



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**GUIÓN EXPERIMENTAL DE PROTECCIÓN  
AMBIENTAL I  
DETERMINACIÓN DE BIÓXIDO DE AZUFRE EN  
GASES QUE FLUYEN POR UN CONDUCTO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:**

**SAÚL ADALBERTO PÉREZ CALTENCO**



**MÉXICO, D.F.**

**2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** PROFESOR: M. EN C. NÉSTOR NOÉ LÓPEZ CASTILLO  
**VOCAL:** PROFESOR: DR. ALFONSO DURAN MORENO  
**SECRETARIO:** PROFESOR: DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO  
**1ER. SUPLENTE:** PROFESOR: M. EN C. SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ  
**2° SUPLENTE:** PROFESOR: DRA. GEMA LUZ ANDRACA AYALA

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA. ÁREA: FISCOQUÍMICA ATMOSFÉRICA.**  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CIRCUITO DE LA INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA S/N, CIUDAD UNIVERSITARIA, DEL. COYOACÁN, 04510 MÉXICO D.F.

**ASESOR DEL TEMA:**

**DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO**

**SUSTENTANTE:**

**SAÚL ADALBERTO PÉREZ CALTENCO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. José Agustín García Reynoso, por su valiosa asesoría, apoyo y amabilidad en la realización de este trabajo.

A la Maestra Rafaela Gutiérrez Lara por su apoyo y amabilidad en la realización de este trabajo.

Al Ing. Alfredo Rodríguez Manjarrez, por su valioso apoyo técnico en la construcción del equipo de muestreo utilizado en esta tesis.

Al Ing. Adolfo Corona por su valioso apoyo técnico

Al Dr. Alfonso Duran Moreno, al M. En C. Néstor Noe López Castillo, a la Dra. Gema Luz Andraca y al M. En C. Sergio Adrián García González por sus correcciones y observaciones para mejorar este trabajo.

A mis profesores por brindarme su tiempo, su atención, por compartir sus conocimientos conmigo.

A la UNAM, por ser mi casa de estudios y permitirme desarrollarme plenamente.

A la Facultad de Química por darme todas las herramientas para ser un profesionalista

## DEDICATORIA

A mis padres Jaime y Luz María, quienes siempre han creído en mi y han sembrado su confianza en todo lo que soy, por su gran amor y sacrificio desde el momento en que me regalaron la vida, y desde ese momento me han guiado de la manera más incondicional a lo largo de mi vida, por enseñarme el valor de la vida, el trabajo y el respeto para con los demás; contar con la paciencia y la perseverancia, la responsabilidad y cariño para hacer las cosas bien, Sin ellos no hubiera sido posible la culminación de este sueño compartido.

Soy un ser afortunado por tenerlos en mi vida, alguien a quien imitar por toda su valentía y la forma de afrontar las adversidades que la vida nos presentó siempre, los llevo en mi corazón siempre.

A mi hermano Marcos, por ser siempre tan pasivo y arreglar las cosas de la manera más prudente, por estar conmigo en momentos malos y buenos, por compartir las alegrías y logros de los dos, por cuidarme en momentos difíciles, por querer siempre formar parte de mi vida y tomarme en cuenta dentro de la tuya.

A mi hermana Romi, por ser la pequeña a la que tengo que enseñar todo lo que aprendí de mis padres, por quererme siempre y ser tan cariñosa conmigo, por compartir tus sueños y desvelos conmigo y dejarme ser parte de tu vida.

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se desarrolló un guión experimental para la determinación de emisiones de una fuente puntual, el cual se implementará en el laboratorio de Protección Ambiental I, que se imparte en la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM.

Para realizar el trabajo se planteó una metodología que incluye el estudio de la problemática de la calidad del aire en la Ciudad de México y el estudio de las normas que regulan el muestreo en fuente. Con esto se llevó a cabo el diseño y construcción del tren de muestreo, que posteriormente se utilizó para el desarrollo del experimento.

El guión experimental es el resultado del análisis de las normas mexicanas de muestreo en fuente y su aplicación en el análisis de los gases de combustión que fluyen a través de la chimenea de la caldera que se encuentra en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM.

El guión experimental que se desarrolló muestra el procedimiento para determinar, concentración de agua, dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno y dióxido de azufre considerando el flujo de gas que pasa a través de sistema desarrollado.

Al implementar el guión experimental, sólo se aplicó el procedimiento para determinar, humedad y concentración de dióxido de azufre, con la finalidad que el tiempo de trabajo sea menor a 2 horas, tiempo que dura una sesión experimental de la materia de Protección Ambiental I.

El procedimiento para determinación de concentración de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno se deja para que se pueda plantear otra sesión experimental de la materia Protección Ambiental I.

Los resultados obtenidos con el muestreo en fuente muestran que la concentración de  $\text{SO}_2$  en el gas de combustión es menor a 10 ppm, valor mínimo de detección del sistema implementado, por lo que la emisión de  $\text{SO}_2$  de la caldera está dentro del rango que permite las normas oficiales mexicanas, el cual es 550 ppm de volumen, corroborando con esto que el Diesel de Pemex, utilizado para la combustión de la caldera del laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM es de ultra bajo azufre, como muestra la especificación de Pemex, donde menciona que la concentración de azufre es menor a 500 mg/kg.

## ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>1</b>
OBJETIVO.....	2
METAS.....	2
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>4</b>
<b>GENERALIDADES</b> .....	<b>5</b>
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	5
CONTAMINANTES CRITERIO .....	6
<i>Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)</i> .....	6
<i>Monóxido de carbono (CO)</i> .....	7
<i>Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</i> .....	8
<i>Partículas suspendidas (PM<sub>x</sub>)</i> .....	9
<i>Plomo (Pb)</i> .....	10
<i>Ozono (O<sub>3</sub>)</i> .....	11
CONTAMINACIÓN POR FUENTES PUNTUALES.....	11
MUESTREO EN FUENTE COMO HERRAMIENTA PARA REALIZAR UN INVENTARIO DE EMISIONES.....	13
EMISIONES LÍMITES MÁXIMAS Y NORMAS OFICIALES.....	13
MÉTODOS DE MUESTREO .....	15
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>18</b>
<b>MÉTODO</b> .....	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>21</b>
<b>DESARROLLO DEL GUIÓN EXPERIMENTAL</b> .....	<b>22</b>
REVISIÓN DE LAS NORMAS.....	22
DISEÑO DEL TREN DE MUESTREO .....	23
PROCURA.....	29
CONSTRUCCIÓN DEL TREN DE MUESTREO .....	33
<i>Pruebas de hermeticidad</i> .....	37
<i>Pruebas de flujo del equipo</i> .....	37
EQUIPO ORSAT.....	38
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>40</b>
<b>RESULTADOS DEL GUIÓN EXPERIMENTAL</b> .....	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO 5.</b> .....	<b>43</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>44</b>
CONCLUSIONES.....	44
RECOMENDACIONES PARA EL GUIÓN EXPERIMENTAL.....	46
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>47</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>51</b>
ANEXO 1. COTIZACIÓN.....	52
ANEXO 2. GUIÓN EXPERIMENTAL .....	54

GUIÓN VII. DETERMINACIÓN DE BIÓXIDO DE AZUFRE EN GASES QUE FLUYEN POR UN CONDUCTO.....	54
<i>Objetivo académico:</i> .....	54
<i>Problema:</i> .....	54
<i>Introducción</i> .....	54
<i>Materiales y reactivos</i> .....	55
<i>Aparatos, instrumentos y equipos:</i> .....	56
<i>Desarrollo experimental:</i> .....	56
<i>Cuestionario:</i> .....	68
<i>Indicaciones:</i> .....	68
<i>Apéndice A del guión experimental</i> .....	71
<i>Determinación del contenido de humedad en el gas:</i> .....	71
<i>Apéndice B del guión experimental</i> .....	72
<i>Determinación de la concentración de CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub> en el gas</i> .....	72
<i>Apéndice C del guión experimental</i> .....	73
<i>Determinación de SO<sub>2</sub> en el gas</i> .....	73
<i>Apéndice D del guión experimental</i> .....	76
<i>Determinación del flujo en el sistema:</i> .....	76
<i>Apéndice E del guión experimental</i> .....	77
<i>Hoja de campo</i> .....	77
ANEXO 3. EMISIÓN TEÓRICA DE SO <sub>2</sub> DE LA CALDERA .....	79
<i>Datos técnicos de la caldera:</i> .....	79
<i>Propiedades del Diesel:</i> .....	79
<i>Base de cálculo:</i> .....	80
<i>Cálculos:</i> .....	80
<i>Flujo de bióxido de azufre en el gas de combustión:</i> .....	80
<i>Flujo del gas de combustión</i> .....	81
<i>Capacidad térmica de la caldera:</i> .....	84
<i>Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en ppmV (mL/m<sup>3</sup>):</i> .....	84
<i>Emisión teórica de SO<sub>2</sub> en kg/10<sup>6</sup> kcal:</i> .....	84
ANEXO 4. CONCENTRACIÓN EXPERIMENTAL DE SO <sub>2</sub> EN EL GAS DE COMBUSTIÓN QUE EMITE LA CALDERA .....	85
<i>Experimento 1</i> .....	85
<i>Datos del tren de muestreo:</i> .....	85
<i>Determinación del contenido de humedad</i> .....	86
<i>Determinación de la densidad normal del gas</i> .....	87
<i>Determinación de SO<sub>2</sub> en el gas:</i> .....	87
<i>Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en ppmV (mL/m<sup>3</sup>):</i> .....	89
<i>Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en kg/10<sup>6</sup> kcal:</i> .....	89
<i>Datos del tren de muestreo:</i> .....	90
<i>Determinación del contenido de humedad</i> .....	91
<i>Determinación de la densidad normal del gas</i> .....	92
<i>Determinación de SO<sub>2</sub> en el gas:</i> .....	92
<i>Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en ppmV (mL/m<sup>3</sup>):</i> .....	94
<i>Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en kg/10<sup>6</sup> kcal:</i> .....	94
ANEXO 5. DISEÑO DEL MEDIDOR DE ORIFICIO .....	95
<i>Diseño del tubo venturi</i> .....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN A LA ATMÓSFERA DE LOS EQUIPOS DE COMBUSTIÓN EN LA ZMCM. ....	15
TABLA 2. RANGO DE FLUJO DEL TREN DE MUESTREO .....	38
TABLA 3. HUMEDAD EN EL GAS DE COMBUSTIÓN .....	41
TABLA 4. CONCENTRACIÓN DE BIÓXIDO DE AZUFRE EN EL GAS DE COMBUSTIÓN.....	42
TABLA 5. COTIZACIÓN DE LOS ACCESORIOS QUE CONFORMAN TREN DE MUESTREO .....	52
TABLA 6 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS EN EL ÁREA TRANSVERSAL PARA CONDUCTOS CIRCULARES .....	70
TABLA 7 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. RESULTADOS PARTE 1 DEL EXPERIMENTO.....	77
TABLA 8 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. RESULTADOS DE LA PARTE 2 DEL EXPERIMENTO.....	78
TABLA 9 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. RESULTADOS DE LA TITULACIÓN .....	78
TABLA 10. FLUJO MÁXIMO Y MÍNIMO PARA DIFERENTES DIÁMETROS DE GARGANTA DEL TUBO VENTURI .....	99

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. TREN DE MUESTREO. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GAS DE COMBUSTIÓN.....	24
ILUSTRACIÓN 2. TREN DE MUESTREO. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SO <sub>2</sub> EN EL GAS DE COMBUSTIÓN.....	25
ILUSTRACIÓN 3. TREN DE MUESTREO (ORSAT). DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> , CO Y O <sub>2</sub> EN EL GAS DE COMBUSTIÓN .....	28
ILUSTRACIÓN 4. GASÓMETRO.....	29
ILUSTRACIÓN 5. TERMÓMETRO BIMETÁLICO.....	30
ILUSTRACIÓN 6. VACUÓMETRO.....	30
ILUSTRACIÓN 7. MANÓMETRO DIFERENCIAL.....	31
ILUSTRACIÓN 8. IMPACTORES.....	31
ILUSTRACIÓN 9. Sonda, tubo de Pitot y termopar.....	32
ILUSTRACIÓN 10. BOQUILLA.....	32
ILUSTRACIÓN 11. BOMBA DE VAÍO DE ACEITE.....	32
ILUSTRACIÓN 12. EQUIPO ORSAT .....	33
ILUSTRACIÓN 13. EQUIPO DE MEDICIÓN DE FLUJO.....	34
ILUSTRACIÓN 14. EQUIPO DE MEDICIÓN DE FLUJO CON SOPORTE .....	35
ILUSTRACIÓN 15. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO .....	36
ILUSTRACIÓN 16. TREN DE MUESTREO PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y SO <sub>2</sub> .....	36
ILUSTRACIÓN 17. EQUIPO ORSAT PARA DETERMINACIÓN DE CO, CO <sub>2</sub> Y O <sub>2</sub> .....	39
ILUSTRACIÓN 18 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. TREN DE MUESTREO. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL GAS DE COMBUSTIÓN.....	57
ILUSTRACIÓN 19 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. EQUIPO ORSAT. TREN DE MUESTREO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> , CO Y O <sub>2</sub> EN EL GAS DE COMBUSTIÓN.....	59
ILUSTRACIÓN 20 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. TREN DE MUESTREO: DETERMINACIÓN LA CONCENTRACIÓN DE SO <sub>2</sub> EN EL GAS DE COMBUSTIÓN.....	64
ILUSTRACIÓN 21 DEL GUIÓN EXPERIMENTAL. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE PUNTOS .....	69
ILUSTRACIÓN 22. TUBO VENTURI.....	95

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo desarrolló el guión experimental para la determinación de emisiones de una fuente puntual. Para la realización del mismo se estudian y presentan las generalidades sobre contaminación ambiental que sirven de base y fundamento para la evaluación inicial de la problemática de la calidad del aire en la Ciudad de México, identificando los principales contaminantes emitidos y las cantidades aproximadas emitidas, a partir de lo cual se logran definir los parámetros de diseño del guión experimental.

## **JUSTIFICACIÓN**

Con base al Censo Económico 2009 del INEGI, a nivel nacional existen alrededor de 328,000 industrias manufactureras, de las cuales aproximadamente el 19.5% se encuentran ubicadas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), 8.1% en el Distrito Federal y 11.4% en el Estado de México. El inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM tiene registradas 5,146 industrias que presentan emisiones hacia la atmósfera. 2,581 ubicadas en el Distrito Federal y 2,565 en el Estado de México, entre las que destacan la industria química y de transformación.

Estas industrias denominadas fuentes puntuales emiten ciertos contaminantes nocivos para la salud humana, entre los que destacan el monóxido de carbono, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.

Por tal motivo se necesitan elaborar programas de gestión de la calidad del aire, que permitan conocer la distribución de las emisiones de contaminantes a la atmósfera y los sectores con mayor aporte de emisiones, evaluar sitios problemáticos y planear la ubicación de fuentes emisoras.

El Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM registra que anualmente en la ZMVM se emiten 6,704 toneladas de óxidos de azufre, de los cuales 3,375 toneladas (50.3%) corresponden a las fuentes puntuales. De monóxido de carbono se emiten 1, 568,428 toneladas, de las cuales 6,961 toneladas (0.4%) son por fuentes puntuales. Los óxidos de nitrógeno son emitidos 188,087 toneladas, de los cuales 20,094 toneladas (10.7%) corresponden a las fuentes puntuales.

En la actualidad, la Facultad de Química de la UNAM, imparte la materia de Protección Ambiental I en la carrera de Ingeniería Química, con la finalidad de que los alumnos refuercen conocimientos teóricos sobre la contaminación atmosférica, así como conocer el marco jurídico, legal y las normatividades vigentes asociadas a la contaminación atmosférica; también tiene como finalidad poner en práctica las técnicas analíticas más utilizadas para la evaluación y control de la contaminación por emisiones gaseosas.

Considerando lo anterior, en el presente trabajo se proponen los siguientes puntos:

## **Objetivo**

Desarrollar un guión experimental para determinar las emisiones a la atmósfera de contaminantes del proceso de combustión en fuentes puntuales.

## **Metas**

- Revisión de la normatividad.
- Diseño del tren de muestreo.
- Procura de accesorios y equipos.
- Construcción del tren de muestreo.

- Pruebas del tren de muestreo.
- Desarrollo del guión experimental.
- Pruebas del guión experimental.

# **CAPÍTULO 1**

# GENERALIDADES

## Contaminación ambiental en la Ciudad de México

En la zona metropolitana del valle de México (ZMVM) se han identificado ciertos contaminantes nocivos para la salud de los seres humanos; estos contaminantes denominados criterio son: el monóxido de carbono, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno, las partículas suspendidas ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y el ozono. Adicionalmente también se miden los hidrocarburos por su contribución en la formación de ozono.

Los daños a la salud humana, ocasionados por los contaminantes criterio varían con la intensidad y la duración de la exposición a éstos. El ozono, los óxidos de nitrógeno y de azufre, así como las partículas, producen irritación de ojos y dolor de cabeza, además de ocasionar serias consecuencias en el sistema respiratorio. Mientras que el monóxido de carbono tiende a desplazar el oxígeno de la sangre, produciendo daños cardiovasculares y al sistema neurológico.

En el año 2008 se estimaron en la ZMVM 1.56 millones de toneladas de CO, 188 mil toneladas anuales de NOx, 6074 toneladas anuales de SO<sub>2</sub><sup>1</sup>. En conjunto, la industria de la ZMVM emite alrededor de 169, 798 toneladas al año de contaminantes, de los cuales el 12% de NOx, 4% de CO, 2% de SO<sub>2</sub> y 3% de PM<sub>10</sub>.

El Distrito Federal concentra el 50.2% (2581) de las industrias ubicadas en la ZMVM; dentro de éstas, 1472 son de jurisdicción local<sup>2</sup>. Sin embargo, las industrias federales son las que generan mayores emisiones. En el Distrito Federal la delegación de Iztapalapa cuenta con el mayor número de industrias (540), seguida de Azcapotzalco (422) y Gustavo A. Madero (300); estas tres

---

<sup>1</sup> (Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM, 2008)

<sup>2</sup> (Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM, 2008)

delegaciones concentran casi la mitad de la industria del Distrito Federal y generan la mayor parte de los contaminantes de la entidad <sup>(1)</sup>.

## **Contaminantes criterio**

Los contaminantes del aire se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población<sup>3</sup>. Los contaminantes criterio son:

- Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- Monóxido de carbono (CO).
- Bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).
- Material particulado (PM<sub>x</sub>).
- Plomo (Pb).
- Ozono (O<sub>3</sub>).

## **Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

El bióxido de azufre es un gas incoloro que se produce especialmente de la reacción de oxígeno (O<sub>2</sub>) con azufre (S<sub>2</sub>) durante la combustión de hidrocarburos con cierta concentración de azufre (S<sub>2</sub>). Su concentración está relacionada con el grado de impureza del combustible. Se produce además en procesos industriales como la producción de ácido sulfúrico y la producción de pape<sup>4</sup>.

La exposición a SO<sub>2</sub> en valores por encima de los recomendados disminuye la función pulmonar, agrava enfermedades respiratorias ya existentes y reduce la

---

<sup>3</sup> (Instituto Nacional de Ecología, 2009)

<sup>4</sup> (Instituto Nacional de Ecología, 2009)

capacidad pulmonar para liberarse de las partículas que ingresan al tracto respiratorio. La exposición de SO<sub>2</sub> a corto plazo en altas concentraciones puede irritar el tracto respiratorio y congestionar los conductos bronquiales.

La Organización Mundial de Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración de 20 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas<sup>5</sup>. La norma oficial mexicana NOM-022-SSA-1993 establece como límite de protección a la salud, una concentración de <sup>6</sup>0.13 ppm (341 µg/m<sup>3</sup>) promedio de 24 horas, una vez al año, y 0.03 ppm (79 µg/m<sup>3</sup>) en una media aritmética anual para la protección de la población<sup>7</sup>.

## **Monóxido de carbono (CO)**

Es un gas incoloro, inodoro, insípido y tóxico. Es producto de la combustión incompleta de material que contiene carbono y de algunos procesos industriales. En un proceso de combustión, la falta de oxígeno, la temperatura de flama y el tiempo de residencia del material en la cámara de combustión da a lugar a la producción de CO en lugar de CO<sub>2</sub><sup>8</sup>.

Esos parámetros se tienen mejor controlados en fuentes fijas de combustión que en vehículos automotores, por lo que alrededor de 70% de emisiones de CO provienen de las fuentes móviles.

Entre los efectos que genera la exposición al CO se encuentra la disminución de transporte de O<sub>2</sub> en la corriente sanguínea. El CO compite con el O<sub>2</sub> por los sitios activos de la hemoglobina, una vez adherido el poco oxígeno que llega a adsorberse es más difícil desprender en presencia del monóxido, limitando así la oxigenación celular.

---

<sup>5</sup> (Organización Mundial de la Salud, 2012)

<sup>6</sup> NOM 022-SSA-1993, Definición: 1 ppm = 2620 µg

<sup>7</sup> (Norma oficial mexicana NOM-022-SSA-1993, 1993)

<sup>8</sup> (Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM, 2008)

La Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA-1993 establece como límite de protección a la salud, una concentración de 11 ppm ( $12,595 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) promedio de 8 horas, la cual puede rebasarse 1 vez al año<sup>9</sup>.

## **Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

Es un gas de color rojo pardo, olor desagradable, pertenece a los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) término comúnmente utilizado para referirse a un grupo de gases altamente reactivos, que contienen diferentes cantidades de oxígeno y nitrógeno<sup>10</sup>.

Los óxidos de nitrógeno se forman cuando un combustible es quemado a altas temperatura y/o cuando éste contiene compuestos nitrogenados<sup>11</sup>. Las principales fuentes de emisión de los óxidos de nitrógeno son los vehículos automotores, plantas de generación eléctrica e industrias que queman combustibles.

La exposición al dióxido de nitrógeno incrementa la presión arterial y puede ocasionar preclampsia. El aumento progresivo en la exposición de NO<sub>2</sub> puede producir problemas de percepción olfativa, molestias respiratorias, dolores respiratorios agudos y edema pulmonar.

La Organización Mundial de Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de una hora y  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una media aritmética anual para la protección de la población<sup>12</sup>. La Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993 establece como límite de protección a la salud, una concentración de 0.21 ppm ( $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en una hora una vez al año<sup>13</sup>.

---

<sup>9</sup> (Norma oficial mexicana NOM-021-SSA1-1993, 1993)

<sup>10</sup> (Calixto Flores, Herrera Reyes, & Hernández Guzmán, 2008)

<sup>11</sup> (Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM, 2008)

<sup>12</sup> (Organización Mundial de la Salud, 2012)

<sup>13</sup> (Norma oficial mexicana NOM-023-SSA1-1993, 1993)

## Partículas suspendidas (PMx)

Es una mezcla compleja y variada de partículas sólidas y líquidas, que se encuentran suspendidas en el aire. Algunas clasificaciones del material particulado son: partículas totales, partículas primarias y secundarias, partículas suspendidas totales (PST), partículas con diámetro aerodinámico menor que 10 micras ( $PM_{10}$ ) y partículas con diámetro menor que 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ )<sup>14</sup>.

La composición química del material particulado abarca un amplio rango de especies incluyendo compuestos orgánicos, óxidos de silicio, sulfatos, nitratos y amonio.

Algunos de los componentes del material particulado están asociados con daños específicos a la salud, principalmente algunos compuestos orgánicos, metales pesados y una variedad de especies químicas. Como parte de esta mezcla compleja de agentes químicos se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos, que son considerados como indicadores de enfermedades como cáncer. También se ha encontrado que las partículas  $PM_{10}$  contienen altas concentraciones de elementos tóxicos.

La Organización Mundial de Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración de  $PM_{10}$  de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas y  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una media aritmética anual para la protección de la población<sup>15</sup>. La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 establece que la concentración de partículas menores de 10 micras como contaminante atmosférico, no deben rebasar el límite permisible de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en 24 horas una vez al año y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible<sup>16</sup>.

---

<sup>14</sup> (Instituto Nacional de Ecología, 2009)

<sup>15</sup> (Organización Mundial de la Salud, 2012)

<sup>16</sup> (Norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-1993, 1993)

La Organización Mundial de Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración  $PM_{2.5}$  de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas y  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una media aritmética anual para la protección de la población. La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 establece que la concentración de partículas menores de 2.5 micras como contaminante atmosférico, no deben rebasar el límite permisible de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en 24 horas una vez al año y  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible<sup>17</sup>.

## **Plomo (Pb)**

Es un metal pesado de origen natural. La cantidad de este metal liberada al ambiente se debe en su mayoría a la producción del metal, pues aproximadamente la mitad del plomo que se produce se libera como contaminante<sup>18</sup>.

El plomo es un contaminante tóxico, debido a que es muy difícil de mover del cuerpo, ocasionando que se acumule en varios órganos y pueda dañar el sistema nervioso central. La intoxicación aguda produce síntomas como diarrea, vómito, cólico, convulsiones y dolor de cabeza. Los niños con altos niveles de plomo en la sangre presentan desórdenes en su comportamiento social y un desarrollo mental restringido con efectos neuroconductuales irreversibles.

La Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993 establece que la concentración de plomo como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en un periodo de tres meses promedio aritmético, como protección a la salud de la población<sup>19</sup>.

---

<sup>17</sup> (Norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-1993, 1993)

<sup>18</sup> (Calixto Flores, Herrera Reyes, & Hernández Guzmán, 2008)

<sup>19</sup> (Norma oficial mexicana NOM-026-SSA1-1993, 1994)

## **Ozono (O<sub>3</sub>)**

Es un gas azulado, alótropo del oxígeno, poco denso y de poder oxidante. El ozono se produce de forma natural durante las tormentas eclécticas por el paso de descargas a través de la atmósfera, que se encuentra en la estratósfera llamada capa de ozono<sup>20</sup>.

El ozono es un contaminante secundario formado por una compleja serie de reacciones químicas de contaminantes primarios o precursores en presencia de oxígeno atmosférico y luz solar.

Los principales efectos a la salud están asociados con el daño que ocasiona a las células en las vías respiratorias causando entre otros problemas, inflamación y reducción de la capacidad del aparato respiratorio. Las personas que son expuestas presentan síntomas como irritación ocular, de nariz y garganta, tos, dificultad para respirar, opresión en el pecho y náusea.

La Organización Mundial de Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración O<sub>3</sub> de 100 µg/m<sup>3</sup> promedio de 8 horas para la protección de la población<sup>21</sup> La Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993 establece que la concentración de ozono, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo de 0.11 ppm (216µg/m<sup>3</sup>) en una hora, una vez al año, en un periodo de tres años, como protección a la salud de la población.

## **Contaminación por fuentes puntuales**

Las fuentes puntuales son grandes fuentes estacionarias de emisiones a la atmósfera tales como fábricas, centrales eléctricas, fundiciones, refinerías y plantas químicas.

---

<sup>20</sup> (Calixto Flores, Herrera Reyes, & Hernández Guzmán, 2008)

<sup>21</sup> (Organización Mundial de la Salud, 2012)

Para el año 2008, en la ZMVM, se tienen registrados 5146 industrias (fuentes puntuales) de las cuales, 2581 se ubican en el Distrito Federal, mientras que el resto corresponden al Estado de México<sup>22</sup>.

La principal contribución de emisiones por las fuentes puntuales está registrada en el Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM 2008, de la siguiente manera:

- Emisiones de  $PM_{10}$  se concentran en cuatro subsectores: productos minerales no metálicos, productos alimenticios, bebidas y tabaco, sustancias químicas y productos metálicos. Estos aportan 3891 toneladas por año, lo cual representa el 78% de las emisiones de las fuentes puntuales.
- Emisiones de  $PM_{2.5}$  se concentran en los sectores de generación de energía y el sector industrial de productos minerales no metálicos y contribuyen con 479 toneladas anuales.
- Emisiones de bióxido de azufre ( $SO_2$ ) se concentran en los subsectores: Productos minerales no metálicos, industria química, industria del papel y productos, así como la industria metálica. Estos aportan 2677 toneladas por año.
- Emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_2$ ) se concentra en el giro de generación de energía eléctrica con una aportación de 10975 toneladas por año.

---

<sup>22</sup> (Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM, 2008)

## **Muestreo en fuente como herramienta para realizar un inventario de emisiones**

El muestreo de fuentes es una herramienta principal para obtener datos presentes en el inventario de emisión de contaminantes; tales como emisiones horarias, emisiones anuales, emisiones de fuentes puntuales por rama industrial y emisiones por entidad y jurisdicción.

El inventario de emisión de contaminantes es de utilidad para las autoridades ambientales, encargadas de controlar la calidad del aire; así como un apoyo a las investigaciones dedicadas a desarrollar proyectos ambientales. Esto se debe a que el inventario proporciona datos como la calidad del aire y la cantidad de agentes contaminantes que se emiten por un periodo de tiempo. Con esto se puede saber el deterioro del aire.

## **Emisiones límites máximas y Normas Oficiales**

Parte de los contaminantes que se emiten por las fuentes puntuales se deben a la quema de combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos por medio del uso de equipos de calentamiento directo o indirecto por combustión y equipos de generación eléctrica que utilizan la tecnología de ciclo combinado.

Por tal motivo, en México existen normas que regulan las emisiones de los contaminantes que son producto del proceso de combustión. Se hace énfasis en las Normas Oficiales, presentando una breve descripción.

Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994, Contaminación Atmosférica-Fuentes Fijas.- Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

La norma establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión; así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas suspendidas totales, óxidos de nitrógeno y bióxido de azufre de los equipos de combustión de las fuentes fijas de la ZMCM están establecidos en la tabla 1.

**Tabla 1. Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de los equipos de combustión en la ZMCM.**

Capacidad del equipo de combustión MJ/h	Tipo de combustible empleado	Partículas suspendidas totales		Bióxido de azufre		Óxidos de nitrógeno	
		mg/m <sup>3</sup>	kg/10 <sup>6</sup>	ppm V	kg/10 <sup>6</sup>	ppm V	kg/10 <sup>6</sup>
			Kcal		Kcal		Kcal
Hasta 5,250	Combustóleo o Gasóleo	NA	NA	550	2.04	NA	NA
	Otros Líquidos	NA	NA	550	2.04	NA	NA
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA
De 5,250 a 43,00	Líquidos	75	0.106	550	2.04	190	0.507
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	190	0.486
De 43,000 a 11,000	Líquidos	60	0.085	550	2.04	110	0.294
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	110	0.281
Mayor de 110,000	Sólidos	60	0.09	550	2.16	110	0.309
	Otros Líquidos	60	0.085	550	2.04	110	0.294
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	110	0.281

NA: No Aplica

ppm V: partes por millón de volumen

## Métodos de Muestreo

Existe en la literatura la descripción de diferentes métodos de muestreo para determinación de concentración de contaminantes en los gases que fluyen por un conducto, así como la descripción de los equipos de muestreo para cada método. Se hace énfasis en los métodos y equipos de muestreo descritos en las Normas Mexicanas presentando una breve descripción.

- NMX-AA-009-1993-SCFI, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de Flujo de Gases en un Conducto por Medio de Tubo de Pitot.

La norma describe el procedimiento para determinar el flujo de gases en un conducto por medio del tubo Pitot, aplicable para velocidades de gases superiores a 3 m/s y conductos con diámetros internos iguales o mayores a 10 cm.

- NMX-AA-010-SCFI-2001, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de la Emisión de Partículas Contenidas en los Gases que Fluyen por un Conducto- Método Isocinético.

La norma describe el procedimiento para determinar por método isocinético la emisión y concentración de partículas totales contenidas en los gases que fluyen por un conducto. Es parte fundamental para el desarrollo de pruebas que se efectúan en fuentes fijas.

- NMX-AA-035-1976, Determinación de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.

La norma describe el procedimiento para determinar por absorción las proporciones de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno contenidos en los gases de combustión

- NMX-AA-054-1978, Contaminación Atmosférica – Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto. – Método gravimétrico.

La norma establece el método gravimétrico para determinar la humedad contenida en los gases que fluyen por un conducto.

- NMX-AA-055-1979, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto

La norma establece el procedimiento para la determinación de la concentración y de la emisión de bióxido de azufre en gases que fluyen a través de un conducto.

## **CAPÍTULO 2**

## MÉTODO

Para la realización del presente proyecto se desarrollaron las siguientes actividades:

- Revisión de las normas

Se realizó el análisis de la literatura, sobre métodos y normas que definen el procedimiento para analizar las fuentes puntuales.

- Diseño del tren de muestreo

Con base al análisis de las normas y métodos, se identificaron los equipos necesarios para llevar a cabo el muestreo en fuente, así como los elementos que constituyen dichos equipos para posteriormente realizar la procura y construcción del equipo.

- Procura

Una vez que se tiene la lista de elementos que constituyen el equipo de muestreo, se realiza una cotización y posteriormente la compra del equipo.

- Desarrollo del guión experimental

Con base al método de muestreo y las normas que definen el monitoreo en fuente, se desarrolló el guión experimental para poder realizar el muestreo de gases en la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química para determinar las emisiones de SO<sub>2</sub>.

El análisis de concentración SO<sub>2</sub> en el presente trabajo, se fundamenta en el método de determinación del contenido de bióxido de azufre por medio del peróxido de hidrógeno y titulación con perclorato de bario.

En este método, se hace pasar una cantidad conocida de volumen del gas a través de una solución diluida de peróxido de hidrógeno, el azufre se oxida de S(IV) ( $\text{SO}_2$  disuelto) a S(VI) (ion sulfato del  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de forma instantánea.

El ion sulfato presente en la solución, es titulado con perclorato de bario para producir sulfato de bario, usando torino como indicador. La titulación se hace en solución alcohólica, para reducir la solubilidad del sulfato de bario formado.

El bario reacciona preferentemente con el ion sulfato, una vez que todo el ion sulfato ha reaccionado, el bario reacciona con el indicador para formar un complejo de bario generando un cambio de color en la solución.

El color que indica el fin de la titulación con el torino no es fácil de observar, por lo que se necesita de otro indicador adicional que permita ver un color más fuerte como es el azul de metileno.

# **CAPÍTULO 3**

## DESARROLLO DEL GUÓN EXPERIMENTAL

### Revisión de las normas

El método estándar de monitoreo en fuente de gases que fluyen por una chimenea está basado en las normas mexicanas:

- NMX-AA-009-1993-SCFI, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de Flujo de Gases en un Conducto por Medio de Tubo de Pitot
- NMX-AA-010-SCFI-2001, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de la Emisión de Partículas Contenidas en los Gases que Fluyen por un Conducto – Método Isocinético.
- NMX-AA-035-1976, Determinación de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.
- NMX-AA-054-1978, Contaminación Atmosférica- Determinación del Contenido de Humedad en los Gases que Fluyen por un Conducto-Método Gravimétrico.
- NMX-AA-055-1979, Contaminación Atmosférica-Fuentes Fijas- Determinación de Bióxido de Azufre en Gases que Fluyen por un Conducto.

Este método especifica procedimientos y equipamiento que permite, dentro de ciertos límites, tomar muestras representativas para la determinación manual de concentraciones de compuestos contaminantes emitidos por gases que fluyen por una chimenea. La aplicación experimental en este proyecto se limita a la determinación de bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y la humedad del gas ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

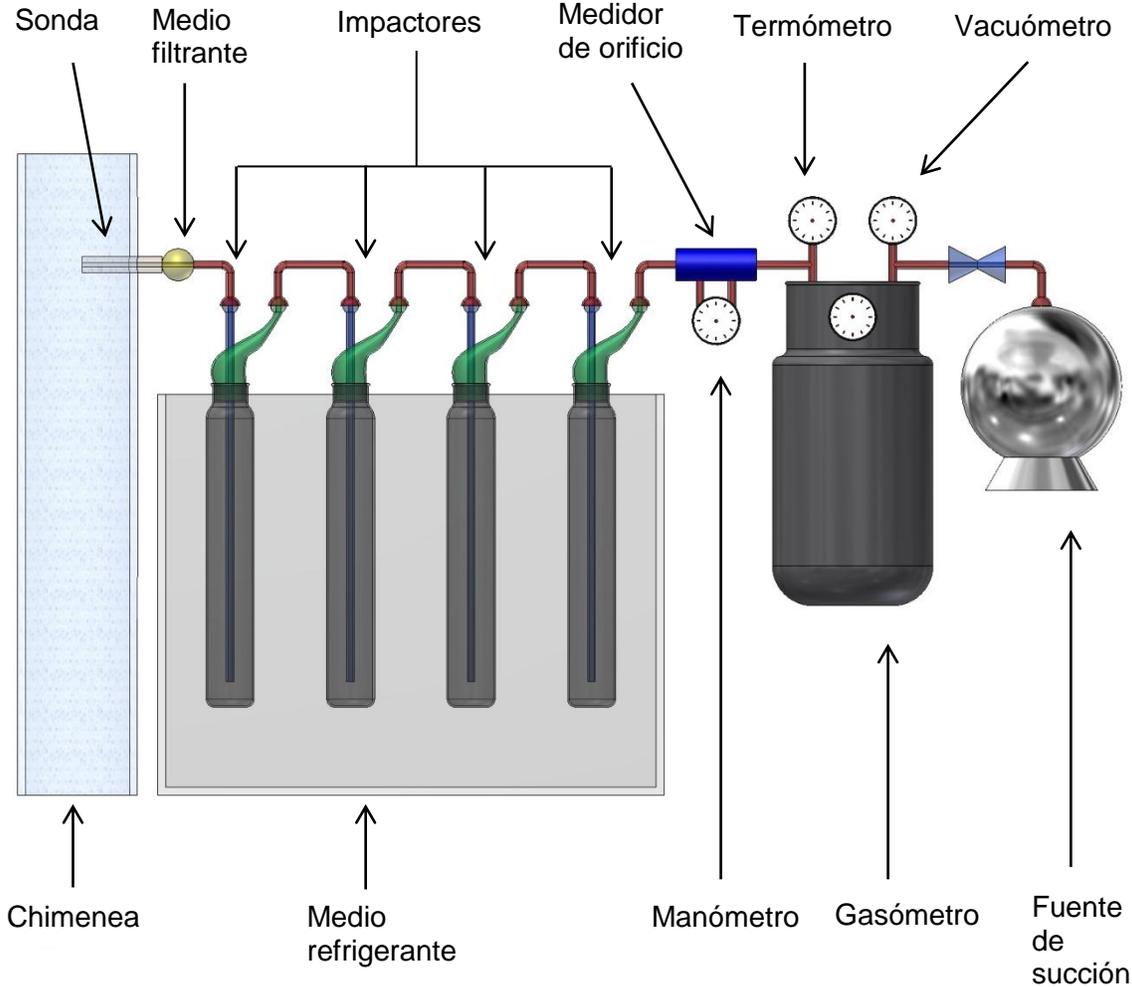
## **Diseño del tren de muestreo**

El equipo de muestreo de gases tiene como objetivo cuantificar la proporción de un componente presente en el gas de combustión que fluye por un conducto; por medio de la toma de una muestra de gas y cuantificación del volumen, flujo, temperatura y presión de la muestra.

Para este proyecto se considera el equipo de muestreo detallado en las siguientes normas mexicanas:

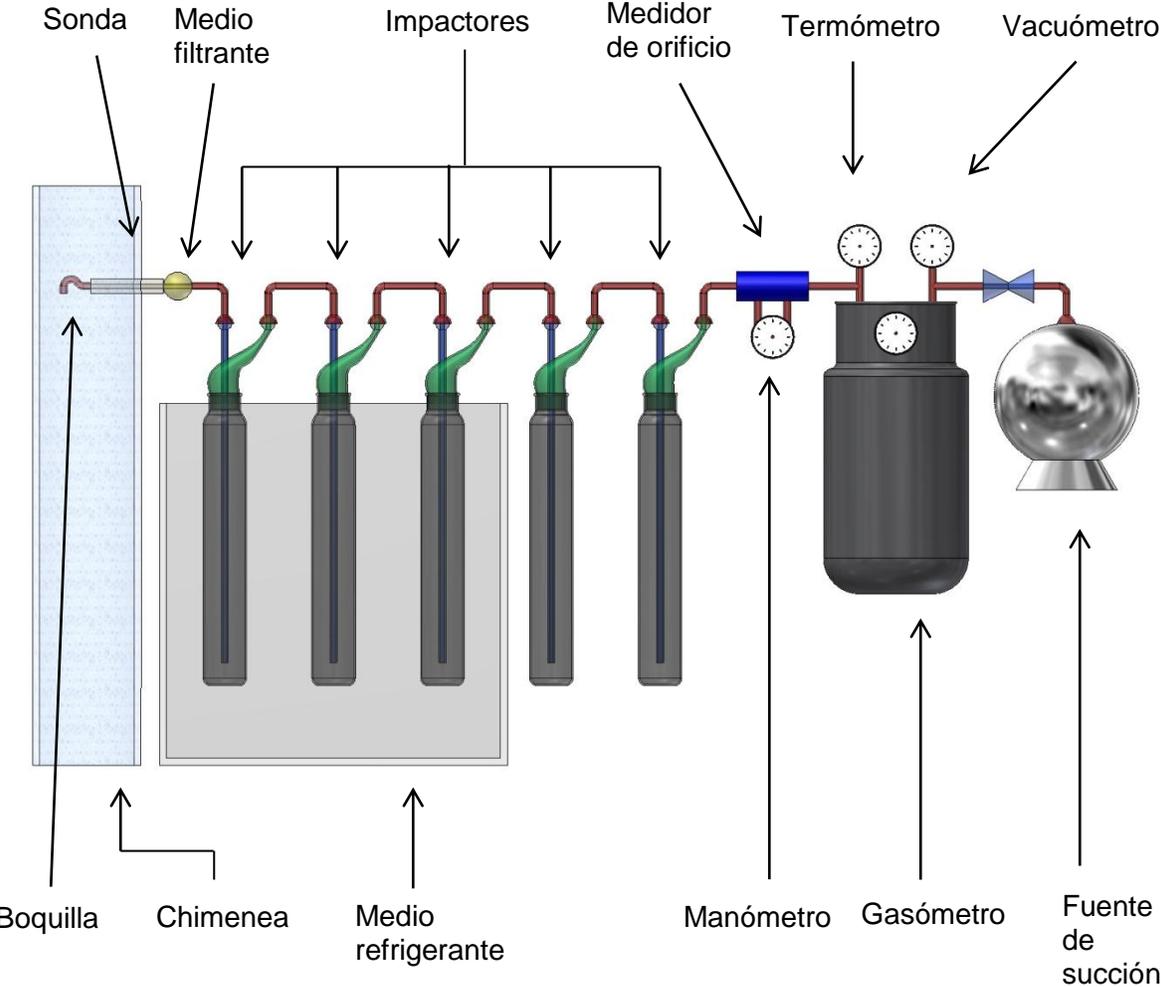
- NMX-AA-010-SCFI-2001, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de la Emisión de Partículas Contenidas en los Gases que Fluyen por un Conducto- Método Isocinético.
- NMX-AA-035-1976, Determinación de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.
- NMX-AA-054-1978, Contaminación Atmosférica- Determinación del Contenido de Humedad en los Gases que Fluyen por un Conducto-Método Gravimétrico.
- NMX-AA-055-1979, Contaminación Atmosférica-Fuentes Fijas- Determinación de Bióxido de Azufre en Gases que Fluyen por un Conducto.

El equipo para determinar el la humedad del gas basado en la norma mexicana NMX-AA-054-1978 se muestra en la ilustración 1.



**Ilustración 1. Tren de muestreo. Determinación del contenido de humedad del gas de combustión**

El equipo de muestreo para determinar el SO<sub>2</sub> en un gas basado en la norma mexicana NMX-AA-055-1979 se muestra en la ilustración 2.



**Ilustración 2. Tren de muestreo. Determinación de la concentración de SO<sub>2</sub> en el gas de combustión**

Las normas NMX-AA-054-1978 y NMX-AA-055-1979 detallan los elementos que conforman el tren de muestreo para la determinación de humedad y de SO<sub>2</sub> respectivamente. Estos elementos se describen a continuación.

- Fuente de succión

Bomba de vacío capaz de inducir el volumen de gas requerido a través del tren de muestreo según el análisis a realizar (1.2 m<sup>3</sup>/h para las normas NMX-AA-054-1978 y NMX-AA-010-SCFI-2001); y 0.002 m<sup>3</sup>/min para la norma NMX-AA-055-1979), provisto de un sistema de válvulas de precisión para regular el flujo de los gases y capaz de levantar una presión de cuando menos 15 in Hg.

- Medidor de volumen

Medidor de gas seco (gasómetro) con una capacidad de 0.0028 m<sup>3</sup>/rev (0.1 ft<sup>3</sup>/rev) con divisiones de escala hasta 0.003 cm<sup>3</sup> (0.001 ft<sup>3</sup>) con sensibilidad mínima de ± 1% del volumen medido.

- Medidor de temperatura

Termómetro bimetalico de carátula, con un rango de 0 a 120 °C.

- Vacuómetro

Debe cumplir con un rango de 0 a 30 in Hg.

- Manómetro

Debe cumplir con la escala mínima de 249.08 Pa (1 in de agua), con sensibilidad de 2.4908 Pa (±0.001 inH<sub>2</sub>O) o menor, en la primera pulgada.

- Impactores

Frascos burbujeadores con capacidad de 50 cm<sup>3</sup>.

- Condensador

Medio de enfriamiento con soporte para 5 impactores.

- Sonda

Medio por donde fluye el gas del puerto de muestreo al equipo de medición. De vidrio o acero inoxidable u otros materiales inertes a la muestra y capaces de resistir las condiciones de muestreo.

- Portafiltro

Soporte para filtro de partículas de gases, no debe perder el medio filtrante al ser desmontad. El material puede ser de vidrio, teflón, acero inoxidable o aluminio.

- Boquilla

De materiales de vidrio o acero inoxidable, para resistir las condiciones del muestreo con puntas y bordes de adelgazamiento gradual.

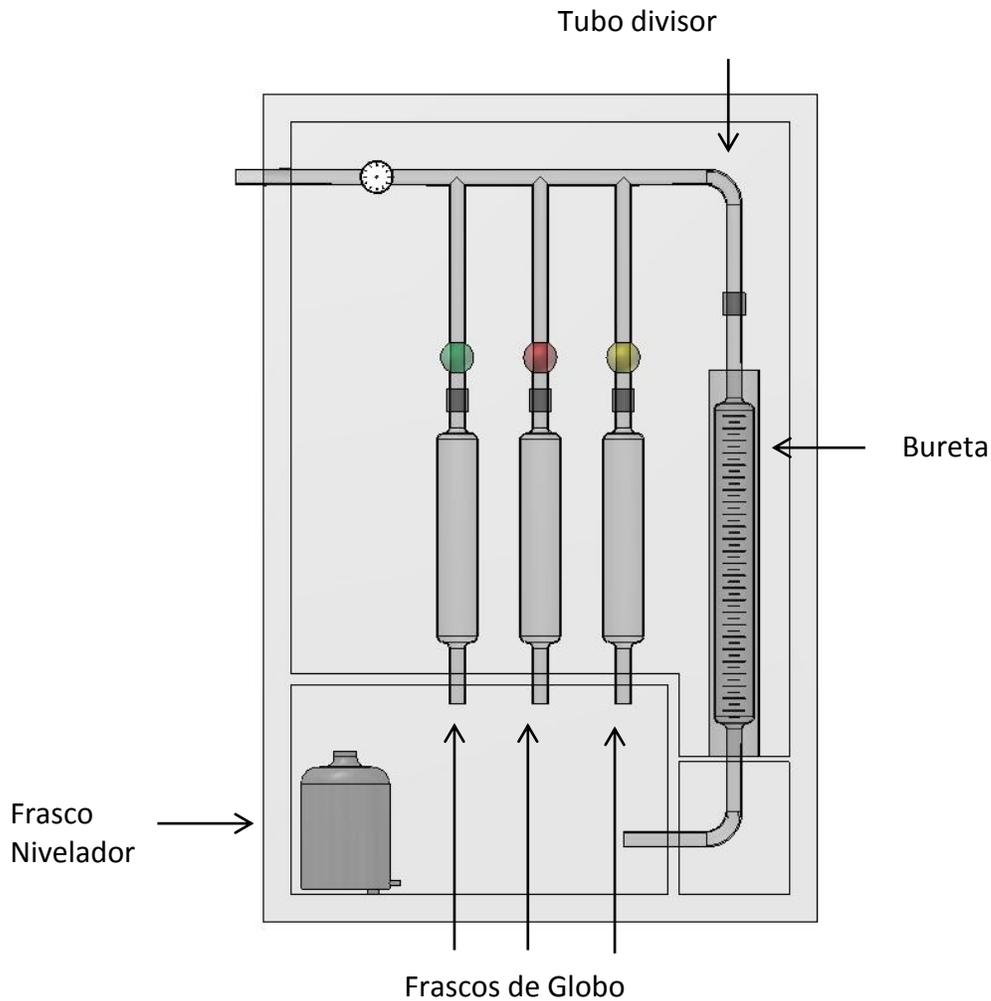
- Tubo de pitot tipo S o invertido

Constituido de dos tubos conectados a un manómetro diferencial que permite medir la velocidad de un fluido.

- Conexiones

De materiales inertes al gas y a prueba de fugas para unir el tren de muestreo.

El equipo ORSAT para determinar el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{O}_2$ , basado en la norma NMX-AA-035-1976 se muestra en la Ilustración 3.



**Ilustración 3. Tren de muestreo (ORSAT). Determinación de la concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{O}_2$  en el gas de combustión**

Los elementos que conforman el equipo ORSAT de muestreo para la determinación de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{O}_2$  son:

- Frasco Nivelador de 150 ml.
- Bureta de 150 ml.
- Tubo divisor.
- 3 Frascos de globo de 100 ml.

## Procura

En base a la cotización de los accesorios que conforman el tren de muestreo para determinación de humedad, SO<sub>2</sub> CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, ver anexo 1, se realizó la compra de los siguientes elementos:



Modelo: KG3

De 13 mm para Q max de 3.2  
m<sup>3</sup>/h

Presión máxima: 0.1 kg/cm<sup>2</sup>

Ilustración 4. Gasómetro.



Marca: Metron  
Modelo: 210484  
Rango: 0°C-120°C  
Carátula: 2 in  
Macho 1/4 " NTP

**Ilustración 5. Termómetro bimetálico**



Marca: Metron  
Modelo: 51110  
Carátula 2 in  
Macho 1/4" NTP  
Rango: 76-0 cm Hg

**Ilustración 6. Vacuómetro**



Marca: Dwyer  
Modelo: 421-5  
Rango: 0-5 inH<sub>2</sub>O

**Ilustración 7. Manómetro diferencial**



Capacidad 50 ml

**Ilustración 8. Impactores**



**Ilustración 9. Sonda, tubo de Pitot y termopar**

Sonda de acero inoxidable de 1.2 m de longitud, con tubo de pitot de 1.2 m de longitud, 3/8 in de diámetro, Lainer de acero inoxidable de 1/2 in, con niple doble de 5/8 in y termopar tipo K de 1/8 in de diámetro y 1.2 m de longitud.



**Ilustración 10. Boquilla**

Boquilla de 3/16 in en acero inoxidable Andersen.



**Ilustración 11. Bomba de vaío de aceite**

Marca: Rocker  
Modelo: 300  
Potencia: 110-120v / 50,60 Hz  
Vacío máx: 650 mmHg  
Flujo máx: 20 l/min  
Potencia del motor: polo 1/8 hp.



Juego Equipo Orsat

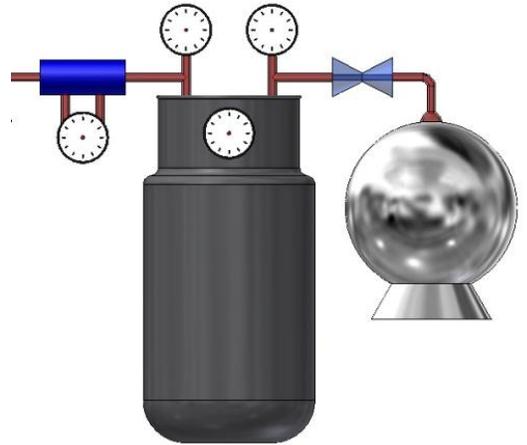
3 frascos globo de 150 ml, probeta de  
100 ml

**Ilustración 12. Equipo ORSAT**

### **Construcción del tren de muestreo**

Se procedió a ensamblar la bomba de vacío, el gasómetro, el termómetro bimetálico, el vacuómetro, el medidor de orificio y manómetro diferencial; para tener el equipo de medición de flujo del tren de muestreo que se detalla en el procedimiento de muestreo de las normas mexicanas NMX-AA-010-SCFI-2001, NMX-AA-054-1978 y NMX-AA-055-1979, para medición de partículas, humedad y bióxido de azufre respectivamente.

El equipo de medición de flujo se muestra en la ilustración 13.



**Ilustración 13. Equipo de medición de flujo**

Debido a la complejidad de transporte y almacenamiento del equipo, los accesorios son montados en una caja de acrílico, como se muestra en la ilustración 14.



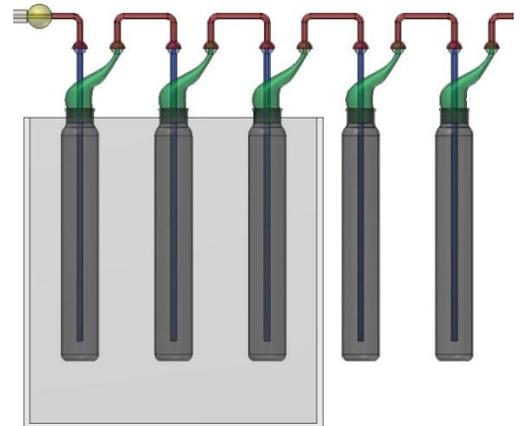
#### Ilustración 14. Equipo de medición de flujo con soporte

La caja de acrílico tiene un diseño que permite el acceso rápido a los elementos del equipo, que sirve para poder dar mantenimiento o simplemente cambiar cualquier pieza en caso de ser necesario. Este diseño tiene como principal característica una puerta deslizable en el lado frontal, así como soportes para cada elemento del equipo.

Adicionalmente el equipo está provisto de una junta rápida en la parte exterior de la caja de acrílico, esto permite que la manguera por la que pasará el gas de análisis pueda ser montada y desmontada del equipo sin generar esfuerzos extra en el tren.

Posteriormente, se construyó en acrílico el sistema de enfriamiento, el cual tiene 5 soportes para poder sujetar los impactores, esto se debe a que el método de análisis de  $\text{SO}_2$  utiliza 5 impactores mientras que el análisis de humedad sólo utiliza 4.

Los impactores se montan en el sistema de enfriamiento y se unen por medio de mangueras, como se muestra en la Ilustración 15.



### Ilustración 15. Sistema de enfriamiento

El tren de muestreo para determinación de humedad y  $\text{SO}_2$  queda terminado cuando se unen el equipo de succión y el sistema de enfriamiento. Como se muestra en la Ilustración 16.

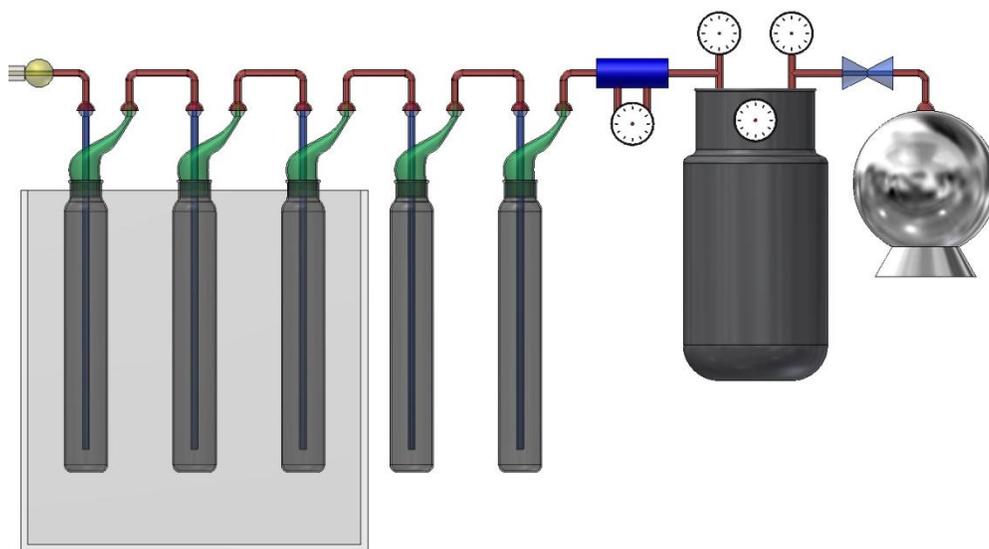
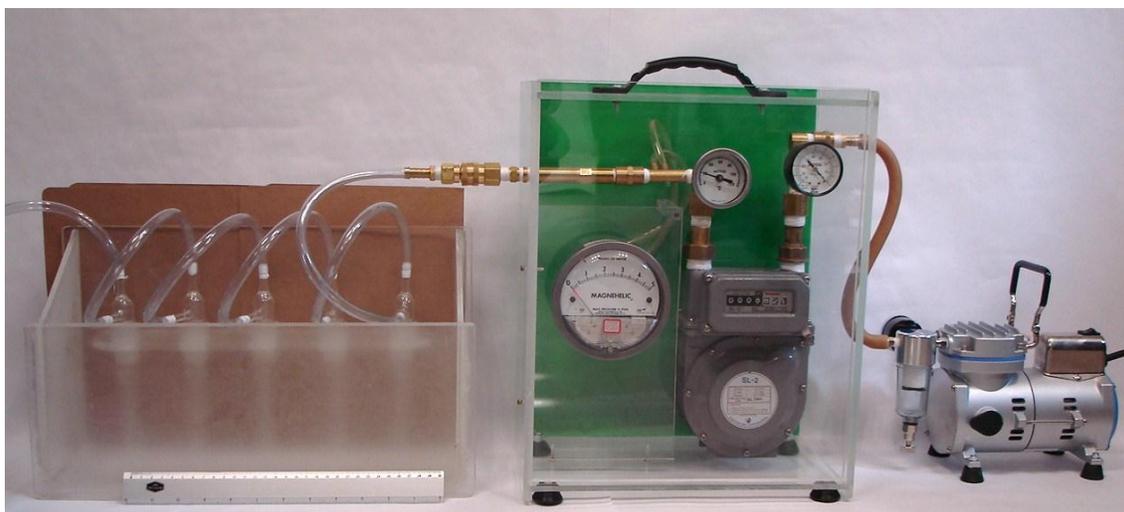


Ilustración 16. Tren de muestreo para determinación de humedad y  $\text{SO}_2$

Una vez que se terminó de ensamblar el tren de muestreo se realizaron pruebas de hermeticidad y de flujo en el equipo, para verificar que no existen fugas en el sistema y que el equipo tiene la capacidad de medir el flujo del que se necesita para el muestreo de SO<sub>2</sub> y humedad indicado en las normas mexicanas (5 l/min para determinación de SO<sub>2</sub> y 1 l/min para determinación de humedad).

### **Pruebas de hermeticidad**

Las pruebas de hermeticidad se realizaron de la siguiente manera: Se hace funcionar la bomba de vacío, después se coloca un tapón en la entrada del flujo al gasómetro y se espera a que la lectura del vacuómetro llegue a su valor máximo estable. Después se apaga la bomba y se verifica que la lectura del vacuómetro no varíe en un tiempo de 30 segundos. La prueba se realizó 4 veces.

### **Pruebas de flujo del equipo**

Se realizaron pruebas para verificar el flujo mínimo y máximo que puede tener equipo. La prueba de flujo se realizó al accionar la bomba de vacío y midiendo la diferencia de volumen (volumen inicial – volumen final) registrado en el gasómetro durante un periodo de 1 min. La prueba se realizó 4 veces.

Los resultados se muestran en la tabla 2.

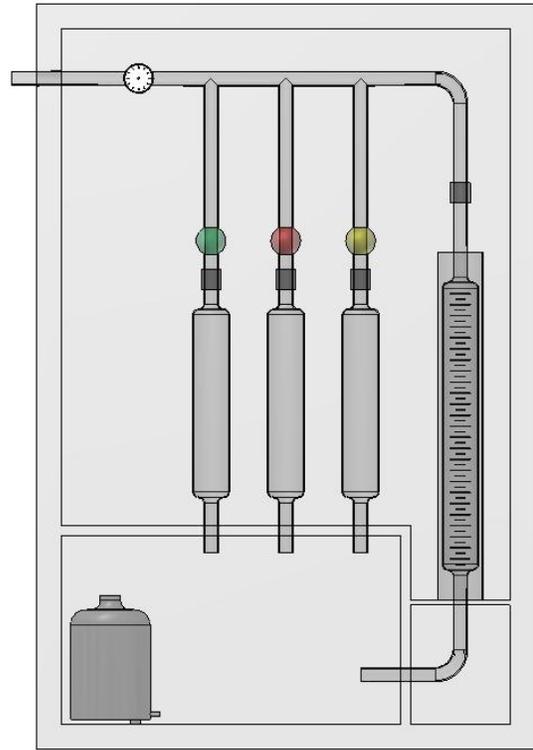
**Tabla 2. Rango de flujo del tren de muestreo**

Presión (in H <sub>2</sub> O) manómetro diferencial	Flujo (L/min)
0.2	0.85
0.3	1.1
0.4	1.25
0.5	1.5
0.6	1.7
0.7	1.85
0.8	2
1	2.3
2	3.4
3	4.2
4	4.9
5	5.5

Los resultados en la tabla 2 muestran que el flujo mínimo que se puede medir en el tren de muestreo es de 0.85 L/min, mientras que el flujo máximo es de 5.5 L/min, considerando el rango de medición que permite el manómetro diferencial de 5 in H<sub>2</sub>O. Esto indica que los dos flujos que se necesitan para el muestreo (1 y 5 L/min) están dentro del rango del tren de muestreo.

### **Equipo ORSAT**

El equipo ORSAT que para determinación de CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> cumple con el diseño que se presentó en el capítulo 3. Como se muestra en la ilustración 17.



**Ilustración 17. Equipo ORSAT para determinación de CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>**

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS DEL GUIÓN EXPERIMENTAL

El laboratorio de Protección Ambiental I, impartido en la Facultad de Química de la UNAM, tiene una duración de 2 horas por clase. Para poder ajustar el guión experimental al tiempo que dura una sesión, se implementó sólo el procedimiento para determinar, humedad y concentración de dióxido de azufre.

Los resultados obtenidos para determinar el porcentaje de humedad en el gas de combustión se muestran en la tabla 4.

**Tabla 3. Humedad en el gas de combustión**

	% humedad en el gas de combustión
Experimento 1	9.78
Experimento 2	3.32

Los cálculos para determinación de porcentaje de humedad se encuentran en el anexo 4.

Los resultados de humedad en el gas de combustión son indicio del consumo de aire para la combustión, es decir, a mayor humedad mayor exceso de aire. El exceso de aire en la caldera permite tener una mejor eficiencia en la combustión, aprovechando con esto el consumo energético del combustible.

Los resultados obtenidos para determinar la concentración de bióxido de azufre en el gas de combustión se presentan en la tabla 5.

**Tabla 4. Concentración de bióxido de azufre en el gas de combustión**

	Concentración de SO <sub>2</sub> en el gas de combustión	
	ppm V	10 <sup>-6</sup> kg/kcal
Experimento 1	4.62	0.00000117
Experimento 2	0.717	0.00000473
Valor teórico	20.20	0.0869
Límite NOM-085-ECOL-1994	550	2.04

Los cálculos para determinación de concentración de SO<sub>2</sub> se encuentran en el anexo 3 y 4.

El valor de concentración de SO<sub>2</sub> en los gases de combustión puede variar por dos razones principalmente, el consumo de combustible en la caldera y el exceso de aire.

A mayor exceso de aire el azufre puede reaccionar por completo para formar SO<sub>2</sub>, mientras que a una deficiencia de aire, el azufre no reacciona por completo. Por otro lado, a mayor consumo de combustible mayor emisión de SO<sub>2</sub>.

Sin embargo, como se muestra en la tabla 5, la emisión de bióxido de azufre sigue estando por debajo del valor permitido por la NOM-085-ECOL-1994.

# **CAPÍTULO 5.**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

El presente trabajo cumple con el objetivo de presentar un guión experimental y un tren de muestreo para determinación de contaminantes emitidos a la atmósfera, producto de procesos de combustión en fuentes puntuales; para implementarse en laboratorio de Protección Ambiental I, de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM.

El guión experimental, junto con el tren de muestreo que se construyó, es el resultado del análisis de las normas mexicanas de muestreo en fuente y su aplicación en el análisis de los gases de combustión que fluyen a través de la chimenea de la caldera que se encuentra en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM.

Al implementar el guión experimental, sólo se aplicó el procedimiento para determinar, humedad y concentración de dióxido de azufre, con la finalidad que el tiempo de trabajo sea menor a 2 horas, tiempo que dura una sesión experimental de la materia de Protección Ambiental I. Por tal motivo fue necesario sustituir el experimento correspondiente al análisis de la parte 2, determinación de la concentración de CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, con información de gases de combustión emitidos por calderas con la misma capacidad térmica a la que se encuentra en la Facultad de Química. Esta información fue proporcionada por la empresa Tecnología Ambiental Integral S.A. de C.V.

Las pruebas para determinación de humedad y concentración de SO<sub>2</sub> se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM. Los resultados obtenidos con el muestreo en fuente muestran que la concentración de SO<sub>2</sub> en el gas de combustión es menor a 10 ppm, valor mínimo que el sistema implementado puede medir, mientras que el valor estimado de

concentración de bióxido de azufre en el gas de combustiones de 20.20 ppm. Esto indica que la emisión de  $\text{SO}_2$  de la caldera del laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química está dentro del rango que permite la norma oficial mexicana NOM-085-ECOL-1994, para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos, el cual es 550 ppm de volumen.

Con este resultado se puede afirmar que el Diesel que produce Pemex para equipos de combustión, es de ultra bajo azufre, como muestra la hoja de especificación de Diesel que proporciona Pemex, donde menciona que la concentración de azufre máxima es de 500 mg/kg.

Por otra parte, la chimenea del laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química no cuenta con los puertos de muestreo adecuados para realizar la parte 4 del guión experimental, determinación de flujo que fluye por un conducto; por lo que no se pudo realizar esta parte del experimento.

El procedimiento para determinación de concentración de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno, así como el procedimiento para determinación de flujo de un gas que fluye por un conducto, se deja para que se pueda plantear otra sesión experimental de la materia Protección Ambiental I.

## Recomendaciones para el guión experimental

Para realizar el guión experimental es necesario tomar en cuenta:

- Verificar que el tren de muestreo esté correctamente ensamblado como se muestra en los anexos del guión.
- Realizar pruebas de infiltración en el tren de muestreo.
- Ya tener preparadas las soluciones que se van a utilizar durante el muestreo.
- Verificar las condiciones de temperatura y presión en la chimenea durante el muestreo.
- Durante el análisis de humedad, verificar que los impactores están completamente secos en su exterior cuando se pesen en la balanza.
- Durante el muestreo, no exceder el flujo de 1.5 L/min, ya que la solución en cada impactor se puede transferir a otro y contaminar las muestras.
- Durante la titulación de la muestra poner atención al cambio de vire, ya que es muy difícil de percibir y puede ser con poco volumen de titulante.

# **BIBLIOGRAFÍA**

Calixto Flores Raúl, Herrera Reyes Lucila, Hernández Guzmán Verónica, *Ecología y medio ambiente*. Segunda edición. Editorial Cengage Learning Editores, 2008.

Marcos, R., Olivera, L., Sivipaucar, C., Cubas, J., & Valderrama, A. *Análisis del proceso de combustión de las mezclas de pretróleo diesel 2 con biodiesel de soya, algodón y girasol en cocinas no convencionales*. Revista de investigación del CEDIT 2007; 2, 19-25.

*Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías*, División de Ingeniería Crane. McGraw Hill, 1993.

García Lozada Héctor Manuel, *Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá*. Editorial Universidad Nacional de Colombia, 2006.

Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2008 Monóxidos de carbono, Partículas finas, Bióxido de azufre, Óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles.

NORMA MEXICANA, NMX-AA-009-1993-SCFI, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de Flujo de Gases en un Conducto por Medio de Tubo de Pitot.

NORMA MEXICANA, NMX-AA-010-SCFI-2001, Contaminación Atmosférica – Fuentes Fijas – Determinación de la Emisión de Partículas Contenidas en los Gases que Fluyen por un Conducto – Método Isocinético.

NORMA MEXICANA, NMX-AA-023-1986, Protección al Ambiente – Contaminación Atmosférica – Terminología

NORMA MEXICANA, NMX-AA-035-1976, Determinación de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.

NORMA MEXICANA, NMX-AA-054-1978, Contaminación Atmosférica-Determinación del Contenido de Humedad en los Gases que Fluyen por un Conducto-Método Gravimétrico.

NORMA MEXICANA, NMX-AA-055-1979, Contaminación Atmosférica-Fuentes Fijas-Determinación de Bióxido de Azufre en Gases que Fluyen por un Conducto.

NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-021-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-022-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a las partículas menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>). Valor permisible para la concentración de partículas menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-026-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración del plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-085-ECOL-1994, Contaminación Atmosférica- Fuentes Fijas.- Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

P. Lodge, James, *Methods of Air Sampling and Analysis*, third Edition, Lewis Publishers Inc., USA, 1991.

Perry, R. H., *Chemical Engineer's Hand Book*, 7<sup>th</sup> Edition, McGraw Hill, New York, 1997.

Resumen de los resultados de los Censos Económicos 2009. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI, 2010.

Sbarato Dario, Sbarato Viviana, Ortega José, *Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmósfera, Volumen 2*. Editorial Brujas, 2007

Moragues Jaime A., *Manual de tecnologías de medición de concentración de gases y material particulado en chimeneas y atmósfera*. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente.

# **ANEXOS**

## Anexo 1. Cotización

Se realizó la cotización de los elementos que componen el tren de muestreo y el equipo ORSAT, basado en las características que se detallan en las normas mexicanas. La cotización se presenta en la tabla 5.

**Tabla 5. Cotización de los accesorios que conforman tren de muestreo**

Descripción	Proveedor	Precio Total (MN)
Medidor volumétrico KUMHO KG-3 de 13 mm para Q max de 3.2 M37HR	CDG Venta e instalación de equipos para Gas L.P. y G.N.	\$603.20
Termómetro Bimetálico Marca Metron Modelo 210484 Rango 0-120°C Carátula 2", vástago 4" posterior 1/2" NPT	Refacciones Aranzabal	\$493.00
Vacuometro Marca Metron Modelo 51110 Rango 7/0 CMHG Carátula 2", termómetro 1/4" NPT	Refacciones Aranzabal	\$185.60
Manómetro Diferencial Marca Dwyer Modelo 20-10 10" columna de agua	VanControls S.A. de C.V.	\$1,183.15
4 Impactores	Proveedor Científico de Equipo	\$1,322.40
Sonda de acero inoxidable de 1.20 mts, de longitud	Servicio Electromecánico e Instrumentación	\$3,280.00
Porta filtros dedal de acero inoxidable	Servicio Electromecánico e Instrumentación	\$3,480.00
Boquilla de 3/16 en acero inoxidable tipo anderse	Servicio Electromecánico e Instrumentación	\$1,160.00
Tubo Pitot, Marca Dwyer	VanControls S.A. de C.V.	\$2,551.08
Manómetro inclinado vertical Marca Dwyer Modelo 421-10	Proveedor Científico de Equipo	\$11,506.28
1 Juego Equipo Orsat 3 unidades, 150 ml	Soplado de Vidrio Científico. Elaboración y reparación	\$13,500.08

Los datos de la cotización se realizó en el mes de agosto del 2011 por lo que solo es válida para el septiembre de 2011, ya que las cotizaciones dadas por los proveedores tienen una validez máxima de 1 mes.

La bomba de vacío no se cotizó debido a que ya se cuenta con una dedicada a este proyecto.

El medidor de orificio (Venturi) no se cotizó, ya que es necesario hacer el diseño de este, para después mandarlo a hacer al taller del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

## **Anexo 2. Guión experimental**

### **Guión VII. Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto**

**Objetivo académico:** El alumno podrá integrar los conceptos físicos, químicos, de transferencia de masa y de energía que se emplean durante el muestreo en fuente.

**Problema:** Determinar la concentración de bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en los gases que fluyen en la chimenea de la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química.

#### **Introducción**

La emisión del  $\text{SO}_2$  a la atmósfera y sus respectivos efectos contaminantes han sido uno de los problemas que ha traído la generación de energía a partir del uso de combustibles fósiles. En consecuencia, el hombre se ha visto en la necesidad de buscar soluciones a este problema.

En México la norma oficial mexicana NOM-085-ECOL-1994 establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido de azufre para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos; así como también el método de monitoreo para determinar la concentración de bióxido de azufre emitido por las fuentes fijas y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento directo por combustión.

## Materiales y reactivos

Materiales	Reactivos
Probeta 100 mL	Gel de sílice
Bureta de 25 mL	Hielo en trozos
3 Matraces volumétrico de 1 L	Hidróxido de potasio
Matraz volumétrico de 250 mL	Ácido pirogálico
Matraz de 125 mL	Cloruro cuproso
2 Matraces volumétricos de 100 mL	Ácido clorhídrico 30%
Pipeta de 10 mL	Alcohol isopropílico
Pipeta volumétrica de 10 mL	Peróxido de hidrógeno al 30%
Vaso de precipitado de 400 mL	Ácido nítrico al 70%
Vaso de precipitado de 1 L	Perclorato de bario trihidratado
Vaso de precipitado de 250 mL	Sulfato de sodio anhidro
Portafiltros	Torino (Sal disódica del ácido o-(2-
Cronómetro, con precisión de 0.2 s.	hidroxi-3-6-disulfo-1-naftil)naftil-azo-
4 impactores de 50 mL, uno provisto de difusor y el resto de diseño normal 4	bencenarsónico (OH) <sub>2</sub> -AsC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> N)
Juntas esmeriladas de cuenca y bola o de material flexible inerte para unir los impactores.	Azul de metileno
Medio de enfriamiento para los impactores	

## Aparatos, instrumentos y equipos

- Balanza analítica con precisión de 0.0001g.
- Sonda de vidrio o acero inoxidable
- Medio filtrante, de lana de vidrio, con tamaño máximo de poro de 0.8 micra.
- Medidor de gas seco, provisto de termómetro, vacuómetro y válvula reguladora de flujo.
- Fuente de succión, provisto de una válvula reguladora de flujo.
- Equipo de Orsat.
- Tubo de pitot tipo S o invertido.
- Manómetro diferencial inclinado con rango de operación de 0.00 a 2.54 cm de H<sub>2</sub>O y con sensibilidad de  $\pm 0.0254$  cm de H<sub>2</sub>O.
- Barómetro con rango de operación de 66660 Pa a 101325 Pa (0.65 a 1 atm).
- Trampa para retener humedad.

## Desarrollo experimental

Para el análisis en la determinación del SO<sub>2</sub> en la chimenea de la caldera del laboratorio de Ingeniería Química está dividido en 4 partes.

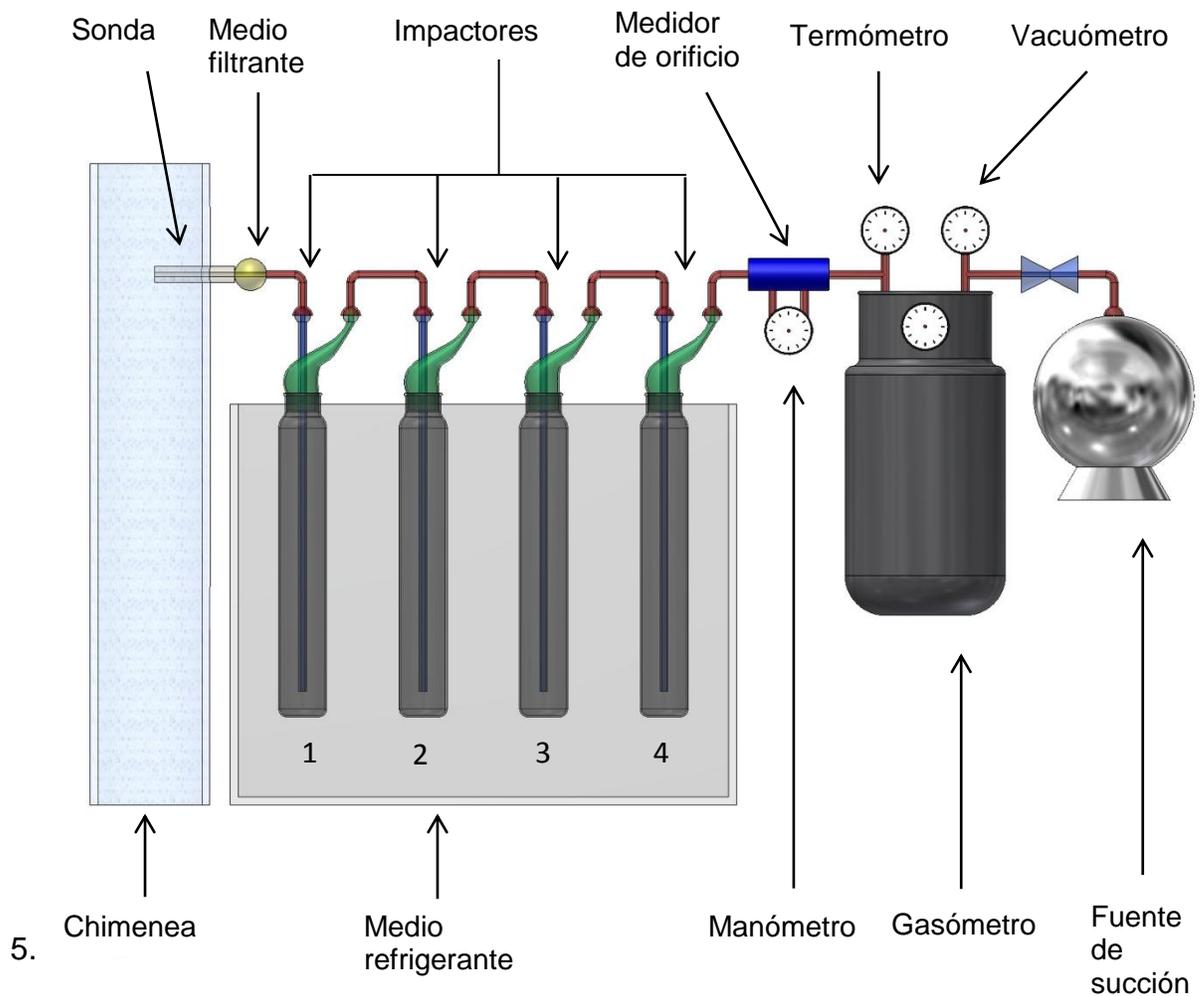
**PARTE 1:** Determinación del contenido de humedad en el gas que fluye en la chimenea

### *Preparación del tren de muestreo*

1. Verificar la hermeticidad del tren de muestreo, colocando un tapón en la entrada de la sonda de muestreo; hacer funcionar la fuente de succión hasta que la lectura del manómetro llegue a su valor máximo estable. Detener la fuente de succión, asegurarse que la lectura del manómetro no tenga variación por lo

menos durante 30 s, si esto ocurre será indicativo de que existen infiltraciones al sistema por lo que estas se deberán localizar y eliminar al máximo.

2. Colocar en el primer impactor 50 mL de agua destilada, el segundo deberá quedar vacío, el tercero y cuarto impactor colocar gel de sílice.
3. Pesar cada uno de los impactores preparados y registrar la suma de los valores obtenidos como  $M_1$ .
4. Utilizar las conexiones flexibles para montar el tren de muestreo, como se muestra en la ilustración 18 del guión experimental.



**Ilustración 18 del guión experimental. Tren de muestreo. Determinación del contenido de humedad en el gas de combustión.**

### *Colección de la muestra*

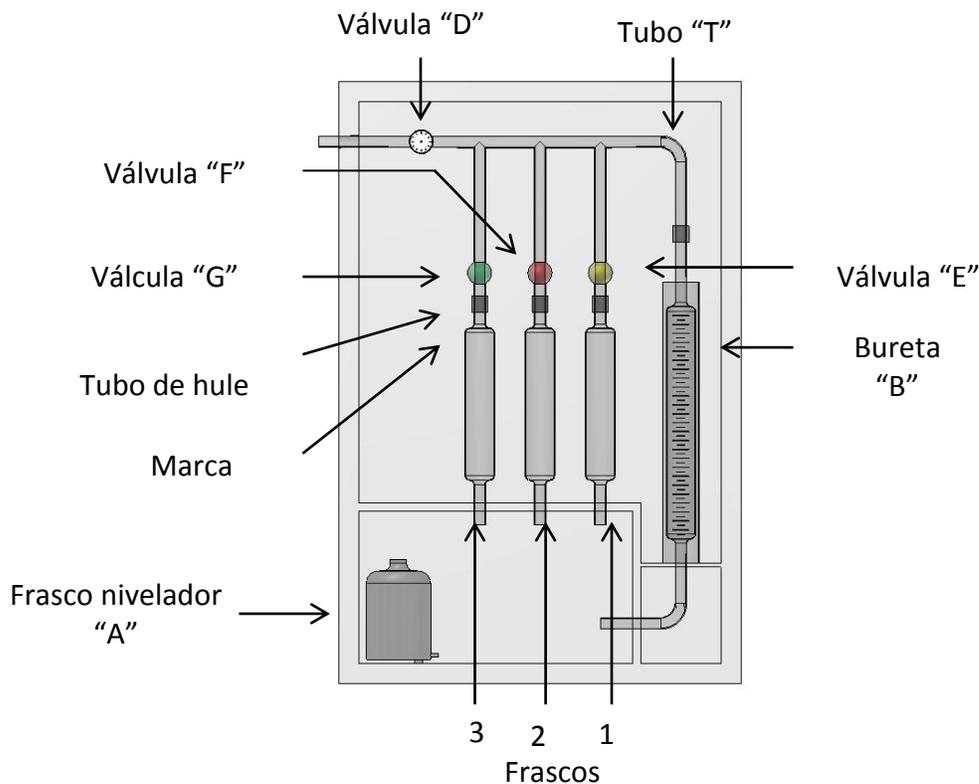
6. Sin accionar la fuente de succión, colocar la sonda en el punto seleccionado de la chimenea de la caldera para la extracción de la muestra.
7. Poner a funcionar la fuente de succión y muestrear a un gasto de 5 L/min, por 5 minutos. Medir el tiempo que dura el muestreo.
8. Durante el muestreo tomar un mínimo de 3 lecturas de la temperatura y de la presión existente en el gasómetro.
9. Desmontar los impactores pesar estos para obtener su peso, registrar la suma de los mismos como el valor de  $M_2$ . Cuide de secar bien los impactores por fuera antes de pesarlos.
10. Registrar los resultados obtenidos en la tabla 7 del guión experimental ubicada en el apéndice E.

**PARTE 2:** Determinación de la concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{O}_2$  en el gas que fluyen en la chimenea

*Preparación de soluciones*

1. Solución de hidróxido de potasio: Pesar 66 g de hidróxido de potasio y disolverlos en 200 mL de agua destilada.
2. Solución de pirogalato: Pesar 10 g de ácido pirogálico y disolverlos en 10 mL de agua destilada. Pesar 60 g de hidróxido de potasio y disolverlos en 170 mL de agua destilada. Mezclar las dos soluciones.
3. Solución ácida de cloruro cuproso: Pesar 12 g de cloruro cuproso y disolverlos en 200 mL de ácido clorhídrico concentrado a 30%.

Utilizar el equipo Orsat que se muestra en la ilustración 19 del guión experimental.



**Ilustración 19 del guión experimental. Equipo ORSAT. Tren de muestreo para la determinación de la concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{O}_2$  en el gas de combustión**

### *Preparación del tren de muestreo*

4. Agregar 50 mL de solución de hidróxido de potasio en el frasco 1 del equipo Orsat.
5. Agregar 50 mL de solución de pirogalato en el frasco 2 del equipo Orsat.
6. Agregar 50 mL de solución de cloruro cuproso en el frasco 3 del equipo Orsat.

### *Colección de la muestra*

7. Nivelar los reactivos colocados en los frascos 1, 2 y 3 hasta que la marca que está a la mitad de entre la parte superior de la pipeta y el tubo de hule.
  - a. Se abre la válvulas E del frasco 1.
  - b. posteriormente se abre toda la llave "D".
  - c. Se saca el frasco nivelador A y se baja hasta que el reactivo suba al nivel marcado en la ilustración 1 del guión experimental.
  - d. Cerrar la válvula "E" y realizar el mismo procedimiento para los frascos 2 y 3, abriendo las válvulas F y G respectivamente.
  - e. Llenar la bureta B con agua, con las válvulas E, D y G cerradas. Se coloca un frasco con agua destilada en la toma de muestreo, se abre la llave "D" y se sube el frasco nivelador A.

### *Determinación de CO<sub>2</sub>*

8. Se abre la llave E del frasco 1 (se mantienen cerradas las válvulas F y G)
9. Se coloca la sonda de muestreo en la chimenea y se abre la llave D del puerto de muestreo para tomar una muestra del gas.
10. Se sube el frasco nivelador A para que el gas entre al sistema. El gas entrará al equipo y desplazará al reactivo del frasco 1.
11. Se cierra la llave D del puerto de muestreo.

12. Se continúa con el movimiento de subir y bajar el frasco nivelador A, para forzar el gas que no fue absorbido a fluir hacia el tubo T. De esta manera el reactivo del frasco 1 regresará a la marca original mientras que el agua de la bureta se desplazará.
13. Se cierra la llave E y se acomoda el frasco A en su posición original, para que el nivel del agua de la bureta regrese a su nivel inicial.
14. Se toma la lectura del volumen desplazado en la bureta. La diferencia entre el volumen inicial y el volumen final representa el porcentaje  $\text{CO}_2$  en la muestra.

#### *Determinación de $\text{O}_2$*

15. Se abre la llave F del frasco 2 (se mantienen cerradas las válvulas E y G)
16. Se sube el frasco nivelador A para que el gas entre al frasco 2 y desplace al reactivo.
17. Se continúa con el movimiento de subir y bajar el frasco nivelador A, para forzar el gas que no fue absorbido a fluir hacia el tubo T. De esta manera el reactivo del frasco 2 regresará a la marca original mientras que el agua de la bureta se desplazará.
18. Se cierra la llave F y se acomoda el frasco A en su posición original, para que el nivel del agua de la bureta regrese a su nivel inicial.
19. Se toma la lectura del volumen desplazado en la bureta. La diferencia entre el volumen inicial y el volumen final representa el porcentaje  $\text{O}_2$  en la muestra.

#### *Determinación de CO*

20. Se abre la llave G del frasco 2 (se mantienen cerradas las válvulas E y F)
21. Se sube el frasco nivelador A para que el gas entre al frasco 3 y desplace al reactivo.
22. Se continúa con el movimiento de subir y bajar el frasco nivelador A, para forzar el gas que no fue absorbido a fluir hacia el tubo T. De esta manera el reactivo

del frasco 3 regresará a la marca original mientras que el agua de la bureta se desplazará.

23. Se cierra la llave G y se acomoda el frasco A en su posición original, para que el nivel del agua de la bureta regrese a su nivel inicial.
24. Se toma la lectura del volumen desplazado en la bureta. La diferencia entre el volumen inicial y el volumen, adicionado al volumen de gas libre de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  en la muestra, representa el valor de CO presente.
25. Registre los datos obtenidos en la tabla 8 del guión experimental ubicada en el apéndice E.

### **PARTE 3:** Determinación de la concentración de SO<sub>2</sub> en el gas que fluye por la chimenea

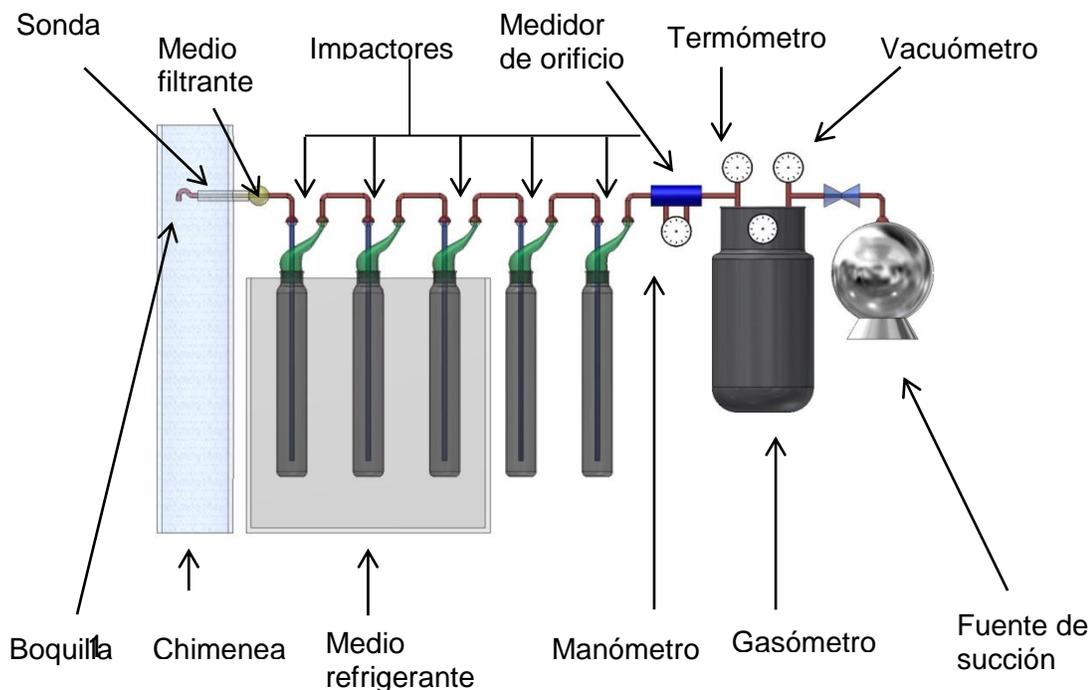
#### *Preparación de soluciones*

1. Solución de peróxido de hidrógeno. Medir 100 ml de peróxido de hidrógeno al 30% y aforar a 1 L.
2. Solución de alcohol isopropílico. Mezclar 800 mL de alcohol isopropílico con 200 mL de agua y homogeneizar.
3. Solución de ácido nítrico 0.5N. Medir 7.5 ml de ácido nítrico al 70% y aforar a 250 mL.
4. Solución de perclorato de bario. Pesar con precisión 1.05g de perclorato de bario trihidratado, transferir a un vaso de precipitados de 400 mL, adicional 200 ml de agua destilada y agitar hasta disolución total. Transferir a un matraz volumétrico de 1L y aforar con alcohol isopropílico.
5. Solución de sulfato de sodio 0.02N. Pesar con precisión 1.4204g de sulfato de sodio anhidro previamente secado a 398 °K (125°C) durante dos horas, transferir a un matraz volumétrico de 1 L, disolver y aforar con agua.
6. Solución indicadora de Torino. Pesar con precisión 200 mg de la sal disódica del ácido o-(2-hidroxi-3-6-disulfo-1-naftil) naftil-azo-bencenarsónico (OH)<sub>2</sub>-AsC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>N: NC<sub>10</sub>H<sub>4</sub>(OH)SO<sub>3</sub> Na<sub>2</sub> (Torino), transferir a un vaso de precipitados de 250 ml agregar 100 ml de agua y agitar hasta disolución total. (preguntar si la solución ya está previamente preparada).
7. Solución indicadora de azul de metileno. Pesar con precisión 200 mg de (3,5-dimetil amino) cenotiazina 5 cloruro (C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>ClN<sub>3</sub>S 2H<sub>2</sub>O) (azul de metileno), transferir a un matraz volumétrico de 100 mL llevar a la marca de agua y homogeneizar. De esta solución medir con pipeta volumétrica 10 mL transferir a un matraz volumétrico de 100 mL, llevar a la marca con agua y homogeneizar, esta última es la que se utiliza en el procedimiento.
8. Titular la solución de perclorato de bario. Tomando 10 mL de la solución de sulfato de sodio 0.02N y transferir a un matraz de 125 mL, agregar dos gotas de

solución de ácido nítrico, tres gotas de solución indicadora de Torino y una gota de solución indicadora de azul de metileno. Titular con la disolución de perclorato de bario hasta que vire de color amarillo verdoso a rosa tenue definitivo. Verificar la hermeticidad del tren de muestreo, colocando un tapón en la entrada de la sonda de muestreo; hacer funcionar la fuente de succión hasta que la lectura del manómetro llegue a su valor máximo estable. Detener la fuente de succión, asegurarse que la lectura del manómetro no tenga variación por lo menos durante 30 s, si esto ocurre será indicativo de que existen infiltraciones al sistema por lo que estas se deberán localizar y eliminar al máximo.

#### *Preparación del tren de muestreo*

- Montar el tren de muestreo como se muestra en la ilustración 20 del guión experimental.



**Ilustración 20 del guión experimental. Tren de muestreo: Determinación la concentración de SO<sub>2</sub> en el gas de combustión**

2. Verificar la hermeticidad del tren de muestreo, colocando un tapón en la entrada de la sonda de muestreo; hacer funcionar la fuente de succión hasta que la lectura del manómetro llegue a su valor máximo estable. Detener la fuente de succión, asegurarse que la lectura del manómetro no tenga variación por lo menos durante 30 s, si esto ocurre será indicativo de que existen infiltraciones al sistema por lo que estas se deberán localizar y eliminar al máximo.
3. Colocar 25 mL de la disolución de alcohol isopropílico en el primer impactor y 15 mL de la disolución de peróxido de hidrógeno en los impactores segundo y tercero.
4. Dejar vacío el cuarto impactor y colocar lana de vidrio dentro de la trampa para retener la humedad; colocar después de este impactor entre dos capas de lana de vidrio de espesor aproximadamente 100g de gel de sílice previamente secada a 398K durante dos horas.
5. Colocar el medio filtrante en el portafiltros y ubicarlo antes del primer impactor.

#### *Colección de la muestra*

6. Colocar la sonda en el punto donde se va a tomar la muestra en dirección normal al conducto y con la boquilla apuntando en dirección del flujo de gases.
7. Girar la sonda 180° y simultáneamente poner a funcionar la fuente de succión y el cronómetro. Muestrear a un gasto volumétrico de aproximadamente 0.001 m<sup>3</sup>/min durante 20 minutos.  
NOTA: Si se observa condensación antes de que la corriente gaseosa llegue al tren de impactores, ésta se debe evitar proporcionando calentamiento a la sonda.
8. Registrar las condiciones de presión y temperatura en el medidor de gases cada tres minutos.
9. Detener la fuente de succión y el cronómetro y simultáneamente girar la sonda 180°. Registrar el volumen de muestra tomado.
10. Desechar el contenido del primer impactor y transferir el contenido de los impactores 2 y 3 a un matraz volumétrico de 100 mL, lavar cada impactor tres

veces con agua, recibiendo el agua de lavado en el matraz volumétrico, llevar a la marca con agua y homogeneizar.

11. Tomar una alícuota de 5 mL y transferirla a un matraz de 125 mL. Tomar la misma cantidad de agua como testigo y transferirla a otro matraz de igual volumen.
12. A cada matraz adicionar 20 mL de alcohol isopropílico, dos gotas de ácido nítrico 0.5N, tres gotas de solución indicadora de Torino y una gota de indicador de azul de metileno.
13. Titular con disolución de perclorato de bario hasta que el color amarillo verdoso cambie a rosa tenue definitivo.
14. Registre los datos obtenidos en la tabla 9 del guión experimental ubicada en el apéndice E.

#### **PARTE 4. Determinación del flujo en el sistema**

1. Verificar condiciones de puertos y dimensiones del conducto
2. Seleccionar y marcar a lo largo del tubo de Pitot el número de puntos a medir. El mínimo número de puntos por corrida está especificado en la Ilustración 4 del guión experimental y tabla 4 del guión experimental.. Para conductos con diámetros de 30 cm y mayores.
3. Comprobar que las paredes interiores del manómetro no presenten escurrimiento de aceite antes de ser nivelado.
4. Conectar y nivelar el manómetro con las válvulas abiertas y ajustar la escala del manómetro a cero.
5. Introducir el tubo de Pitot al primer punto de medición.
6. Tapar los claros que quedaron en el puerto de muestreo para asegurar que no hay infiltraciones de aire o fugas de gases.
7. Asegurarse que la boquilla de presión dinámica del tubo de Pitot se mantenga en sentido opuesto al flujo, dando tiempo a que se establezca la lectura.
8. Anotar la lectura del manómetro de cada uno de los puntos seleccionados. En caso de que se presenten fluctuaciones, se tomarán tres lecturas en cada punto y se utilizará el promedio de éstas como valor real de medición.
9. Anotar el valor de la presión estática, tomada en el punto más representativo promedio de las presiones de velocidad. La presión estática puede ser positiva o negativa.
10. Retirar el tubo de Pitot del conducto y comprobar el ajuste inicial del manómetro
11. Anotar las temperaturas de cada uno de los puntos seleccionados y determinar el promedio aritmético.

## Cuestionario

- 1) ¿Por qué es importante conocer las condiciones de temperatura y presión en la chimenea y en el tren de muestreo?
- 2) ¿Cuál fue el peso molecular húmedo del gas?
- 3) ¿Cuál fue la velocidad (m/s) de los gases?
- 4) ¿Cuál es el flujo en el conducto ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a condiciones estándar ( $P=1\text{atm}$  y  $T=25^\circ\text{C}$ )?
- 5) ¿Qué fenómeno ocurre entre el peróxido y el  $\text{SO}_2$  en los impactores?
- 6) ¿Cuál es la concentración de  $\text{SO}_2$  en el conducto ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a condiciones estándar?
- 7) ¿Por qué se consideran condiciones estándar?
- 8) ¿Cuál es la emisión de  $\text{SO}_2$  en g/día?
- 9) ¿Cuál sería el error en la emisión si no se considera la humedad de los gases de la chimenea?

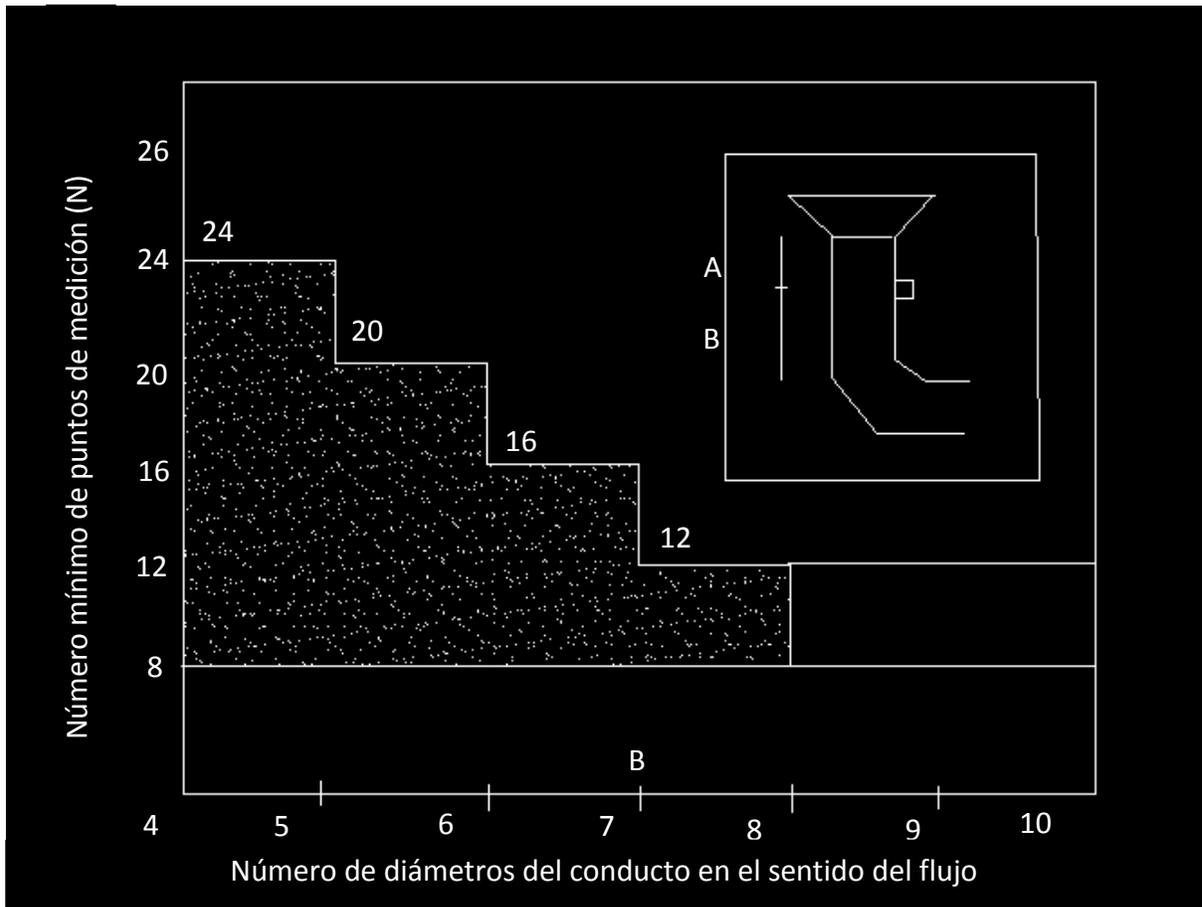
## Indicaciones

Obtener el % de humedad utilizando los cálculos del apéndice A del guión experimental y con los resultados obtenidos de la parte 1 del guión.

Obtener %  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  y de  $\text{N}_2$  en el gas, así como la densidad normal del gas, utilizando los cálculos del apéndice B del guión experimental y con los resultados obtenidos de la parte 2 del guión.

Obtener la emisión de bióxido de azufre, en g de  $\text{SO}_2/\text{h}$  utilizando los cálculos del apéndice C del guión experimental y con los resultados obtenidos de la parte 3 del guión.

Obtener el flujo del gas utilizando las ecuaciones del apéndice D del guión experimental y con los resultados obtenidos de la parte 4 del guión.



**Ilustración 21 del guión experimental. Determinación del número de puntos**

**Uso de la ilustración 21 del guión experimental**

1. Se determina A y B
2. Se determina N para cada distancia
3. Se selecciona el mayor de los valores de N

**Notas**

1. Para diámetros mayores de 0.6m
2. Para diámetros de 0.30 a 0.60m

**Tabla 6 del gui3n experimental. Localizaci3n de los puntos en el 1rea transversal para conductos circulares**

N3mero de punto transversal	Factores de Longitud $K_L$ (Fracci3n del di1metro del conducto)											
	N3MEROS DE PUNTOS TRANSVERSALES EN UN DI1METRO											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	0.146	0.067	0.044	0.033	0.025	0.021	0.018	0.016	0.014	0.013	0.011	0.011
2	0.854	0.254	0.147	0.105	0.082	0.067	0.057	0.048	0.044	0.039	0.035	0.032
3		0.750	0.295	0.184	0.148	0.118	0.099	0.085	0.075	0.067	0.060	0.055
4		0.933	0.705	0.323	0.226	0.127	0.146	0.125	0.108	0.087	0.087	0.790
5			0.853	0.677	0.342	0.250	0.201	0.169	0.146	0.129	0.116	0.105
6			0.956	0.806	0.658	0.355	0.269	0.220	0.188	0.165	0.146	0.132
7				0.895	0.774	0.645	0.366	0.283	0.236	0.204	0.180	0.161
8				0.967	0.854	0.750	0.634	0.375	0.296	0.250	0.218	0.194
9					0.918	0.823	0.731	0.625	0.382	0.306	0.281	0.230
10					0.975	0.882	0.799	0.717	0.618	0.388	0.315	0.272
11						0.933	0.854	0.780	0.704	0.612	0.393	0.323
12							0.979	0.901	0.831	0.764	0.694	0.507

## Apéndice A del guión experimental

### Determinación del contenido de humedad en el gas

El % en volumen de la humedad, en relación al volumen total de los gases que circulan por el conducto se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{V_2}{V_{GC} + V_2} \times 100$$

Considerando las siguientes ecuaciones

$$V_2 = \frac{P_1 T_2 VAC}{P_2 T_1} \times 100$$

$$VAC = n \times 22.4$$

$$n = \frac{H}{18}$$

$$H = M_2 - M_1$$

Donde:

H= peso total de humedad.

n= número de moles que equivalen a la humedad colectada.

VAC= volumen del vapor que equivalen al agua condensada y absorbida a condiciones de referencia.

V<sub>2</sub>= volumen del vapor que equivale al agua condensada y absorbida a condiciones del gasómetro.

P<sub>1</sub>= presión normal en Pa.

P<sub>2</sub>= presión absoluta del gasómetro en Pa.

T<sub>1</sub>= temperatura normal en K.

T<sub>2</sub>= temperatura del gasómetro en K.

V<sub>gc</sub>= volumen registrado por el gasómetro en litros.

NOTA: Condiciones normales 273 °K y 101325 Pa (0 °C y 1atm).

## Apéndice B del guión experimental

### Determinación de la concentración de CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub> en el gas

Se determina por medio del método Orsat

% de CO<sub>2</sub> base seca

% de CO base seca

% de O<sub>2</sub> base seca

% de N<sub>2</sub> base seca

Donde:

$$\%N_2 = 100 - (\%CO_2 + \%O_2 + CO)$$

Se calcula el peso molecular de la mezcla gaseosa base húmeda PM<sub>H</sub>.

$$\begin{aligned} PM_H &= \left[ (PM_{H_2O}) \left( \frac{\%H_2O}{100} \right) \right] + \left[ (PM_{CO_2}) \left( \frac{\%CO_2}{100} \right) \left( \frac{100 - \%H_2O}{100} \right) \right] \\ &+ \left[ (PM_{CO}) \left( \frac{\%CO}{100} \right) \left( \frac{100 - \%H_2O}{100} \right) \right] + \left[ (PM_{O_2}) \left( \frac{\%O_2}{100} \right) \left( \frac{100 - \%H_2O}{100} \right) \right] \\ &+ \left[ (PM_{N_2}) \left( \frac{\%N_2}{100} \right) \left( \frac{100 - \%H_2O}{100} \right) \right] \end{aligned}$$

Se determina la densidad normal de los gases a condiciones normales

$$D_n = \frac{PM_H}{22.4}$$

Donde

D<sub>n</sub>= densidad normal de los gases base húmeda a 273 K y 101,325 Pa.

22.4= volumen molar en m<sup>3</sup>/kg mol.

## Apéndice C del guión experimental

### Determinación de SO<sub>2</sub> en el gas

El volumen de muestra referido a condiciones normales se obtiene con la ecuación 1:

$$V_n = (V_m + V_H) \left[ \frac{T_n(P_b + P)}{T_m P_n} \right] \quad (1)$$

Donde:

V<sub>n</sub>= Volumen muestra a condiciones normales.

V<sub>m</sub>= Volumen de muestra registrado en el medidor seco de gases, en m<sup>3</sup>.

T<sub>n</sub>= Temperatura normal, en K.

T<sub>m</sub>= Temperatura absoluta promedio, registrada en el medidor seco de gases, en K.

P<sub>b</sub>= Presión barométrica existente en el lugar de la determinación, en atm.

P<sub>n</sub>= Presión normal, en atm.

P= Presión manométrica promedio registrada en el medidor seco de gases, en atm.

V<sub>H</sub>= Volumen de vapor equivalente al agua condensada a condiciones del medidor seco de gases, en m<sup>3</sup>. Ver apéndice A (valor de V<sub>2</sub>).

La cantidad de bióxido de azufre colectado se obtiene con la siguiente ecuación 2:

$$M = P_{eq} \times N \times V \times F \times 10^{-3} \quad (2)$$

Donde:

M= Masa de bióxido de azufre colectada en g.

P<sub>eq</sub>= Peso equivalente del SO<sub>2</sub> (32.0 g/g. Eq).

N=Normalidad de la solución de perclorato de bario.

V= Diferencia entre  $V_1$  y  $V_2$ .

$V_1$ = Volumen perclorato de bario gastado durante la titulación de la alícuota tomada para la cuantificación de la muestra, en  $\text{cm}^3$ .

$V_2$ = Volumen perclorato de bario gastado durante la titulación de la alícuota tomada para la cuantificación de la muestra testigo (blanco), en  $\text{cm}^3$ .

F= Factor de aforos y alícuotas, adimensional.

La concentración de bióxido de azufre, a condiciones normales, se obtiene con la ecuación 3:

$$E = G_v \times C \quad (3)$$

Donde:

E= Emisión de bióxido de azufre, en g de  $\text{SO}_2/\text{h}$ .

C= Concentración de bióxido de azufre a condiciones normales, en g de  $\text{SO}_2/\text{m}^3$  (base húmeda).

$G_v=F$ = Gasto volumétrico de la corriente gaseosa a condiciones normales y se puede obtener de la ecuación 4.

$$F = V \times A \quad (4)$$

Donde V se obtiene a partir de la ecuación 5 y 6

$$V = K_p F_C \sqrt{\frac{T_{ch}}{P_M P_{ch}}} \overline{\Delta P}^{1/2} \quad (5)$$

$$\overline{\Delta P}^{1/2} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta P_i)^{1/2}}{n} \quad (6)$$

Donde:

V= velocidad media, m/s.

A= m<sup>2</sup>.

K<sub>p</sub>= 128 m/s(g/gmol K)<sup>1/2</sup>.

F<sub>C</sub>= factor de calibración del tubo de Pitot.

T<sub>ch</sub>= temperatura de gases del conducto, K.

PM= peso molecular base húmeda, g/gmol.

P<sub>ch</sub>= presión del conducto (absoluta), Kpa.

$\Delta P^{1/2}$ = presión dinámica, Kpa<sup>1/2</sup> es la suma de las raíces cuadradas de cada una de las presiones dinámicas en los puntos de muestreo seleccionados divididos entre el número de puntos totales.

NOTA: Condiciones normales 273 K y 101325 Pa (0 °C y 1 atm).

## **Apéndice D del guión experimental**

### **Determinación del flujo en el sistema**

Los resultados se deben expresar de la siguiente manera.

- Humedad. Utilizando los cálculos del apéndice A.
- Temperatura promedio. El promedio aritmético de los valores de temperatura en cada uno de los puntos.
- Peso molecular promedio. Utilizando los cálculos del apéndice B.
- Presión real. Es la suma algebraica de la presión barométrica y la presión estática.
- Área del conducto. Utilizando las ecuaciones del apéndice C.
- Presión dinámica. Utilizando las ecuaciones del apéndice C.
- Velocidad medio. Utilizando las ecuaciones del apéndice C.
- Flujo de gases. Utilizando las ecuaciones del apéndice C.

## Apéndice E del guión experimental

### Hoja de campo

Integrantes del Equipo:

Fecha:

Datos del tren de muestreo

Tabla 7 del guión experimental. Resultados parte 1 del experimento.

Impactor	Peso final (g)	Peso inicial (g)	Diferencia (g)
1			
2			
3			
4			
Suma			

Tiempo (min)	Temperatura Chimenea (°C)	Presión Atmosférica (Pa)	Temperatura (°C)	Consola Volumen (L)	Presión de vacío (in Hg)
Promedio				$L_{20}-L_0 =$	

$M_1$	$M_2$	H	n	VAC	$V_2$	% Humedad

**Tabla 8 del guión experimental. Resultados de la parte 2 del experimento**

Volumen agua desplazado en probeta			
	Volumen frasco 1 (mL)	Volumen frasco 2 (mL)	Volumen frasco 3 (mL)
Inicial			
Final			
Diferencia			

	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub> O
%					
PM					
PM <sub>M</sub>					

**Tabla 9 del guión experimental. Resultados de la titulación**

Matraz	Alícuota	Volumen perclorato de bario
1		
2		
	Promedio	

V <sub>m</sub> (L)	T <sub>n</sub> (K)	T <sub>m</sub> (K)	P <sub>b</sub> (Pa)	P <sub>n</sub> (Pa)	P (Pa)

### **Anexo 3. Emisión teórica de SO<sub>2</sub> de la caldera**

Se presentan los cálculos realizados para determinar la emisión teórica de SO<sub>2</sub> de la caldera del laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química.

#### **Datos técnicos de la caldera.**

Tipo: Monitor

Modelo: M-100-60

No. De serie: MX-3548-CE

Presión de diseño: 10.5 kg/cm<sup>2</sup>

Fecha de fabricación: 07-11-79

Combustible: Diesel

Capacidad: 940 kg/hora

#### **Propiedades del Diesel**

La hoja de seguridad HDSS: PR-304/2008 Diesel industrial bajo azufre, de PEMEX, presenta las siguientes propiedades para el diesel ocupado en la caldera del laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química.

Peso Molecular: ND.

Temperatura de ebullición: ND.

Temperatura de inflamación (°C): 45.

Temperatura de auto ignición (°C): 254 – 285.

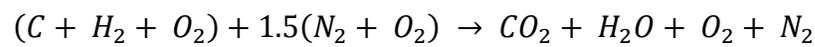
Presión de vapor @ 21°C (kPa): ND.

Poder calorífico: 48 MJ/kg combustible.

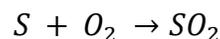
Contenido máximo de azufre total (mg/kg):500.

## Base de cálculo

- Consumo de combustible máximo de la caldera: 940 kg/hora.
- Contenido máximo de azufre del combustible (Diesel): 500 mg/kg.
- Composición gravimétrica del diesel<sup>23</sup>: Carbono=87%, Hidrogeno=12.6%, Oxígeno=0.3%.
- Exceso de aire 50%, considerando que es el valor máximo permisible en la NOM-085-ECOL-1994.
- Para el cálculo del gas de combustión, se considera que el diesel está compuesto por carbono, hidrógeno y oxígeno, ya que son los compuestos en mayor composición en el combustible; se descartan al azufre, nitrógeno y cenizas por tener una composición menor al 0.05%.
- El gas de combustión está compuesto por N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, y O<sub>2</sub>.
- El aire está compuesto de N<sub>2</sub> (79%) y de O<sub>2</sub> (21%).
- Se considera la ecuación de combustión.



- El gas de combustión es un gas ideal.
- Presión de combustión es la presión de diseño de la caldera.
- Temperatura del gas de combustión 240°C.
- El azufre contenido en el combustible reacciona completamente para formar bióxido de azufre de acuerdo a la siguiente reacción química.



## Cálculos

### Flujo de bióxido de azufre en el gas de combustión

- Flujo molar de azufre en el combustible.

$$\left(\frac{500 \text{ mg}_S}{1 \text{ kg}_{Diesel}}\right) \times \left(\frac{940 \text{ kg}_{Diesel}}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ g}_S}{1000 \text{ mg}_S}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_S}{32 \text{ g}_S}\right) = 14.68 \frac{\text{mol}_S}{\text{hr}}$$

---

<sup>23</sup> (Marcos, Olivera, Sivipaucar, Cubas, & Valderrama, 2007)

- Flujo másico de bióxido de azufre en el gas de combustión, en kilogramos, considerando que reacciona el 100% de azufre.

$$\left(\frac{14.68 \text{ mol}_S}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_{SO_2}}{1 \text{ mol}_S}\right) \times \left(\frac{64 \text{ g}_{SO_2}}{1 \text{ mol}_{SO_2}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ kg}_{SO_2}}{1000 \text{ g}_{SO_2}}\right) = 0.9376 \frac{\text{kg}_{SO_2}}{\text{hr}}$$

- Flujo volumétrico de bióxido de azufre en el gas.

Temperatura: 240°C

Presión: 10.5 kg/cm<sup>2</sup>

$$V = \frac{nRT}{P} = \left[ \frac{\left(14.68 \frac{\text{mol}}{\text{hr}}\right) \left(0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) (240^\circ\text{C} + 273.15)}{\left[ \left(10.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) \left(\frac{1 \text{ atm}}{1.0332 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}\right) \right]} \right] \times \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}\right)$$

$$= 60782.60 \frac{\text{mL}_{SO_2}}{\text{hr}}$$

### Flujo del gas de combustión

- Composición molar de carbono, hidrogeno y oxígeno en el diesel.
  - Carbono

$$\left(\frac{0.87 \text{ kg}_C}{1 \text{ kg}_{Diesel}}\right) \times \left(\frac{940 \text{ kg}_{Diesel}}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1000 \text{ g}_C}{1 \text{ kg}_C}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_C}{12 \text{ g}_C}\right) = 68150 \frac{\text{mol}_C}{\text{hr}}$$

- Hidrogeno

$$\left(\frac{0.126 \text{ kg}_{H_2}}{1 \text{ kg}_{Diesel}}\right) \times \left(\frac{940 \text{ kg}_{Diesel}}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1000 \text{ g}_{H_2}}{1 \text{ kg}_{H_2}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_{H_2}}{2 \text{ g}_{H_2}}\right) = 59220 \frac{\text{mol}_{H_2}}{\text{hr}}$$

- Oxígeno

$$\left(\frac{0.004 \text{ kg}_{O_2}}{1 \text{ kg}_{Diesel}}\right) \times \left(\frac{940 \text{ kg}_{Diesel}}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1000 \text{ g}_{O_2}}{1 \text{ kg}_{O_2}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_{O_2}}{32 \text{ g}_{O_2}}\right) = 117.5 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}}$$

- Oxígeno necesario para combustión.

Relación carbono-oxígeno es 1:1.

Relación hidrógeno-oxígeno es 2:1.

$$\left[\left(\frac{68150 \text{ mol}_C}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_{O_2}}{1 \text{ mol}_C}\right)\right] + \left[\left(\frac{59220 \text{ mol}_{H_2}}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_{O_2}}{2 \text{ mol}_{H_2}}\right)\right] = 97760 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}}$$

- Composición molar del aire para la combustión.

- Oxígeno

$$1.5 \left[ 97760 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}} - 117.5 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}} \right] = 146463.75 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}}$$

- Nitrógeno

$$\left(\frac{146463.75 \text{ mol}_{O_2}}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{79 \text{ mol}_{N_2}}{21 \text{ mol}_{O_2}}\right) = 550982.68 \frac{\text{mol}_{N_2}}{\text{hr}}$$

- Composición molar del gas de combustión.

- Dióxido de carbono

Se considera que todo el carbono reacciona para formar dióxido de carbono.

Relación C-CO<sub>2</sub> es 1:1.

$$\left(\frac{68150 \text{ mol}_C}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_{CO_2}}{1 \text{ mol}_C}\right) = 68150 \frac{\text{mol}_{CO_2}}{\text{hr}}$$

- Agua

Se considera que todo el hidrógeno reacciona para formar agua.

Relación H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O es 1:1

$$\left(\frac{59220 \text{ mol}_{H_2}}{1 \text{ hr}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol}_{H_2O}}{1 \text{ mol}_{H_2}}\right) = 59220 \frac{\text{mol}_{H_2O}}{\text{hr}}$$

- Dióxido de nitrógeno

El nitrógeno es un gas inerte.

$$550982.68 \frac{\text{mol}_{N_2}}{\text{hr}}$$

- Oxígeno

Oxígeno total menos oxígeno necesario para la combustión

$$\left(146463.75 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}}\right) - \left(97760 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}}\right) = 48103.75 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}}$$

- Flujo volumétrico del gas de combustión.

- 

- Moles totales

$$68150 \frac{\text{mol}_{CO_2}}{\text{hr}} + 59220 \frac{\text{mol}_{H_2O}}{\text{hr}} + 550982.68 \frac{\text{mol}_{N_2}}{\text{hr}} + 48103.75 \frac{\text{mol}_{O_2}}{\text{hr}} = 726456.43 \frac{\text{mol}}{\text{hr}}$$

- Flujo volumétrico del gas de combustión

Temperatura: 240°C

Presión: 10.5 kg/cm<sup>2</sup>

$$V = \frac{nRT}{P} = \left[ \frac{\left(726456.43 \frac{\text{mol}}{\text{hr}}\right) \left(0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) (240^\circ\text{C} + 273.15)}{\left[\left(10.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) \left(\frac{1 \text{ atm}}{1.0332 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}\right)\right]} \right] \times \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right)$$

$$= 3007.89 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

### Capacidad térmica de la caldera

$$\left(\frac{940 \text{ kg}_{\text{combustible}}}{\text{hr}}\right) \times \left(\frac{48 \text{ MJ}}{1 \text{ kg}_{\text{combustible}}}\right) = 45120 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

### Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en ppmV (mL/m<sup>3</sup>)

$$\text{ppm} = \frac{60782.60 \frac{\text{mL}_{\text{SO}_2}}{\text{hr}}}{3007.89 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}} = 20.20$$

### Emisión teórica de SO<sub>2</sub> en kg/10<sup>6</sup> kcal

$$\frac{0.9376 \frac{\text{kg}_{\text{SO}_2}}{\text{hr}}}{\left(45120 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{239 \text{ kcal}}\right)} = 0.0869 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}_{\text{SO}_2}}{\text{kcal}}$$

## Anexo 4. Concentración experimental de SO<sub>2</sub> en el gas de combustión que emite la caldera

### Experimento 1

Datos del tren de muestreo.

Impactor	Peso final (g)	Peso inicial (g)	Diferencia (g)
1	84.8	84.8	0
2	88.4	88.4	0
3	87.0	86.9	0.1
4	84.0	84.0	0
5	83.7	83.6	0.1
Suma	427.9	427.7	0.2

Tiempo (min)	Temperatura Chimenea (°C)	Presión Atmosférica (Pa)	Temperatura (°C)	Consola Volumen (L)	Presión de vacío (in Hg)
0	180	77993.5	20	876.3	0.5
4	180	77993.5	20	879.5	0.5
10					
15					
20					
Promedio	180	77993.5	20	L <sub>20</sub> -L <sub>0</sub> = 3.2	

Matraz	Alícuota	Volumen perclorato de bario
1	5	1
2	5	1
Promedio		1
Blanco		0.05

V <sub>m</sub> (L)	T <sub>n</sub> (K)	T <sub>m</sub> (K)	P <sub>b</sub> (Pa)	P <sub>n</sub> (Pa)	P (Pa)
3.2	273	293	77993.5	101325	0

## Determinación del contenido de humedad

$$H = M_2 - M_1 = 427.9g - 427.7g = 0.2g$$

$$n = \frac{H}{18} = \frac{0.2g}{18g/gmol} = 0.0111 gmol$$

$$VAC = n \times 22.4 = (0.0111 gmol) \left( 22.4 L/gmol \right) = 0.2488 L$$

$$V_2 = \frac{P_1 T_2 VAC}{P_2 T_1} \times 100 = \frac{(101325 Pa)(293 K)(0.2488 L)}{(77993.5 Pa)(273 K)} = 0.3469 L$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{V_2}{V_{GC} + V_2} \times 100 = \frac{0.3469 L}{3.2L + 0.3469 L} \times 100 = 9.78\%$$

Donde

H= es el peso total de humedad

n= es el número de moles que equivalen a la humedad colectada

VAC= es el volumen del vapor que equivalen al agua condensada y absorbida a condiciones de referencia

V<sub>2</sub>= es el volumen del vapor que equivale al agua condensada y absorbida a condiciones del gasómetro.

P<sub>1</sub>= es la presión normal en Pa

P<sub>2</sub>= es la presión absoluta del gasómetro en Pa

T<sub>1</sub>= es la temperatura normal en K

T<sub>2</sub>= es la temperatura del gasómetro en K

V<sub>gc</sub>= es el volumen registrado por el gasómetro en litro

### Determinación de la densidad normal del gas

$$\begin{aligned} PM_H = & \left[ \left( 18 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{9.78\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 44 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{9.75\%}{100} \right) \left( \frac{100\% - 9.78\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 38 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{0.13\%}{100} \right) \left( \frac{100\% - 9.78\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 32 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{3.50\%}{100} \right) \left( \frac{100\% - 9.78\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 28 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{86.62}{100} \right) \left( \frac{100\% - 9.78\%}{100} \right) \right] = 28.46 \text{ g/gmol} \end{aligned}$$

$$D_n = \frac{PM_H}{22.4} = \frac{28.46 \text{ g/gmol}}{22.4 \text{ L/gmol}} = 1.2705 \text{ g/L}$$

Donde

$PM_H$ = es el peso molecular base húmeda del gas

$D_n$ = densidad normal de los gases base húmeda a 273 °K y 101,325 Pa

22.4= volumen molar en L/g mol

### Determinación de SO<sub>2</sub> en el gas

$$\begin{aligned} V_n &= (V_m + V_H) \left[ \frac{T_n(P_b + P)}{T_m P_n} \right] \\ V_n &= (3.2 \text{ L} + 0.3469 \text{ L}) \left[ \frac{(273 \text{ K})(77993.5 \text{ Pa} + 0 \text{ Pa})}{(293 \text{ K})(101325 \text{ Pa})} \right] = 2.54 \text{ L} \end{aligned}$$

$$M = P_{eq} \times N \times V \times F \times 10^{-3}$$

$$M = \left( 32 \frac{g}{g \text{ eq}} \right) \left( 0.01 \frac{g \text{ eq}}{L} \right) (0.05 \text{ cm}^3) \\ \left( \frac{1 L}{1000 \text{ cm}^3} \right) \left( \frac{2 \times 49 \frac{g}{g \text{ mol}} (\text{ClO}_4^{-1})}{105 \frac{g}{g \text{ mol}} (\text{BaCl}_4)} \right) (10^{-3}) = 1.48 \times 10^{-8} g$$

Donde

$V_n$ = Volumen muestra a condiciones normales

$V_m$ = Volumen de muestra registrado en el medidor seco de gases, en  $m^3$

$T_n$ = Temperatura normal, en K

$T_m$ = Temperatura absoluta promedio, registrada en el medidor seco de gases, en K

$P_b$ = Presión barométrica existente en el lugar de la determinación, en atm

$P_n$ = Presión normal, en atm

$P$ = Presión manométrica promedio registrada en el medidor seco de gases, en atm

$V_H$ = Volumen de vapor equivalente al agua condensada a condiciones del medidor seco de gases, en  $m^3$ . Ver apéndice A (valor de  $V_2$ ).

$M$ = Masa de bióxido de azufre colectada en g

$P_{eq}$ = Peso equivalente del  $\text{SO}_2$  (32.0 g/g. Eq)

$N$ =Normalidad de la solución de perclorato de bario

$V$ = Diferencia entre  $V_1$  y  $V_2$

$V_1$ = Volumen perclorato de bario gastado durante la titulación de la alícuota tomada para la cuantificación de la muestra, en  $\text{cm}^3$

$V_2$ = Volumen perclorato de bario gastado durante la titulación de la alícuota tomada para la cuantificación de la muestra testigo (blanco), en  $\text{cm}^3$

$F$ = Factor de aforos y alícuotas, adimensional.

### Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en ppmV (mL/m<sup>3</sup>)

- Volumen del SO<sub>2</sub> en la muestra

Se utilizan valores de la muestra registrados en la consola

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{(1.48 \times 10^{-8} g_{SO_2}) \left( \frac{32 \text{ mol}_{SO_2}}{1 g_{SO_2}} \right) \left( 0.082 \frac{L * atm}{mol * K} \right) (293.5 K)}{(77993.5 \text{ Pa}) \left( \frac{1 atm}{101325 Pa} \right)}$$
$$= 1.47 \times 10^{-5} L_{SO_2}$$

- Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en la muestra

$$ppm = \frac{(1.47 \times 10^{-5} L_{SO_2}) \left( \frac{1000 mL}{1 L} \right)}{(3.2 L_{gas}) \left( \frac{1 m^3}{1000 L} \right)} = 4.62 ppm_{SO_2}$$

### Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en kg/10<sup>6</sup> kcal

$$\frac{\left( \frac{1.48 \times 10^{-8} g_{SO_2}}{4 \text{ min}} \right) \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)}{\left( 45120 \frac{MJ}{hr} \right) \left( \frac{1 MJ}{239 \text{ kcal}} \right)} = 1.17 \times 10^{-12} \frac{kg_{SO_2}}{kcal}$$

## Experimento 2.

Datos del tren de muestreo.

Impactor	Peso final (g)	Peso inicial (g)	Diferencia (g)
1	86.2	86.2	0
2	97.6	97.5	0.1
3	88.5	88.4	0.1
4	89.2	89.0	0.2
5	88.6	88.6	0
Suma	450.1	449.7	0.4

Tiempo (min)	Temperatura Chimenea (°C)	Presión Atmosférica (Pa)	Temperatura (°C)	Consola Volumen (L)	Presión de vacío (in Hg)
0	50	77993.5	20	881.2	0.5
5	130	77993.5	20	886.8	0.5
10	150	77993.5	20	891.8	0.5
15	170	77993.5	20	896.8	0.5
20	180	77993.5	20	901.4	0.5
Promedio	136	77993.5	20	$L_{20}-L_0 = 20.2$	

Matraz	Alícuota	Volumen perclorato de bario
1	5	1
2	5	1
Promedio		1
Blanco		0.05

$V_m$ (L)	$T_n$ (K)	$T_m$ (K)	$P_b$ (Pa)	$P_n$ (Pa)	$P$ (Pa)
20.1	273	293	77993.5	101325	0

## Determinación del contenido de humedad

$$H = M_2 - M_1 = 450.1g - 449.7g = 0.4g$$

$$n = \frac{H}{18} = \frac{0.4g}{18g/gmol} = 0.0222 gmol$$

$$VAC = n \times 22.4 = (0.0222 gmol) \left( 22.4 L/gmol \right) = 0.4977 L$$

$$V_2 = \frac{P_1 T_2 VAC}{P_2 T_1} \times 100 = \frac{(101325 Pa)(293 K)(0.4977 L)}{(77993.5 Pa)(273 K)} = 0.6939 L$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{V_2}{V_{GC} + V_2} \times 100 = \frac{0.6939 L}{20.2 L + 0.6939 L} \times 100 = 3.32\%$$

Donde

H= es el peso total de humedad

n= es el número de moles que equivalen a la humedad colectada

VAC= es el volumen del vapor que equivalen al agua condensada y absorbida a condiciones de referencia

V<sub>2</sub>= es el volumen del vapor que equivale al agua condensada y absorbida a condiciones del gasómetro.

P<sub>1</sub>= es la presión normal en Pa

P<sub>2</sub>= es la presión absoluta del gasómetro en Pa

T<sub>1</sub>= es la temperatura normal en K

T<sub>2</sub>= es la temperatura del gasómetro en K

V<sub>gc</sub>= es el volumen registrado por el gasómetro en litro

### Determinación de la densidad normal del gas

$$\begin{aligned} PM_H = & \left[ \left( 18 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{3.32\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 44 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{9.75\%}{100} \right) \left( \frac{100\% - 3.32\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 38 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{0.13\%}{100} \right) \left( \frac{100\% - 3.32\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 32 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{3.50\%}{100} \right) \left( \frac{100\% - 3.32\%}{100} \right) \right] \\ & + \left[ \left( 28 \text{ g/gmol} \right) \left( \frac{86.62}{100} \right) \left( \frac{100\% - 3.32\%}{100} \right) \right] = 29.21 \text{ g/gmol} \end{aligned}$$

$$D_n = \frac{PM_H}{22.4} = \frac{29.21 \text{ g/gmol}}{22.4 \text{ L/gmol}} = 1.3040 \text{ g/L}$$

Donde

$PM_H$ = es el peso molecular base húmeda del gas

$D_n$ = densidad normal de los gases base húmeda a 273 °K y 101,325 Pa

22.4= volumen molar en L/g mol

### Determinación de SO<sub>2</sub> en el gas

$$\begin{aligned} V_n &= (V_m + V_H) \left[ \frac{T_n(P_b + P)}{T_m P_n} \right] \\ V_n &= (20.2 \text{ L} + 0.6939 \text{ L}) \left[ \frac{(273 \text{ K})(77993.5 \text{ Pa} + 0 \text{ Pa})}{(293 \text{ K})(101325 \text{ Pa})} \right] = 14.99 \text{ L} \end{aligned}$$

$$M = P_{eq} \times N \times V \times F \times 10^{-3}$$

$$M = \left( 32 \frac{g}{g \text{ eq}} \right) \left( 0.01 \frac{g \text{ eq}}{L} \right) (0.05 \text{ cm}^3) \\ \left( \frac{1 L}{1000 \text{ cm}^3} \right) \left( \frac{2 \times 49 \frac{g}{g \text{ mol}} (\text{ClO}_4^{-1})}{105 \frac{g}{g \text{ mol}} (\text{BaCl}_4)} \right) (10^{-3}) = 1.49 \times 10^{-8} g$$

Donde

$V_n$ = Volumen muestra a condiciones normales

$V_m$ = Volumen de muestra registrado en el medidor seco de gases, en  $m^3$

$T_n$ = Temperatura normal, en K

$T_m$ = Temperatura absoluta promedio, registrada en el medidor seco de gases, en K

$P_b$ = Presión barométrica existente en el lugar de la determinación, en atm

$P_n$ = Presión normal, en atm

$P$ = Presión manométrica promedio registrada en el medidor seco de gases, en atm

$V_H$ = Volumen de vapor equivalente al agua condensada a condiciones del medidor seco de gases, en  $m^3$ . Ver apéndice A (valor de  $V_2$ ).

$M$ = Masa de bióxido de azufre colectada en g

$P_{eq}$ = Peso equivalente del  $\text{SO}_2$  (32.0 g/g. Eq)

$N$ =Normalidad de la solución de perclorato de bario

$V$ = Diferencia entre  $V_1$  y  $V_2$

$V_1$ = Volumen perclorato de bario gastado durante la titulación de la alícuota tomada para la cuantificación de la muestra, en  $\text{cm}^3$

$V_2$ = Volumen perclorato de bario gastado durante la titulación de la alícuota tomada para la cuantificación de la muestra testigo (blanco), en  $\text{cm}^3$

$F$ = Factor de aforos y alícuotas, adimensional.

### Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en ppmV (mL/m<sup>3</sup>)

- Volumen del SO<sub>2</sub> en la muestra

Se utilizan valores de la muestra registrados en la consola

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{(1.49 \times 10^{-8} g_{SO_2}) \left( \frac{32 \text{ mol}_{SO_2}}{1 g_{SO_2}} \right) \left( 0.082 \frac{L * atm}{mol * K} \right) (293.5 K)}{(77993.5 \text{ Pa}) \left( \frac{1 atm}{101325 Pa} \right)}$$
$$= 1.49 \times 10^{-5} L_{SO_2}$$

- Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en la muestra

$$ppm = \frac{(1.49 \times 10^{-5} L_{SO_2}) \left( \frac{1000 \text{ mL}}{1 L} \right)}{(20.2 L_{gas}) \left( \frac{1 m^3}{1000 L} \right)} = 0.717 ppm_{SO_2}$$

### Emisión experimental de SO<sub>2</sub> en kg/10<sup>6</sup> kcal

$$\frac{\left( \frac{1.49 \times 10^{-8} g_{SO_2}}{4 \text{ min}} \right) \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)}{\left( 45120 \frac{MJ}{hr} \right) \left( \frac{1 MJ}{239 \text{ kcal}} \right)} = 4.73 \times 10^{-12} \frac{kg_{SO_2}}{kcal}$$

## Anexo 5. Diseño del medidor de orificio

El gasto de un fluido se puede cuantificar relacionando la variación de la presión con la velocidad que tiene un fluido que fluye a través de un conducto.

Para medir el gasto en tubería se pueden usar medidores de orificio, cuya función es básicamente tener una reducción gradual o brusca en la sección transversal de la tubería, lo que ocasiona un aumento en la velocidad del fluido y disminución de la presión; dando con esto los datos necesarios para calcular el gasto del fluido.

El medidor venturi es uno de los dispositivos más precisos para medir el gasto en tuberías mayores a 2 pulgadas, pero tiene la desventaja de tener un costo elevado.

El tubo venturi se compone de tres secciones y elementos principales que se muestran en la Ilustración 1.

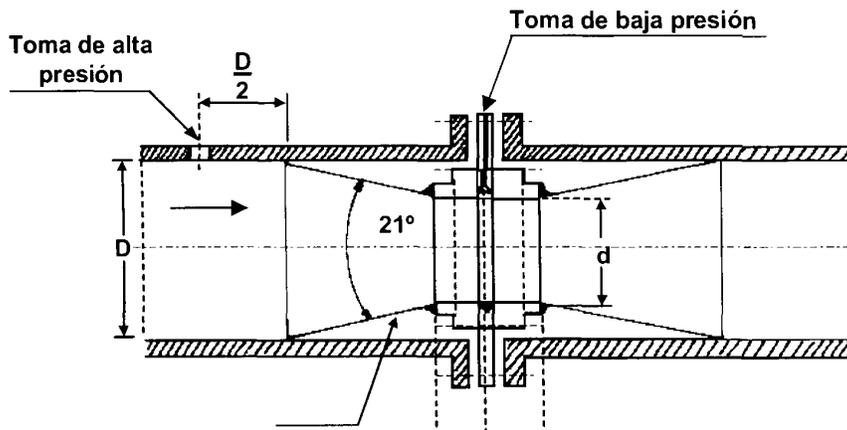


Ilustración 22. Tubo venturi

Las secciones del tubo venturi son:

- Entrada: Tiene un diámetro inicial igual al diámetro de la tubería y una sección cónica convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta.
- Garganta: Es el orificio de menor diámetro que la entrada, la cual genera la caída de presión.
- Salida: Consiste en una sección cónica divergente que concluye con el diámetro de la tubería.

Los elementos del tubo venturi son:

- Toma de alta presión.
- Chapa.
- Toma de baja presión.

En el libro de “Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías” de Crane, se encuentra la ecuación para obtener el flujo de un gas o vapor que pasa por un orificio o tobera, la ecuación es la siguiente:

$$Q = YCA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Donde:

Q= Es el gasto del fluido en m<sup>3</sup>/s.

Y= Es el factor de expansión neto.

El factor de expansión es función de:

- La relación de calores específicos.
- La relación ( $\beta$ ) entre el orificio de garganta y el diámetro de entrada.
- Este factor se puede ver en la tabla A-18 del libro *Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías*.

C= Es el coeficiente de flujo equivalente a la velocidad del fluido.

El coeficiente C es función de:

- La relación ( $\beta$ ) entre el orificio de garganta y el diámetro de entrada.
- El número de Reynolds basado en  $d_2$ .

A= Es el área de sección transversal por donde pasa el fluido en la tubería, en  $m^2$ .

$\Delta P$ = Es la caída de presión debido al cambio de diámetros, en Pa.

$\rho$ = Es la densidad del fluido en  $kg/m^3$ .

El coeficiente de flujo se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{C_v}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Donde:

$C_v$ = Es el factor del venturi = 0.98.

Nota: el coeficiente C se puede obtener de las tablas A-16 y A-17 del Libro *Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías* para una relación entre el valor de  $\beta$  y el Reynolds.

$$Re = \frac{d_2 V \rho}{\mu}$$

Donde:

V= es la velocidad del fluido en m/s.

$\rho$ = Es la densidad del fluido en  $Kg/m^3$ .

$d_2$ = es el diámetro de la tubería en m.

$\mu$ =es la viscosidad del fluido en  $kg/m \cdot s$ .

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{PM}{RT}$$

Donde:

P= Presión del fluido en atm.

M= peso molecular del fluido en g/gmol.

R= constante de los gases (0.088205 atm L/gmol K).

T= temperatura del fluido en K.

$\beta$ = Es la relación de diámetros del orificio de garganta y el diámetro de entrada  
la ecuación para calcular  $\beta$  es:

$$\beta = \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}$$

Donde:

$d_1$ = Es el diámetro de la garganta de la tubería, en m.

$d_2$ = Es el diámetro de la entrada del venturi, en m.

### **Diseño del tubo venturi**

Para calcular el diámetro del tubo venturi, se considera que para un diámetro de garganta existe una caída de presión mínima y una máxima, lo que corresponde a un flujo mínimo y uno máximo para cada diámetro de garganta. En el caso particular de este diseño se cuenta con un manómetro diferencial que tiene un rango de 0 a 5 inH<sub>2</sub>O, dando con esto los límites mínimo y máximo de caída de presión.

Se realizan los cálculos de flujo mínimo y máximo para diferentes diámetros de garganta, con la finalidad de encontrar el diámetro de garganta que dé un rango de flujo en el que se encuentren el que se necesita para el análisis. Los resultados se encuentran en la tabla 2.

Nota: las ecuaciones para diseñar el tubo Venturi son para diámetros industriales. El diseño del tubo Venturi para este proyecto es de un diámetro pequeño, menor a 8 mm, que es el diámetro exterior de la tubería utilizada, por lo que puede existir un margen de error y los cálculos presentados son sólo una aproximación.

**Tabla 10. Flujo máximo y mínimo para diferentes diámetros de garganta del tubo venturi**

D1 (Diámetro garganta) (mm)	Q min (l/min)	Q max (l/min)
1	14.55	100.84
1.5	14.55	100.84
2	14.79	102.55
2.5	14.79	102.55
3	15.04	104.26
3.5	15.29	105.97
4	17.01	117.93
4.5	17.51	121.35
5	18.49	128.19
5.5	19.73	136.73
6	22.93	158.95
6.5	24.66	170.92
7	24.66	170.92
7.5	24.66	170.92

El análisis de humedad del gas que fluye por una chimenea establece que se debe manejar un flujo de 5 L/min, mientras que para el análisis de SO<sub>2</sub> se debe manejar un flujo de 1 L/min. Dados estos parámetros, se puede observar en la tabla 3 que para tener un flujo de 1 L/min sería necesario un diámetro de garganta pequeño,

por debajo de 1 mm, sin embargo el material que se tiene para manufacturar el tubo venturi sólo permite un diámetro mínimo de garganta que es de 1.5 mm (1/16 in), por lo que, una vez ensamblado el tren de muestreo, se realizarán pruebas para verificar si este diámetro es adecuado para el flujo deseado.

El tubo Venturi queda con las siguientes características:

Diámetro exterior en mm: 8.

Diámetro de garganta en mm: 1.5.

Longitud en cm: 5.

Distancia entre toma de alta presión diámetro de garganta ( $D/2$ ) en mm: 4.

