre provenientes de fuentes fijas que usan

combustibles fósiles líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

Con la correcta interpretación de los datos obtenidos de un muestreo en su fuente de emisión, se podrán hacer sugerencias para la modificación de los equipos en operación o de control, y diseñar nuevos equipos, para esto se deberá tener un entendimiento básico de la termodinámica y cinética de reacción entre el oxígeno atmosférico y los contaminantes generados a partir de los procesos de combustión, especialmente a altas temperaturas, por lo que es importante realizar de manera cualitativa un análisis del comportamiento termodinámico y cinético de los contaminantes atmosféricos; en el capítulo 2 de esta tesis se explica de manera cualitativa este comportamiento.

El presente trabajo es de interés tanto para los profesionista involucrados en el area de contaminación ambiental como para industriales que requieran tales conocimientos sobre los métodos isocinéticos para evaluar partículas y dióxido de azufre en fuentes fijas, así como los requerimientos básicos para la realización de los mismos.

# CAPÍTULO 1

## CONTAMINACION DEL AIRE

### 1.1 ANTECEDENTES

Uno de los principales problemas de la contaminación que se ha convertido en tema común de nuestra cultura es el de la contaminación atmosférica, sobre todo en el caso de los habitantes de los asentamientos humanos más importantes de nuestro país.

La generación de humos, polvos y gases ha acompañado al desarrollo de la humanidad desde sus estadios más primitivos, las edades de bronce y de hierro, trajeron como consecuencia el desarrollo de la metalúrgica y con ello el problema de las primeras emisiones de origen "industrial".

Esta situación y el constante desarrollo industrial fueron creciendo en forma paralela al crecimiento demográfico, llegando a situaciones que, en su momento, llamaron la atención de las autoridades gubernamentales por afectar directamente la salud de la población en general.

México, cuyo desarrollo industrial intensivo se inicia a mediados del siglo XX con la instalación de diversas empresas. Siendo en la década de los 40's cuando, por la escasez de bienes manufacturados a causa de la Segunda guerra Mundial se inicia realmente el desarrollo industrial del país y consigo los problemas serios de contaminación atmosférica en las tres principales ciudades del país Cd. de México, Guadalajara y Monterrey.

La lucha contra la contaminación ambiental es muy reciente en el Valle de México, en 1972 se contó con la Primera Ley Federal para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, en 1982 se creó la Ley Federal de Protección al Ambiente y a mediados de 1988 se tiene la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; a paa velocidad reducida, esta El equipo de control para partículas más simple es aquel que utiliza las fuerzas gravitacionales para remover las partículas de la ente de gas. Este dispositivo velocidad generalmente es de 0.3 a 3.0 m/s, la reducción de la velocidad de los gases se logra a través de una expansión del ducto dentro de la cámara de sedimentación. Las partículas suspendidas en el gas alcanzan una velocidad de caída libre final que se determina por la Ley de Stoke para partículas y es directamenttaminación atmosférica.

#### **1.2. DEFINICION DE LA CONTAMINACION DEL AIRE**

La contaminación atmosférica se define como "la presencia ajena o extraña de materia (gases, partículas o la combinación de partículas y gases) en el aire que causan daños a la salud y/o bienestar del hombre" (Hesketh, 1970). Como presencia ajena o extraña de materia en el aire se entiende que las concentraciones de ésta excede significativamente las concentraciones ambientales normales, en otras palabras, las sustancias en el aire son contaminantes cuando sus concentraciones son suficientemente elevadas como para causar efectos adversos sobre la salud del hombre y de su ambiente.

Los efectos indirectos de la contaminación atmosférica surgen como consecuencia de los cambios en las propiedades físicas del sistema atmosférico de la tierra, por ejemplo el equilibrio de la radiación infrarroja en el caso del dióxido de carbono, y la cantidad de la radiación ultra violeta que entra a la tierra, en el caso de la disminución de la capa de ozono causada por los clorofluoruros carbonados. Los efectos directos de contaminación ocurren como consecuencia de la interacción entre un contaminante y un receptor; tales efectos resultan, como ya se mencionó, de las concentraciones más elevadas de lo común en relación con la cercanía a la fuente de contaminantes. Los efectos directos pueden ser inmediatos si la concentración es bastante elevada (efectos agudos), o se pueden desarrollar durante un período largo como resultado de la exposición continua a niveles de contaminación más altos que los comúnmente establecidos (efectos crónicos) (Strauss, 1980).

Los contaminantes son clasificados por primarios y secundarios, siendo los primeros aquellos que permanecen en la atmósfera de la misma manera en que fueron emitidos por la fuente, por ejemplo los óxidos de azufre, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y las partículas; y los secundarios son aquellos que son generados a partir de reacciones en la atmósfera de los primarios, por ejemplo el trióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.

Además los contaminantes atmosféricos se agrupan de acuerdo a sus características físicas y químicas como se muestra a continuación:

gases inorgánicos	óxidos de azufre, ácido sulfhídrico, óxidos de nitrógeno, amoníaco, ácido clorhídrico, monóxido de carbono, ácido fluorhídrico, etc.
gases orgánicos	hidrocarburos volátiles, mercaptanos, terpenos, alcoholes, cetonas, etc.
partículas inorgánicas	óxidos metálicos, sales, compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno, etc.
partículas orgánicas	polen, heces fecales, restos de vegetales, bacterias, etc.

La composición de los contaminantes atmosféricos, varia de acuerdo con la fuente, el área geográfica, y la estación del año entre otros factores (Robinson, 1972).

### 1.2.1 PARTICULAS

La atmósfera actual contiene partículas, gases y vapores, todos con ciclos naturales en la atmósfera, los cuales son

afectados debido a las actividades del ser humano. Las partículas pueden definirse como materia dispersa en la atmósfera que existe en estado sólido o líquido, las cuales varían en tamaño desde conglomerados moleculares con  $0.05 \mu\text{m}$  hasta  $100 \mu\text{m}$  (las partículas mayores de  $100 \mu\text{m}$  tienen una velocidad de sedimentación muy rápida por lo que su presencia en la atmósfera es muy breve, no así las partículas menores a  $0.05 \mu\text{m}$  las cuales tienden a estar por mucho tiempo flotando en la atmósfera) (NAPCA, 1970). Las partículas, representan un conjunto de diversas clases de sustancias con características físicas y químicas diferentes dependiendo de su fuente de emisión, del tiempo, de la región, y de la meteorología, es de esperarse que los efectos de las partículas en la salud y bienestar del ser humano varíen también (Wark, 1980).

Aunque el total de partículas liberadas a partir de agentes humanos es solo cercano al 10% en relación con la cantidad de partículas emitidas por fuentes naturales, éstas se concentran en las regiones industriales que tienen alta densidad de población lo que incrementa los riesgos ocasionados por este tipo de contaminante. Las partículas son generadas principalmente por la combustión de combustibles fósiles y por algunos procesos industriales tales como la condensación, la trituración y la molienda; las partículas menores a  $1 \text{ mm}$  se producen por condensación, mientras que las partículas mayores son el resultado del proceso de trituración y del proceso de combustión, los procesos de molienda en seco son rara vez eficientes en la producción de partículas menores de pocos

micrómetros. En el proceso de combustión las partículas se forman principalmente por los siguientes métodos:

- 1.- El calor vaporiza materiales que se condensan posteriormente, produciendo partículas entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$
- 2.- Las reacciones químicas del proceso de combustión producen partículas de cúmulos moleculares inestables de corta duración
- 3.- Los procesos mecánicos liberan cenizas o partículas de combustible de 1  $\mu\text{m}$  o mayores
- 4.- Si intervienen aspersiones de combustibles líquidos, puede que se escape directamente cenizas muy finas
- 5.- La combustión parcial de los combustibles fósiles produce hollín.

Las principales fuentes industriales de la contaminación por partículas son las siguientes industrias o procesos: fábricas de hierro y acero, fundición de hierro gris, metalurgia no ferrosa, refinerías de petróleo, industria cementera, fábricas de papel, manufactura de ácidos fosfórico y sulfúrico, manufactura de coque vidrio y fibra de vidrio, También las cargas intermitentes de asfalto en la industria de la construcción constituyen otra gran fuente potencial de generación de partículas, además de la industria alimenticia. (Jost, W., 1965)

Algunas partículas como las emitidas por los motores diesel, presentan alta probabilidad de ser los precursores del cáncer, otras como los polvos acarreados por tolvaneras, pueden ser portadores de sustancias tóxicas como pesticidas o de microorganismos bacteriológicos como los coliformes o

salmonellas. Las partículas además, pueden ocasionar corrosión de materiales, daños a la vegetación, reducir sensiblemente la visibilidad y la penetración de los rayos solares, entre otros (EPA, 1984).

La eficiencia de colectar o separar las partículas de la fase gaseosa, a través de equipos de control está directamente relacionada con el tamaño de éstas, las partículas mayores de 50  $\mu\text{m}$  son relativamente fácil de separar por sedimentación, mientras que las partículas menores a 2  $\mu\text{m}$  son más difíciles de remover de la corriente gaseosa; las partículas menores de 0.5  $\mu\text{m}$  son removidas de la corriente gaseosa por difusión molecular, mientras que las mayores de 0.5  $\mu\text{m}$  son separadas por el mecanismo de impacto inercial; conforme aumentan de tamaño las partículas, aumenta la eficiencia de separarlas o colectarlas (Stern, 1968).

#### **1.2.2 GASES ATMOSFERICOS.**

El aire es una mezcla de gases que rodean la tierra en una capa relativamente delgada. La mayor parte del aire (95%) se encuentra dentro de los primeros 20 kilómetros sobre el nivel del mar. En su mayor parte, las actividades del hombre se realizan sobre la superficie de la tierra sobre los 2 primeros kilómetros de la atmósfera; los gases contaminantes generados por estas actividades se filtran directamente en la troposfera (parte más baja de la atmósfera) donde son mezclados y transportados (Strauss, 1980), éstos gases tienen peso, ocupan un lugar en el espacio y se expanden por difusión hasta que sus

moléculas son igualmente distribuidas en un área determinada. Los contaminantes gaseosos presentes en el aire usualmente se encuentran en bajas concentraciones por lo que el aire se considera como un gas ideal a condiciones de presión y temperatura ambiental.

La Tabla 1.1 muestra la composición del aire limpio y seco a nivel del mar, en porcentaje volumen y partes por millón (Handbook of Air Pollution, 1968).

COMPONENTES	FORMULA	% EN VOLUMEN	ppm
NITROGENO	N <sub>2</sub>	78.09	780,900
OXIGENO	O <sub>2</sub>	20.94	209,400
ARGON	Ar	0.93	9,300
DIOXIDO DE CARBONO	CO <sub>2</sub>	0.033	330
NEON	Ne	1.80E-03	18
HELIO	He	5.20E-04	5.2
METANO	CH <sub>4</sub>	1.50E-04	1.5
KRIPTON	Kr	1.00E-04	1
HIDROGENO	H <sub>2</sub>	5.00E-05	0.5
OXIDO DE NITROGENO	N <sub>2</sub> O	8.00E-06	0.5
XENON	Xe	7.00E-06	0.08
OZONO	O <sub>3</sub>	1.00E-06	0.07
AMONIO	NH <sub>3</sub>	1.00E-06	0.01
IODO	I <sub>2</sub>	1.00E-06	0.01
DIOXIDO DE NITROGENO	NO <sub>2</sub>	1.00E-07	0.001
DIOXIDO DE AZUFRE	SO <sub>2</sub>	2.00E-08	0.0002

**TABLA 1.1 COMPOSICION TIPICA DEL AIRE SECO Y LIMPIO A NIVEL DEL MAR**

Debe de tomarse en cuenta que la contaminación del aire en zonas urbanas puede variar substancialmente en estos valores de concentración, por ejemplo; la concentración de metano en zonas urbanas usualmente tiene valores de 6 a 9 partes por millón, mientras que a nivel del mar los valores de metano están alrededor de 1.5 ppm.

Los problemas más comúnmente ocasionados por la contaminación de los gases son:

- 1.- Desprendimiento de olores;
- 2.- Reaccionan químicamente en la atmósfera dando origen a otros contaminantes secundarios los cuales pueden ser gases o aerosoles, o combinación de ambos;
- 3.- Reaccionan destruyendo objetos inanimados.

Algunos gases causan solamente uno de estos problemas y otros pueden causar los tres problemas, la extensión del daño varía con la concentración de un contaminante en particular en la atmósfera y los factores naturales.

Los componentes principales del aire no reaccionan entre sí (nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono) bajo condiciones normales. Asimismo las pequeñas cantidades de los gases raros (helio, neón, kriptón, xenón, hidrógeno y óxido de nitrógeno) no reaccionan o tienen poca o ninguna interacción con otras moléculas. Algunos otros gases reactivos, por ejemplo, monóxido de carbono, metano, hidrocarburos (excepto el metano), dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, amoníaco y ozono, también presente en pequeñas cantidades, no son químicamente inertes sino que interactúan con la atmósfera y entre ellos mismos; en consecuencia, esos gases tienen un tiempo limitado en ella y sus concentraciones son característicamente variables. Los gases reactivos son los que se consideran contaminantes cuando los produce el hombre en cantidades suficientemente elevadas como para exceder en forma significativa a las concentraciones ambientales señaladas en la Tabla 1.1.

Como se mencionó anteriormente los gases más importantes dentro de este grupo son: dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y hidrocarburos; otros gases reactivos también pueden causar problemas de contaminación en concentraciones elevadas, por ejemplo, los gases clorohalogenados y los fluorohalogenados, así como sus ácidos derivados: ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, pero estos problemas tienden a ser regionales más que universales.

Los problemas de la contaminación asociada con los gases, surgen en menor intensidad por las emisiones naturales en las regiones de mayor intensidad de población; en las zonas industriales los efectos nocivos son potencialmente incrementados por las emisiones realizadas por el hombre (antropogénicamente).

A largo plazo, los problemas más serios de contaminación pueden surgir no de gases reactivos, sino de gases no reactivos, como por ejemplo el dióxido de carbono, el cual no tiene ninguna interacción nociva con los sistemas vivientes, pero la descarga cada vez mayor de este compuesto trae consigo un aumento de la concentración del "contaminante" en la atmósfera, que al no tener vertedero, están ocasionando un cambio significativo en la temperatura atmosférica global del planeta.

En relación a lo expuesto anteriormente, con relación a los tipos más comunes de contaminantes; ahora se hará énfasis en cuales son la fuentes más importantes de generación de estos contaminantes.

### 1.3. FUENTES DE CONTAMINACION AMBIENTAL

Las fuentes de contaminación del aire se divide principalmente en: naturales y artificiales, entendiéndose como contaminación por fuentes naturales la producida por la naturaleza, como sería el caso de las explosiones volcánicas, los incendios naturales, las tolveneras, olores de gases originados en pantanos, sal de la brisa marina y otros; la contaminación artificial es aquella producida por el hombre en sus diferentes actividades, como la industrial, de transporte y generación de energía.

Anualmente en la zona metropolitana de la Ciudad de México, según cifras oficiales, se emiten 4 millones 356 mil toneladas de contaminantes (partículas y gases) de los cuales el 15% de estas emisiones provienen de fuentes naturales y el restante son originadas por fuentes artificiales. Figura 1.1 (Dirección de estudios económicos Canacintra, 1993).

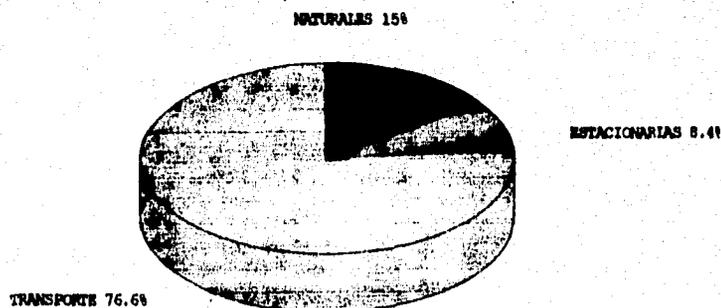


FIGURA 1.1 EMISION TOTAL DE CONTAMINANTES A LA ATMOSFERA DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO.

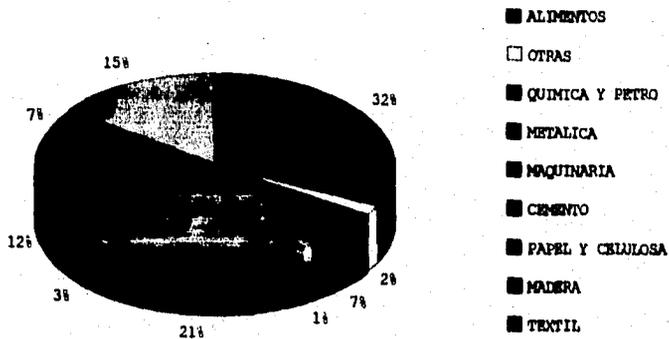
La contaminación artificial o antropogénica proviene principalmente de las siguientes "fuentes":

- 1.- Industrial
- 2.- Transporte
- 3.- Generación de energía

#### **1.3.1 CONTAMINACION POR FUENTE INDUSTRIAL Y DE SERVICIOS**

En la Ciudad de México hay más de 30 mil establecimientos industriales, de los cuales alrededor de 4 mil contribuyen significativamente a la emisión de contaminantes, por su tamaño y procesos de transformación y combustión destacan las siguientes ramas: química (incluyendo pinturas y solventes), fundición de hierro y acero, textil, de minerales no metálicos, huleira, papelera, alimenticia, vidriera, de plásticos, metal mecánica, asfalto, grasas y aceite, y cementera. Del total de industrias manufactureras localizadas en el valle de México, aproximadamente el 75% se concentran dentro del Distrito Federal y el resto en las áreas conurbadas, las cuales se localizan predominantemente al norte y oriente de la Ciudad, aunque actividades como la farmacéutica se concentran en el sur y centro (CANACINTRA, 1993).

En la Figura 1.2 se muestra la composición de la industria manufacturera en la zona metropolitana de la Ciudad de México según datos de Canacinttra de 1993.



**FIGURA 1.2 COMPOSICION DE LA INDUSTRIA MANUFACTURERA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO**

De los 4 millones 356 mil toneladas de contaminantes emitidos anualmente en el Valle de México el 8.4% provienen de la industria (fuentes estacionarias o fijas) incluyendo las termoeléctricas, y establecimientos de servicio. En forma ponderada la toxicidad que se genera por este tipo de fuente de emisión es del 16.9%. Tabla 1.2. (Albert, L.A., 1990).

CONCEPTO	COMPOSICION
ENERGIA	10.8%
INDUSTRIAS Y SERVICIOS	16.9%
TRANSPORTE	42.4%
DEGRADACION ECOLOGICA	29.9%
TOTAL	100.0%

**TABLA 1.2 INVENTARIO DE EMISIONES POR SECTOR PONDERADO POR TOXICIDAD**

La industria química y metalúrgica son particularmente agresivas al medio ambiente, y lo son más cuando sus procesos están tecnológicamente atrasados y no poseen equipos de control de emisiones. En general, la obsolescencia y poco control de los procesos de combustión, el empleo de combustibles con alto contenido de azufre y el uso de solventes, causan las mayores emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Según los datos reportados por la INEGI en 1990 la emisión total de hidrocarburos a la atmósfera fue de 372 mil 525 toneladas, el total de dióxido de azufre emitido a la atmósfera fue de 205 mil 594 toneladas, la emisión total de óxidos de nitrógeno fue de 177 mil 399 toneladas, la generación de monóxido de carbono para ese mismo año fue de 2 millones 923 mil 265 toneladas y la emisión de partículas generadas fue de 26 mil 959 toneladas. La contribución por parte del sector industrial en la emisión total de hidrocarburos fue de solo el 9.5% del total de este tipo de contaminante. De igual forma la aportación en la emisión de dióxido de azufre fue del 42.6 % mientras que para los óxidos de nitrógeno su aportación fue del 18.6%; la contribución de la industria en la generación del monóxido de carbono es mínima, ya que no aporta ni siquiera el 1% de este componente tóxico, finalmente la aportación de este sector en la emisión de partículas representa el 47.1% para el mismo año.

Se estima que en el Valle de México operan 12 mil establecimientos de servicios que poseen procesos de combustión e incineración los cuales contribuyeron aproximadamente con 1 millón 45 mil 440 toneladas anuales de contaminantes en el año

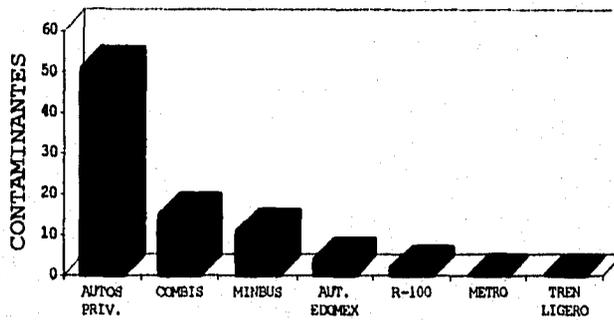
de 1990, lo que representa el 2.4% de la emisión total de contaminantes generadas en ese año.

De acuerdo con la magnitud y tipo de calderas, cada giro emplea distintos combustibles. Los baños públicos, panificadoras, hoteles, deportivos y hospitales utilizan combustóleo preferentemente. Algunos hoteles consumen diesel, las tintorerías usan principalmente petróleo diáfano, mientras los expendios de alimentos consumen gas L.P. (PICCA, 1990).

### **1.3.2 CONTAMINACION POR TRANSPORTE**

La extensión del área urbana y la intensa vida económica y social de la Ciudad, obliga a sus pobladores a transportarse grandes distancias para cumplir con sus actividades cotidianas. En la Ciudad de México, en 1990, con sus 14 millones 987 mil habitantes, se estimó que diariamente se realizaron 29.5 millones de viajes, los cuales se realizaron en 2 millones 372 mil autos privados, 57 mil taxis, 69 mil combis y microbuses, 10 mil 500 autobuses urbanos, 9 líneas del metro, dos líneas de tren ligero y 450 trolebuses; además se estimó que circularon en el Valle de México cerca de 196 mil camiones a gasolina distribuidores de mercancía y 60 mil camiones a diesel que mueven carga y pasajeros de rutas foráneas (PICCA, 1990).

Entre estos modos de transporte, los taxis y los autos privados emiten la mayor carga de contaminantes por pasajero-kilometro-transportado, como se muestra en la Figura 1.3, emisión por transporte.



**FIGURA 1.3 EMISION POR TRANSPORTE**

De los 4,356,000 toneladas al año de contaminantes generados en el Valle de México el 77% de las emisiones provienen del transporte y en forma ponderada las emisiones de contaminantes tóxicos es del 42.4% (Tabla 1.2). Los autos particulares emiten más de la mitad de los contaminantes de origen vehicular y al emplear gasolina generan además óxidos de plomo, de azufre y partículas.

En el caso de hidrocarburos, el transporte es la principal fuente de contaminación contribuyendo con el 81% de las emisiones totales generadas (372 mil 525 toneladas en el año de 1990), la aportación de los dióxidos de azufre por este tipo de fuente de emisión es del 22% del total de este contaminante emitido a la atmósfera (205 mil 594 toneladas). Los óxidos de nitrógeno generados por fuentes vehiculares constituyen el 78% de la emisión total (177 mil 399 toneladas), mientras que la contribución que aporta para el monóxido de carbono es del 98% de total de este contaminante (2 millones 923 mil 265

toneladas), finalmente su aportación al total de partículas generadas por fuentes antropogénicas es del 36% (de un total de 26 mil 959 toneladas).

### **1.3.3 CONTAMINACION POR GENERACION DE ENERGIA**

Las centrales termoeléctricas Jorge Luque y Valle de México producen en conjunto más del 9% del total de los contaminantes emitidos por el grupo de industrias y establecimientos de servicios (fuentes fijas). Sus emisiones de bióxido de azufre han disminuido por en 80% con la sustitución de combustóleo por gas natural. No obstante, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) siguen siendo importantes porque estos se generan en todo proceso de combustión.

Las emisiones en forma ponderada de la toxicidad que se obtienen por la generación de energía son del 10.8% (tabla 1.2). La contribución del total de hidrocarburos generados, en el año de 1990, es del 8.5%; mientras que del total de dióxido de azufre generado artificialmente, para el mismo año, la generación de energía contribuye con el 35.4%; en la emisión de óxidos de nitrógeno, la generación de energía representa el 5.4% y del total de NOx generados en el mismo año. Las partículas producidas por la generación de energía representan el 17.4% del total de partículas para el año de 1990.

Como se mencionó anteriormente las sustancias que pueden encontrarse en el aire ambiente son partículas y gases, estas sustancias pueden ser contaminantes si sus concentraciones están por encima de las concentraciones presentes en la atmósfera como

para causar algún efecto adverso sobre el hombre y su ambiente. Por su contribución al total de contaminantes emitidos a la atmósfera, además de pertenecer al grupo de los contaminantes que reaccionan en el medio ambiente, los componentes más importantes son: partículas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y monóxido de carbono. De estos cinco contaminantes las partículas y los óxidos de azufre tienen su principal fuente de emisión en el sector industrial generados principalmente como productos del proceso de combustión; Los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y el monóxido de carbono tienen como principal fuente de emisión a los vehículos automotores. De los contaminantes antes mencionados; en el presente trabajo, se determinarán las concentraciones en su fuente de emisión industrial de las partículas y de óxidos de azufre ya que a parte de ser los contaminante que más se emiten en el sector industrial, los efectos más perjudiciales para el ser humano provienen de la combinación de estos dos contaminantes; en la sección 1.4 se describirán en forma independientes los efectos causados por estos cinco contaminantes. Existen un mayor número de contaminantes en la atmósfera, pero debido a que las cantidades emitidas al medio ambiente, a través de sus diferentes fuentes de emisión, son de baja concentración, comparados con la de estos cinco contaminantes no se mencionarán en este trabajo.

#### 1.4 EFECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

Después de su formación, los contaminantes del aire se emiten hacia la atmósfera y se dispersan en ella. Una vez mezclados con el aire, algunos contaminantes como el dióxido de carbono, permanecen en forma inalterada y se mezcla en toda la atmósfera donde potencialmente tienen una influencia global. Los contaminantes más reactivos tienen una vida media más corta en la atmósfera y se remueven ya sea por conversión a constituyentes atmosféricos normales, o bien al depositarse sobre la superficie de la tierra; durante este proceso pueden reaccionar con otros constituyentes atmosféricos para formar contaminantes secundarios, los cuales se remueven mediante el mismo proceso. Tanto las emisiones primarias como las secundarias pueden causar alteraciones en la composición química de suelos y aguas, así como ocasionar daños directos a propiedades y sistemas biológicos. La mezcla de contaminantes en el aire nunca es constante ni simple y el daño que se observa en una situación particular es con frecuencia el resultado de más de un contaminante en acción conjunta. En ciertos casos, una interacción sinérgica ocurre donde el efecto total corresponde a un valor mucho más grande que la suma de los efectos individuales de los contaminantes que participan tal es el caso de la combinación de las partículas y los óxidos de azufre.

El nivel máximo permisible de emisión para cada contaminante se establece como concentraciones máximas a las cuales no se les permite a las personas estar expuestas durante periodos determinados. En la Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-019-

ECOL/1993 se establecen los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas y óxidos de azufre emitidos por las fuentes fijas que usan combustibles fósiles líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Los límites máximos permisibles establecidos en esta norma para equipos de 151 C.C. a 1200 C.C. es de  $100 \text{ mg/m}^3$  para partículas en la zona metropolitana de la Ciudad de México, y el límite permisible para el dióxido de azufre en esta misma zona es de 100 ppm; en esta misma norma se establecen los métodos de medición de estos contaminantes y la frecuencia con la que se deben de realizar estas mediciones.

#### **1.4.1 PARTICULAS**

Las partículas arrastradas por el aire pueden ser en sí químicamente inerte o químicamente activas; podrán ser inertes pero absorber de la atmósfera sustancias químicamente activas; o se pueden combinar para formar especies químicamente activas. Dependiendo de su composición química y estado físico, las partículas causan grandes daños a los materiales. Las partículas pueden causar daños químicos directos a los metales, ya sea por corrosividad intrínseca o por la acción de sustancias químicas corrosivas adsorbidas o absorbidas, por partículas inertes emitidas a la atmósfera. En general, los metales pueden resistir sólo en el aire seco o aún en el aire húmedo y limpio. Sin embargo, las partículas higroscópicas que se encuentran usualmente en la atmósfera pueden corroer las superficies metálicas sin que este presente contaminante alguno.

Poco es lo que se conoce de los efectos de las partículas en general, sobre la vegetación. Pero se sabe que algunas sustancias específicas causan daños. Las partículas que contienen fluoruros parecen causar daños en las plantas, y el óxido de magnesio que cae sobre los terrenos agrícolas han dado como resultado un insatisfactorio crecimiento de las plantas.

Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro muy grande para la salud. Los contaminantes entran principalmente al cuerpo humano por las vías respiratorias. Los daños a los órganos respiratorios se pueden presentar directamente, ya que se ha estimado que más del 50 por ciento de las partículas entre 0.01 y 0.1  $\mu\text{m}$  que penetran a las cavidades pulmonares se depositan allí.

Las partículas pueden tener un efecto tóxico de una o más de las tres maneras siguientes:

- 1.- Las partículas pueden ser intrínsecamente tóxicas debido a sus características inherentes químicas y/o físicas.
- 2.- Las partículas pueden interferir con uno o más de los mecanismos que conforman el sistema respiratorio.
- 3.- Las partículas pueden actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida, las cuales al depositarse en el sistema respiratorio pueden dañarlo.

Es extremadamente difícil obtener una reacción directa entre la exposición a varias concentraciones de partículas y los efectos resultantes sobre la salud humana. Se ha observado en

algunos casos que la exposición a partículas en combinación con otros contaminantes produce un mayor deterioro de la salud que la exposición por separada de cada contaminante.

En la Tabla 1.3 se presenta algunos datos sobre la relación entre la concentración de las partículas y los efectos producidos.

CONCEN- TRACION ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	TIEMPO DE MEDICION	EFECTO
60 - 180	Media geométrica anual	Aceleración de la corrosión de las láminas de acero y zinc
75	Media anual	Norma de la calidad del aire ambiente, sitio cerrado
150	Humedad relativa menor al 70 por ciento	Visibilidad reducida a 8 Km
80 - 100	Con niveles de sulfatación de $30 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$	Puede ocurrir un aumento en la tasa de mortalidad de personas mayores de 50 años
100 - 130	con $\text{SO}_2 > 120$ $\mu\text{m}/\text{m}^3$	En niños aumenta la incidencia de enfermedades respiratorias
200	24 h y $\text{SO}_2 > 250 \mu\text{m}/\text{m}^3$	Puede ser causa de un aumento de la mortalidad de los obreros industriales
260	Máximo cada 24 h	Norma de la calidad del aire ambiente, sitio abierto

**TABLA 1.3 EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS PARTICULAS**

CONCEN- TRACION ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	TIEMPO DE MEDICION	EFECTO
300	24 h y $\text{SO}_2 >$ $630 \mu\text{g}/\text{m}^3$	En los pacientes con bronquitis crónica puede que se presente empeoramiento
750	24 h y $\text{SO}_2 > 715 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Puede ocurrir un número excesivo de muertes

**TABLA 1.3 EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS PARTICULAS  
(CONTINUACION)**

#### 1.4.2 OXIDOS DE AZUFRE

Los óxidos de azufre del aire pueden inhibir el crecimiento de las plantas y ser letales para algunas de ellas. Cuando las plantas están expuestas a concentraciones subletales de dióxido de azufre durante largos periodos, el follaje muere y se seca. En general, las plantas se ven afectadas cuando se sobrepasan las 0.3 - 0.5 ppm pero los efectos tóxicos en las diversas especies vegetales son diferentes.

Los principales efectos nocivos del dióxido de azufre en el ser humano se mencionan en la Tabla 1.4:

CONCENTRACION (ppm)	EFFECTOS
1 - 6	Broncoconstricción
3 - 5	Concentración mínima detestable por el olfato
8 - 12	Irritación de la garganta
12 -20	Irritación de la garganta y tos
50 - 100	Concentración máxima para una exposición corta
400 - 500	Puede ser mortal, incluso en exposición breve

**TABLA 1.4 EFECTOS TOXICOS DEL DIOXIDO DE AZUFRE PARA EL  
HOMBRE**

No se sabe que efectos pueden presentarse en los seres humanos a largo plazo a exposiciones bajas de concentraciones de dióxido de azufre, ya que no existen pruebas contundentes de que este gas provoque enfermedades respiratorias; pero se ha encontrado una correlación específica entre la incidencia de óxidos de azufre en la atmósfera y el índice de muertes por enfermedades crónicas cardiovasculares y respiratorias.

### 1.4.3 MONOXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono es el único contaminante que produce un cambio en la fisiología humana que se puede relacionar con la concentración a la cual el sujeto se expone. La carboxihemoglobina (COHb) de la sangre se puede predecir a partir de las concentraciones atmosféricas de monóxido de carbono cuando se toma en cuenta el nivel de actividad del sujeto y la altura sobre el nivel del mar; esto hace mucho más fácil la cuantificación de concentración y el efecto.

La muerte por monóxido de carbono ocurre en el ser humano expuestos a concentraciones alrededor de 1000 ppm correspondientes a niveles sanguíneos del 60% de COHb. Los cambios funcionales cardiacos y pulmonares sucede a niveles sanguíneos más bajos, entre el 10% y 20% de COHb, y se ha tenido información de algunas personas con niveles del 2% que se ven afectados en su conducta, para niveles de COHb que se encuentran en un intervalo de 10% a 80% los posibles efectos son: dolores de cabeza, fatiga, somnolencia, estado de coma, falla respiratoria y muerte.

Se ha demostrado que la funciones cardiacas se alteran mediante un nivel de COHb elevado, como se prueba a través de electrocardiogramas en adultos sanos expuestos a concentraciones de monóxido de carbono, debido a que este bloquea el transporte de oxígeno en la corriente sanguínea. (Albert, Lilia, 1990).

#### 1.4.4 OXIDOS DE NITROGENO

No se conocen con certeza los efectos de los óxidos de nitrógeno, en las plantas. Sin embargo, algunos contaminantes secundarios que se forman a partir de los óxidos de nitrógeno son mortales para las plantas.

El óxido de nitrógeno afecta los pulmones y es tóxico. En la Tabla 1.5 se muestran los principales efectos sobre la salud del dióxido de nitrógeno en función de su concentración.

CONCENTRACIONES (ppm)	EFFECTOS
1-3	Concentración mínima detectada por el olfato
13	Irritación de nariz garganta y ojos
25	Congestión y enfermedades pulmonares
100 - 1000	Es mortal, incluso tras una exposición breve

TABLA 1.5 EFECTOS DEL DIOXIDO DE NITROGENO SOBRE LA SALUD

#### 1.4.5 HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos no parecen causar ningún daño apreciable por la corrosión en los materiales. Las partículas o el hollín procedente de hidrocarburos no quemados ensucian las superficies. Algunos hidrocarburos son tóxicos para las plantas y animales a concentraciones relativamente altas (500 ppm o

más). El etileno tiene efectos adversos sobre las plantas ante concentraciones ambientales conocidas; pero no se ha demostrado que tengan efectos significativos en los humanos a las concentraciones existentes en el aire. Estudios de las propiedades carcinogénicas de ciertas clases de hidrocarburos sí indican que ciertas formas de cáncer parecen ser causadas por la exposición a hidrocarburos aromáticos que se encuentran en el hollín y los alquitranes.

### **1.5 ASPECTO LEGAL**

La prevención y control de la contaminación del aire en México, han requerido desde los años sesenta, una atención prioritaria por parte del Gobierno Federal. La complejidad del problema, por la concentración industrial y vehicular, así como por las condiciones topográficas y meteorológicas que existen en el país ha demandado la concertación e implantación de medidas tendientes a mejorar la calidad del aire.

La Ley Federal para la Prevención y el Control de la Contaminación Ambiental de 1972, la Ley Federal de Protección al Ambiente de 1982 y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, todavía vigente, han sido los marcos de referencia para las acciones gubernamentales de control de este problema.

Actualmente, el desarrollo del marco jurídico para la protección de los ecosistemas y la salud humana, se ha extendido intensivamente, tanto en forma horizontal como vertical; en el plano horizontal, la Ley ha establecido la corresponsabilidad de

las responsabilidades de los tres niveles de gobierno (Federal, Estatal y Municipal) en la vigilancia y solución de este problema; por lo que toca a dimensión vertical, el marco jurídico se ha establecido de lo general -la Ley-, a lo particular, reglamentos y normas, cubriendo los diversos aspectos del problema.

En el caso concreto de la contaminación atmosférica, algunas medidas implantadas son: el Decreto Presidencial del 14 de febrero de 1986 para prevenir y controlar la contaminación atmosférica; las cien acciones ecológicas necesarias, publicadas en enero de 1987 y en forma más estricta, el marco legal fundamental que está constituido por el capítulo I del Título IV, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; de este emana el Reglamento en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica publicado en el Diario Oficial el 28 de Noviembre de 1988, así como las diversas normas técnicas ecológicas en este campo, publicadas hasta la fecha.

Por lo que toca a la competencia de los diversos niveles de gobierno en esta materia, la Ley General en su artículo 111 establece las responsabilidades de las autoridades federal en la materia, y en el 112, la corresponsabilidad de estados y municipios.

En forma más explícita, el artículo 3o del Reglamento establece los campos de competencia federal en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, estableciendo en el artículo 7 las competencias específicas de

la PROFEPA, mientras que el artículo 4 representa las competencias estatales y municipales; finalmente, en el caso del Distrito Federal, el artículo 9 establece los límites de competencia de la PROFEPA y el DDF en esta materia.

Dentro del marco fundamental representado por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, el nivel técnico-aplicativo básico está conformado por las Normas Técnicas Ecológicas, que la propia Ley define como "el conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Secretaría, que establecen los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o daño al ambiente, y, además que uniformen principios, criterios, políticas y estrategias en la materia". Al respecto, la SEMARNAP ha publicado normas técnicas ecológicas, estableciendo en ellas los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, fundamentalmente en los procesos de combustión, la fabricación de cemento y ácido sulfúrico, la emisión de partículas en general.

En el aspecto de competencia territorial, la Ley prevee la promulgación de Leyes y Reglamentos locales, por lo cual, actualmente, en el caso de instalaciones en las entidades federativas, es necesario conocer la legislación local, basada generalmente en una Ley estatal de ecología.

## CAPÍTULO 2

### COMPORTAMIENTO QUIMICO DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

#### GENERADOS EN EL PROCESO DE COMBUSTION

##### 2.1 GENERALIDADES

Como se mencionó en el capítulo 1 por su contribución a las emisiones atmosféricas generadas de manera antropogénica, los principales contaminantes: son las partículas, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el monóxido de carbono, estos contaminantes son emitidos principalmente, a nivel industrial, como productos de los procesos de combustión.

La reducción de estos contaminantes atmosféricos a niveles deseables, se puede llevar a cabo por varios métodos; en las partículas, generalmente, la disminución de esta emisiones se puede lograr a través del estudio de los fenómenos de las fuerzas gravitacionales, centrífugas y electrostáticas; en cuanto la reducción de los gases contaminantes puede realizarse mediante la absorción de estos gases sobre una superficie sólida o líquida, o se pueden oxidar por medio de la incineración catalítica o de flama directa a otra forma química que no sea contaminante, también en primera instancia, la concentración de los contaminantes gaseosos se puede reducir por la restricción de la cantidad de contaminante formado en el proceso químico original. Los métodos antes mencionados se indican en anexo 1, donde se describen los equipos de control utilizados en fuentes fijas, con excepción del método de control que implica la restricción de la cantidad de contaminantes formados en el proceso original, en el cual, para lograr la eficiencia de este método es necesario

conocer el comportamiento cinético de reacción y la evolución del equilibrio químico de las especies entre sí.

En este capítulo se analiza de manera cualitativa el comportamiento termodinámico y cinético de los tres principales contaminantes atmosféricos, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, generados en los procesos de combustión de las fuentes industriales.

Debido a la amplia variación de la temperatura de los gases de combustión durante un período relativamente corto; la velocidad de reacción es tan importante como la termodinámica de reacción en la aplicación de cualquiera de las dos técnicas generales de control de contaminantes, por un lado, la técnica que consiste en impedir la formación inicial del contaminante controlando las variables que promueven su formación y la técnica de incineración del contaminante.

Además para la correcta interpretación de los datos, hacer sugerencias para la modificación de los equipos en operación, y diseñar nuevos equipos de control, también se deberá contar con un entendimiento básico de la termodinámica y cinética de reacción entre el oxígeno atmosférico y los contaminantes generados a partir de los procesos de combustión.

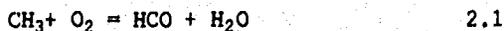
## **2.2. MONOXIDO DE CARBONO**

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro, el cual es muy estable y tiene una vida promedio en la atmósfera de 2 a 4 meses. Los efectos de este componente se mencionaron en el punto 1.4.3 del capítulo 1. El monóxido de carbono es generado

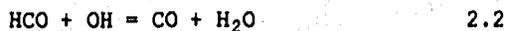
principalmente por la combustión incompleta de combustibles carbonados en motores de automóviles así como en unidades de calefacción, cabe señalar que los hidrocarburos no quemados son el resultado, también, de la combustión incompleta de los combustibles. Una porción relativamente pequeña de CO proviene de otras operaciones como son los procesos de limpieza en seco, de evaporación de capas industriales y la limpieza de piezas manufacturadas.

### 2.2.1 TERMODINAMICA DEL MONOXIDO DE CARBONO

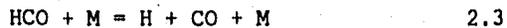
En los estudios sobre los procesos de oxidación a altas temperaturas para hidrocarburos, como el metano, se incluye con frecuencia la reacción del oxígeno (O<sub>2</sub>) con el radical metilo (CH<sub>3</sub>) (Serry, 1970).



El monóxido de carbono se forma por una reacción intermedia principal en donde se hace reaccionar el radical HCO con un radical hidroxilo (OH):



otra posibilidad de formación del monóxido de carbono puede ser la reacción del radical aldehído en presencia de una molécula capaz de absorber la energía desprendida de esta reacción:

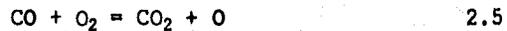


La formación del CO mediante estos dos mecanismos usualmente no esta restringida debido a que en las flamas de los hidrocarburos existen cantidades apreciables de HCO.

La conversión de CO a CO<sub>2</sub> se origina por la reacción del CO con un hidroxilo OH (Dryer, 1971):



Existe otra ruta de formación de dióxido de carbono a partir de la oxidación directa del monóxido de carbono:



Esta etapa es relativamente lenta comparada con la reacción 2.4 En las flamas con insuficiente contenido de combustible, siempre está presente un exceso de oxígeno; por tanto es de esperarse que la reacción 2.5 sea la predominante en los gases de combustión bajo estas condiciones, generando grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, pero en realidad se encuentran cantidades apreciables de CO en estos gases en vez del CO<sub>2</sub> esperado, este fenómeno se puede explicar por dos razones específicas: 1) puede haber una mezcla defectuosa del combustible y el aire en la zona de reacción, de manera que en dicha zona la mezcla se comporta como rica en combustible, a pesar de que la mezcla global sea pobre; ó 2) el monóxido de carbono se puede originar en regiones de altas temperaturas de la zona de combustión, donde según los datos

termodinámicos experimentales reportados en las tablas de JANAF, el equilibrio químico establece que deberá ocurrir la disociación del dióxido de carbono con monóxido de carbono (Tabla 2.1)

$\text{CO} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}_2$	T (°K)	Kp
$K_p = [\text{CO}_2]/[\text{CO}][\text{O}_2]^{1/2}$	298	1.2E+45
	500	1.1E+25
	1000	1.7E+10
	1500	2.1E+5
	2000	766
	2500	28

**TABLA 2.1 CONSTANTES DE EQUILIBRIO PARA EL PROCESO DE OXIDACION DEL CO AL CO<sub>2</sub>. (JANAF; 1965).**

En esta tabla se muestran las constantes de equilibrio (Kp) de un gas ideal para el proceso de oxidación de monóxido de carbono a dióxido de carbono, en función de la temperatura, de la tabla se observa cuando se tiene temperaturas elevadas (mayores de 2000 °K) se tienen valores relativamente pequeños de la constante de equilibrio químico, lo que establece una mala oxidación del CO, aumentando de manera significativa la concentración de este compuesto.

### 2.2.2 CINETICA DEL MONOXIDO DE CARBONO

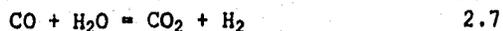
La formación de los productos a partir de la desaparición de los reactivos se rige por la velocidad de reacción y este parámetro es tan importante como los de la termodinámica para conocer los factores que favorecen la formación de los productos.

Como se observó anteriormente, los datos termodinámicos de la constante de equilibrio químico predicen que la oxidación directa (reacción 2.5) no es la ruta preferida para la formación del CO<sub>2</sub> a pesar del exceso de O<sub>2</sub> por lo que la reacción dominante es la reacción 2.4, en ésta, el grado de CO consumido está controlado por la concentración de óxidrilo (OH) presentes en diversas regiones del proceso de la combustión.

A pesar de que existe varias reacciones que contribuyen a la formación de los radicales OH, hay una etapa esencial para producir estos radicales la cual es a partir de la siguiente reacción:



Esta reacción en combinación con la reacción 2.4 propician la formación del dióxido de carbono:



En la zona caliente de las flamas premezcladas (aproximadamente 2000 °K) o de las flamas de difusión turbulenta, se alcanza rápidamente el equilibrio entre estas reacciones

competitivas (reacciones 2.4 y 2.6), por lo tanto, una reacción global como la reacción 2.7 se encuentra también en equilibrio. Los datos de las constantes de equilibrio (Tabla 2.2) muestran que se debería formar  $\text{CO}_2$  a partir del  $\text{CO}$  cuando la temperatura desciende, esto conforme los gases abandonan la zona caliente de combustión.

$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$	T (°K)	Kp
	298	1.04E+5
	500	1.38E+2
	1000	1.44
$K_p = [\text{CO}_2][\text{H}_2]/[\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]$	1500	0.39
	2000	0.22
	2500	0.16

**TABLA 2.2 Constantes de equilibrio para la formación de  $\text{CO}_2$  a partir del  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Tablas termoquímicas de JANAF, 1965)**

Si existe suficiente oxígeno, la magnitud de la constante de equilibrio (Kp) a una temperatura de 298 °K indica una conversión casi completa de  $\text{CO}$  a  $\text{CO}_2$ , no obstante, la velocidad y el mecanismo con que se lleva a cabo esta reacción (cinética de la reacción) conduce a una conclusión diferente.

Las reacciones elementales 2.4 y 2.6 constituyen la etapa fundamental de la reacción 2.7, mediante estas reacciones se puede presentar una explicación cinética para los niveles de

equilibrio del CO formado en los gases de combustión; según la cinética de su reacción (Palmer, 1974), la reacción progresiva 2.4 es muy rápida y la constante de velocidad de reacción es razonablemente independiente de la temperatura. La reacción progresiva 2.6 también tiene una velocidad de reacción rápida a altas temperaturas. Alrededor de los 1500 °K, las constantes de velocidad de reacción para las dos reacciones son comparables, sin embargo, la reacción 2.6 tiene una alta energía de activación (85 KJ), por lo que su constante de velocidad de reacción decrece rápidamente conforme disminuye la temperatura. Según la ecuación de Arrhenius, la cual relaciona la constante de velocidad en función de la energía de activación y la temperatura, a 1000 °K la constante de velocidad de reacción es aproximadamente la trigésima parte de su valor a 1500 °K, y a 800 °K esta constante es solamente 0.03 del valor a 1500 °K. Por lo tanto, la reacción 2.6 es ineficaz para producir especies de óxidrilo a una velocidad de reacción razonable conforme decrece la temperatura del gas. Con una disminución en la producción de OH, la conversión del CO a CO<sub>2</sub> por la reacción 2.4 se reduce notablemente.

La siguiente reacción



es otra posible fuente de producción de óxidrilo, los cuales combinados con la reacción 2.6 pudiesen proporcionar la formación de CO<sub>2</sub> en vez del CO encontrado en los gases de combustión, pero

esta reacción elemental también tiene una energía de activación razonablemente alta, por lo que su constante de equilibrio de velocidad de reacción decrece rápidamente según disminuye la temperatura.

### 2.3 DIÓXIDO DE AZUFRE

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) son los óxidos dominantes del azufre presentes en la atmósfera. El  $\text{SO}_2$  es un gas incoloro, no flamable y no explosivo que produce una activación de las glándulas salivales a concentraciones de 0.3 a 1.0 ppm en el aire, a concentraciones mayores de 3.0 ppm, el gas es irritable y tiene un olor acre. El  $\text{SO}_2$  se convierte parcialmente a  $\text{SO}_3$  o a ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y a sus sales mediante procesos fotoquímicos o catalíticos en la atmósfera. Los óxidos de azufre en combinación con las partículas y la humedad del aire producen los efectos más perjudiciales atribuidos a la contaminación atmosférica del aire (Mark, K., 1992). En el punto 1.4.2 del capítulo 1 se mencionan los efectos de este contaminante. La principal fuente de los óxidos de azufre proviene del consumo de combustibles que contengan azufre, otros compuestos del azufre son liberados a la atmósfera durante el procesamiento de minerales y de los procesos de fabricación que utilizan ácido sulfúrico.

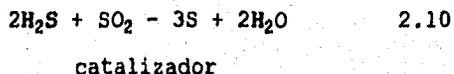
### 2.3.1 TERMODINÁMICA DEL DIÓXIDO DE AZUFRE

La reacción de oxidación total para la formación del dióxido de azufre a partir del azufre es:

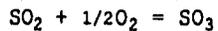


La reacción es altamente exotérmica, con un calor liberado de 296,800 KJ/Kg-mol a 25°C. Además del dióxido de azufre, se forma una pequeña cantidad de trióxido de azufre en la reacción de combustión, la relación de SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> formado, para combustibles fósiles, está usualmente alrededor de 40:1 y de 80:1.

El dióxido de azufre puede actuar tanto como agente reductor como agente oxidante, en condiciones atmosféricas. La reacción entre el ácido sulfhídrico, H<sub>2</sub>S, y el dióxido de azufre representa un ejemplo de la actuación del SO<sub>2</sub> como agente oxidante, esta reacción es:



En los problemas de la contaminación del aire es importante la capacidad que tiene el SO<sub>2</sub> gaseoso para reaccionar ya sea fotoquímicamente o catalíticamente con otros contaminantes atmosféricos, como en la formación de trióxido de azufre, ácido sulfúrico y diversas sales del ácido sulfúrico. Por ejemplo, en la presencia en la atmósfera de un óxido metálico como catalizador se genera la siguiente reacción entre el SO<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>



2.11

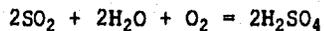
Muchas sustancias presentes en la atmósfera, especialmente partículas y óxidos de nitrógeno, actúan como catalizadores en la reacción anterior.

Algunos óxidos metálicos oxidan el dióxido de azufre directamente a sulfato. Por ejemplo:

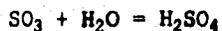


2.12

Hay otras dos reacciones que ocurren en la atmósfera cuando predomina un alto contenido de humedad, las cuales son:



2.13



2.14

La reacción de oxidación 2.13 tiene lugar rápidamente en la presencia de sales metálicas, tales como los sulfatos y cloruros de hierro y manganeso, estas sales metálicas actúan como catalizadores de la reacción. Las gotas de ácido sulfúrico que se forman a partir del trióxido de azufre y la humedad atmosférica (reacción 2.14) además de ser altamente corrosivas, tienden a reducir la visibilidad de los objetos a distancia. Estas reacciones son también causantes, en parte, del fenómeno de la lluvia ácida.

### 2.3.2 CINÉTICA DEL DIÓXIDO DE AZUFRE

Los óxidos de azufre convencionales que se encuentran como productos estables en la atmósfera, resultantes de la combustión a altas temperaturas de los combustibles que contienen azufre, son el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y el trióxido de azufre ( $SO_3$ ). La relación de equilibrio termodinámico entre los dos compuestos, está expresada por la reacción 2.11. En la Tabla 2.3 se presenta un resumen de los valores de la constante de equilibrio  $K_p$  para esta reacción, en función de la temperatura. Según los valores termodinámicos de la constante de equilibrio se observa que el equilibrio favorece al  $SO_3$  a bajas temperaturas y al  $SO_2$  a altas temperaturas en mezclas pobres (una relación de equivalente de combustible y aire menor a la unidad), en base a esto, se podría esperar que se encontraran pequeñas cantidades de  $SO_3$  en la zona de la flama (temperaturas mayores de  $1800^\circ K$ ), y grandes cantidades en los gases fríos generados del proceso de combustión puesto que el equilibrio se desplaza con la temperatura. (JANAF, 1965)

$\text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2 = \text{SO}_3$	T (°K)	Kp
	298	2.6E+12
	500	2.6E+5
$Kp = [\text{SO}_3]/[\text{SO}_2][\text{O}_2]^{1/2}$	1000	1.8
	1500	3.8E-2
	2000	5.6E-3

**TABLA 2.3 CONSTANTES DE EQUILIBRIO PARA LA REACCION DE OXIDACION DEL  $\text{SO}_2$  A  $\text{SO}_3$**

Sin embargo en los hornos de las plantas generadoras de energía se ha demostrado el efecto contrario (Hedley, A., 1967), el nivel de  $\text{SO}_3$  en la zona de la flama sobre pasa el valor de equilibrio pronosticado, mientras que en los gases fríos de la combustión las concentraciones del  $\text{SO}_3$ , están muy por debajo del valor de equilibrio para dichas temperaturas. Este comportamiento del  $\text{SO}_3$  se debe a la cinética de reacción que determina la velocidad de reacción de formación de las especies intermedias en las etapas químicas elementales. El monóxido de azufre, constituye un importante producto intermedio dentro del esquema de reacción global de la formación del  $\text{SO}_3$ . Las principales reacciones elementales de formación son las siguientes:



y



Dichas reacciones producen  $\text{SO}_2$ , átomos de oxígeno y hidrógeno, que son altamente reactivos, los cuales posteriormente se incorporan al esquema global de la reacción.

La principal reacción de formación del trióxido de azufre es el proceso de los tres cuerpos donde M es un tercer cuerpo que actúa como un absorbedor de energía.



Este tipo de procesos son lentos; sin embargo, esta reacción se realizará rápidamente en la zona caliente de la flama debido a que a concentración de átomos de oxigenos es máxima en este lugar. Las principales reacciones de remoción del  $\text{SO}_3$  son las siguientes:



La última reacción 2.20, que es sencillamente el inverso de la reacción 2.17 es un proceso de descomposición térmica.

En la zona caliente de reacción, donde existen altos niveles de átomos de oxígeno, las reacciones 2.17 y 2.18 dominan el mecanismo de la reacción global. Aplicando los conceptos básicos de la cinética de reacción, la ecuación para la velocidad de

reacción en la formación y remoción del  $\text{SO}_3$  en zona caliente de reacción es:

$$d[\text{SO}_3]/dt = K_1[\text{SO}_2][\text{O}][\text{M}] - K_2[\text{SO}_3][\text{O}] \quad (\text{A})$$

donde;

$K_1$  = constante de velocidad para la reacción 2.17

$K_2$  = constante de velocidad para la reacción 2.18

La máxima concentración de  $\text{SO}_3$  se obtiene cuando la velocidad de reacción del trióxido de azufre es igual a cero,  $d[\text{SO}_3]/dt = 0$ . De aquí resulta que:

$$[\text{SO}_3]_{\text{máx}} = K_8[\text{SO}_2][\text{M}]/K_9 \quad (\text{B})$$

Con base a los cálculos experimentales para estimar los valores de  $K_1$ ,  $K_2$  y  $M$ , que aparecen en la literatura, se tiene un valor máximo del nivel de  $\text{SO}_3$  entre 1 y 5 por ciento de la concentración de  $\text{SO}_2$  en la zona caliente de reacción (Hedley, A., 1967).

Con flamas ricas en hidrocarburos (una relación equivalente de combustible y aire mayor que la unidad) la reacción de remoción del trióxido de azufre será principalmente la (2.19), puesto que la concentración de átomos de oxígeno es mucho más baja en estas condiciones predominando la concentración de átomo de hidroxilos

La ecuación de la velocidad de reacción para la concentración de  $\text{SO}_3$ , en términos de las reacciones 2.17 y 2.19 e igualando a cero, bajo las condiciones de una mezcla rica en combustible, es:

$$[\text{SO}_3]_{\text{máx}} = K_8 [\text{SO}_2] [\text{M}] [\text{O}] / K_{10} [\text{H}] \quad (\text{C})$$

donde;

$K_8$  = constante de velocidad para la reacción 2.19

La relación  $[\text{O}]/[\text{H}]$  controla en esta reacción el valor de la máxima concentración de  $\text{SO}_3$ ; como esta relación es relativamente pequeña, puesto que en las flamas ricas en combustible predomina los átomos de hidrógeno sobre los átomos de oxígeno, la conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  se ve significativamente limitada en condiciones ricas en combustibles.

Conforme los gases producidos por la combustión de combustibles abandona la zona caliente de reacción, la temperatura decrece y la concentración de los átomos de oxígeno disminuye rápidamente por recombinación, por lo que, bajo estas condiciones, las etapas de formación y remoción del trióxido de azufre, tales como las reacciones 2.17, 2.18 y 2.19, resultan insignificantes; solamente una parte de  $\text{SO}_3$  se podrá descomponer térmicamente por la reacción 2.20 conforme disminuye la temperatura, sin embargo, esta reacción posee una gran energía de activación, de tal manera que la velocidad de reacción pierde importancia al decrecer la temperatura. De acuerdo con lo anterior la cinética de reacción pronostica, en la zona de flama de mezclas pobres de hidrocarburos, niveles de superequilibrio para el trióxido de azufre decreciendo su concentración conforme se van enfriando los gases de combustión. La concentración del  $\text{SO}_3$  pronosticado representa un mínimo porcentaje de la concentración de  $\text{SO}_2$  presentes en la combustión rica en

sustancias combustibles, resultando los niveles de  $\text{SO}_3$  insignificantes.

Por lo tanto, el dióxido de azufre es el principal óxido de azufre formado en los procesos de combustión, a pesar de que las fuerzas termodinámica promueven fuertemente la reacción hacia la formación de  $\text{SO}_3$ . La conversión final de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  en la atmósfera es un proceso lento, debido a la baja velocidad de reacción de conversión a temperaturas ambientales, no obstante, una vez que el  $\text{SO}_2$  está en la atmósfera, la velocidad de reacción se ve influenciada por catalizadores heterogéneos, presentes en la superficie de las partículas en suspensión, estos catalizadores aceleran la velocidad de reacción en la conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  conduciendo, también a la formación de sulfatos en forma de aerosol, los cuales constituyen un riesgo para la salud humana.

#### **2.4 OXIDOS DE NITROGENO**

Los óxidos gaseosos estables de nitrógeno incluyen al  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso),  $\text{NO}$  (monóxido de nitrógeno),  $\text{N}_2\text{O}_3$  (trióxido de nitrógeno),  $\text{NO}_2$  (dióxido de nitrógeno) y  $\text{N}_2\text{O}_5$  (pentóxido de nitrógeno). También existe una forma inestable, el  $\text{NO}_3$ , de estos óxidos los únicos que están presentes en la atmósfera en cantidades significativas son el  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ , y  $\text{NO}_2$ ; siendo estos tres últimos los contribuyentes potenciales a la contaminación del aire. De estos óxidos de nitrógeno el  $\text{NO}$  y el  $\text{NO}_2$  son importantes contaminantes del aire, ninguno de estos dos compuestos causan daños directos a los materiales; sin embargo,

el  $\text{NO}_2$  puede reaccionar con la humedad atmosférica y formará ácido nítrico que es causante de la corrosión de las superficies metálicas, más detalles sobre los efectos de los óxidos de nitrógeno se establecieron en el punto 1.4.4 del capítulo 1. Los óxidos de nitrógeno se forman en un proceso de combustión cuando el nitrógeno del aire o en el combustible se combina con el oxígeno a elevadas temperaturas, una pequeña cantidad de los óxidos es liberada en las plantas que emplean o fabrican ácido nítrico.

#### 2.4.1 TERMODINAMICA DE LOS OXIDOS DE NITROGENO

Existen dos reacciones globales de importancia que producen monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, estas reacciones de equilibrio son la oxidación directa del nitrógeno y la oxidación del monóxido de nitrógeno:



Según datos termodinámicos experimentales obtenidos para la reacción 2.21, y valores típicos de la constante de equilibrio, basados en las tablas Termodinámica de JANAF (Tabla 2.4), los valores de la constante de equilibrio son extremadamente pequeños para temperaturas por debajo de los  $1000^\circ\text{K}$  lo que origina una presión parcial del monóxido de nitrógeno baja y, por lo tanto, la cantidad en equilibrio del NO es muy pequeña. Por encima de

los 1000°K y conforme va aumentando la temperatura, se podrían formar cantidades apreciables de NO.

Los valores de la constante de equilibrio para la reacción de oxidación del monóxido de nitrógeno a dióxido de nitrógeno (reacción 2.22) disminuyen con el aumento de la temperatura (Tabla 2.5), por lo tanto, la formación del dióxido de nitrógeno se ve favorecida por las bajas temperaturas, pero el dióxido de nitrógeno se disocia nuevamente a monóxido de nitrógeno a temperaturas más altas. Según la temperatura se eleva por encima de los 1000°K, la formación del dióxido de nitrógeno se hace cada vez menos probable en condiciones de equilibrio. (JANAF, 1965)

$N_2 + O_2 = 2NO$	T (°K)	Kp
	300	1.0E-30
	1000	7.5E-9
	1200	2.8E-7
$Kp = [NO]^2 / ([N_2][O_2])$	1500	1.1E-5
	2000	4.0E-4
	2500	3.5E-3

**TABLA 2.4 CONSTANTES DE EQUILIBRIO PARA LA FORMACION DE NO A PARTIR DE N<sub>2</sub> Y O<sub>2</sub>**

$\text{NO} + 1/2\text{O}_2 = \text{NO}_2$	T (°K)	Kp
	300	1.0E+6
	500	1.2E+2
$K_p = [\text{NO}_2] / ([\text{NO}] [\text{O}_2]^{1/2})$	1000	1.1E-1
	1500	1.1E-2
	2000	3.5E-3

**TABLA 2.5 CONSTANTES DE EQUILIBRIO PARA LA REACCION DE OXIDACION DEL NO A NO<sub>2</sub>**

En los procesos reales de combustión, las reacciones 2.21 y 2.22 ocurren simultáneamente. En la Tabla 2.6 se muestran las concentraciones de equilibrio, pronosticadas para el NO y NO<sub>2</sub> en un gas de combustión típico (3.3% de O<sub>2</sub> y 76% de N<sub>2</sub>); en estas condiciones termodinámicas se formará un poco de NO o NO<sub>2</sub> a temperatura ambiente, y cualquier cantidad de NO que se genere se convertirá en NO<sub>2</sub> (Tabla 2.5). En el rango de 800°K las cantidades presentes de estos compuestos son todavía más despreciables, a pesar de que la cantidad de NO, bajo estas condiciones, rebasa la concentración de NO<sub>2</sub> (Tabla 2.6). No obstante, a las temperaturas convencionales de combustión (mayores de 1500°K) termodinamicamente, es posible una formación apreciable de NO, con cantidades despreciables de NO<sub>2</sub> presentes.

A medida de que los gases de combustión se van enfriando la temperatura decreciente desplazará la composición de equilibrio

del NO y el NO<sub>2</sub>, si se cuenta con un exceso de oxígeno, se preferirá la conversión del NO al NO<sub>2</sub> (reacción 2.22). La termodinámica pronostica entonces, que el gas enfriado que sale de un proceso de combustión consistirá principalmente de óxidos de nitrógeno en la forma de dióxido de nitrógeno. (Caretto, L., 1968)

T (°K)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)
300	1.1E-10	3.3E-5
800	0.77	0.11
1400	250	0.87
1873	2000	1.8

**TABLA 2.6 PRONOSTICO DE LA COMPOSICION DE EQUILIBRIO DEL NO Y DEL NO<sub>2</sub> A VARIAS TEMPERATURAS EN UN GAS DE COMBUSTION TIPICO**

#### 2.4.2 CINETICA DE LOS OXIDOS DE NITROGENO

En condiciones reales de combustión los óxidos de nitrógeno de los gases generados mediante este mecanismo no son predominantemente emisiones de NO<sub>2</sub>, si que contienen predominantemente NO, a pesar de que este componente es termodinamicamente inestable según entra al medio ambiente y cae la temperatura de los gases de combustión.

La aplicación de la cinética química a los procesos que contienen nitrógeno y oxígeno procedentes del aire atmosférico ha ayudado a comprender la estructura del sistema de reacción química, que conduce a la formación de los óxidos de nitrógenos.

Existen varios modelos analíticos para la formación de óxido de nitrógeno en los procesos de combustión, siendo una característica inherente de estos modelos el mecanismo cinético de reacción para la formación de NO del nitrógeno atmosférico. El modelo básico actualmente en uso surge de los trabajos realizados por el Investigador Zeldovich en el año de 1946 (Wark, 1987).

Las reacciones primarias, según los mecanismos de cadenas de radicales libres de Zeldovich, son:



Estas reacciones de combustión se equilibran antes del inicio de la formación de NO en la zona de postcombustión de las flamas. Otra reacción que también se lleva a cabo es la siguiente:



Las reacciones 2.23 y 2.24 son las más importantes en términos de la formación del NO en las flamas pobres y moderadamente ricas (relación de equivalencia entre las mezclas del combustible y el aire es igual o un poco mayor que la unidad), siendo la reacción 2.23 la que controla, generalmente, el proceso de producción de NO ya que la ruptura del enlace  $\text{N}_2$  es la etapa más difícil de este mecanismo. La reacción 2.25 tiene su importancia para la formación de monóxido de nitrógeno en las flamas ricas de combustibles.

Las reacciones 2.23 y 2.24 poseen grandes energías de activación, de manera que sus velocidades de reacción son relativamente pequeñas a bajas temperaturas (ecuación de

Arrhenius), además, la concentración de los átomos de oxígeno, que controla también las velocidades de reacción, es insignificante a bajas temperaturas; por lo tanto la cinética pronostica una velocidad de formación de NO muy lenta a temperaturas bajas, y la termodinámica pronostica una concentración baja de NO en el equilibrio (Tabla 2.4).

A altas temperaturas, si se tiene suficiente concentración de átomos de oxígeno, se formara rápidamente NO; de hecho, en la zona más caliente de la flama existe un nivel de superequilibrio de átomos de oxígeno por lo que en esta zona la concentración de NO aumenta rápidamente ya que la combustión de los hidrocarburos proporciona las condiciones apropiadas para la oxidación del nitrógeno atmosférico, sin embargo, como los gases se enfrían rápidamente al abandonar la zona caliente de la flama, la concentración de NO está "congelada", debido a que su remoción depende de la reacción inversa de la reacción 2.24, su velocidad de reacción cae significativamente con la disminución de la temperatura, debido a su gran energía de activación y a su dependencia en los átomos de oxígeno, los cuales se combinan en la zona fría para formar oxígeno molecular. A pesar de que la constante de equilibrio, basada en consideraciones termodinámicas, podrían indicar un cambio de NO a  $N_2$  y  $O_2$ , conforme va disminuyendo la temperatura en los gases de combustión, este cambio está limitado cinéticamente, por lo que, una cantidad significativa de óxido de nitrógeno sale con los gases de combustión y entra a la atmósfera (Bowman, C., 1971).

### CAPÍTULO 3

#### FACILIDADES TECNICAS, DE SEGURIDAD Y EQUIPO DE MONITOREO PARA LA REALIZACION DE UN MUESTREO EN FUENTES FIJAS

Anteriormente se indicó que la vigilancia de la contaminación atmosférica y sus efectos, así como el dimensionamiento de los equipos anticontaminantes, exigen de la valoración de las concentraciones de contaminantes presentes en su fase de emisión industrial, así como de la medición de los parámetros meteorológicos para que, conjuntamente se correlacionen al momento de desarrollar el muestreo en una fuente de emisión.

Además estas mediciones permiten conocer las fuentes generadoras de contaminación que se deben tratar con prioridad para su control, así mismo sirven para autorizar la continuación o la modificación regulada del funcionamiento operacional de proceso industrial; también, esta medición se efectúa a menudo para verificar que las industrias funcionen en conformidad con los reglamentos de protección al medio ambiente, es decir, evaluar si los contaminantes generados en la industria están o no dentro de los límites permisibles fijados por los diversos reglamentos o leyes aplicadas por organismos gubernamentales.

Para la realización óptima y eficiente de un muestreo en su fuente de emisión se requiere que tanto el ducto o chimenea, los puertos de muestreo así como las plataformas de muestreo cumplan con ciertas características técnicas y de seguridad para la protección del personal y del equipo empleado en los monitoreos. Las condiciones mínimas de seguridad y de operación tanto de las

plataformas y puertos de muestreo como del equipo empleado para la evaluación de la concentración de partículas y óxidos de azufre, a través de un muestreo isocinético, realizado en la fase de emisión industrial se mencionan a continuación.

### **3.1 PUERTOS DE MUESTREO Y PLATAFORMAS**

Para realizar un muestreo de contaminantes en su fuente de emisión, se deben seleccionar los sitios apropiados y secciones en el ducto de desfogue, donde el flujo presente la menor turbulencia posible. Para los conductos de las operaciones y procesos industriales con diámetro iguales o mayores a 30 cm., es necesario instalar puertos y plataformas de muestreo que faciliten las operaciones de muestreo y garanticen la seguridad del personal que las realice (EPA, 1975).

### **3.2 PUERTOS DE MUESTREO**

Los puertos de muestreo son modificaciones realizadas en los ductos o chimeneas de desfogue por donde se introduce una sonda que toma la muestra de gases a analizar, estos puertos de muestreos tienen una localización y estructura específica dependiendo del tipo de chimenea de desfogue.

#### **3.2.1 Localización.**

Los puertos de muestreo deberán estar localizados de 8 a 10 veces el diámetro del ducto, corriente arriba, después de cualquier perturbación de flujo (codo, reducción expansión, etc.) y como mínimo a dos veces de diámetros corriente abajo antes del final de

la descarga o de cualquier disturbio, tratando de obtener con esto un flujo laminar de los gases que circulan dentro del ducto.

Cuando la chimenea no cumpla con estos criterios se deberán realizar las modificaciones pertinentes con la finalidad de que estas condiciones se cumplan de tal manera que estas muestras sean lo más representativas, posibles, de la corriente gaseosa a evaluar.

### **3.2.2 Tipos de puerto**

Los puertos de muestreo deben ser de tubos industriales de 3.5 pulgadas de diámetro interior, ya sea con brida o con cuerda exterior para colocarles una tapa que evita que salgan los gases por el puerto de muestreo cuando este no se utiliza. La longitud de los puertos debe ser de 3 pulgadas; al menos que fuera necesario equiparlos con válvulas de compuerta cuando circulen gases peligrosos (tóxicos, explosivos), con presión positiva o temperaturas muy altas, estos puertos son más largos..

### **3.2.3 Instalación del puerto**

La instalación de los puertos de muestreo en los ductos o chimeneas no debe perturbar el flujo de los gases que circulan dentro del ducto o chimenea.

El puerto deberá ser instalado a no menos de 5 pies ni más de 6 pies del piso de la plataforma de muestreo.

### **3.2.4 Números de puertos requeridos**

Si la suma total del diámetro interior del ducto más la longitud del puerto es menor que diez pies se requiere la instalación de dos puertos de muestreo separados entre sí 90°. Cuando esta suma sea

mayor de diez pies se requerirá la instalación de cuatro puertos de muestreos separados a  $90^\circ$  entre sí, todo esto a la altura y con las medidas en donde se van a colocar los puertos requeridos.

### **3.2.5 Resistencia de los puertos.**

Los puertos deben ser suficientemente resistentes para soportar:

- Una fuerza cortante vertical de 100 Kg.
- Una fuerza radial de 25 Kg.
- Una fuerza lateral de 25 Kg.

### **3.3 PLATAFORMAS DE MUESTREO**

Las plataformas son estructuras metálicas que permiten el acceso a los puertos de muestreo así como la instalación de los equipos de muestreo, las dimensiones y diseño de las plataformas de muestreo deben de ser de tal manera que permitan el desarrollo de los muestreo con eficiencia y seguridad.

#### **3.3.1 Forma y extensión de las plataformas.**

Cuando se tiene dos puertos de muestreo separados entre sí a  $90^\circ$  una plataforma de media luna con una extensión de 3 pies de ancho mas allá de cada puerto es suficiente.

Si se cuenta con una chimenea que tiene cuatro puertos de muestreo, la plataforma deberá ser totalmente circular con un ancho de 3 pies medidos a partir de cada puerto de muestreo, a menos que la sumatoria del diámetro interior de la chimenea más la longitud del puerto sea mayor de 10 pies, entonces se requiere una plataforma de 4 pies de ancho.

### **3.3.2 Resistencia de las plataformas**

La plataforma de trabajo deberá ser suficientemente amplia y resistente para que puedan trabajar tres personas de aproximadamente 75 Kg. cada una, con un equipo de monitoreo que pese hasta 100 Kg. y estar provista de barandal y piso antiderrapante.

### **3.3.3 Acceso a la plataforma.**

Para la realización de un muestreo en su fase de emisión se deberá disponer de un medio seguro de ascenso, por ejemplo una escalera de tipo marino o un elevador de carga para subir el equipo de monitoreo y el ascenso del personal operativo.

Si se utiliza una escalera de tipo marino, esta deberá tener adaptada una tapa de seguridad a la abertura de acceso a la plataforma.

### **3.3.4 Fuente eléctrica.**

La plataforma de muestreo deberá contar con suministro de corriente eléctrica con voltaje de 115 Volts y amperaje de 15 Amper. Esta corriente tiene que ser monofásica y contar con 60 Hertz de corriente alterna.

Además deberá contar con una iluminación suficiente que permita la óptima realización de los muestreos, y la protección adecuada, de esta corriente, para evitar cortos circuitos y choques eléctricos

### **3.4 CARACTERISTICA FISICAS DE LA CHIMENEA**

Como se mencionó anteriormente, el lugar de muestreo debe estar localizado en una posición tal que el flujo gaseoso de la chimenea sea lo suficientemente uniforme para que se pueda obtener con precisión una muestra representativa. Para asegurar un flujo lo más uniforme posible, el sitio de muestreo se debe localizar entre ocho o diez diámetros en sentido del flujo y a dos diámetros en contra flujo, medido desde cualquier tipo de perturbación, tales como codos, entradas, salidas o cambios de diámetros. Si el flujo en el lugar de muestreo es suficientemente uniforme, el número mínimo de puntos de muestreos a utilizar es de 12 por muestra. Sin embargo si los requisitos para establecer un flujo laminar no se cumplen, y se origina un flujo turbulento, es necesario incrementar el número de puntos de muestreo. En la sección 4.2 del capítulo 4 se presenta el procedimiento para la localización de los puntos de muestreo necesarios que definirán el perfil de velocidades.

### **3.5 EQUIPO INVOLUCRADO EN EL MUESTREO**

Uno de los equipos utilizado en un muestreo de partículas y gases de óxidos de azufre en su fuente de emisión industrial, es el muestreador tipo universal semiautomático marca ANDERSEN; con este equipo se colecta una muestra isocinéticamente, es decir que la velocidad de los gases que circulan dentro de la chimenea es igual a la velocidad de succión que pasa a través de la boquilla de muestreo; esta corriente gaseosa que circula dentro de la chimenea es la que contiene los contaminantes a evaluar. El principio de operación de este equipo es el siguiente: los gases de la chimenea

son extraídos a través de una boquilla preseleccionada de muestreo y manteniéndolos calientes dentro de la sonda de muestreo. Las partículas contenidas en la muestra gaseosa son removidas a través un filtro de fibra de vidrio, el cual está colocado dentro de la línea de muestreo. Los gases pasan a una zona de enfriamiento, donde mediante una serie de recipientes de vidrio llamados impactores se condensa la humedad presente en la corriente gaseosa, en estos impactores es donde se colocan las diversas soluciones absorbedoras que sirven para captar los componentes presentes en esta corriente; la corriente gaseosa sigue su trayectoria hacia la bomba de succión pasando por un medidor de gas seco, y un medidor de orificio que sirve para determinar la caída de presión.

Este equipo universal de muestreo se muestra en la figura 3.1 en la cual se identifican los principales componentes del equipo, los cuales son:

- a) unidad de control.
- b) el tren de muestreo
- c) cordón umbilical con sus conexiones neumáticas y eléctricas
- d) cajas de muestreo
- e) sonda de muestreo
- f) riel con abrazadera

### **3.5.1 Unidad de control**

La unidad de control se emplea para ajustar y regular el flujo gaseoso de la muestra, que circula por el tren de muestreo, para garantizar que se cumplan las condiciones de un muestreo

representativo. El flujo se controla a través de dos válvulas de control localizadas en esta unidad; una de control brusco y otra de control fino.

Además esta unidad contiene todos los sistemas eléctricos y mecánicos necesarios para realizar la operación de muestreo, proporcionando lectura directa de temperaturas y de presiones.

Los principales controles y salidas de lecturas que constituyen la unidad de control son:

a) Termopar instalado a la entrada y salida del medidor de gases.

Este termopar registra la temperatura a la cual entra el gas muestreado al medidor, así como la temperatura con la cual sale de este. Con estas dos temperaturas se obtiene un promedio que representa la temperatura total del medidor, la cual se utilizará posteriormente para el cálculo de la velocidad de los gases que circulan dentro del ducto.

b) Termopar para medir la temperatura de chimenea y de la sonda. Esta temperatura es reportada mediante un pirómetro digital (colocado en la sonda de muestreo) que mide la temperatura de los gases que circulan dentro de la chimenea así como la temperatura a la cual se encuentra la sonda de muestreo, regularmente el rango de lectura que miden estos dispositivos es de 0 a 1999 °F.

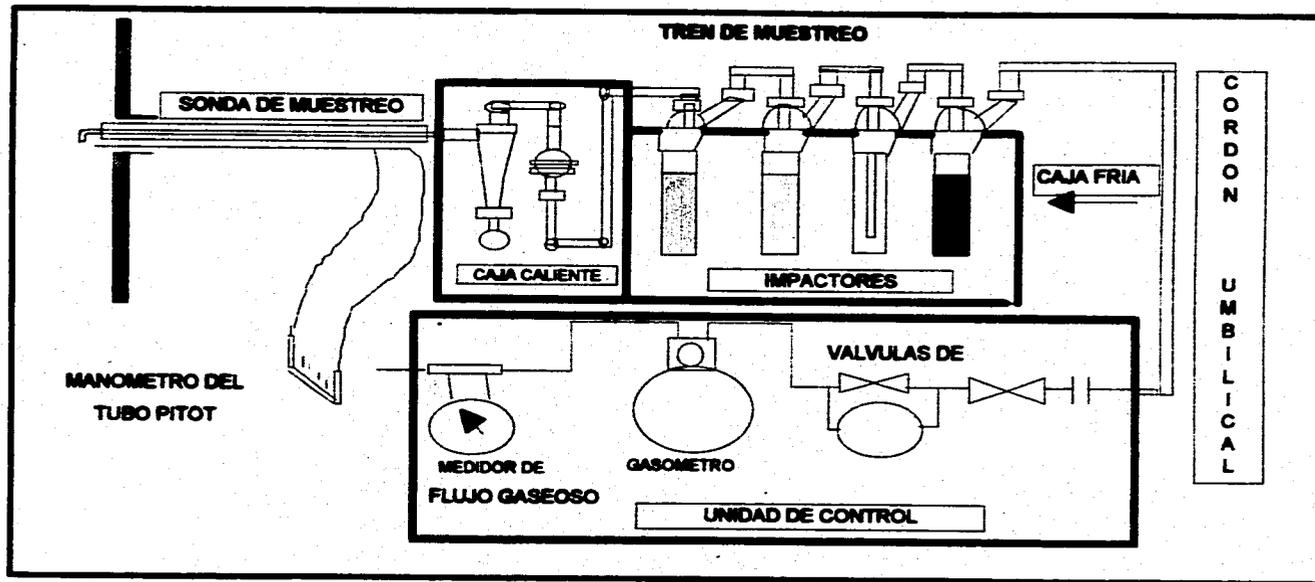


FIGURA 3.1 DIAGRAMA DEL EQUIPO DE MONITOREO PARA FUENTES FIJAS

c) Gasómetro.

Este instrumento mide el volumen de gas muestreado en unidades de pies cúbicos por minutos a condiciones reales de muestreo. Es muy importante que el gas que circule por este medidor se encuentre libre de humedad y de impurezas para evitar dañar el gasómetro y obtener lecturas representativas

d) Switch para calentar la caja caliente.

Desde este control se enciende o se apaga la fuente de calor que proporciona la temperatura adecuada de la caja caliente para evitar condensación de los gases que fluyen a través del tren de muestreo.

e) Switch para calentar la sonda de muestreo.

Aquí se enciende o se apaga el control que suministra calor a la sonda de muestreo para evitar condensaciones de los gases muestreado dentro de esta sonda.

f) Switch para operar la bomba de vacío.

Este switch enciende y apaga la bomba de vacío que va a succionar el gas proveniente de la fuente de emisión.

g) Switch de encendido y apagado de la unidad de control.

Con este control se suministra de la energía necesaria a la unidad de control y así poder accionar todos los controles que requieren de energía eléctrica.

h) Medidor de vacío.

El medidor de vacío mide la presión de vacío en pulgadas de mercurio mediante un manómetro de cara, esta lectura nos indica cuanto se fuerza la bomba de vacío al succionar el gas muestreado a través de un filtro saturado de partículas.

i) Válvulas de control fino y control brusco.

Estas válvulas regulan el flujo de succión requerido para lograr obtener eficientemente las condiciones de un muestreo isocinético.

j) Medidor de la presión de velocidad.

Mediante un manómetro inclinado o de carátula que se encuentra instalado en la unidad de control se toman las lecturas de la presión de velocidad para cada punto de muestreo que definen el perfil de velocidades a lo largo del diámetro de la chimenea.

k) Medidor de la placa de orificio.

En la unidad de control existe otro manómetro inclinado o de carátula que indica los valores de la presión dinámica del gas cuando pasa por un medidor del tipo de placa de orificio. Para la realización correcta de un muestreo isocinético el valor de la presión de la placa de orificio debe ser igual al valor de la presión de velocidad multiplicado por la constante  $K$ , la obtención de esta constante se establece en los métodos del capítulo 4

La igualdad de las presiones de la placa de orificio con las presiones de velocidad se obtiene manipulando las dos válvulas de control de flujo.

### **3.5.2 Cordón umbilical**

El cordón umbilical contiene todas las conexiones eléctricas y neumáticas que une a la unidad de control con el tren de muestreo o unidad de muestreo.

Las partes que constituyen usualmente al cordón umbilical son: la línea de muestreo flexible, las líneas del tubo pitot para medir presiones, las líneas de corriente eléctrica, los alambres de los termopar para proporcionar calentamiento al tren de muestreo, y una línea de comunicación.

### **3.5.3 Tren de muestreo**

La Figura 3.2. muestra un diagrama del tren de muestreo utilizado en este equipo, los principales componentes de este tren de muestreo son: caja caliente con portafiltro, caja fría con cuatro o cinco recipientes de vidrio o impactores (según las condiciones de muestreo), sonda de muestreo con boquilla de muestreo y tubo pitot para medir presiones de velocidad.

A través de este tren de muestreo pasa la muestra gaseosa tomada de la chimenea, se capturan las partículas mediante un filtro de fibra de vidrio y los gases emitidos por medio de soluciones adsorvedoras. Con algunas modificaciones al tren de muestreo se puede determinar la emisión de ácido sulfúrico y óxidos de azufre provenientes de una fuente fija. Estas modificaciones y

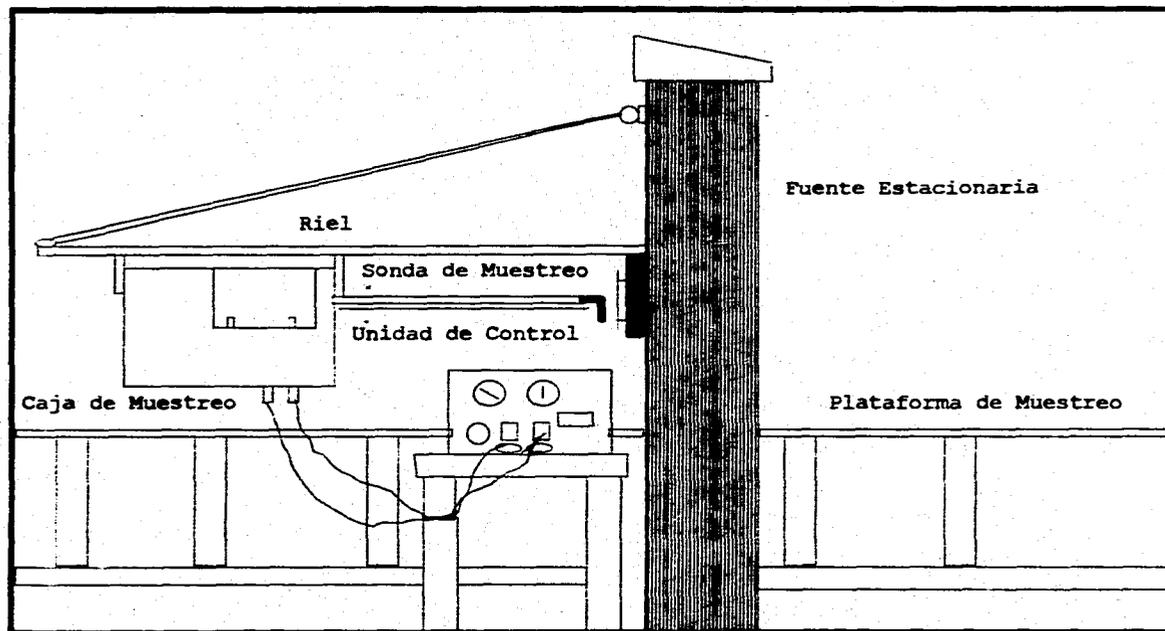


FIGURA 3.2 TREN DE MUESTREO INSTALADO EN LA FUENTE DE EMISION

el método de muestreo isocinético se establecerán en el capítulo 4.

#### **3.5.4 Caja caliente de muestreo.**

La caja caliente de muestreo se compone principalmente de un ciclón, un matraz bola, un porta filtro y accesorios o uniones para interconectar a estos equipos, todos estos componentes son de vidrio refractario los cuales resisten temperaturas hasta de 500 °F. La sonda de muestreo se une directamente al ciclón de la caja caliente, esta caja normalmente se mantiene en un intervalo de temperatura de 250 a 300 °F, con la finalidad de prevenir la condensación de humedad que pueda saturar el filtro instalado dentro de esta caja.

Con la ayuda del filtro de fibra de vidrio que esta colocado dentro del porta filtro se colectan las partículas emitidas de la fuente estacionaria, que fueron capturadas isocinéticamente.

#### **3.5.5 Caja fría de muestreo.**

La caja fría o de condensación contiene una serie de recipientes de vidrio, llamados impactores, usualmente son cuatro impactores los que constituyen esta parte de la caja fría con sus respectivas uniones. Las características de las soluciones contenidas en los dos primeros impactores se determinan de acuerdo al tipo de muestra que va a ser colectada, ya que en estos se colocan las soluciones absorbedoras que servirán para absorber los contaminantes presentes dentro de la corriente gaseosa. Los dos últimos se modifican con el objeto de tener una extensión de tubo de vidrio recto que quede aproximadamente a 12.7 mm. del fondo del mismo. El ultimo de estos

impactores siempre debe contener aproximadamente 150 grs. de sílica gel seca para retener la humedad de la corriente gaseosa.

### **3.5.6 Sonda de muestreo**

La sonda de muestreo consiste en un tubo de 15.875 mm. (5/8 de pulgadas) de diámetro exterior de vidrio o de acero inoxidable con junta tipo bola. Cuando se usa una sonda con sistema de calentamiento, ésta se encuentra alambrada logarítmicamente de punta a punta con un alambre de cromo níquel calibre 26. El tubo de vidrio o de acero con el cable enroscado está cubierto con una tela de fibra de vidrio y colocado para su protección dentro de un tubo de acero inoxidable de 25.4 mm. de diámetro exterior. Una conexión roscada de la boquilla esta unida a un extremo de la cubierta de la sonda mediante un cople de acero inoxidable con un empaque de teflon o nylon. En el otro extremo de la sonda con la junta en forma de bola se conecta con la tubería de cristal a la caja caliente.

### **3.5.7 Riel y abrazadera**

El riel es un canal de acero de alta resistencia que sirve para soportar el tren de muestreo; este riel se sujeta por un extremo con una abrazadera colocada alrededor del puerto de muestreo y por el otro lado con un cable tensor de acero el cual se engancha de una argolla que esta colocada, regularmente, a 1.5 mts. por arriba del puerto de muestreo. Este riel debe ser capaz de facilitar el manejo del tren de muestreo permitiendo libremente la entrada y salida de la sonda de muestreo a través del puerto de muestreo. El sistema de riel, abrazadera y cuerda de acero debe ser capaz de soportar el

peso de la caja fría y la caja caliente así como el peso de la sonda de muestreo en forma perpendicular al flujo de la emisión industrial.

#### CAPITULO 4

### PROCEDIMIENTOS Y METODOS DE MUESTREO PARA LA DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE PARTICULAS Y DIOXIDO DE AZUFRE EN UNA FUENTE FIJA

La determinación de los componentes contaminantes del flujo de una corriente gaseosa no podrá tener mayor exactitud que la que le proporcione el grado hasta el cual la muestra tomada sea representativa del flujo de gas, por lo que algunos de los requisitos básico que deben cumplir una evaluación de los contaminantes emitidos desde la fuente de origen son los siguientes:

- 1.- La corriente gaseosa a muestrear deberá ser representativa del total de las emisiones de la fuente.
- 2.- Las muestras colectadas deberán ser representativas de la corriente gaseosa muestreada.
- 3.- Todos los equipos y accesorios usados en el monitoreo deberán ser químicamente inerte con respecto a los gases que se captan
- 4.- La temperatura en la sonda de muestreo y las líneas de gas deberán mantenerse por encima del punto de rocío de los vapores condensables presentes en la muestra de gas.
- 5.- Se deberá medir la velocidad y el flujo volumétrico de la corriente gaseosa muestreada.

- 6.- La velocidad del gas que entra al equipo de monitoreo tendrá que ser de la misma magnitud y dirección que el gas en la corriente principal (muestreo isocinético).
- 7.- La cantidad de gas colectado deberá ser suficiente para satisfacer los requisitos de los métodos o dispositivos utilizados en el análisis de la muestra.
- 8.- La localización de la estación de muestreo deberá estar en una sección recta del ducto o de la chimenea y cuando menos a una distancia de 10 veces el diámetro de este ducto de tubería recta, en dirección de la corriente gaseosa, después de cualquier obstrucción.
- 9.- Es necesario medir la temperatura y presión manométrica de la muestra de la corriente para el posterior cálculo del volumen de gas en condiciones normales.

Normalmente, las muestras colectadas son transportadas al laboratorio para su análisis, antes de esto es necesario acondicionar la muestra según el método o técnica seleccionada; estas modificaciones dependen directamente de la naturaleza de la muestra y de las características del muestreo.

#### 4.1 PROCEDIMIENTO GENERAL DE UN MUESTREO

Desde el planteamiento inicial hasta el reporte final, un procedimiento de muestreo para la evaluación de los contaminantes en su fuente de emisión consiste de varias etapas, el alcance de cada una de ellas depende de la magnitud y complejidad del programa de muestreo, así como del tipo de contaminante a evaluar. Normalmente estas etapas se desarrollan en el siguiente orden:

- a) Planeación y objetivos para el muestreo de la fuente industrial.
- b) Inspección de la fuente.
- c) Selección de las técnicas de muestreo
- d) Programación de las pruebas
- e) Medición de la velocidad y el flujo de gas
- f) Muestreo isocinético
- g) Procesamiento y análisis de las muestras
- h) Calculo de resultados a partir de los datos obtenidos en campo y en el laboratorio.
- i) Elaboración del informe del muestreo.

Para llevar a cabo la planeación de un muestreo en la fuente de emisión es necesario un conocimiento preliminar del proceso que esta generando la emisión del contaminante a evaluar, por lo que, tanto el muestreo como el proceso de producción se debe considerar como un sistema total, en la planeación se debe contemplar si el proceso es continuo o

intermitente, esto con la finalidad de coordinar el muestreo a las condiciones reales de operación del proceso. El plan de muestreo puede incluir un balance de materiales e información relativa al proceso como por ejemplo el tipo y consumo de combustible, la temperatura y presión de operación, la producción durante el proceso, entre otras cosas. La planeación del muestreo debe incluir, además, una cuidadosa selección del sitio de muestreo.

La inspección física de la fuente se realiza con el objeto de establecer la localización de los puertos de muestreo, así como también las características técnicas de la plataformas de muestreos.

Los procedimientos de muestreo y el equipo empleado en la selección de las técnicas de muestreo deben ser los adecuados al caso específico de las emisiones contaminantes a evaluar tomando en consideración los alcances, objetivos y las normas establecidas al respecto.

Cuando se programan los monitoreos se deben hacer las asignaciones para el abastecimiento del personal y equipo, el desarrollo de métodos especiales de pruebas, la coordinación con el personal autorizado por parte de la empresa y el manejo de los medios disponibles, todo esto bajo las condiciones especificadas en la planeación y técnicas de muestreo.

Para calcular la concentración y la emisión de contaminantes, se deberá medir con exactitud la velocidad de los gases de la chimenea y el flujo gaseoso, así como sus condiciones específicas de presión estática, temperatura,

composición y densidad, además del área transversal del ducto o chimenea en el puerto de muestreo.

La obtención de la muestra isocinéticamente en general, consiste en hacer pasar a través del tren de muestreo (adaptado con un tren de impactores que contienen la solución absorbente. Figura 3.1), un volumen conocido del gas que se emite por el ducto o chimenea, midiendo el volumen gaseoso equivalente captado a las condiciones de la fuente, finalmente se determina la cantidad del material capturado efectuando las correcciones necesarias de presión y temperatura.

Normalmente, las muestras son transportadas al laboratorio para su análisis y cálculo de la cantidad del contaminante presente, antes de esto es necesario acondicionar la muestra para su transporte, según el método o técnica seleccionada, estas modificaciones dependen directamente de la naturaleza de la muestra y de las características del equipo de monitoreo; algunas muestras antes de ser analizadas requieren de la separación del polvo, el enfriamiento o el mantenimiento a una temperatura determinada y/o la eliminación del vapor de agua, todos estos acondicionamientos deberá ser cuidadosamente realizados.

Después de obtener la muestra y analizarla se realizan los cálculos necesarios para obtener las concentraciones de las emisiones contaminantes y los flujos de la corriente gaseosa que los contienen. Tales cálculos se basan en el conocimiento de la velocidad de flujo y las condiciones de presión y

temperatura del gas, así como del volumen equivalente de gas tomado como muestra y de la cantidad de materia capturado.

#### **4.2 LOCALIZACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO**

El tiempo total de muestreo se determina con el número de puntos a evaluar y el tiempo utilizado en cada punto, esto es en base a la norma NOM-AA-09/1980. La duración del muestreo de partículas es como mínimo de una hora.

Para definir el perfil de velocidades adecuadamente del ducto o chimenea de donde se tomara la muestra, primero se definen los punto de muestreo, para esto se utiliza la Figura 4.1, el cálculo de estos puntos se encuentra en función del diámetro del ducto o chimenea y la longitud de la chimenea. Para la localización de los puntos de muestreo se mide la distancia ( $L_a$ ) la cual corresponde a la distancia que existe desde la ultima perturbación del ducto hasta el puerto de muestreo; la distancia ( $L_b$ ) corresponde a la distancia que hay del puerto de muestreo hasta el final del ducto; para determinar los puntos de muestreo, también es necesario medir el diámetro de la chimenea ( $D$ ) y la extensión del puerto de muestreo ( $L$ ).

Posteriormente se calcula el valor de ( $A$ ), el cual va a ser empleado en la Figura 4.1, dividiendo la distancia  $L_a$  entre el diámetro de la chimenea ( $A=L_a/D$ ). El valor de ( $B$ ) se calcula de dividiendo la distancia  $L_b$  entre el diámetro de la misma ( $B=L_b/D$ ).

Con la intersección de los valores obtenidos de A y B en la Figura 4.1 se determinan los puntos de muestreo (N), con este valor y, con la Tabla 4.1 se obtienen las fracciones de longitud para cada punto.

Para cada punto de muestreo las fracciones de longitud se multiplican por el diámetro de la chimenea o ducto y se les suma la longitud del puerto de muestreo para obtener finalmente las distancias que deben tener cada punto a lo largo de la sonda de muestreo.

Si el diámetro del ducto o chimenea es menor de dos pies (61.0 cm.) de largo, los puntos de prueba obtenidos de la Figura 4.1, se multiplican por 0.67 para obtener el total de los puntos de muestreo definitivos.

Una muestra nunca debe de tomarse a una distancia menor de 2.54 cm. considerada desde la pared interna de la chimenea al primer o último punto de muestreo, porque da lugar a caídas de presión erróneas generadas por la turbulencia ocasionada por la cercanía de la pared del ducto con la boquilla de muestreo.

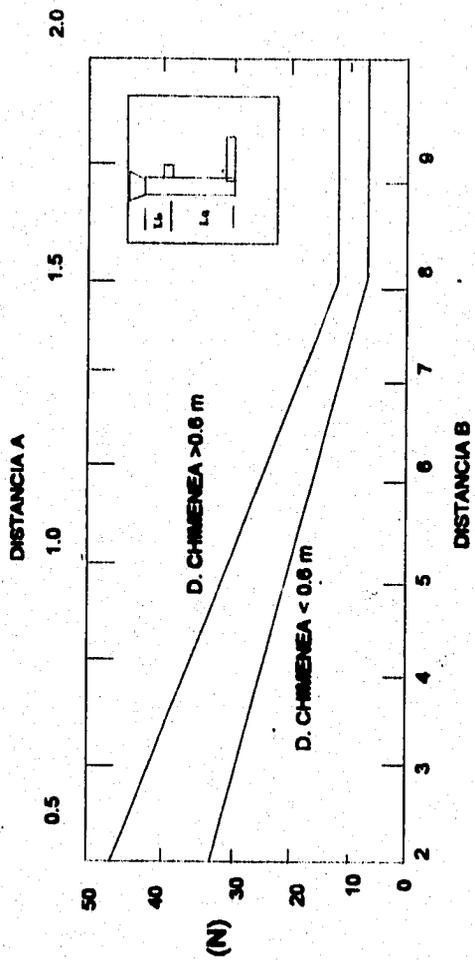


FIGURA 4.1 MINIMO NUMERO DE PUNTOS PARA DEFINIR EL PERFIL DE VELOCIDADES

No. DE PUNTOS TRANSVERSALES SOBRE UN DIAMETRO (N)	NUMERO DE PUNTOS TRANSVERSALES SOBRE UN DIAMETRO (N)											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14.2	6.7	4.4	3.2	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1
2	85.4	25.0	14.8	10.5	8.2	6.7	5.7	4.9	4.4	3.9	3.5	3.2
3		75.0	29.6	19.4	14.6	11.8	9.9	8.5	7.5	6.7	6.0	5.5
4		93.3	70.4	32.3	22.6	17.7	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7	7.9
5			85.4	67.7	34.2	25.0	20.1	16.9	14.6	12.9	11.6	10.5
6			95.8	80.6	65.8	35.6	26.9	22.0	18.8	16.5	14.6	13.2
7				89.5	77.4	64.4	36.6	28.3	23.6	20.4	18.0	16.1
8				96.8	85.4	75.0	63.4	37.5	29.6	25.0	21.8	19.4
9					91.8	82.3	73.1	62.5	38.2	30.6	26.2	23.0
10					97.4	88.2	79.9	71.7	61.8	38.8	31.5	27.2
11						93.3	85.4	78.0	70.4	61.2	39.3	32.3
12						97.9	90.1	83.1	76.4	69.4	60.7	39.8
13							94.3	87.5	81.2	75.0	68.5	60.2
14							98.2	91.5	85.4	79.6	73.6	67.7
15								95.1	89.1	83.5	78.2	72.8
16								98.4	92.5	87.1	82.0	77.0
17									95.6	90.3	85.4	80.6
18									98.6	93.3	88.4	83.9
19										96.1	91.3	86.8
20										98.7	94.0	89.5
21											96.5	92.1
22											98.9	94.5
23												96.8
24												96.9

TABLA 4.1 LOCALIZACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

ESTÁ TRASMIGADO  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Después de seleccionar el número de puntos de muestreo, la sección transversal de la chimenea se divide en un número igual de áreas. Los incrementos de área por cada punto deben ser lo suficientemente pequeños a fin de asegurar que el flujo en el punto de muestreo sea representativo del flujo existente en este; sin embargo el número total de áreas por cada punto deben ser convenientemente limitados de tal forma, que los puntos a muestrear se realicen dentro de un periodo de tiempo razonable.

En ductos o chimeneas rectangulares, la sección transversal se divide en un número de áreas rectangulares iguales. La muestra se toma en el centroide de cada área rectangular, estas áreas deberán de estar colocadas de tal manera que la relación de la longitud ( $L_a$ ) al ancho ( $a_n$ ) de las áreas elementales sea de 2:1.

El número mínimo de puntos de muestreo es de doce para chimeneas superiores a dos pies de diámetro; el mismo criterio usado para las chimeneas redondas es usado para definir el perfil de velocidades con precisión de las chimeneas rectangulares. El diámetro equivalente de una chimenea rectangular se aproxima por la siguiente formula (EPA, 1975):

$$(2 \cdot L_a \cdot a_n) / (L_a + a_n) \quad 4.1$$

donde  $L_a$  y  $a_n$  son las dimensiones de cada sección transversal.

### **4.3 MUESTREO PRELIMINAR**

Con objeto de establecer los parámetros específicos que rigen el flujo gaseoso, es necesario hacer mediciones previas de la velocidad de los gases que circulan dentro del ducto, así como de la temperatura, presión estática, composición, densidad, además del área transversal del conducto, esto se lleva a cabo realizando un muestreo preliminar para determinar a parte de los parámetros anteriores, el tipo de boquilla a utilizar así como el factor (K) de corrección, posteriormente con la corrida definitiva se cuantifica el flujo volumétrico real utilizado para determinar la concentración de las emisiones evaluadas.

En el desarrollo del muestreo preliminar se aplican tres métodos para calcular el diámetro de la boquilla y el factor de corrección K:

#### **4.3.1 METODO DE CONDENSACION**

##### **Método gravimétrico**

Para determinar la cantidad de humedad en los gases que fluyen por un ducto se utilizan: un impactor tipo Greenburg-Smith y un impactor recto, los dos con 150 ml. de agua destilada, un tercer impactor recto vacío y un cuarto impactor también recto con 150 g de sílica gel con indicador de humedad, todos estos son pesados inicialmente. El cuarto impactor sirve para atrapar la humedad que existe en los gases que fluyen por un ducto.

El procedimiento consiste en hacer pasar un volumen aproximado de 10 ft<sup>3</sup> a través de este tren de impactores, con un flujo moderado de 0.5 ft<sup>3</sup>/min.

El tren de impactores deberá estar en un baño de hielo cuando el gas de la chimenea es pasado a través de este.

Con el peso ganado en los impactores, el volumen de gas de chimenea corregido con el factor de calibración del gasómetro, la temperatura de entrada y salida del medidor y la presión del medidor se calcula la fracción húmeda mediante la siguiente ecuación (EPA, 1975):

$$YH = (DW*1.359)/[(DW*1.359) + (VC*PM/TM) (508.23)]$$

4.2

#### **4.3.2 DETERMINACIÓN DEL PESO MOLECULAR DEL GAS QUE FLUYE POR LA CHIMENEA**

En la determinación del peso molecular del gas que circula por la chimenea se emplea el equipo analizador ORSAT (Figura 4.2), mediante este análisis se determinan las cantidades en porcentaje volumen de: monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno usando soluciones absorbentes y midiendo a través de los cambios de los volumen de la muestra original del equipo ORSAT. El analizador incluye: Sonda de muestreo, medio filtrante, tres buretas con sus respectivas solución absorbedoras, una bureta de vidrio graduada para medir los volúmenes de gases muestreados, un vaso nivelador, conexiones y válvulas de paso.

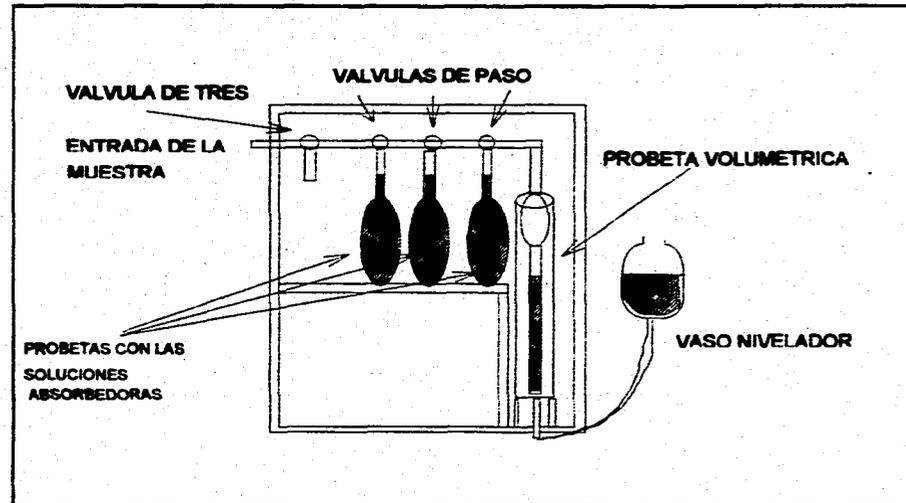


FIGURA 4.2 EQUIPO ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTION ORSAT

La preparación de las soluciones absorbedoras empleadas para absorber los gases de combustión es de la siguiente manera (EPA, 1975):

-Solución de hidróxido de potasio para absorber el dióxido de carbono presente en los gases de combustión.

Se pesan 66 g de hidróxido de potasio y se disuelven en 200 ml de agua destilada.

-Solución de pirogalato para absorber la concentración de oxígeno presente en los gases de combustión.

Se pesan 10 g de ácido pirogálico, y se disuelve en 30 ml de agua destilada; en seguida se pesan 60 g de hidróxido de potasio o 45 g de hidróxido de sodio, y se disuelven en 170 ml de agua destilada, finalmente las dos soluciones anteriores se mezclan entre sí.

-Solución ácida de cloruro cuproso para absorber la concentración de monóxido de carbono.

Se pesan 12 g de cloruro cuproso y se disuelven en 200 ml de ácido clorhídrico concentrado al 30%.

El procedimiento para determinar los porcentos de los componentes de los gases de combustión con el equipo Orsat es el siguiente (EPA, 1975):

- 1.- Se nivelan las soluciones absorbedoras colocadas en sus respectivas buretas hasta una marca que está a la mitad del tubo de vidrio que se encuentra entre la parte superior de la bureta y el tubo de hule (figura 4.2).
- 2.- Se pone en contacto íntimo la muestra del gas primeramente con la solución de hidróxido de potasio hasta la absorción completa del dióxido de carbono, esta operación se lleva a cabo abriendo la llave de paso de la bureta que contiene esta solución absorbedora y subiendo el frasco nivelador el cual contiene agua destilada, el gas desplaza al reactivo y regresa cuando ocurre la absorción, este desplazamiento es forzado subiendo y bajando el frasco nivelador.
- 3.- Después de subir y bajar unas cuatro o cinco veces el frasco nivelador se cierra la llave de paso y se toman las lecturas del porcentaje de gas en la bureta graduada.
- 4.- La diferencia entre el volumen inicial y el volumen final representa el porcentaje de  $\text{CO}_2$  presente en la muestra colectada.
- 5.- Este procedimiento se repite para la

cuantificación del oxígeno y del monóxido de carbono con sus respectivas soluciones absorbedoras.

- 6.- Una vez obtenidos los porcentajes en volumen del dióxido de carbono, oxígeno y monóxido de carbono en la muestra de gas el peso molecular de los gases de chimenea se determina mediante la siguiente ecuación (EPA,1975):

$$PMH = YH * 18.0 + YG * PMS \quad 4.3$$

#### 4.3.3 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CHIMENEA

Es conveniente emplear una hoja de campo conjuntamente con este procedimiento para la determinación de la velocidad, la boquilla y del factor K, en donde se anotan las presiones dinámicas, las temperaturas de chimenea por cada punto de muestreo.

La determinación de la velocidad de flujo de los gases de chimenea se realiza como se mencionó anteriormente con una corrida preliminar, la cual nos proporcionará las condiciones a la cuales están saliendo estos gases en ese momento.

El método que a continuación se describe es aplicable para velocidades de gases superiores a 3 m/s en promedio, conductos con diámetro interno iguales o mayores de 10 cm. y equipos de combustión con capacidad de operación mayor de 150 caballos calderas. (EPA,1975).

- 1.- Seleccionar y marcar en el tubo pitot el número

de puntos a medir conforme a la Figura 4.1 y Tabla 4.1 para la localización de los puertos de muestreo según el procedimiento establecido en el punto 4.2.

- 2.- Introducir el tubo pitot en el puerto de muestreo y colocarla en el primer punto de medición, tapando los claros que queden en el puerto de muestreo para evitar infiltraciones de aire o fugas de gas.
- 3.- Tomar las lecturas de la presión velocidad, presión estática, temperatura de chimenea, temperatura de entrada y salida del medidor y volumen de muestreo en cada punto, reportados en la unidad de control.
- 4.- La humedad de los gases que circulan dentro de la chimenea se determina a través del procedimiento ya especificado por el método de condensación (punto 4.3.1).
- 5.- El peso molecular del gas que circula por la chimenea se determina mediante el análisis del "ORSAT", establecido en el punto 4.3.2
- 6.- Una vez obtenidos estos parámetros se calcula la velocidad media de los gases con la siguiente ecuación:

$$VCH = (85.32 * CTP * PDRA) * \text{SQRT}(TCH / (PM * PCH))$$

4.4

La presión dinámica (PDRA) se obtiene de la sumatoria de las raíces cuadradas de cada una de las presiones de velocidad en los puntos seleccionados divididos entre el número de puntos totales de muestreo.

#### 4.3.4 DETERMINACIÓN DEL DIAMETRO DE LA BOQUILLA Y EL FACTOR K

Una vez calculada la velocidad de chimenea, la presión de la chimenea, temperatura de chimenea y la fracción seca de los gases de chimenea se procede a calcular una constante C de la siguiente manera:

$$C = VCH * YG * 60 * PCH/29.92 * 537/TCH \quad 4.5$$

Con el valor de C se determina el área de la boquilla teórica de la siguiente forma:

$$Bd = 0.75/C \quad 4.6$$

Con el área de la boquilla se selecciona el diámetro y se procede a calcular la constante del factor K, con la siguiente fórmula:

$$K=859.340033*CTP*DBN*DH*YG*(PMS/PMH)*(TM/TCH)*(PCH/PM) \quad 4.7$$

El factor K se utiliza durante las corridas definitivas para determinar cada ajuste de las presiones obtenidas DH de acuerdo a las lecturas correspondientes de las presiones dinámicas DP.

#### **4.4 MUESTREO ISOCINETICO DEFINITIVO.**

##### **MUESTREO DE PARTÍCULAS EN FUENTES FIJAS.**

La obtención de una muestra representativa de una corriente gaseosa que circula dentro de un ducto o chimenea, se realiza mediante un muestreo isocinético, es decir, que la energía cinética de la corriente gaseosa que fluye dentro de la chimenea sea igual a la energía cinética de la corriente gaseosa que pasa a través de la boquilla utilizada en el muestreo, de aquí que la composición de las dos corrientes gaseosas sea la misma, simplificando el balance de energía cinética en función de la velocidad, queda de la siguiente manera: la velocidad de los gases que circulan dentro de la chimenea es igual a la velocidad de succión que pasa a través de la boquilla de muestreo. Si una muestra de partículas no es muestreada isocineticamente, los datos de las concentraciones de los contaminantes captados en la muestra no serán representativos de las emisiones generadas por la fuente monitoreada.

Siempre que un objeto es colocado dentro de una corriente gaseosa en movimiento, alguna turbulencia de flujo deberá ocurrir. Uno de los propósitos del muestreo isocinético es minimizar estas turbulencias causadas por la boquilla de

muestreo. Una muestra isocinéticamente bien colectada a través de una boquilla correctamente seleccionada proporciona datos fidedignos de la corriente gaseosa muestreada.

La velocidad de la corriente gaseosa que fluye por un ducto varía generalmente de un punto a otro punto de muestreo localizados transversalmente a la corriente gaseosa; por lo tanto, la relación de flujo o velocidad a través de la boquilla de muestreo deberá ser ajustada para mantener las condiciones isocinéticas en cada uno de los puntos.

La velocidad de los gases que fluyen por la chimenea se miden por las caídas de presión (DP) a través del tubo pitot; y la velocidad de succión empleada para captar la muestra gaseosa a través de la boquilla es medida por la caída de presión (DH) a través de la placa de orificio; ambas velocidades deberán mantener una relación equivalente en sus medidores de presión para obtener el flujo isocinético, esta relación esta dada por:

$$DH = K \cdot DP$$

4.8

Una vez obtenido el número de puntos totales a muestrear, de la misma manera que el método preliminar, se procede a realizar la corrida definitiva, empleando el factor de corrección K calculado con la ecuación 4.7 para relacionar la velocidad de los gases de la chimenea con la velocidad de succión empleada para captar la muestra gaseosa, y la boquilla seleccionada previamente.

En la determinación de gasto volumétrico se lleva a cabo el mismo procedimiento que para el muestreo preliminar hasta el cálculo de la velocidad de chimenea.

Con el volumen de control, la presión del medidor, la temperatura de chimenea, la fracción seca, la presión de chimenea, temperatura de entrada y salida de los gases del medidor, el área de la boquilla, el tiempo de muestreo y la velocidad de chimenea se puede determinar el porcentaje de isocinético en un muestreo definitivo, el cual nos indica si la muestra tomada es representativa o no del flujo gaseoso.

Calculando primeramente el volumen de la muestra gaseosa, con la siguiente formula:

$$VR = (VC * PM * TCH) / (YG * PCH * TM) \quad 4.9$$

Porcentaje isocinético:

$$I\% = (VR * 100) / (60 * AB * T * VCH) \quad 4.10$$

Si el muestreo isocinético se encuentra dentro del intervalo de 90 a 110 se considera como aceptable y se procede a calcular la concentración de partículas. En caso de que el muestreo no sea aceptable, es necesario repetir el muestreo definitivo totalmente.

Con la diferencia de peso del filtro, puesto a peso constante, empleado para atrapar las partículas durante el muestreo isocinético se calcula el peso neto de las partículas y con el volumen total muestreado a condiciones normales

(T=25°C, P=760mmHg), se determina la concentración de partículas con la siguiente ecuación:

$$CP = PP/VMS$$

4.11

#### **4.5 MUESTREO DE GASES EN FUENTES FIJAS**

Los muestreos de la corriente gaseosa que fluye por el interior del ducto o chimenea, se colecta y se concentra al mismo tiempo mediante la absorción de los contaminantes a determinar en una solución absorbadora específica. Por lo general, esto se lleva acabo al arrastrar el aire a una velocidad conocida, primero a través de un filtro de fibra de vidrio para remover partículas y luego a través de las soluciones absorbadoras contenidas dentro de los impactores diseñados para asegurar que el gas burbujeado en la solución absorbente presente la máxima superficie expuesta hacia la solución. En muchos casos la solución elegida tiene una reacción irreversible con el gas contaminante mediante el cual se fija en la solución.

Como se indicó anteriormente, el presente trabajo esta enfocado a la evaluación de las concentraciones de partículas y óxidos de azufre generadas a partir de una fuente de emisión industrial, por los que solamente se describirá el método de análisis para realizar la caracterización de los óxidos de azufre presentes en la corriente gaseosa muestreada, el procedimiento de muestreo de partículas se describió en el punto 4.4 de este capítulo. En el capítulo 5 se reportaran las

memorias de calculo de un muestreo realizado para la valoración de las partículas y los óxidos de azufre emitidos por una fuente fija.

#### **4.6 MÉTODO PARA LA DETERMINACION DE DIOXIDO DE AZUFRE, TRIOXIDO DE AZUFRE Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO GENERADOS A PARTIR DE UNA FUENTE DE EMISION INDUSTRIAL.**

El trióxido de azufre y los vapores de ácido sulfúrico son absorbidos en un impactor el cual contiene alcohol isopropílico al 80%, aquí el trióxido de azufre se convierte a ácido sulfúrico. El dióxido de azufre se absorbe en un segundo impactor que contiene una solución de peróxido de hidrógeno que atrapa las moléculas de dióxido de azufre y lo convierte a ácido sulfúrico.

El ácido sulfúrico formado en las soluciones absorbentes es medido por la titulación con perclorato de bario ( $Ba(ClO_4)_2$ ) utilizando Thorin como indicador, los resultados son calculados como dióxido o trióxido de azufre.

##### **4.6.1 APLICABILIDAD**

El intervalo de análisis es de 0.005 g a 14.0 g para el  $SO_2$ . En el primer impactor se colecta aproximadamente el 95% de  $SO_2$ . El indicador de Thorin es un catión divalente, de modo que cualquier catión metálico divalente como el Cd, Co, Fe y Zn interfieren en el análisis. La realización de la titulación se debe realizar solamente en muestras que se hayan tomado,

colocando un filtro para remover partículas antes del tren de impactores.

#### **4.6.2 EQUIPO Y REACTIVOS EMPLEADOS.**

##### **MATERIAL Y EQUIPO**

##### **EQUIPO Y MATERIAL DE LABORATORIO**

- Equipo de muestreo de universal para chimenea tipo Andersen, provisto de un tren de impactores, portafiltro con filtros de fibra de vidrio, sonda de muestreo y consola de control semiautomática.
- Material de laboratorio
- Frascos de almacenamiento

##### **REACTIVOS**

Estos reactivos son preparados en base a la norma

NOM-AA-56-1980

- 1.- Solución de perclorato de bario 0.01 N.
- 2.- Disolución de alcohol isopropílico al 80 %
- 3.- Disolución de peróxido de hidrógeno al 6 %
- 4.- Acido sulfúrico 0.1 N.
- 5.- Indicador anaranjado de metilo
- 6.- Indicador de Thorin
- 7.- Sílica gel, provista de indicador de humedad
- 8.- Disolución de ácido nítrico
- 9.- Disolución de sulfato de sodio
- 10.- Hielo en trozos

### 4.6.3 MUESTREO Y ANALISIS DE LABORATORIO

#### MUESTREO

Las muestras se deben coleccionar de acuerdo a los procedimientos de muestreo isocinético en chimeneas explicados anteriormente en el punto 4.5; colocando en el primer impactor 100 ml de la disolución de alcohol isopropílico, en el segundo impactor se colocan 100 ml. de la disolución de peróxido de hidrógeno, el tercer impactor se deja vacío y el cuarto se colocan aproximadamente 100 g de sílica gel previamente seca. Después del muestreo, los impactores se envían al laboratorio para su análisis; si no se dispone de suficientes impactores se pueden transferir las muestras a frascos de polietileno, enjuagando el impactor con agua destilada y etiquetando adecuadamente las muestras.

#### ANALISIS

1.- Titulación de la solución de ácido sulfúrico 0.1 N. Pesar 0.1 g. de carbonato de sodio estándar primario, transferirlo a un matraz Erlenmeyer. Antes de utilizar el carbonato de sodio debe de secarse en una estufa a 105°C durante dos horas. Disolver la primera muestra de carbonato de sodio con 25 ml. de agua destilada, agregar tres gotas del indicador anaranjado de metilo y titular con la solución de ácido sulfúrico 0.1 N. hasta un cambio de coloración del indicador de color amarillo a anaranjado (se utilizan 20 ml. aproximadamente de la solución 0.1 N de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

2.- Titulación de la solución de perclorato de bario

Adicionar a un vaso de precipitado 1 ml. de la solución de ácido sulfúrico 0.1 N, transferirlo a otro vaso de 100 ml, agregar 4 ml de agua destilada, 20 ml de alcohol isopropílico y 2-4 gotas de indicador thoring. Agitar. Titular con la solución de  $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$  hasta el cambio de coloración de amarillo a amarillo rosado.

3.- Titulación de la muestra.

Pasar la muestra a un matraz aforado de 500 ml y aforar con agua destilada, tomar una muestra de esta solución de 5 ml (si la muestra contiene altas concentraciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  se debe de tomar una alícuota más pequeña o hacer una dilución). Posteriormente titular la muestra con la solución de  $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$  0.01 N.

**4.6.4 CALCULOS**

1. TITULACION DEL  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 N.

NORMALIDAD DEL  $\text{H}_2\text{SO}_4$  =

$$\frac{[\text{g de NaCO}_3 \times 1000\text{ml/l}]}{[53\text{g eq} \times \text{Volumen H}_2\text{SO}_4 \text{ ml}]}$$

4.12

2. TITULACION DEL  $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$

NORMALIDAD DEL  $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$  =

$$\frac{[\text{Volumen H}_2\text{SO}_4 \text{ ml} \times \text{Normalidad H}_2\text{SO}_4]}{\text{Volumen Ba}(\text{ClO}_4)_2 \text{ ml}}$$

4.13

### 3. MUESTRAS:

Gramos de  $\text{SO}_2$  en la muestra:=

$$[\text{Vol}] [\text{N. Ba}(\text{ClO}_4)_2] [0.032. \text{g/eq/ml}] [\text{F}] [10\text{E}-3]$$

4.14

Para la determinación de los gramos de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la muestra se utiliza la misma ecuación solamente cambiar 0.49 por 0.032

Para la determinación de los gramos de  $\text{SO}_3$  en la muestra se utiliza la misma ecuación solamente cambiar 0.40 por 0.032

**CAPITULO 5**  
**EVALUACION DE LA CONCENTRACION DE PARTICULAS Y OXIDOS DE**  
**AZUFRE**

En el capítulo 1 se estableció que a nivel industrial los contaminantes que más se generan son las partículas y los óxidos de azufre, siendo la combinación de estos dos componentes la mezcla más perjudicial a la salud humana.

En este capítulo se reportan las memorias de cálculo para la evaluación de la concentración de partículas y de los óxidos de azufre emitidos a través de una fuente fija.

La toma de muestra para evaluar las concentraciones de estos contaminantes se realizó en la chimenea de un horno de fundición perteneciente a una empresa procesadora de aluminio.

Las facilidades técnicas y de seguridad, así como el equipo utilizado en el muestreo de contaminantes en su fuente de emisión industrial se describieron en el capítulo 3.

El cálculo del número total de puntos de muestreo que describen el perfil de velocidad de los gases de chimenea se estableció en el punto 4.2 del capítulo 4.

La humedad de los gases que circulan por la chimenea de desfogue se determinó con el procedimiento establecido en el punto 4.3.1 del capítulo 4, el peso molecular y la velocidad de los gases que emanan de la chimenea del horno de fundición

evaluado se determinaron con los métodos establecidos en los puntos 4.3.2 y 4.3.3. respectivamente.

La determinación de la emisión de partículas sólidas contenidas en los gases descargados por la chimenea a la atmósfera se realizó mediante la metodología establecida en el punto 4.4. del capítulo 4; el método para evaluar la concentración de los óxidos de azufre en los gases que fluyen por un ducto se estableció en los puntos 4.5 y 4.6.

Los valores obtenidos de la concentración de partículas y de los óxidos de azufre son comparados con la norma NOM-CCAT-019-ECOL/93 que establece los límites permisibles para estos dos contaminantes presentes en los procesos de combustión.

En el anexo 1 se presentan los equipos de control de emisiones contaminantes, los cuales, dependiendo de las características propias de este contaminante, son empleados para abatir los niveles de contaminación generados a través de una fuente fija. La remoción de contaminantes emitidos a la atmósfera mediante una fuente industrial representa dos problemas independientes los cuales están en función de que si el contaminante es emitido en forma de partícula o de gas, en el primer caso las partículas pueden ser removidas mediante una serie de fuerzas físicas gravitacionales y/o electrostáticas y, los gases generalmente son removidas por adsorción, absorción o incineración.

5.1 DATOS GENERALES DE LA EMPRESA Y DEL PROCESO.

1.- IDENTIFICACION DE COMPAÑIA:

1.1 RAZON SOCIAL DE LA EMPRESA:

ALUMINIO Y DERIVADOS DE VERACRUZ S.A. DE C.V.

1.2 DIRECCION: Carr. México-Xalapa-Veracruz Km. 435.3

1.3 COLONIA: 1.4 DELEGACION O MUNICIPIO : Veracruz

1.5 ENTIDAD FEDERATIVA: Veracruz 1.6 CODIGO POSTAL:

1.7 TELEFONOS: 81 02 11

1.8 REPRESENTANTE LEGAL: CP LUIS E. SORDO FERNANDEZ

1.9 TELEFONO DEL REPRESENTANTE LEGAL: 81 02 11

1.10 LICENCIA DE FUNCIONAMIENTO: 4580

1.11 FECHA DE OBTENCION DE LICENCIA: 16 de Febrero de 1990

1.12 GIRO DE LA EMPRESA: Metalurgia

2.- CARACTERISTICAS DEL PROCESO

2.1 NOMBRE DEL PROCESO: Producción de Lingotes de Aluminio (Horno 1)

2.2 RESPONSABLE DE LA OPERACION: Ing. G. Ortega G.

2.3 FECHA DE INICIO DE OPERACION: 11-IV-94

2.4 OPERACION MANUAL O AUTOMATICA: Manual

2.5 CAPACIDAD DE DISEÑO: 25.000 Kg 2.6 MAXIMA CAPACIDAD: 23.000 Kg

2.7 OPERACION EN HR/DIA: 25 DIAS/SEMANA: 7 SEMANAS/AÑO: 82

2.8 PROCESO OPERA EN FORMA: CONTINUO: ( ) INTERMITENTE: ( X )

2.9 MATERIA PRIMA ALIMENTADA DURANTE EL MUESTREO:

23.500 Kg Aprox. UNIDADES: Lingotes y material de Aluminio

2.10 PRODUCTOS: Lingotes de 50 UNIDADES: Kg

2.11 PRODUCCION DURANTE EL MUESTREO: 13.136 UNIDADES: Kg

2.12 CONSUMO DE COMBUSTIBLE DURANTE EL MUESTREO: 140 UNIDADES: m<sup>3</sup>

2.13 ANALISIS DEL COMBUSTIBLE: Gas natural (Pamex)

2.14 DIMENSIONES DEL HOGAR EN LOS PROCESOS DE COMBUSTION ( ANEXAR PLANOS ): En  
ARCA

2.16 CUENTA CON SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO: SI ( ) NO ( X )

2.17 CUENTA CON SISTEMA DE RECIRCULACION: SI ( ) NO ( X )

2.18 TIENE QUEMADOR DE BAJO NOX: SI ( ) NO ( X )

3.- EQUIPO DE CONTROL

3.1 TIPO DE EQUIPO DE CONTROL: M.P.

3.2 FECHA DE INICIO DE OPERACION:

3.3 EFICIENCIA: DE DISEÑO: DE OPERACION:

3.4 METODO DE DETERMINACION DE LA EFICIENCIA:

3.5 TIENE BITACORA DE OPERACION Y MANTENIMIENTO: SI ( ) NO ( )

3.6 FECHA DE BITACORA DE CONTROL:

3.7 TEMPERATURAS DEL EQUIPO DE CONTROL: ENTRADA SALIDA

3.8 BREVE DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS DE CONTROL ( ANEXAR INFORMACION NECESARIA ):

4.- DIMENSIONES DE LA CHIMENEA

4.1 IDENTIFICACION: Chimenea No.1

4.2 FORMA DEL DUCTO: Circular

4.3 ALTURA FISICA DE TRAMO RECTO DONDE SE MUESTREO : 1.1 m.

ALTURA DE LOS PUERTOS DESPUES DE LA ULTIMA PERTURBACION: 0.4 m.

TIPO DE TIRO: Natural

4.4 DIAMETRO INTERIOR EN LA BASE: 1.1 m No. de puertos: 2

4.5 AREA DE LA CHIMENEA A LA ALTURA DE LOS PUERTOS: 0.2822 m2

4.6 PUERTOS. - DIAMETRO INTERIOR: 0.08 m. LONGITUD: 0.08 m.

PARA CALDERAS SE ANEXIA LA SIGUIENTE INFORMACION:

MARCA: N.A.

MODELO:

No. DE SERIE:

COMBUSTIBLE:

CONSUMO DE COMBUSTIBLE:

CAPACIDAD DE DISEÑO:

PRESION DE TRABAJO:

OTROS:

DATOS DEL RESPONSABLE DE LA INFORMACION

Nombre: ING. LUIS VALDEZ NAVAS

Fecha:           

Puesto: Coordinador medio ambiente

Notas:

N/A.....NO APLICA

N/P.....NO PROPORCIONADO

N/D.....NO DISPONIBLE



DETERMINACION DE LA HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION

DATOS DE LOS BURBUJADORES

NUMERO	SOLUCION	TIPO	INICIAL g	FINAL g	DIFERENCIA g
1	AGUA	RECTO	713.6	718.4	4.8
2	AGUA	G - S	682.3	683.9	1.6
3	VACIO	RECTO	497.2	498.0	0.8
4	SILICA GEL	RECTO	649.5	654.4	4.9

DIFERENCIA TOTAL EN GRAMOS ( ΔW ): 12.1 g

ANALISIS ORSAT PARA DETERMINACION DEL PESO MOLECULAR SECO

COMPUESTO	PESO MOLECULAR	PORCENTAJE
DIOXIDO DE CARBONO	44	0.00
OXIGENO	32	16.50
MONOXIDO DE CARBONO	28	0.10
NITROGENO	28	83.40

PESO MOLECULAR SECO: 28.66 ( g / gmol )

VOLUMEN DE INFILTRACIONES ( VINP ): 0.006 ft<sup>3</sup> / min

MEMORIA DE CALCULO PRELIMINAR

RESUMEN DE DATOS DE MUESTREO

TIEMPO TOTAL DE MUESTREO ( T ): 30 min
VOL. TOTAL DE MUESTREO ( VT ): 12.545 ft <sup>3</sup>
VOL. DE INFILTRACIONES ( VINP ): 0.006 ft <sup>3</sup> / min
PRESION DE VEL. PROM. ( PD ): 0.0200 " ca
P. DE VEL. RAIZ PROM. ( PDRA ): 0.1414 " ca
PRESION PROM. DE LA PLACA ( DH ): 0.0000 " ca
TEMP. DE CHIMENEA ( TCH ): 732.330 ° R
TEMP. PROM. DEL MEDIDOR ( TM ): 567.220 ° R
PRESION ESTATICA ( PEST ): -0.0500 "ca

VOLUMEN DE CONTROL ( ft<sup>3</sup> )

$$VC = ( VT - ( VINP * T ) ) * PCG$$

$$VC = ( 12.545 - ( 0.006 * 30 ) ) * 0.9297 = 10.004$$

PRESION DEL MEDIDOR ( " Hg )

$$PM = PB ( PARA EL PRELIMINAR SE CONSIDERAN IGUALES)$$

$$PM = 30.02$$

FRACCION HUMEDA

$$YH = DW * I.358 / ( DW * 1.358 + (VC * PM * 508.23 / TM) )$$

$$YH = 12.1 * 1.358 / (12.1 * 1.358 + (10.004 * 30.0900 * 108.23 / 567.920)) = 0.0328$$

FRACCION SECA

$$YG = 1 - YH = 1 - 0.0328 = 0.9672$$

PESO MOLECULAR HUMEDO

$$PMH = ( PMS * YG ) + ( 18 * YH )$$

$$PMH = (20.66 * 0.9672) + (18 * 0.0328) = 20.311$$

PRESSION DE CHIMENEA ( " Hg )

$$PCH = PB + ( PEST * 0.0735 )$$

$$PCH = 30.02 + (-0.0500 * 0.0735) = 30.0863$$

VELOCIDAD DE CHIMENEA ( ft / seg )

$$VCH = 85.32 * CTP * PDRA * SQRT ( TCH / ( PMH * PCH ) )$$

$$VCH = 85.32 * 0.85 * 0.1414 * SQRT(732.330 / (20.311 * 30.0863)) = 2.5085$$

DETERMINACION DE LA BOQUILLA

$$CONST. C = VCH * YG * 60 * PCH * 537 / ( 29.92 * TCH ) ( ft / min )$$

$$C = 2.5085 * 0.9672 * 60 * 30.0863 * 537 / (29.92 * 732.330) = 406.0772$$

$$DIAMETRO NOMINAL DE BOQUILLA PARA DEFINITIVO ( DBN ) = 0.375 ( " )$$

CONSTANTE K

$$K = 859.340033 * CTP^2 * DBN^4 * DHe * YG * PMS * TM * PCH / (PMH * TCH * PM)$$

$$K = 859.340033 * 0.85^2 * 0.375^4 * 1.9754 * 0.9672 * 20.66 * 567.920 * 30.0863 / ( 20.311 * 732.330 * 30.0900 ) = 18.4146$$

5.3 MUESTRO ISOCINETICO DEFINITIVO

IDENTIFICACION DE CHIMNEA: **HORMO No. 1**

DATOS GENERALES PARA EL MUESTRO ISOCINETICO DEFINITIVO 1

RAZON SOCIAL: <b>ALUMINIO DE VERACRUZ S.A. DE C.V.</b>
PRESION BAROMETRICA ( PB ): <b>30.02</b> " Hg
TEMPERATURA AMBIENTE ( TA ): <b>35</b> °C
DIAMETRO DE BOQUILLA ( DB ): <b>0.375</b> "
AREA DE BOQUILLA ( AB ): <b>0.000766</b> ft <sup>2</sup>
CONSTANTE DEL TUBO PITOT ( CTP ): <b>0.05</b>
CONSTANTE K DE OPERACION: <b>10.4100</b>
CONSTANTE DE LA PLACA DE ORIFICIO ( DH <sub>0</sub> ): <b>1.9754</b>
CONSTANTE DEL GASOMETRO ( FCG ): <b>0.2297</b>
NUMERO DEL FILTRO : <b>1</b>
PESO INICIAL DEL FILTRO ( PIF ): <b>0.6322</b> g      PESO FINAL ( PFF ): <b>0.7624</b> g
AREA TRANSVERSAL DE LA CHIMNEA: <b>10.2298</b> ft <sup>2</sup>

DETERMINACION DE LA HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION

DATOS DE LOS BURBUJADORES

NUMERO	SOLUCION	TIPO	INICIAL g	FINAL g	DIFERENCIA g
1	AGUA	RECTO	718.4	724.3	5.9
2	AGUA	G - S	683.9	684.9	1.0
3	VACIO	RECTO	498.0	497.5	-0.5
4	SILICA GEL RECTO		654.4	665.0	10.6

DIFERENCIA TOTAL EN GRAMOS ( DW ): **17.0** g

ANALISIS ORSAT PARA DETERMINACION DEL PESO MOLECULAR SECO

COMPUESTO	PESO MOLECULAR	PORCENTAJE
DIOXIDO DE CARBONO	44	0.0
OXIGENO	32	16.5
MONOXIDO DE CARBONO	28	0.0
NITROGENO	28	83.5

PESO MOLECULAR: **28.660** (g / gmol)

5.3.1 MEMORIA DE CALCULO DEFINITIVO 1

RESUMEN DE DATOS DE MUESTREO

TIEMPO TOTAL DE MUESTREO ( T ): 60 min
VOL. TOTAL DE MUESTREO ( VT ): 33.920 ft <sup>3</sup>
VOL. DE INFILTRACIONES ( VINF ): 0.006 ft <sup>3</sup> /min
PRESION DE VEL. PROM. ( PD ): 0.3800 " ca
P. DE VEL. RAIZ PROM. ( PDRA ): 0.1951 " ca
PRESION PROM. DE LA PLACA ( DH ): 0.7057 " ca
TEMP. DE CHIMENEA ( TCH ): 623.830 ° R
TEMP. PROM. DEL MEDIDOR ( TM ): 591.050 °R
PRESION ESTATICA ( PEST ): -0.0460 "ca

VOLUMEN DE CONTROL ( ft ^ 3 )

$$VC = ( VT - ( VINF * T ) ) * FCG$$

$$VC = ( 33.920 - ( 0.006 * 60 ) ) * 0.9227 = 31.201$$

PRESION DEL MEDIDOR ( " Hg )

$$PM = PB + DH * 0.0735 = 30.02 + 0.7057 * 0.0735 = 30.1419$$

FRACCION HUMEDA

$$YH = DW * 1.358 / ( DW * 1.358 + ( VC * PM * 508.23 / TM ) )$$

$$YH = 17.0 * 1.358 / ( 17.0 * 1.358 + ( 31.201 * 30.1419 * 508.23 / 591.050 ) ) = 0.0273$$

FRACCION SECA

$$YG = 1 - YH = 1 - 0.0273 = 0.9727$$

PESO MOLECULAR HUMEDO

$$PMH = ( PMS * YG ) + ( 18 * YH )$$

$$PMH = ( 28.460 * 0.9727 ) + ( 18 * 0.0273 ) = 28.362$$

PRESION DE CHIMENEA ( " Hg )

$$PCH = PB + ( PEST * 0.0735 )$$

$$PCH = 30.02 + ( -0.0460 * 0.0735 ) = 30.0666$$

VELOCIDAD DE CHIMENEA ( ft / seg )

$$VCH = 85.32 * CTP * PDRA * EQRT ( TCH / ( PMH * PCH ) )$$

$$VCH = 85.32 * 0.85 * 0.1951 * SQRT ( 623.830 / ( 28.362 * 30.0666 ) ) = 12.7562$$

VOLUMEN REAL SUCCIONADO POR LA BOQUILLA ( ft<sup>3</sup> )

$$VR = VC * PM * TCH / ( YG * PCH * TM )$$

$$VR = 31.201 * 30.1412 * 593.830 / ( 0.9727 * 30.0866 * 581.050 ) = 38.373$$

CALCULO DEL PORCENTAJE DE ISOCINETISMO

$$I = 100 * VR / ( 60 * AB * T * VCH )$$

$$I = 100 * 38.373 / ( 60 * 0.000766 * 60 * 12.7562 ) = 109.080 \%$$

FLUJO DE CHIMENEA ( ft<sup>3</sup> / min )

$$QCH = 60 * VCH * ATCH = 60 * 12.7562 * 10.2228 = 7830.028$$

FLUJO DE CHIMENEA STANDARD ( m<sup>3</sup> / min )

$$QCHS = 0.5082 * QCH * PCH / TCH$$

$$QCHS = 0.5082 * 7830.028 * 30.0866 / 593.830 = 172.551$$

VOLUMEN DE MUESTREO STANDARD ( ft<sup>3</sup> )

$$VMS = VC * PM * 537 / ( YG * 29.92 * TM )$$

$$VMS = 31.201 * 30.1412 * 537 / ( 0.9727 * 29.92 * 581.050 ) = 29.864$$

5.3.2 CONCENTRACION DE PARTICULAS

$$PP = ( PFF - PIF ) + ( PESO FINAL LAVADO SONDA - PESO INICIAL ) / PESO DEL BLANCO DE ACETONA$$

$$PP = ( 0.7624 - 0.6322 ) + ( 81.1920 - 81.0570 ) - 0.0045 = 0.2607$$

CONCENTRACION DE PARTICULAS EN ( g / ft<sup>3</sup> )

$$CP = PP / VMS = 0.2607 / 29.864 = 0.0087$$

CONCENTRACION DE PARTICULAS EN UNIDADES METRICAS ( mg / m<sup>3</sup> )

$$CPM = CP * 35,314.66 = 0.0087 * 35,314.66 = 308.2771$$

EMISION DE PARTICULAS EN CHIMENEA ( Kg / Hr )

$$EPCH = CPM * QCHS / 0.00006 = 308.2771 * 172.551 / 0.00006 = 3.1916$$

### 5.3.3 CONCENTRACION DE DIOXIDO DE AZUFRE

$$M = \text{Peq} * N * V * F * 0.001$$

$$M = 32 + 0.009 + 1.05 * 35 * 0.001$$

$$M = 0.0106 \text{ grs.}$$

CONCENTRACION A CONDICIONES NORMALES ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$C = M/VMS = 0.0106/29.864 = 3.59 \text{ E-04}$$

CONCENTRACION DE DIOXIDO DE AZUFRE EMITIDO AL AMBIENTE ( $\text{KgSO}_2/\text{H}$ )

$$E = QCHS * C * 0.001 = 172.551 * 3.549 \text{ E-04} * 0.001$$

$$E = 6.1245 \text{ E-04}$$

CANTIDAD TOTAL DE DIOXIDO DE AZUFRE EMITIDO AL MEDIO AMBIENTE POR CADA MILLON DE METROS CUBICOS DE COMBUSTIBLE CONSUMIDO

$$E T = \frac{E}{C_{\text{comb}} (10^6)}$$

$$E T = \frac{6.1245 \text{ E-04}}{140(10^6)} = 0.4374 \text{ KgSO}_2 / (10^6) \text{M}^3$$

5.4 MUESTREO ISOCINETICO DEFINITIVO

IDENTIFICACION DE CHIMENEA: **MORMO No. 1**

DATOS GENERALES PARA EL MUESTREO ISOCINETICO DEFINITIVO 1

RAZON SOCIAL: <b>ALUMINIO DE VERACRUZ S.A. DE C.V.</b>	
PRESION BAROMETRICA ( PB ):	<b>30.09 " Hg</b>
TEMPERATURA AMBIENTE ( TA ):	<b>40 °C</b>
DIAMETRO DE BOQUILLA ( DB ):	<b>0.375 "</b>
AREA DE BOQUILLA ( AB ):	<b>0.000766 ft<sup>2</sup></b>
CONSTANTE DEL TUBO PITOT ( CTP ):	<b>0.85</b>
CONSTANTE K DE OPERACION:	<b>10.4100</b>
CONSTANTE DE LA PLACA DE ORIFICIO ( DHe ):	<b>1.9754</b>
CONSTANTE DEL GASOMETRO ( FCG ):	<b>0.9227</b>
NUMERO DEL FILTRO :	<b>2</b>
PESO INICIAL DEL FILTRO ( PIF ):	<b>0.6441 g</b>
PESO FINAL ( PFF ):	<b>0.7205 g</b>
AREA TRANSVERSAL DE LA CHIMENEA:	<b>10.2290 ft<sup>2</sup></b>

DETERMINACION DE LA HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION

DATOS DE LOS BURBUJERADORES

NUMERO	SOLUCION	TIPO	INICIAL g	FINAL g	DIFERENCIA g
1	AGUA	RECTO	724.3	725.6	1.3
2	AGUA	G - S	684.9	686.1	1.2
3	VACIO	RECTO	497.5	497.8	0.3
4	SILICA GEL	RECTO	665.0	677.9	12.9

DIFERENCIA TOTAL EN GRAMOS ( DW ): **15.7 g**

ANALISIS ORSAT PARA DETERMINACION DEL PESO MOLECULAR SECO

COMPUESTO	PESO MOLECULAR	PORCENTAJE
DIOXIDO DE CARBONO	44	0.0
OXIGENO	32	16.0
MONOXIDO DE CARBONO	28	0.0
NITROGENO	28	84.0

PESO MOLECULAR: **28.640 (g / gmol)**

5.4.1 MEMORIA DE CALCULO DEFINITIVO 2

RESUMEN DE DATOS DE MUESTREO

TIEMPO TOTAL DE MUESTREO ( T ): 60 min
VOL. TOTAL DE MUESTREO ( VT ): 29.160 ft <sup>3</sup>
VOL. DE INFILTRACIONES ( VINI ): 0.006 ft <sup>3</sup> /min
PRESION DE VEL. PROM. ( PD ): 0.0400 " ca
P. DE VEL. RAIZ PROM. ( PDRA ): 0.2000 " ca
PRESION PROM. DE LA PLACA ( DH ): 0.7364 " ca
TEMP. DE CHIMENEA ( TCH ): 938.000 ° R
TEMP. PROM. DEL MEDIDOR ( TM ): 583.708 ° R
PRESION ESTATICA ( PEST ): -0.0500 "ca

VOLUMEN DE CONTROL ( ft ^ 3 )

$$VC = ( VT - ( VINI * T ) ) * FCG$$

$$VC = ( 29.160 - ( 0.006 * 60 ) ) * 0.9297 = 26.775$$

PRESION DEL MEDIDOR ( " Hg )

$$PM = PB + DH * 0.0735 = 30.09 + 0.7364 * 0.0735 = 30.1441$$

FRACCION HUMEDA

$$YH = DW * 1.358 / ( DW * 1.358 + ( VC * PM * 508.23 / TM ) )$$

$$YH = 15.7 * 1.358 / ( 15.7 * 1.358 + ( 26.775 * 30.1441 * 508.23 / 583.708 ) ) = 0.0294$$

FRACCION SECA

$$YG = 1 - YH = 1 - 0.0294 = 0.9706$$

PESO MOLECULAR HUMEDO

$$PMH = ( PMS * YG ) + ( 18 * YH )$$

$$PMH = ( 28.640 * 0.9706 ) + ( 18 * 0.0294 ) = 28.327$$

PRESION DE CHIMENEA ( " Hg )

$$PCH = PB + ( PEST * 0.0735 )$$

$$PCH = 30.09 + ( -0.0500 * 0.0735 ) = 30.0663$$

VELOCIDAD DE CHIMENEA ( ft / seg )

$$VCH = 85.32 * CTP * PDRA * SQRT ( TCH / ( PMH * PCH ) )$$

$$VCH = 85.32 * 0.85 * 0.2000 * SQRT ( 938.000 / ( 28.327 * 30.0663 ) ) = 15.2166$$

VOLUMEN REAL SUCCIONADO POR LA BOQUILLA ( ft<sup>3</sup> )

$$VR = VC * PM * TCH / ( YG * PCH * TM )$$

$$VR = 26.775 * 30.1441 * 938.000 / ( 0.9706 * 30.0863 * 583.708 ) = 44.418$$

CALCULO DEL PORCENTAJE DE ISOCINETISMO

$$I = 100 * VR / ( 60 * AB * T * VCH )$$

$$I = 100 * 44.418 / ( 60 * 0.000766 * 60 * 15.2166 ) = 105.854 \%$$

FLUJO DE CHIMENEA ( ft<sup>3</sup> / min )

$$QCH = 60 * VCH * ATCH = 60 * 15.2166 * 10.2220 = 9339.057$$

FLUJO DE CHIMENEA STANDARD ( m<sup>3</sup> / min )

$$QCHS = 0.5082 * QCH * PCH / TCH$$

$$QCHS = 0.5082 * 9339.057 * 30.0863 / 938.000 = 152.231$$

VOLUMEN DE MUESTRO STANDARD ( ft<sup>3</sup> )

$$VMS = VC * PM * 537 / ( YG * 29.92 * TM )$$

$$VMS = 26.775 * 30.1441 * 537 / ( 0.9706 * 29.92 * 583.708 ) = 25.570$$

5.4.2 CONCENTRACION DE PARTICULAS

$$PP = ( PPF - PIF ) + ( PESO FINAL LAVADO BOMBA - PESO INICIAL ) - PESO DEL BLANCO DE ACETONA$$

$$PP = ( 0.7205 - 0.6441 ) + ( 01.1917 - 01.0570 ) - 0.0005 = 0.2106$$

CONCENTRACION DE PARTICULAS EN ( g / ft<sup>3</sup> )

$$CP = PP / VMS = 0.2106 / 25.570 = 0.0082$$

CONCENTRACION DE PARTICULAS EN UNIDADES METRICAS ( mg / m<sup>3</sup> )

$$CPM = CP * 35,314.66 = 0.0082 * 35,314.66 = 289.9254$$

EMISION DE PARTICULAS EN CHIMENEA ( Kg / Hr )

$$EPCH = CPM * QCHS / 0.00006 = 289.9254 * 152.231 / 0.00006 = 2.6873$$

#### 5.4.3 CONCENTRACION DE DIOXIDO DE AZUFRE

$$M = \text{Peq} * N * V * F * 0.001$$

$$M = 32 + 0.009 + 1.02 * 35 * 0.001$$

$$M = 0.0103 \text{ grs.}$$

CONCENTRACION A CONDICIONES NORMALES ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$$C = M/VMS = 0.0103/25.570 = 4.028 \text{ E-04}$$

CONCENTRACION DE DIOXIDO DE AZUFRE EMITIDO AL AMBIENTE ( $\text{KgSO}_2/\text{H}$ )

$$E = QCHS * C * 0.001 = 152.231 * 4.028 \text{ E-04} * 0.001$$

$$E = 6.132 \text{ E-04}$$

CANTIDAD TOTAL DE DIOXIDO DE AZUFRE EMITIDO AL MEDIO AMBIENTE POR CADA MILLON DE METROS CUBICOS DE COMBUSTIBLE CONSUMIDO

$$ET = \frac{E}{C_{\text{comb}} (10^6)}$$

$$ET = \frac{6.132 \text{ E-04}}{140(10^6)} = 0.4379 \text{ KgSO}_2 / (10^6) \text{M}^3$$

5.5 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

PARAMETROS	PRELIMINAR	DEFINITIVO 1	DEFINITIVO 2	PROMEDIO	MAXIMO PERMISIBLE	UNIDADES
PRES. DE VELOCIDAD	0.02	0.038	0.04	0.039		Plg.ca
VOL. DE CONTROL	18.004	31.201	26.775	28.988		ft3
FRACCION HUMEDA	0.0328	0.0273	0.0294	0.0284		
FRACCION SECA	0.9672	0.9727	0.9706	0.9717		
PESO MOLECULAR HUM.	28.311	28.369	28.327	28.648		lb/lb mol
VELOCIDAD	9.5085	12.7569	15.2166	13.9868		ft/seg.
VOLUMEN REAL SUCC.		38.373	44.418	41.3955		ft3
ISOCINETISMO		109.08	105.854	107.467	90<I>110	%
FLUJO DE CHIMENEA		7830.028	9339.057	8584.5425		ft3/min.
FLUJO DE CHIM. ,S.T.D.		172.551	152.231	162.391		m3/min.
VOL. DE MUEST. S.T.D.		29.864	25.57	27.7171		ft3std
PESO DE PARTICULAS		0.2607	0.2106	0.2357		g
CONC.DE PARTICULAS		308.2771	290.9254	299.6013	534.1133	mg/m3
EMIS. DE PARTICULAS		3.1916	2.6573	2.9245		Kg/hr.
CONCEN. DE SO2		3.549 E-04	4.028 E-04	3.788 E-04		grs/m3
EMIS. DE SO2		0.4374	0.4379	0.4376	10	KgSO2/10E-6m3

TABLA 5.1 RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN EL MUESTREO DEL HORNO 1

## ANALISIS DE RESULTADOS

Los muestreos realizados, con el objeto de determinar las concentraciones de partículas y de dióxido de azufre se realizaron mediante un muestreo isocinético. De los datos obtenidos en campo se determinó un valor isocinético promedio de 107.46 % lo que lo hace un muestreo representativo ya que se encuentra dentro del intervalo aceptable de confiabilidad, garantizando así que la velocidad de los gases que circulan dentro de la chimenea sea igual a la velocidad de succión que pasa a través de la boquilla de muestreo.

Las concentraciones de partículas obtenidas durante el muestreo en el Horno 1 de fundición se compararon con la concentración máxima permisible, tomado de la referencia de la Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-019-ECOL/ 93; la cual establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas y óxidos de azufre provenientes de fuentes fijas que usan combustibles fósiles líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. De acuerdo a la tabla 5.1 los resultados obtenidos anteriormente se puede apreciar que en la fuente emisora se determinó un valor promedio de partículas de 299.6013 mg/m<sup>3</sup> el cual comparado con el valor máximo permisible, que es de 534.1133 mg/m<sup>3</sup>, se encuentra un 56% por debajo de este valor. En lo que se refiere a la concentración de dióxido de azufre emitido por esta misma fuente se tiene que se encuentra, también, dentro de los límites máximos permisibles con un valor promedio de 0.4376 SO<sub>2</sub>/10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> por cada millón de metros cúbicos de combustible consumido.

De las concentraciones evaluadas en la fuente emisora identificada como Horno 1 se concluye que bajo sus condiciones normales de operación, dichas concentraciones se encuentran dentro de los límites permisibles de emisión.

## CONCLUSIONES

La constante lucha por abatir los niveles de emisión de contaminantes atmosféricos ha obligado tanto al sector privado como al Gobierno de México ha desarrollar estrategias de control, como parte de éstas estrategia se obliga al sector industrial a realizar de manera periódica la medición de emisiones de partículas y óxidos de azufre, por lo que es de gran importancia tanto para el industrial como para el gobierno contar con los conocimientos adecuados que permitan la valoración optima y eficiente de la concentración de contaminantes en su fase de emisión.

Este trabajo describe la metodología para desarrollar un muestreo isocinético el cual es uno de los procedimientos más completos y confiables para determinar la concentración de partículas y óxidos de azufre emitidos a través de una fuente fija de emisión industrial. Además esta metodología puede ser empleada para determinar concentraciones de otros contaminantes, adecuando el equipo con soluciones adsorbedoras que permitan la adsorción eficiente de los contaminantes a evaluar.

En la evaluación de la concentración de partículas y dióxido de azufre realizada en un horno de fundición de aluminio se determinó que bajo condiciones normales de operación dichas concentraciones se encuentran dentro de los

límites permisibles de emisión, esto es de esperarse debido a que el combustible empleado en este proceso es gas natural el cual además de producir por combustión pocas cantidades de partículas y de óxidos de azufre, la relación de oxígeno/combustible presente en el proceso de fundición permitieron disminuir la generación de estos contaminantes.

Cualquier tratamiento para abatir los niveles de contaminación debe considerar la posibilidad de que se puedan producir otras formas de contaminación, y que la eliminación eficaz de partículas y/o gases contaminantes nunca debe de repercutir en otra forma de contaminación en las aguas residuales ni en la generación de nuevos residuos peligrosos que causen un impacto al medio ambiente.

Un procedimiento para controlar la contaminación del aire producido por fuente industrial es proponer el cambio en el proceso de operación de la planta o sustituir los materiales no elaborados que se utilizan durante el proceso, por ejemplo, utilizar el gas combustible en lugar de combustóleo o diesel, los cuales tienen mayores cantidades de óxidos de azufre; o mediante la modificación del proceso de combustión para producir menos CO y NOx. Si ninguno de estos métodos no es aplicable se procede a implementar equipos de control que ayuden a disminuir la concentración de los contaminantes generados en el proceso. En el anexo 1 se presentan los equipos de control generalmente empleados.

## ANEXO 1

### EQUIPOS DE CONTROL EMPLEADOS PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES FIJAS

Aunque se tiene presente que los automóviles y la producción de energía contribuyen considerablemente a la contaminación atmosférica, y que actualmente se están empleando medios específicos para tratar la contaminación producidas por estas fuentes contaminadoras, la presente tesis, como se mencionó anteriormente, ésta enfocada a la medición y control de los principales contaminantes originados por la actividad industrial.

Cualquier tratamiento para abatir los niveles de contaminación debe de considerar la posibilidad de que se puedan producir otras formas de contaminación, y que la eliminación eficaz de gases nocivos o de partículas en ningún caso debe conducir a una transferencia inaceptable de contaminación a las aguas residuales ni a la generación de nuevos residuos perjudiciales.

Un procedimiento para controlar la contaminación del aire que se debe de considerar primeramente es cambiar el método de operación de la planta, o sustituir los materiales no elaborados que se utilizan durante el proceso, para eliminar o reducir la contaminación, por ejemplo, mediante la utilización de gas como combustible en lugar de combustóleo o diesel, o mediante la modificación del proceso de combustión para producir menos monóxido de carbono u óxidos de nitrógeno.

La remoción de contaminantes de una emisión representa dos problemas muy independientes que están en función de que si el contaminante es gaseoso o en forma de partículas. Los gases pueden ser removidos, en general, mediante difusión hacia una superficie controlada donde se adsorben o se absorben de manera preferencial, o en algunos casos, presentan una modificación química para transformarse en productos menos nocivos. Las partículas pueden ser removidas de la fuente gaseosa mediante una serie completa de fuerzas físicas gravitacionales, centrifugas y/o electrostáticas.

#### **CONTROL DE PARTICULAS**

En términos generales, el control de partículas contaminantes del aire implica pasar la corriente del gas que contiene las partículas a través de una cámara y permitir que una fuerza gravitacional, centrifuga o electrostática actúe sobre ésta para sacarlas de la corriente gaseosa.

Para realizar una apropiada elección del equipo de colección se deben conocer algunos datos importantes de la corriente gaseosa a controlar, por ejemplo, si el proceso de producción es continuo o intermitente, la naturaleza de las partículas (dimensiones, formas, densidad, estado, composición química y conductividad eléctrica) así como las propiedades del gas en el cual las partículas se encuentran suspendidas, en particular la temperatura y composición química.

Se pueden considerar cinco clases básicas de equipos de colección de partículas las cuales son: Separadores por

Gravedad, Separadores Ciclónico, Colectores Via Húmeda, Filtros de Tela y Precipitación Electroestática.

### **Separación por gravedad**

Generalmente se llama cámara de sedimentación por gravedad, este equipo permite que las partículas se asienten fuera de la corriente de gas dentro de tolvas colectoras, mientras que los gases pasan a través de la cámara a una velocidad reducida. El equipo de control para partículas más simple es aquel que utiliza las fuerzas gravitacionales para remover las partículas de la corriente de gas. Esta velocidad generalmente se encuentra en el intervalo de 0.3 a 3.0 m/s, la reducción de la velocidad de los gases se logra a través de una expansión del ducto dentro de la cámara de sedimentación. Las partículas suspendidas en el gas alcanzan una velocidad de caída libre final que se determina por la Ley de Stokes para partículas y es directamente proporcional al producto del cuadrado del diámetro de la partícula y la diferencia de la densidad entre la partícula y el gas acarreador, e inversamente proporcional a la viscosidad del gas acarreador. Este método de separación por gravedad sólo es útil para remover partículas más grandes que 100  $\mu\text{m}$  de diámetro, para la remoción de partículas menores se requiere utilizar otros métodos.

Las características básicas de las cámaras de sedimentación son: bajo costo de energía, bajo mantenimiento, bajo costo de instalación, gran tamaño físico y baja eficiencia de colección.

### **Separadores ciclónicos**

Los separadores ciclónicos son dispositivos más sencillos que las cámaras de sedimentación, estos son utilizados frecuentemente para polvos relativamente gruesos y pulverizados (por arriba de los 10  $\mu\text{m}$ ) tales como el aserrín producto del labrados de madera. En un ciclón convencional, los gases sucios entran a una cámara cilíndrica a la cual se le ha adaptado tangencialmente una sección inferior cónica. los gases circulan hacia la parte inferior del ciclón, y en el fondo de cono, donde se ha fijado una tolva los gases cambian de dirección mientras permanecen girando y finalmente salen a través de un ducto colocado al centro del ciclón. Las partículas de polvo contenidas en el flujo gaseoso terminan por depositarse en la tolva del equipo de control. A pesar de que los ciclones son simples, económicos, y pueden ser construidos de diversos materiales para manejar un rango amplio de condiciones físicas y químicas de operación, existen pocas aplicaciones en las cuales se obtengan eficiencias en el intervalo de 80 a 90% para partículas menores de 25  $\mu\text{m}$  de diámetro; por lo general los ciclones se utilizan para eliminar partículas mayores de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro

### **Colectores por vía húmeda**

En un colector húmedo, se utiliza un líquido, generalmente agua, para capturar las partículas o para aumentar el tamaño de estas a través de la formación de aerosoles, en ambos casos el

aumento de tamaño de las partículas provoca que estas se remuevan de la corriente gaseosa.

Este tipo de equipo captura partículas en el rango de 0.1 a 20  $\mu\text{m}$  de diámetro utilizando como mecanismo la impactación inercial de una partícula sobre una gota.

El tipo más sencillo de depurador de gases que limpia por fricción una corriente gaseosa de partículas, es la torre de rocío, donde el polvo es colectado por la acción de las gotas de agua. Este dispositivo solamente es efectivo para partículas mayores de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro, por lo que generalmente se utiliza como prelimpiador. La torre de rocío con algunas modificaciones también puede ser empleada en la absorción de gases de una fuente emisora.

En un depurador de rocío centrifugo, los gases se introducen en forma tangencial hacia dentro de un ciclón en donde las gotas del fluido (generalmente agua) se dispersan dentro del ciclón a través de rociadores que se encuentran colocados al centro del depurador. Las gotas adquieren un movimiento en espiral interceptando las partículas de polvo de la corriente gaseosa. En la pared la película húmeda evita la reincorporación de las partículas después de su captura.

Existe un tipo más efectivo de depurador de gases conocido como venturi de alta energía, el cual consiste en un canal rectangular o circular que converge a una sección o garganta estrecha y luego diverge a una sección de una área similar a la inicial, generalmente la relación entre las áreas de entrada y salida y la garganta es de 4:1. En la garganta del depurador

venturi la energía cinética del flujo se incrementa aumentando así la velocidad del flujo a un rango de entre 50 a 80 m/s; la remoción de las partículas y el lavado de los gases ocurre en esta sección de la garganta por donde se introduce el agua y, en donde debido a las altas velocidades de flujo contribuyen a la atomización de las gotas e incrementando el área de contacto.

Aun cuando los depuradores de rocío son utilizados ampliamente a nivel industrial, existen varias desventajas en ellos; una es que el líquido ya usado se debe eliminar o reutilizar, en cualquiera de los dos casos el tratamiento es prolongado y por ende costoso, la otra desventaja es que el líquido empleado en sí mismo representa un desembolso aun cuando, como sucede en la mayoría de los casos, es solamente agua.

#### **Filtros de tela**

La remoción de las partículas mediante un elemento de filtro, ocurre como resultado de la operación de los mecanismos de intercepción directa, impacto inercial y atracción electrostática.

Durante el curso del fluido gaseoso a través del filtro, se construye una capa de partículas sobre la superficie de la tela, incrementando con esto la eficiencia de los filtros, pero disminuyendo la velocidad del flujo, por consiguiente. la capa de partícula formada se tendrá que remover periódicamente ya sea sacudiendo el filtro o invirtiendo el flujo de aire que circula a través del filtro.

Desde el punto de vista industrial el único sistema de filtración aplicable al control de partículas es el de los filtros de bolsas, las cuales son generalmente telas tejidas de diferentes tamaños y de diferentes materiales, tanto naturales como sintéticos según sean las condiciones de operación.

La operación de los filtros se clasifican como intermitente o continúa; la operación intermitente se utiliza en procesos que generan cantidades pequeñas de partículas, mientras que los equipos de operación continúa se utilizan en procesos donde se generan altas concentraciones de partículas.

Entre las ventajas de los filtros de tela se encuentra que: tienen alta eficiencia de colección sobre un rango amplio de tamaño de partículas, tienen flexibilidad en su diseño en función del material filtrante disponible, y tienen gran capacidad para manejar grandes volúmenes de gas.

#### **Precipitación electrostática**

Los precipitadores electrostáticos son equipos de alta eficiencia aplicables extensamente para la recolección de partículas en una escala muy grande, tanto para polvo de cemento emitido en los hornos de calcinación de cemento, como para la separación de neblinas de ácido sulfúrico.

Los procesos en un precipitador electrostático utilizan como fuerza conductora, las fuerzas que actúan en las partículas cargadas eléctricamente en la presencia de un campo eléctrico, y el proceso consiste básicamente en: 1) Carga eléctrica de las

partículas por ionización, 2) inducción de las partículas hacia un campo magnético y 3) remoción de estas partículas.

Si el gas que contiene a las partículas pasa a través de un tubo o placas cargadas negativamente a un voltaje elevado (de 40 a 60 kv.), éstas se cargan negativamente. Luego, éstas partículas con carga se mueven hacia las superficies positivas conectadas a tierra donde se descargan. Después de cierto tiempo, se forma una capa de partículas la cual se remueve a intervalos.

Entre sus ventajas están: Una capacidad para manipular grandes volúmenes de gas, altas eficiencias colectoras aún para partículas del tamaño por abajo de los de los 0.5  $\mu\text{m}$ , bajo consumo de energía y bajas pérdidas de tiro y, capacidad para operar con gases a temperaturas relativamente altas.

#### **Aplicaciones de los equipos de control.**

La selección de un equipo de control para su instalación a nivel industrial depende de muchas variables de operación como por ejemplo: El gasto volumétrico, la eficiencia de colección, las características físicas y químicas de las partículas, la carga de polvo de la corriente gaseosa, así como la temperatura y presión de la corriente gaseosa a limpiar.

Como un criterio general, los equipos más utilizados en el control de partículas, además de algunas situaciones en las cuales cada uno de los equipos de control son más efectivos, se aplican en las siguientes condiciones:

1. Los ciclones se usan en general cuando:
  - a) el polvo sea grueso
  - b) Las concentraciones sean altas (mayores de 1 gr./ft<sup>3</sup>)
  - c) Se desee la clasificación de las partículas.
  - d) No se requiera una eficiencia muy alta.
  
2. Los lavadores húmedos se usan generalmente en:
  - a) Sea necesario eliminar partículas finas a una eficiencia relativamente alta
  - b) Sea deseable el enfriamiento y no sea de gran importancia la humedad
  - d) Sea necesario eliminar los contaminantes tanto gaseosos como partículas.
  
3. Los filtros de tela se utilizan principalmente en:
  - a) Cuando se requieran eficiencias muy altas
  - b) Cuando se requiera colectar materiales secos de valor comercial
  - c) Que el gas siempre esté por arriba del punto de rocío
  - d) los volúmenes a manejar sean razonablemente bajos
  - e) Las temperaturas sean relativamente bajas
  
4. Los precipitadores electrostáticos se usan por lo general cuando:
  - a) Se requieran eficiencias altas en la eliminación de polvos muy finos
  - b) Se manejen grandes volúmenes de gas

c) Sea necesario recuperar material valioso sin modificaciones físicas

Dos factores de gran importancia para la selección de cualquier tipo de equipo de control son la eficiencia y el costo derivado de la instalación y operación de estos equipos.

#### **CONTROL DE GASES.**

La reducción de los gases contaminantes a niveles deseables, se puede llevar al cabo por varios métodos: 1) adsorción de las especies contaminantes sobre una superficie adsorbadora sólida selectiva, 2) los contaminantes también pueden ser adsorbidos por solventes líquidos, 3) incineración de los contaminantes gaseosos para su oxidación a otra forma química que no sea contaminante, 4) abatiendo la generación de contaminantes mediante la restricción de la cantidad de contaminantes formada en el proceso original, éste último método de control se mencionó en el capítulo 2 para los contaminantes originados en los gases de combustión.

#### **Adsorción.**

La adsorción es un proceso de separación que se basa en la capacidad que tienen ciertos sólidos para remover en forma preferencial, componentes gaseosos (o líquidos) de una corriente. Las moléculas del gas o vapor contaminante, presentes en una corriente residual se acumulan en la superficie del material sólido, a este medio se le conoce como adsorbente,

mientras que al gas o vapor adsorbido se llama adsorbato. El mecanismo de adsorción es útil en la remoción de olores y contaminantes procedentes de gases industriales, así como en la recuperación de vapores solventes valiosos del aire y otros gases, además es especialmente útil cuando el gas contaminante no es combustible o difícil de quemar o cuando el contaminante se encuentra en una concentración muy diluida o el contaminante es lo suficientemente valioso para justificar su recuperación

El proceso de adsorción se clasifica como adsorción física o como adsorción química. En la primera clasificación, las moléculas de gas se adhieren a la superficie del adsorbente sólido como resultado de las fuerzas atractivas intermoleculares entre ellas (fuerzas de Van Der Waals). El proceso de adsorción es exotérmico, el calor liberado que depende de la magnitud de las fuerzas atractivas son del orden de la entalpia de condensación del vapor. La ventaja de la adsorción física se apoya en el hecho de que el proceso es reversible sin cambios en su composición química. La cantidad de gas que se adsorbe físicamente decrece rápidamente con el incremento de temperatura, y es muy pequeña cuando la temperatura está por encima de la temperatura crítica del componente adsorbido. Por lo general, la adsorción es directamente proporcional a la cantidad disponible de superficie sólida, esta acumulación no siempre está limitada a una sola capa monomolecular.

La adsorción química es el resultado de una interacción entre el adsorbato y el medio adsorbente. las fuerzas de unión asociadas con este tipo de adsorción son mucho más fuertes que

en la adsorción física, por lo tanto el calor que se libera en la adsorción química es mucho mayor y, además más altamente exotérmico (por arriba de 1.6 Kcal/mol), la adsorción química es también con frecuencia irreversible, otra característica importante de este tipo de adsorción es que sólo una capa monomolecular de adsorbato aparece en el medio adsorbente, esto se debe a las distancias extremadamente cortas sobre las que son efectivas las fuerzas de valencia que vinculan el adsorbato con el adsorbente.

En la selección del medio adsorbente se debe de tomar en consideración el área superficial que deberá estar en contacto con el adsorbato, además de sus propiedades químicas naturales del medio sólido; por ejemplo, el carbón natural (carbón activado) tiene gran afinidad por los hidrocarburos, mientras que la sílica gel adsorbe rápidamente al agua, la alúmina activada constituye otro agente deshidratante; otro medio adsorbente son la tierra de batanero, la cual esta formada principalmente por arcillas naturales, utilizadas en la industria del petróleo, así como en aceites de origen vegetal o animal, todos estos medios adsorbentes son de alguna manera fácil de activar por varias veces.

Existe otro medio adsorbente utilizado con frecuencia en los equipos de control de contaminantes, las cuales son las zeolitas (aluminosilicatos metálicos cristalinos), conocidos por lo general como tamices moleculares, los cuales separan las moléculas por su tamaño así como por su diferente modelo

dipolar. Los tamices moleculares se pueden regenerar por calentamiento a través de una corriente gaseosa.

Se han desarrollado recientemente tamices moleculares para el control de las emisiones de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y vapores de mercurio, en estos casos el diámetro del poro de los aluminosilicatos metálicos oscila de 8 a 10 Angstroms.

El efecto del tamaño del poro sobre la selectividad de separación está ilustrado por algunos datos sobre tamices moleculares, recopilados por la Union Carbide Corporation. Cuando el diámetro nominal sea de  $0.003 \mu\text{m}$ , las moléculas adsorbidas pueden ser  $\text{H}_2\text{O}$  o  $\text{NH}_3$ , al aumentar el tamaño a  $0.004 \mu\text{m}$  se adsorberán moléculas mayores tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  y  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , un aumento de  $0.005 \mu\text{m}$  permitirá la adsorción de parafinas normales, con la exclusión de hidrocarburos ramificados y cíclicos.

#### **Absorción de gas en líquidos**

El control de las fuentes de contaminantes gaseosos mediante el proceso de absorción, implica en poner en contacto el gas que contiene las impurezas con un líquido absorbente, separando posteriormente la corriente gaseosa (ya limpia) del líquido contaminado con las impurezas, el proceso de absorción en el campo del control de la contaminación del aire se conoce como lavado. Los gradientes de concentración en las interfases entre el líquido y el gas, sirven como fuerzas impulsoras en el

proceso de absorción, éste proceso se realiza con mayor rapidez por los grandes coeficientes de difusión de masa.

Los equipos de absorción deberán permitir un total contacto entre el gas y el líquido solvente de manera que exista una buena difusión en la interfase. La rapidez de transferencia de masa es proporcional al área superficial de la interfase entre el líquido y el gas; por lo tanto, las unidades de absorción están diseñadas para tener grandes áreas superficiales con una mínima caída de presión del gas. Los absorbedores que dispersan el líquido en el gas son principalmente torres empacadas y absorbedores venturi.

En la distribución básica de una torre empacada a contra corriente el gas sucio entra por la parte inferior y el gas sucio sale por la parte superior de la torre, el líquido absorbente entra en por esta parte superior y se extrae por la parte inferior de la torre; el gas limpio se descarga a la atmósfera a través de una chimenea, mientras el líquido que sale de la torre se puede separar del gas contaminado, y reciclarlo o darle un tratamiento adicional, o para usarlo en el proceso.

El material de empaque se diseña para aumentar el área superficial en la interfase líquido-vapor.

El tamaño del depurador de gases y su eficiencia, están en función de: la superficie de exposición del líquido absorbente, la temperatura, el tiempo disponible y la fuerza de conducción que lleva a las moléculas del gas contaminante hacia la superficie del líquido, así como de la naturaleza química y la interacción del gas contaminante con el líquido.

La superficie de exposición a través de la cual un gas se absorbe es una función del tamaño de la gota del líquido ( en una unidad anticontaminante tipo rocío) o de las dimensiones y tipo de empaquetamiento (en una torre de absorción), así como también de la cantidad de líquido por unidad de volumen de gas que se utiliza y de las dimensiones físicas del sistema.

En general, los contaminantes gaseosos presentes a concentraciones moderadas, menores del 0.1% en volumen, se manejan de manera efectiva mediante equipos absorbedores de gases siempre y cuando se encuentre disponible un líquido absorbente adecuado. Los líquidos limpiadores para estos equipos incluyen agua para amoníaco y ácido clorhídrico en forma de gas, ácido sulfúrico para amoníaco, soluciones de metil y etilamina para ácido sulfhídrico, soluciones de sulfito de sodio y pastas aguadas de caliza para ácido sulfúrico. Una lista de sistemas de absorción de importancia comercial se ilustra en el Manual del Ingeniero Químico, en la sección de absorción de gases.

#### **Incineración.**

Un procedimiento para remover los contaminantes combustibles del aire es la incineración mediante la cual se logra la oxidación completa a monóxido de carbono y agua, la incineración se usa frecuentemente en situaciones donde el gasto volumétrico del gas residual de un proceso es grande, pero el nivel de gas contaminante es pequeño. Además la incineración se usa satisfactoriamente cuando se tiene contaminantes altamente olorosos (mercaptanos, gases de cianuro y ácido sulfhídrico ) y

se desea cambiarlos químicamente a sustancias menos olorosas; también se utiliza para destruir los aerosoles orgánicos que causan plumas visibles. La incineración se emplea para destruir eficazmente ciertos hidrocarburos reactivos, los cuales de alguna forma tienen un papel importante en la formación fotoquímica de neblumo.

Algunas industrias como las refinerías, producen grandes cantidades de gases residuales altamente combustibles y materiales orgánicos que son un peligro para el medio ambiente, por lo general, estos contaminantes son controlados mediante la combustión en chimeneas de flama, u hornos especialmente diseñados.

Las ventajas de combustión auxiliar son múltiples, por ejemplo:

- 1.- Destruye totalmente a todos los contaminantes combustibles, cuando el equipo ésta diseñado y operado de manera adecuada
- 2.- Existe la posibilidad de adaptar el equipo a cambios moderados en el gasto y concentración del efluente.
- 3.- Buena eficiencia de control, la cual es relativamente insensible al contaminante gaseoso empleado.
- 4.- Crea la posibilidad de recuperación económica del calor residual.

Entre las desventajas se tiene que: los costos de operación y de inversión son razonablemente altos, en algunos casos existe la posibilidad de instalar equipos de colección y conducción, lo que incrementa el costo de inversión, también existe la

posibilidad de buscar alternativas de control adicionales cuando se tengan átomos diferentes de C, H y O. En los quemadores auxiliares térmicos y catalíticos, es necesario suministrar combustible adicional a fin de alcanzar el nivel deseado de temperatura para la oxidación de los contaminantes del gas residual.

Los tres tipos básicos de incineración se clasifican como de flama directa, térmico y catalítico.

#### **-Incineración por flama directa**

La incineración por flama directa es un método por el cual los gases residuales se queman directamente en una combustión, con o sin la adición de combustible adicional. En algunos casos, el gas residual puede constituir una mezcla combustible sin que haya que añadir aire, en otras ocasiones aún después de la adición de aire la corriente residual gaseosa estará dentro de sus límites de flamabilidad, si esta mezcla queda fuera de este límite, la adición de una cantidad pequeña de combustible la llevará dentro de su límite de flamabilidad.

La incineración por flama directa se recomienda usar cuando los combustibles del gas residual tenga un valor calórico mínimo de 3150 kJ/m<sup>3</sup>.

Uno de los problemas que se presentan en la incineración por flama directa, es que al generarse temperaturas de la flama alrededor de los 2500 °F se puede generar la formación de los óxidos de nitrógeno cuando se tenga un exceso de aire, y se mantenga esta temperatura en un tiempo razonable para la

formación de los óxidos. De esta manera, el proceso de combustión podría sustituir simplemente un tipo de contaminante por otro. La formación de los óxidos de nitrógeno en procesos de combustión se comento en el punto 2.4 del capítulo 2.

#### **-Incineración térmica.**

La incineración térmica es un método utilizado para la combustión de contaminantes presentes en un gas, los cuales se encuentran en concentraciones muy bajas que sólo suministraría una pequeña fracción del valor calórico requerido para mantener la flama directa ( el intervalo del valor calórico se encuentra entre un 40 a un 750 kJ/m<sup>3</sup>). Por lo general, la corriente del gas natural se precalienta en un intercambiador de calor y luego por la zona de combustión de un quemador, provisto con combustible suplementario, este procedimiento hace que los combustibles del gas residual estén por encima de su temperatura de autoencendido y se quemen con el oxígeno presente en la corriente contaminada. Si no se dispone normalmente de suficiente oxígeno, este se añade al flujo del gas residual por medio de un soplador o ventilador.

La incineración térmica se lleva a cabo generalmente a temperaturas de entre 1000 a 1500° F, lo que hace menos costoso el diseño de la cámara de combustión, y atenúa la posibilidad de una formación apreciable de los óxidos de nitrógeno.

En el diseño de los incineradores térmicos es importante tener en consideración el tiempo, la temperatura y la turbulencia del proceso de combustión ya que estos factores

influyen sobre la eficiencia de oxidación, esta eficiencia también se ve afectada por el tipo de hidrocarburo presente en la corriente gaseosa contaminada y del tipo de quemador. El tiempo de residencia en el incinerador deberá de ser suficiente para la completa combustión de los contaminantes combustibles (normalmente este tiempo se encuentra dentro del intervalo de 0.2 a 0.8 segundos). La turbulencia se refiere a la cantidad requerida de mezclado mecánico a fin de asegurar el completo contacto del oxígeno con el combustible, y de los contaminantes combustibles con los productos de combustión y el calor de la flama. La temperatura de operación usadas en los quemadores auxiliares varían con la naturaleza de los contaminantes combustibles presentes en el gas efluente, estos pueden ser hidrocarburos, monóxido de carbono. olores una combinación de varios de ellos. Un aumento de cualquiera de estos factores incrementará la posibilidad de remoción de los productos residuales combustibles, mientras que una disminución de cualesquiera de estos tres factores requerirá un aumento de uno o de los dos factores restantes a fin de mantener el mismo nivel de remoción del contaminante. La modificación más fácil y barata en un sistema de combustión para lograr una mejor eficiencia es aumentando la turbulencia del sistema, un aumento de la eficiencia de combustión a través de un incremento del tiempo de residencia implica un quemador de mayor dimensión lo que trae como consecuencia un aumento de los costos iniciales y finalmente las temperaturas altas sólo se pueden aumentar con

más combustible suplementario, lo que a su vez aumenta el costo de operación.

**-Incineración catalítica.**

Un quemador catalítico es un método que también se emplea cuando las concentraciones del gas residual son muy bajas. Como se sabe un catalizador acelera la rapidez con la que se lleva a cabo una reacción química sin que éste experimente un cambio químico. En el caso de los incineradores catalíticos los tiempos de residencia requeridos son mucho menores que los requeridos en las unidades de incineración térmica, del orden de pocas centésimas de segundos. En la incineración catalítica también se baja la temperatura de ignición.

La mayoría de los gases residuales que contienen contaminantes combustibles, procedentes de procesos industriales, están a una temperatura muy baja por lo que es necesario utilizar algún tipo de quemador de precalentamiento para llevar el gas residual hasta la temperatura en la que el catalizador es efectivo, esta temperatura es inferior a la temperatura de auto ignición para la incineración térmica.

Una sustancia catalítica debe de ser relativamente barata, de larga duración, capaz de funcionar a la temperatura requerida. Los lechos catalíticos pueden ser conformados por cintas, barras, cuentas y bolitas, sin importar cual sea la configuración específica del lecho éste debe de proveer al á

rea requerida de superficie catalítica y mantener una densidad uniforme a altas temperaturas, a fin de impedir la canalización y el corto circuito de la corriente gaseosa.

La incineración catalítica de los vapores tiene uso generalizado en los procesos que incluyen las estufas de secado de pinturas y esmaltes, marmitas de barnices, insuflación del asfalto y manufactura del anhídrido ftálico. La caída de presión a través de un incinerador catalítico es usualmente muy baja, por tanto, los costos de operación son normalmente bajos, con la excepción del costo de mantenimiento del catalizador, este costo depende de la naturaleza de los vapores. En algunos casos, deberán eliminarse del gas residual las partículas en suspensión antes de que entren al incinerador, ya que la deposición de estas partículas sobre la superficie del lecho catalítico disminuye el área disponible de la superficie para la acción catalítica, disminuyendo así la eficiencia del lecho y cortando su vida útil. Otro problema asociado con la incineración catalítica es el envenenamiento del lecho por contaminantes específicos presentes en el gas residual, algunos materiales como el hierro, plomo, silicio y fósforo acortan la vida útil de muchos catalizadores, también los compuestos de azufre restringen la eficacia de algunos catalizadores.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Albert A.L. "toxicología ambiental", Limusa, 1990
- American Association for Advancement of Science. Air conservation, Washington, 1965
- Bowman, C.T. " 14th International Symposium on Combustion, 1971
- Canacindra, Dirección de estudios Economicos, 1993
- Dryer, F. y colaboradores "Combust. Flame", 1971
- EPA, Environmental Protection Agency "Stationary Source Specific Methods", volume III, 1975-1985
- Handbook of Air Pollution, Detroit, Mich. American Industrial Association, 1968
- Hedley, A.B., "Factors Affecting the Formation of Sulfur Trioxide in Flame Gases", 1967
- Hesketh, H.E. "Air Pollution - A Moral Issue", All clear- The Magazine for Environmental Administration, Vol 2, No. 3 1970
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática, 1990
- Joint Army Navy Air Force (JANAF) Tablas termoquímicas, 1965
- Jost, W. y colaboradores "Física y Química", 1965
- Magill, P.L. Holden, F.R. Ackley, C., "Air Pollution Handbook", McGraw-Hill
- NAPCA "Air Quality Criteria for Particulate Matter", AP-19, HEW, 1969
- NAPCA. Air Quality Criteria for Carbon Monoxide", Washington, D.C. HEW, 1970
- NAPCA. Air Quality Criteria for Sulfur Oxides, AP-50 Washington, 1970
- NAPCA Air Quality Criteria for Photochemical, AP-63, Washington, D.C., 1970

- Octave Levenspiel, "Chemical reaction engineering", Wiley interscience
- Palmer, H.B., y J.M. Beers. "Combustion Technology, Nueva York, Academic Press, 1974
- Perry, R. H., y C.H Chilton, "Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill
- PICCA, Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica, 1990
- Robinson, E. y Robbins, R.C., "Emissions, Concentrations, and Fate of Gaseous Atmospheric Pollutants, 1972
- Seery, D.J., y C.T. Bowman. "Combustion Flame", 1970
- Stern, A.C., "Air Pollution", Vol 1, Secod edition, Academic Press, 1968
- Stern, A.C., Wohlers, H.C. " Fundamentals of Air Pollution", Secod edition, Academic Press, 1973
- Strauss W. Mainwaring S.J. "Air Polluton Control part 11", Wiley interscience, 1980
- Treybal, R.E., "Mass Transfer Operations", McGraw-Hill
- Wallace, F., "Reaction kenetics for chemical engineers", McGraw-Hill
- Wark Kennenth y Cecil F. Warner, "Air Pollution, its origin and control", Second ed., Harper & Row, 1980-1992