

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**



**METODO PARA DETERMINAR LA CONCEN-  
TRACION DE PARTICULAS SOLIDAS EN FUENTES  
CONTAMINANTES.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO QUIMICO**  
**P R E S E N T A**

**FRANCISCO JAVIER GUZMAN CASTILLO**

1973

M-165573



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.

A MIS PADRES

JESUS Y MA. LORETO

... Como una humilde recompensa  
a todos los sacrificios y es- -  
fuerzos que han hecho para for-  
jarme.

A MIS HERMANOS

MA. DE JESUS Y DELIA

... Quienes al haber llegado  
a esta meta me han enseñado-  
el camino por recorrer.

Y JUAN ANTONIO

... Para que esta sea una razón  
más de superación.

A MARILU

... Que con su confianza y apoyo  
supo alentarme en los momentos -  
mas dificiles.

A TODOS MIS FAMILIARES Y AMIGOS

A LOS SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO

AL ING. JORGE MENCARINI P.

Por su atinada dirección y  
ayuda desinteresada en el-  
desarrollo de esta tesis.

A MI ESCUELA

A BUFETE INDUSTRIAL

## I N D I C E

	PAG.
NOMENCLATURA	
GENERALIDADES	
CAPITULO I.- SELECCION DE SITIOS DE MUESTREO.	
1.1	Localización de los Puertos de Muestreo... 1
1.2	Cálculo y selección de los puntos de muestreo en la sección transversal del ducto . 2
1.3	Instalaciones y requisitos..... 10
CAPITULO II.- DETERMINACION DEL FLUJO DE GASES.	
2.1	Descripción del equipo necesario..... 16
2.2	Deducción y discusión de las fórmulas empleadas..... 23
2.3	Desarrollo de la técnica ..... 33
2.4	Hoja de registro y cálculos ..... 38
CAPITULO III.- DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE SOLIDOS EN LOS GASES.	
3.1	Descripción del equipo necesario ..... 41
3.2	Deducción y discusión de las fórmulas empleadas..... 50
3.3	Desarrollo de la técnica ..... 58

	PAG.
3.4 Hoja de registro y cálculos.....	64
CAPITULO IV.- DISCUSION DE LOS RESULTADOS REFERIDOS	
AL REGLAMENTO PARA LA PREVENCION Y -	
CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERI	
CA ORIGINADA POR LA EMISION DE HUMOS-	
Y POLVOS.....	
	67
CAPITULO V.- EJEMPLO.....	74
CONCLUSIONES .....	77
APENDICES .....	78
BIBLIOGRAFIA .....	85



## N O M E N C L A T U R A

	UNIDADES
A = Area efectiva de la sección transversal de la chimenea.....	$M^2$
a = A', B', C' etc. = Subáreas efectivas iguales en las que se divide la sección transversal de la chimenea.....	$m^2$
D = Diámetro de la chimenea.....	cm.
De = Diámetro equivalente de la chimenea.....	cm.
d = Diámetro de la boquilla de muestreo.....	cm.
E = Energía interna del fluido.	
Fc = Factor de corrección por condensados.	
F <sub>S</sub> = Factor de corrección del tubo pitot.	
g <sub>C</sub> = Aceleración de la gravedad = 9.807.....	$m/seg^2$
Gd = Gravedad específica del gas medido referido al aire.	
H = (P <sub>2</sub> - P <sub>1</sub> ) = Lectura en el manómetro.....	mm Hg.
H <sub>M</sub> = Humedad ó volumen de agua remanente, contenida en el volumen muestreado a condiciones del medidor.	
H <sub>R</sub> = Humedad relativa expresada en % .....	%
M = Peso molecular.	
N = Número de lecturas a través de un diámetro.	
$\frac{N}{2}$ = Número de subáreas en las que se divide la sección transversal de la chimenea.	
n = El N <sup>avo</sup> punto desde el centro de la chimenea.	

	UNIDADES
$n'$ = N° de moles.	
$P_b$ = Presión barométrica.....	mm Hg
$P_G$ = Presión absoluta del gas medido en la chimenea	mm Hg
$P_1 = P_G$ = Presión absoluta del gas, medido en la chime - nea.....	mm Hg
$P_2 = P_M$ = Presión absoluta del gas en el medidor.....	mm Hg
$P_S$ = Presión de succión ó vacío promedio en el me- didor.....	mm Hg
P.V. = Presión de vapor del agua.....	mm Hg
PV = Trabajo a expensas de la energía de la vecin- dad.	
$Q'$ = Calor absorbido por el material que está flu- yendo en la vecindad.	
R = Radio de la chimenea.....	cm.
$R_n$ = Distancia del centro de la chimenea al <u>N<sup>avo</sup></u> - punto de prueba, numerado en forma consecuti- va.....	cm.
$T_G$ = Temperatura absoluta del gas muestreado.....	°K
$T_1 = T_G$ = Temperatura absoluta del gas muestreado.....	°K
$T_2 = T_M$ = Temperatura promedio de los gases en el medi- dor (absolutos).....	°K
$\frac{v^2}{2g_c \alpha}$ = Energía cinética externa asociada al movimien- to del fluido.	
V = Gasto volumétrico del gas a condiciones de la chimenea.....	$m^3/\text{min.}$

	UNIDADES
$V_1 = V$ = Volúmen $\delta$ gasto del gas, en las condiciones de la chimenea.....	m <sup>3</sup> /min.
$V_0$ = Gasto volumétrico del gas a condiciones de la chimenea.....	m <sup>3</sup> /seg.
$\bar{V}_G$ = Velocidad promedio del gas muestreado.....	m/seg.
$V_2 = V_M$ = Volúmen de la muestra de gas, medida por el medidor en cada punto de la prueba en un tiempo determinado.....	m <sup>3</sup> /min.
$V_a$ = Volúmen medido del agua.....	cc
$V_m$ = Volúmen total medido en el gasómetro durante todo el transcurso de la prueba.....	m <sup>3</sup>
$V_{TM}$ = Volúmen total muestreado a cond. del medidor	m <sup>3</sup>
$V_{TG}$ = Volúmen total muestreado a cond. de la chimenea.....	m <sup>3</sup>
$V_V$ = Volúmen de vapor a condiciones de medidor..	m <sup>3</sup>
$V_{STD}$ = Gasto volumétrico del gas a condiciones estandard (29.92 in de Hg y 0 ° C ó 32 ° F )..	m <sup>3</sup> /min.
$W$ = Peso.....	g
$W'_f$ = Trabajo transferido por el fluido al exterior a medida que fluye por el equipo.	
$\frac{Z_g}{gc}$ = Energía potencial externa debido a la posición del fluido con respecto a un plano de referencia arbitrario.	
$\rho$ = Densidad del gas.....	kg/m <sup>3</sup>
$V_{CORR}$ $V_{TCORR}$ , (kg/hr) $CORR$ = $V$ , $V_{TM}$ (kg/hr) solo que las condiciones y unidades usadas por	

el " Reglamento para La Prevención y Control De  
La Contaminación Atmosférica Originada Por La -  
Emisión de Humos y Polvos.

### GENERALIDADES

El crecimiento excesivo de la población unido al desarrollo y progreso del hombre, ha ocasionado como consecuencia un fenómeno que brota de la actividad del mismo y es enemigo de su vida y del ambiente productivo, la contaminación ambiental.

Aunque es cierto que siempre ha existido contaminación ambiental en forma natural, por emanaciones de volcanes, polvos levantados por el viento, erosiones, dispersión de polen, etc., y ésta desaparece sin alterar el equilibrio ecológico, también es cierto que la ocasionada por la civilización humana, no desaparece sino que rompe el equilibrio ambiental al descargarse en la atmósfera un número mayor de impurezas que las que se pueden disolver o degradar por acción de la naturaleza.

Las fuentes individuales de la contaminación atmosférica son muchas y muy variadas; pero las emisiones en fuentes estacionarias son identificadas como una de las principales contribuyentes a este problema.

Por esta razón se considera necesario conocer la magnitud de éste en forma unitaria y así tratar de encontrar una solución para lo cual se desarrolló este método sencillo y práctico, cuya función es determinar la concentración de partículas sólidas emitidas por este tipo de fuentes, acep

tando de antemano que no se pretende normar esta clase de prueba, sino solo proponer un sistema.

Para que un muestreo de concentración de partículas sólidas mayores de tres micras en un ducto o chimenea sea preciso debe ser isocinético.

Un muestreo isocinético se obtiene solamente si la velocidad del gas dentro de la boquilla de muestreo es igual a la de la corriente medida.

Si la velocidad de muestreo es demasiado alta (muestreo super-isocinético), habrá una concentración muy baja de partículas colectadas, debido a que la inercia de las partículas mayores les impide continuar la trayectoria de flujo que sigue la corriente al entrar a la boquilla.

Por lo contrario en pruebas sub-isocinéticas donde la velocidad de muestreo es menor que la de la corriente, la concentración de partículas es mayor que la real.

La Environmental Protection Agency (EPA) opina que las muestras que estén fuera de la escala de  $\pm 20\%$  de la relación velocidad en la boquilla/velocidad en la chimenea, deben ser rechazadas y repetirse la prueba.

Esta es la razón por la cual antes de efectuar la prueba es necesario hacer una medición de velocidad; además de medir las temperaturas, presiones y humedad del gas en el ducto y en el gasómetro empleado para efectuar las correcciones correspondientes.

## CAPITULO I.- SELECCION DE LOS SITIOS DE MUESTREO.

La selección de los puertos de muestreo y el número y situación de puntos necesarios para éste, está basada en el intento de obtener muestras representativas y es como se especifica a continuación:

### 1.1 LOCALIZACION DE LOS PUERTOS DE MUESTREO.

Para la selección de estos sitios de prueba, deben de tomarse en cuenta dos consideraciones muy importantes:

1.1.1 Debe escogerse una sección transversal del ducto, donde el flujo sea tan uniforme como sea posible para lo cual es necesario que se encuentre situada en un tramo recto vertical de 8 a 10 diámetros mínimos, antes y después de cualquier tipo de perturbación, cambio de dirección, de sección, entrada o salida de flujo.

1.1.2 La segunda consideración que debe tomarse en cuenta para la selección de esta área, es la facilidad y comodidad que se debe tener para subir, instalar y operar el equipo de medición tanto de velocidad como de concentración.

Para ductos circulares cuando se ha hecho la anterior selección, se localizan los puertos de muestreo que

deben ser mínimos dos, situados en la misma sección -- transversal a 90° uno de otro como lo muestra la figura 1.5, con el objeto que al realizar las pruebas éstas sean representativas, al comprender en ellas una gran parte del área y ser fieles al perfil de velocidades.

Cuando se trate de ductos rectangulares, para seleccionar la sección transversal, se utiliza el diámetro --- equivalente, el cual puede ser calculado de la expresión:

$$Deq = \frac{2(\text{Longitud} \times \text{Ancho})}{\text{Longitud} + \text{Ancho}} \dots\dots\dots 1.1$$

Y para la localización de los puertos de muestreo ver la figura 1.4



1.2 CALCULO Y SELECCION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO EN LA SECCION TRANSVERSAL DEL DUCTO.

El flujo en una chimenea puede ser de dos naturalezas muy diferentes: laminar o turbulento.

En el primer caso, las venas corren paralelamente a las otras; en el segundo siguen trayectorias sinuosas, produciendo remolinos.

En el flujo laminar, puede demostrarse que la velocidad del fluido es máximo en el centro del tubo y nula



en las paredes del mismo; variando parabólicamente desde cero hasta su máximo, lo muestra la figura 1.1

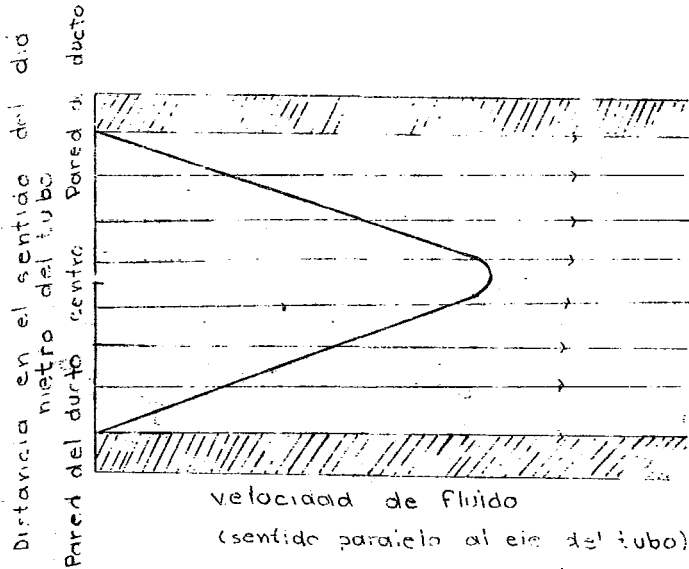


Fig. 1.1.- Distribución de las velocidades en el flujo laminar.

En el flujo turbulento, las venas de fluido cercanas a la pared del tubo siguen la misma ley parabólica, -- por lo que respecta a su velocidad, pero, en la parte central de éste, la velocidad es casi constante, como lo muestra la figura 1.2

Es de esperarse, que cuando el área transversal de --- prueba no se encuentre localizada según requisitos del

punto 1.1, el flujo tenderá a ser más turbulento cuando menos lo cumplan.

Debido a estos grandes gradientes de velocidad, y por consiguiente de concentración (ocasionado por la inercia) que ocurre en las chimeneas, es necesario calcular y localizar varios puntos de muestreo en cada diámetro de la sección transversal seleccionada como puertos de muestreo, por ser completamente irreal hacer la prueba en un solo punto del ducto, para lo cual se sigue el criterio siguiente según sea el tipo de chimenea.

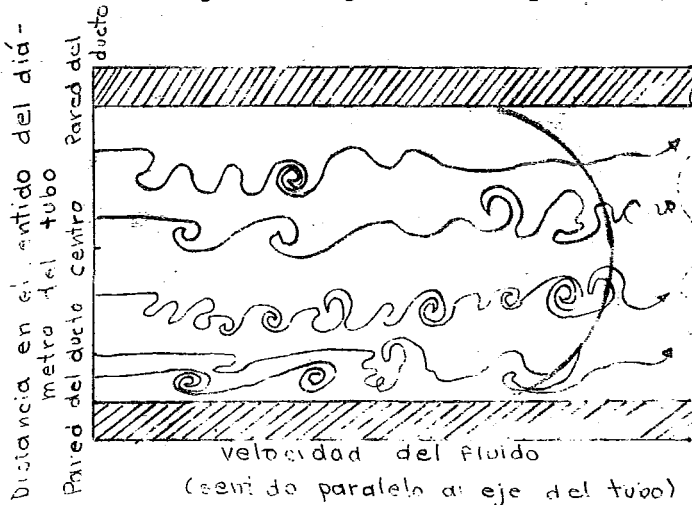


Fig. 1.2.- Distribución de las velocidades en el flujo turbulento.

### 1.2.1 CHIMENEAS CIRCULARES.

Como se dijo anteriormente la velocidad no es y no -- puede ser considerada uniforme a través de ninguna - sección transversal, sin embargo en cualquier subárea individual se puede considerar el cambio de velocidad constante con la velocidad promedio en el centroide de esa área.

En todos los casos se divide el área interior efectiva e un número de sub-areas concéntricas iguales y se hacen las pruebas en el centroide de cada una.

De acuerdo con datos experimentales se puede tener el Número Mínimo de Areas, iguales en función del diámetro en las cuales se vá a dividir la sección transversal del ducto (ver apéndices 1 y 2).

Estas experiencias del apéndice 1 son aplicables sólo en el caso en que la sección transversal cumpla con - el punto 1.1.1 ó sea que el flujo sea regularmente -- uniforme (la relación de velocidades no exceda de 2 a 1).

Cuando los puertos de muestreo, no cumplan con el punto 1.1.1 habrá altas diferencias de velocidad o turbulencias extremas de flujo y los apéndices 1 y 2 no -- son aplicables.

Cuando la sección transversal se encuentre a una distancia de 4 a 6 diámetros de cualquier perturbación de flujo se toman el doble número de puntos en cada diámetro y cuando esté a menos de 4 se tomará el triple.

Cuando por medio de los apéndices 1 y 2, se tiene el número mínimo de subáreas iguales en que se divide el área principal, el paso siguiente es calcular los radios  $R_n$  de los centroides al centro de la chimenea para lo cual se deduce la siguiente ecuación:

(Ver la siguiente figura)

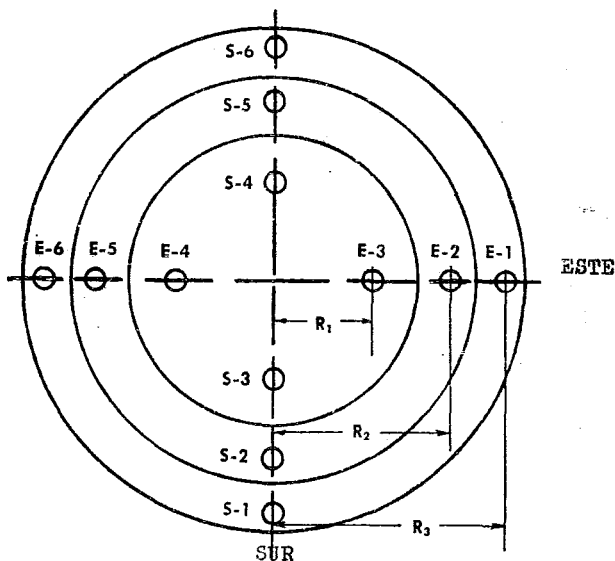


Fig. 1.3.- Localización de los puntos de medición en una sección circular.

$$a = \text{Area A} = \text{Area B} = \text{Area C} \dots\dots\dots 1.2$$

$$a = \pi r^2 \dots\dots\dots 1.3$$

$$a = \pi \frac{D^2}{4} \dots\dots\dots 1.4$$

despejando r de 1.3

$$r = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \dots\dots\dots 1.5$$

R<sub>n</sub> = Radio del centroide n al centro del área total.

$$R_1 = \sqrt{\frac{a/2}{\pi}} \dots\dots\dots 1.6$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{a+a/2}{\pi}} \dots\dots\dots 1.7$$

$$R_3 = \sqrt{\frac{2a + a/2}{\pi}} \dots\dots\dots 1.8$$

$$R_n = \sqrt{\frac{(n-1)a + a/2}{\pi}} \dots\dots\dots 1.9$$

Substituyendo 1.4 en 1.9

$$R_n = \sqrt{\frac{(n-1) \frac{\pi D^2}{4} + \frac{\pi D^2}{8}}{\pi \frac{N}{2}}} \dots\dots\dots 1.10$$

Donde:

$\frac{N}{2}$  = Número de Areas

N = Número de lecturas a través de un diámetro.

Simplificando y Arreglando

$$R_n = \sqrt{\frac{2(n-1) \tilde{\pi} D^2 + \tilde{\pi} D^2}{\frac{8}{2} \tilde{\pi} N}}$$

$$R_n = \sqrt{\frac{D^2 (2n-2) + 1}{4N}}$$

$$R_n = D \sqrt{\frac{2n-1}{4N}} \dots\dots\dots 1.11$$

tanto las ecuaciones 1.9 como 1.11 se pueden usar y en ellas:

$R_n$  = Distancia del centro de la chimenea al  $N^{\text{avo}}$  punto de prueba, numerado en forma consecutiva. ---

(en la figura 1.3 para E-3, E-4, S-3 y S-4.

$n = 1$  El  $N^{\text{avo}}$  punto desde el centro de la chimenea.

$D$  = Diámetro de la chimenea.

$N$  = Número de lecturas a través de un diámetro.

$a = A = B = C$  Subáreas.

La ecuación 1.9 se resolvió para diferentes diámetros y los resultados y los valores de  $R_n$  para cada punto de prueba se encuentran tabulados en los apéndices 1 y 2, y así en esta forma queda resumido el contenido de este inciso.

### 1.2.2 Chimeneas Rectangulares:

En éstas como en las circulares el flujo no es uniforme en toda el área transversal y se sigue el mismo criterio de dividir en subáreas iguales al área total to-

mando como punto de prueba el centro de cada una.

Estas subáreas deben ser iguales y la relación de la longitud a ancho debe ser entre 1 y 2.

Para que la prueba sea confiable un mínimo de 9 puntos transversales debe ser seleccionado. (Ver figura 1.4).

El número mínimo de subáreas como en el caso de diámetro circular está en función del área total del ducto. Estos valores se encuentran en el apéndice 3 y también son aplicables sólo cuando se cumple el punto 1.1.1

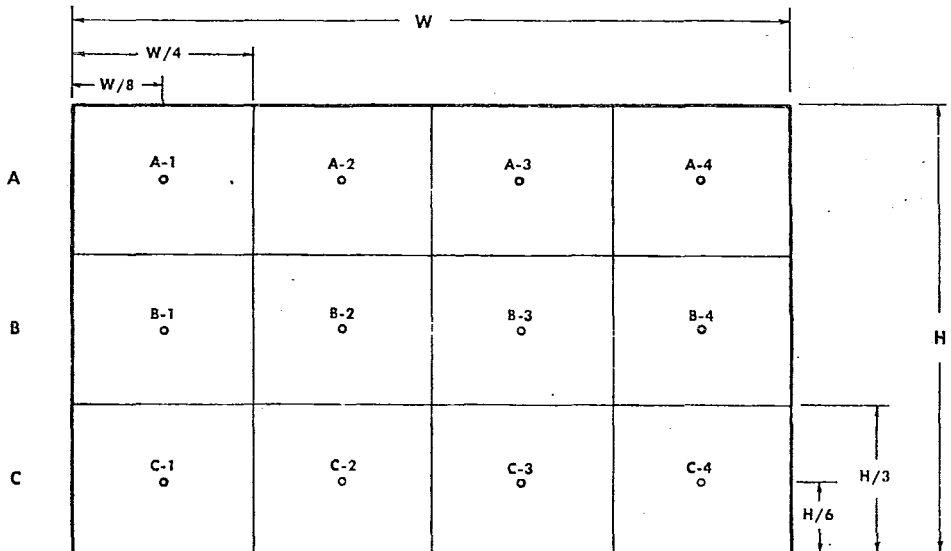


Fig. 1.4.- Localización de los puntos de medición en una sección rectangular.

1.3 INSTALACION Y REQUISITOS:

Para llevar a cabo el muestreo isocinético de aerosoles, además de seleccionar los puntos apropiados es necesario instalar puertos y plataformas, que faciliten las operaciones y garanticen la seguridad del personal que las realice, por tanto, deberá dispo- nerse de las instalaciones y requisitos siguientes:

1.3.1 PUERTOS DE MUESTREO (FIG. 1.5).

1.3.1.1 Generalmente se requieren dos puertos de muestreo - colocados en los sitios especificados por el inciso 1.1.

1.3.1.2 Deben ser tubos industriales de 3 pulg. (7.62 cm) - de diámetro, ya sea con bridas o con cuerda normal - exterior. No deberán sobresalir más de 15 cm. de la parte exterior del ducto, al menos que sea necesario equiparlos con válvulas de compuerta cuando circulen gases peligrosos ( Tóxicos, explosivos, etc.) con - presión positiva a temperaturas muy altas. Tampoco - deberán sobresalir de la parte interior del ducto, - pues entorpecerían las mediciones sobre todo el primer punto.

1.3.1.3 Deben ser lo suficientemente resistentes para sopor-



tar una fuerza cortante vertical de 100 kgs., una fuerza radial (en el sentido del diámetro del ducto) de 25 kgs. y una fuerza lateral de 25 kgs.

1.3.1.4 El espacio libre mínimo horizontal necesario a cada lado del puerto debe ser de 60 cm.

1.3.1.5 El espacio libre mínimo diametral necesario será igual a la distancia de un diámetro más un metro.

1.3.1.6 El espacio libre hacia arriba de un puerto de muestreo debe ser como mínimo, un segmento anular de 30 cm. de altura por 3 veces al radio de la chimenea más un metro a partir del centro de ésta.

1.3.1.7 El espacio libre hacia abajo de un puerto de muestreo debe ser como mínimo un sector anular de 60 cm. de altura por 3 veces al radio de la chimenea más un metro, a partir del centro de ésta.

Todas estas especificaciones y requisitos se encuentran explicadas en las figuras 1.5 y 1.6.

1.3.2 PLATAFORMA DE OPERACION.

1.3.2.1 Deberá ser suficientemente amplia y resistente, para que puedan trabajar 3 personas de peso normal (70 kg) con equipo que pese hasta 70 kg. para mayor seguridad

y estar provista de barandal y rodapié de protección.

1.3.2.2 Como mínimo se requiere un espacio de piso de plataforma de trabajo de 1 m. a cada lado del puerto de muestreo.

1.3.2.3 El ancho mínimo de la plataforma anular debe ser de 1 m.

1.3.2.4 Si la suma del diámetro interior del ducto, más el espesor de la pared de éste (chimenea), más la longitud del puerto, es mayor que la sonda de muestreo o tubo de pitot, será necesario una plataforma (que abarque) en todo alrededor del ducto, y se dispondrá de 4 puertos de muestreo, separados 90° entre sí.

1.3.3 MEDIO DE ASCENSO.

1.3.3.1 Debe contar con un medio seguro de ascenso, por ejemplo elevador o escalera tipo marino.

1.3.3.2 Si se utiliza escalera (tipo marino) la abertura de acceso a la plataforma deberá distar como mínimo 1 m. de cualquier puerto de muestreo.

ANILLO DE ESCALERA  
TIPO MARINO

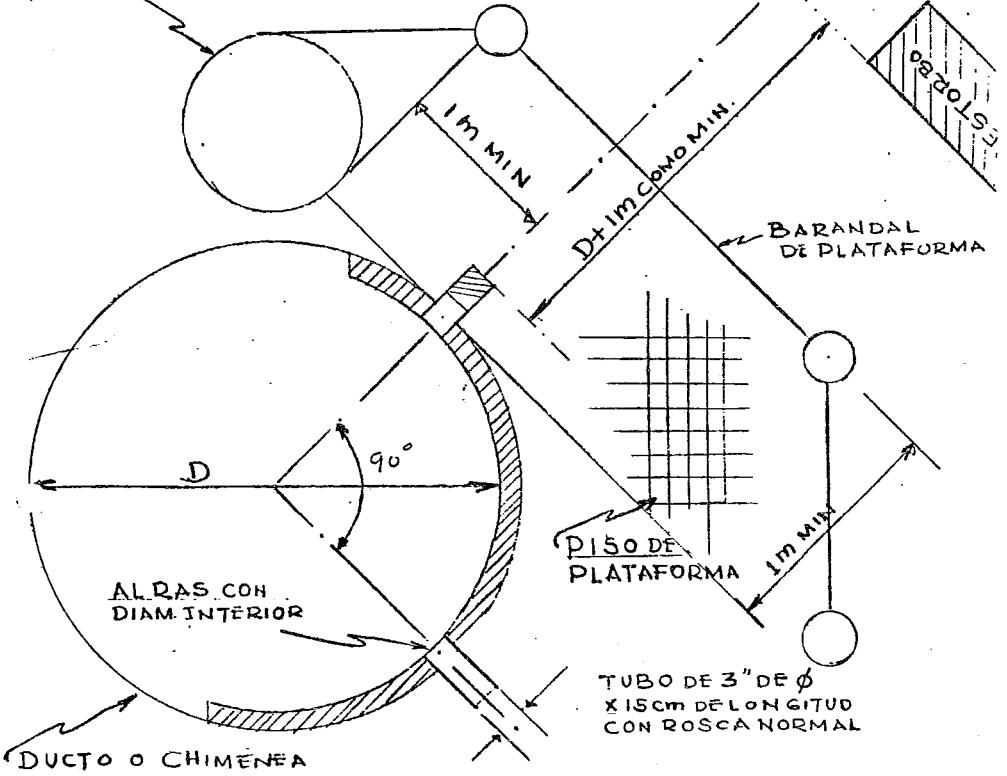


Fig. 1.5.- Dimensiones y requisitos para instalaciones de muestreo en ductos y chimeneas.

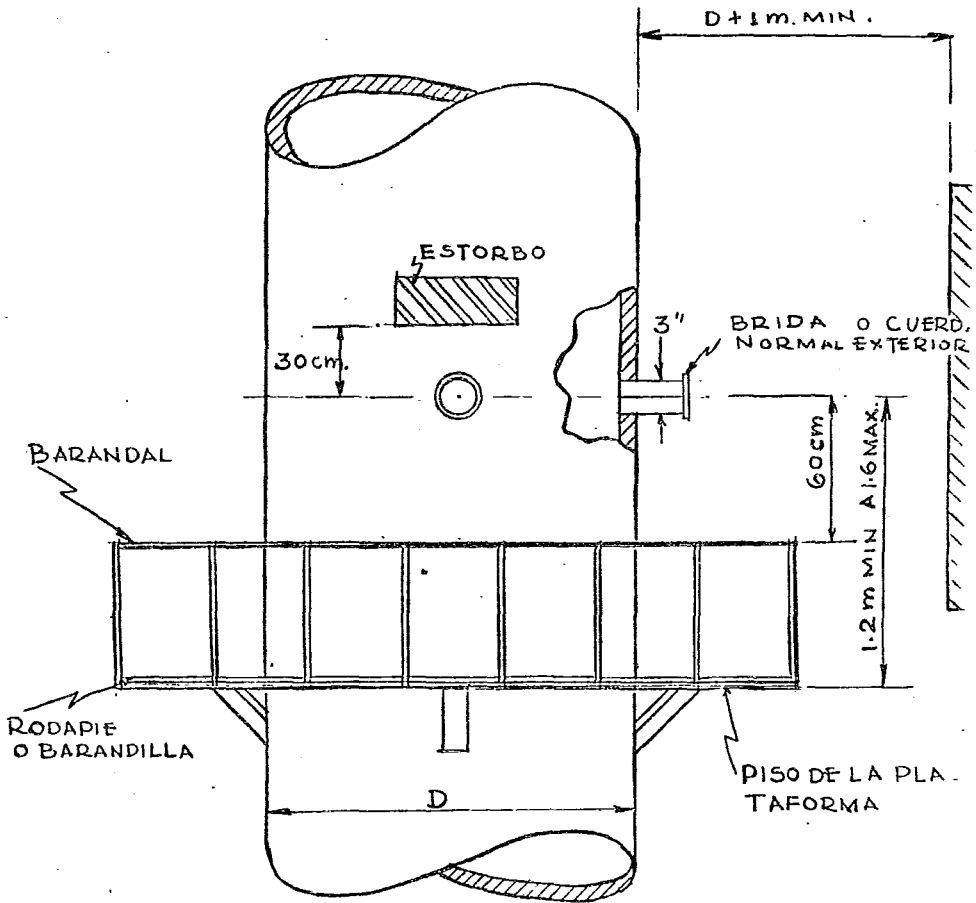


Fig. 1.6.- Dimensiones y requisitos para instalaciones de muestreo en ductos y chimeneas.

## CAPITULO II.- DETERMINACION DEL FLUJO DE GASES.

Como se había dicho anteriormente ningún muestreo puede ser hecho hasta que el flujo del gas ha sido medido. Estas mediciones incluyen la determinación de los siguientes parámetros los cuales definen las condiciones físicas de la corriente de gas.

- 2.a Temperatura
- 2.b Humedad
- 2.c Densidad o gravedad específica del gas
- 2.d Presión estática
- 2.e Velocidad
- 2.f Volumen del gas

Este capítulo describe los métodos para determinar éstos parámetros y sus limitaciones.

### 2.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO NECESARIO.

En este inciso se trata de describir el equipo y material en general necesario para poder encontrar estos 6 parámetros mencionados.

- 2.1.1 <sup>\*</sup> Tubo de Pitot.- Un tubo de pitot es un dispositivo que mide la velocidad en un punto.

Dos tipos de tubo pitot se usan generalmente. La selección depende de la cantidad de polvo y humedad contenida en el gas medido.

- 2.1.1.1 Tubo Pitot Estandar.- Este tipo se tapa rápida--  
mente cuando se mide un gas húmedo con alta concen--  
tración de polvo, por consiguiente sus usos son --  
limitados para gases con baja concentración de pol--  
vos y humedad.
- 2.1.1.1.2 Normalmente consiste en dos tubos concéntricos co--  
locados paralelamente al flujo. El tubo exterior  
está perforado con pequeños orificios, que comuni--  
can con el espacio anular y son perpendiculares a  
la dirección del flujo. El espacio anular se en--  
cuentra sellado en sus demás partes, excepto en su  
conexión cõn la rama de un manómetro. El tubo in--  
terior tiene una pequeña abertura frente a la di--  
rección del flujo. Este tubo está conectado con -  
la otrá rama del manómetro. No existe un movimien--  
to del fluído dentro del tubo pitot; ese espacio -  
anular sirve para transmitir la presión estática.  
El fluído que fluye queda en reposo a la entrada -  
del tubo interior y este tubo transmite una pre---  
sión de impacto equivalente a la energía cinética  
de este fluído. La siguiente figura muestra el --  
diagrama de un tubo pitot estandar.

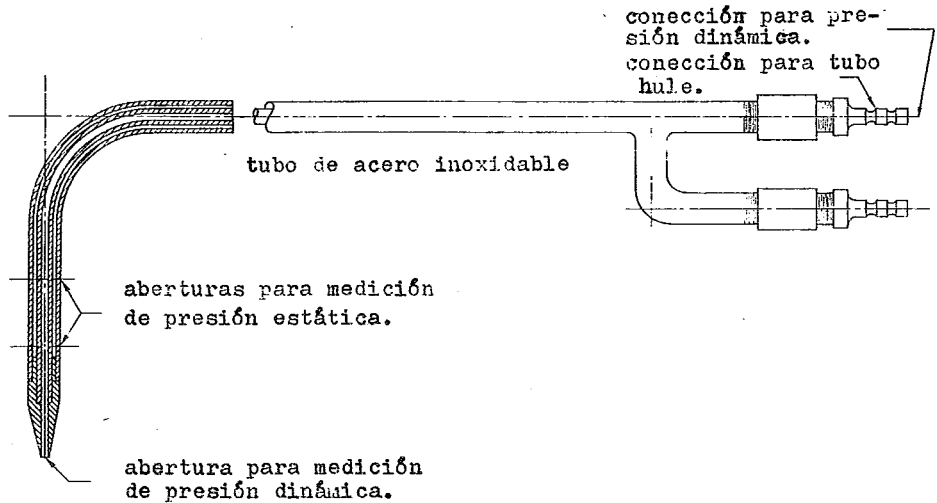


Fig. 2.1.- Tubo pitot estandar.

- 2.1.1.1.3 Tiene un factor de corrección ( $F_s$ ) de 0.98 a 1.02. Sin embargo para propósitos prácticos las lecturas en el manómetro son bastante buenas
- 2.1.1.2 TUBO PITOT TIPO "S".
- 2.1.1.2.1 Este tipo es usado para gases con alto contenido de polvo y humedad. La figura 2.2 muestra un tubo de pitot tipo "S".
- 2.1.1.2.2 No da las lecturas de presión estática reales y --

por lo tanto es necesario usar un factor de corrección (Fs) de 0.83.

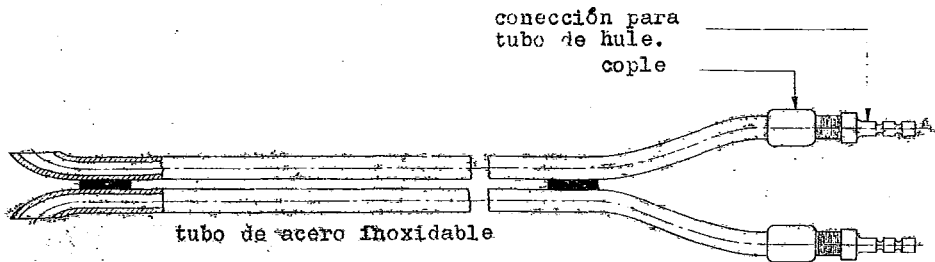


Fig. 2.2.- Tubo Pitot tipo "S" (Especial)

2.1.2 Para indicar la presión-velocidad medida por el tubo pitot pueda usarse cualquiera de los manómetros existentes.

2.1.3 Para medir la temperatura de la chimenea únicamente es necesario un termómetro de mercurio o un pirómetro de base metálica.

Para determinar la humedad es necesario conocer -- la temperatura de bulbo seco y la de bulbo húmedo,



los cuales se miden utilizando el siguiente criterio:

- 2.1.3.1 Si la temperatura del ducto es menor de 100°C son tomadas directamente de éste.
- 2.1.3.2 Si la temperatura es superior a 100°C una muestra del gas puede ser sacada del ducto, y enfriada en una instalación como lo muestra la figura 2.3. -- Esta consiste en empotrar un tubo standard de --- 3/4" (1.905 cm.) dentro de la chimenea conectándole una "T" standard. En la cual se incertan un -- termómetro de bulbo seco y otro de bulbo húmedo -- con un tapón de hule. Pueden obtenerse diversas -- temperaturas ajustando el flujo de aire y la longi tud del tubo adelante de la "T". La velocidad del flujo mínima debe de ser 3 m/seg., de acuerdo con las tablas de la U.S. BUREAU OF STANDARD DATA. --- (Ver la siguiente figura 2.3)
- 2.1.4 Para poder calcular la densidad o la gravedad espe cífica del gas de acarreo es necesario hacer un -- análisis cuando menos de sus componentes principa- les (O<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>).
- Para tal objeto existen diversos aparatos de los - cuales es recomendable usar el analizador de gases

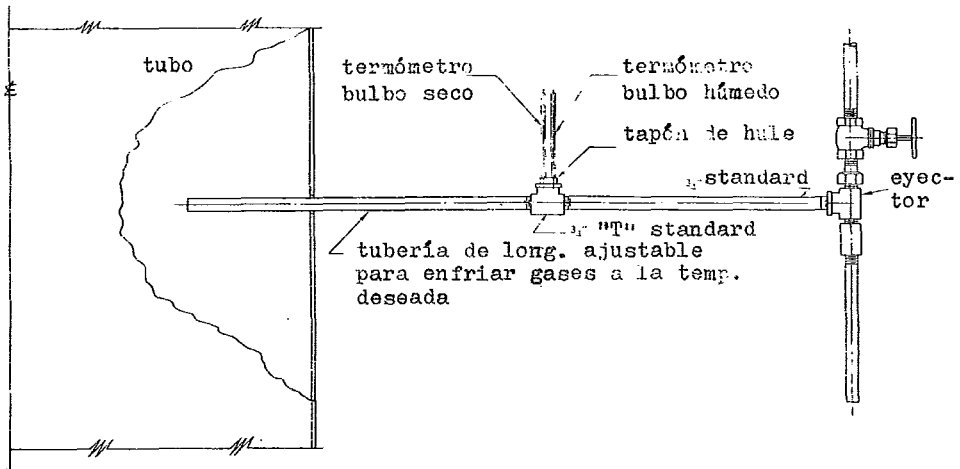


Fig. 2.3.- Instalación enfriadora de gases para medir las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo.

orsat el cual, aunque sea de los más antiguos es uno de los más exactos, y se basa en el principio de absorción sucesiva del  $\text{CO}_2$ , del  $\text{O}_2$  y del  $\text{CO}$ . - El primero por la potasa cáustica, del segundo -- por el ácido pirogálico y el tercero por una solución de cloruro de cobre en ácido clorhídrico. El aparato Orsat como lo indica la figura 2.4 ---

consta de tres probetas A, B y C, en los cuales es t $\acute{a}$ n los reactivos nombrados para absorber los distintos gases.

Consta adem $\acute{a}$ s, de un receptor calibrado D, cuyo objeto es medir los vol $\acute{u}$ menes sucesivos de la muestra de gas que se analiza. El frasco E contiene agua y est $\acute{a}$  unido con D, por medio de un tubo de hule F. El agua del frasco E sirve para encerrar la muestra de gas tomada.

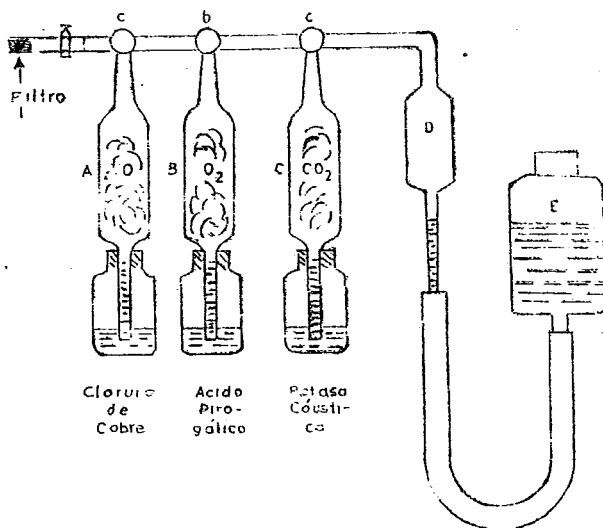


Fig. 2.4.- Analizador de gases Orsat.

2.2 DEDUCCION Y DISCUSION DE LAS FORMULAS EMPLEADAS:

En la introducción de este capítulo se habló sobre los seis parámetros fundamentales para la determinación del flujo de gases, ahora se van a tratar de deducir y explicar las ecuaciones necesarias -- para calcular dichos parámetros. Cabe aclarar que estas ecuaciones se deduciran para un determinado tipo de unidades que son las más comunes para obtener las lecturas necesarias para efectuar los -- cálculos.

2.2.1 Temperatura.- Se hacen dos mediciones de temperatura:

2.2.1.1 Temperatura de bulbo seco.

2.2.1.2 Temperatura de bulbo húmedo.

Para determinar estos valores no es necesario hacer uso de alguna ecuación puesto que se efectúa -- por medición directa como se indicará más adelante cuando se explique la técnica a seguir.

2.2.2 Humedad.- Esta se calcula en forma de % de humedad en volumen cuyo método es como sigue:

Con las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo se va a una carta de humedad (Psicrométrica) a las condiciones del lugar de la prueba y se obtiene la

humedad relativa, la cual multiplicada por la presión de vapor del agua a la temperatura de bulbo seco y dividida entre la presión absoluta de los gases medidos dá como resultado el % de humedad -- en volumen que es el dato requerido.

$$\% \text{ HUMEDAD EN VOLUMEN} = \frac{H_R \times P.V.}{P_G} \dots\dots\dots 2.1$$

2.2.3 Densidad (Gravedad específica del gas).- Para el cálculo de ésta no es necesario deducción de ecuaciones pues únicamente se hace el procedimiento siguiente:

	1	2	3	4
COMPONENTE	%	M	$(\frac{100 - \% H}{X 10^{-2}})$	BASE HUMEDA
CO <sub>2</sub>		44		
O <sub>2</sub>		32		
CO		28		
N <sub>2</sub>		28		
H <sub>2</sub> O		18		
T O T A L				

En la columna (1) se anota el análisis del Orsat - que es en base seca.

En la (2) están registrados los pesos moleculares

de los componentes.

La diferencia entre 100% y % HUMEDAD multiplicado por  $10^{-2}$  es calculada para cada componente y tabulada en la número (3).

El producto de (1), (2) y (3) de cada renglón nos llena la columna (4) que sumada, y el total dividido entre el peso molecular del aire nos dá la gravedad específica (Gd) del gas referida al aire.

2.2.4 Presión Estática.- No se necesita ningún cálculo, es lectura directa.

2.2.5 Velocidad.- Este es el parámetro que está en función de todos los calculados anteriormente y el más importante, la deducción de sus fórmula de cálculo se deducen a continuación.

Si se dispone un tubo, en el seno de una corriente del fluido (ver figura 2.1), de modo que su eje forme un ángulo recto con la dirección del flujo que pasa por delante de su extremo abierto, la presión del fluido estancado en la boca del tubo será igual a la presión del fluido en movimiento. Si se sitúa otro tubo con su eje paralelo a la dirección de flujo, éste tenderá a penetrar en el segundo tubo con una velocidad  $V_1$ . Si el extremo de

descarga de este tubo está cerrado, por ser una --  
 rama de manómetro, la velocidad  $v_2$  en el tubo será  
 cero, mientras que la velocidad del fluido en la --  
 corriente principal continuará siendo  $v_1$ . Bajo --  
 tales condiciones tenemos que:

Hacemos un balance de energía:

$$WE_1 + \frac{W \bar{v}_1^2}{2g_c \alpha} + W Z_1 \frac{g}{g_c} + W P_1 v_1 + W Q' =$$

$$WE_2 + \frac{W \bar{v}_2^2}{2g_c \alpha} + W Z_2 \frac{g}{g_c} + W P_2 v_2 + W W_f' \dots 2.2$$

Como resultado del flujo, la fricción del fluido --  
 tiene lugar en cualquier parte donde exista una --  
 tensión sobre el fluido. Esta fricción convertirá  
 efectivamente la energía en calor, así que todo --  
 el trabajo realizado por el fluido no se transfe--  
 rirá a los alrededores. La pérdida de energía apa--  
 recerá en el fluido como calor; así que

$$Q = Q' + \Sigma F \dots \dots \dots 2.3$$

$$W_f' = W + \Sigma F \dots \dots \dots 2.4$$

sustituyendo la ecuación 2.3 en la ecuación 2.2.,

tenemos

$$WE_1 + \frac{W \bar{v}_1^2}{2g_c} + W Z_1 \frac{g}{g_c} + W P_1 v_1 + W (Q - \Sigma F)$$

$$WE_2 + \frac{W \bar{v}_2^2}{2g_c} + W Z_2 \frac{g}{g_c} + W P_2 v_2 + W W_f' \dots 2.5$$

expressando 2.5 como ecuación diferencial.

$$- \left[ \Delta E + \left( \frac{v^2}{2gc} \right) + \Delta Z \left( \frac{q}{gc} \right) + \Delta PV + Q - \Sigma F \right] = W_f$$

multiplicando por (-1):

$$\Delta E + \Delta \left( \frac{v^2}{2gc} \right) + \Delta Z \left( \frac{q}{gc} \right) + \Delta PV - Q + \Sigma F - W_f \dots\dots\dots 2.6$$

por la 1a. Ley de la termodinámica:

$$\Delta E = Q - W = Q - \int_{V_1}^{V_2} PdV \dots\dots\dots 2.7$$

sustituyendo la ecuación 2.7 en la 2.6, nos queda:

$$\Delta \left( \frac{v^2}{2gc} \right) + \Delta Z \frac{q}{gc} + \Delta PV - Q + \Sigma F - W_f - \int_{V_1}^{V_2} PdV = 0 \dots\dots\dots 2.8$$

rearrreglando

$$\Delta \left( \frac{v^2}{2gc} \right) + \Delta Z \frac{q}{gc} + \Delta PV - \int_{V_1}^{V_2} PdV + \Sigma F = W_f \dots\dots\dots 2.8$$

pero:

$$\Delta(PV) = \int_{V_1}^{V_2} PdV + \int_{P_1}^{P_2} VdP \dots\dots\dots 2.9$$

por lo tanto sustituyendo la ecuación 2.9 en 2.8, tenemos:

$$\Delta \left( \frac{v^2}{2gc} \right) + \Delta Z \frac{q}{gc} + \int_{V_1}^{V_2} PdV + \int_{P_1}^{P_2} VdP - \int_{V_1}^{V_2} PdV + \Sigma F = W_f$$



rearrreglando

$$\Delta \left( \frac{\bar{v}^2}{2xgc} \right) + \Delta Z \frac{g}{gc} + \int_{P_1}^{P_2} v dP + F = -W_f \dots \dots \dots 2.10$$

Suponemos que para el caso de la medición de velo -  
 cidad con el tubo pitot  $\Delta Z$ ,  $W_f$ ,  $Q$  y  $F$  valen cero,

queda:

$$\Delta \frac{\bar{v}^2}{2xgc} + \int_{P_1}^{P_2} v dP = 0 \dots \dots \dots 2.11$$

Entonces la expresión 2.11 se convierte, para un -  
 fluido de densidad practicamente constante, en la -  
 expresión:

$$\int v dP = - \frac{\Delta \bar{v}^2}{2gc} \dots \dots \dots 2.12$$

Puesto que, como se dijo antes la velocidad  $v_2$  den -  
 tro del tubo es cero

$$\int v dP = \frac{\bar{v}_1^2}{2gc} \dots \dots \dots 2.13$$

indicándose con el subíndice 1 la referencia a un -  
 punto inmediato, pero fuera del tubo. Si la caída -  
 de presión es pequeña,  $v_2$  puede considerarse igual -  
 a  $v_1$  y, por tanto

$$P_2 - P_1 = \frac{\bar{v}_1^2}{2gc} \dots \dots \dots 2.14$$

$\bar{v}_1 = V_G =$  Velocidad del gas

$$P_2 - P_1 = \frac{V_G^2 \rho}{2gc} \dots \dots \dots 2.15$$

Despejando  $V_G$  de 2.15, queda:

$$V_G = \sqrt{\frac{2gc (P_2 - P_1)}{\rho}} \dots\dots\dots 2.16$$

$$(P_2 - P_1) = H + \text{Lectura del Medidor (mm Hg)}$$

sustituyendo en 2.16

$$V_G = \sqrt{\frac{2gc H}{\rho}} \dots\dots\dots 2.17$$

donde:

$$gc = \text{Aceleración de la Gravedad} = 9.807 \text{ m/seg}^2.$$

La ecuación 2.17 con la presión del gas igual a 1 atm = 760 mm Hg y densidad igual a la del aire ---  
 ( $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$  a  $0^\circ\text{C}$  y 1 atm.)

Puede ser simplificada de la siguiente forma:

En función de la temperatura en  $^\circ\text{C}$  expresados como-  
absolutos

$$T = 0^\circ\text{C} = 270^\circ\text{K}$$

corrigiendo la densidad

$$\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3 \times \frac{273^\circ\text{K}}{1^\circ\text{K}} = 354 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 1^\circ\text{K}$$

Y así sustituyendo en la ecuación 2.17

$$V_G = \sqrt{\frac{2(9.81) \times 13.59}{354} \text{ HTG}}$$

donde:

$$H = \text{Lectura del Manómetro (mm Hg)}$$

13.59 = Factor para convertir mm Hg (Lectura H) a  $\text{kg/m}^2$

$T_G$  = Temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{C}$ ) del gas muestreado

Simplificando:

$$V_G = 0.87 \sqrt{HT_G} \dots\dots\dots 2.18$$

A la ecuación 2.18 es necesario aplicarle un factor de corrección  $F_S$  del que ya se había hablado anteriormente, y de esta forma queda:

$$V_G = 0.87 F_S \sqrt{HT_G} \dots\dots\dots 2.19$$

Si la presión del gas difiere de 760 mm Hg o su densidad es diferente de la del aire entonces la ecuación 2.19 es modificada, quedando finalmente:

$$V_G = 0.87 F_S \sqrt{\frac{760}{P_G} \times \frac{1.00}{G_d} \times HT_G} \dots\dots\dots 2.20$$

donde:

$P_G$  = Es la presión absoluta del gas en mm de Hg en el ducto muestreado.

$G_d$  = Gravedad específica referida al aire.

### 2.2.6 VOLUMEN DEL GAS O GASTO VOLUMETRICICO

Este último de los seis parámetros mencionados anteriormente se calcula muy facilmente como se indica a continuación.

El volumen de gas que pasa por la sección transversal de la chimenea por unidad de tiempo es el producto de la velocidad promedio por el área de la sección transversal

$$V_O = \bar{V}_G \times A \dots\dots\dots 2.20$$

donde:

$V_O$  = Gasto volumétrico de gas en  $m^3$ /seg., a condiciones de la chimenea.

$A$  = Area efectiva de la sección transversal de la chimenea en  $m^2$  (se encuentran tabulados en el apéndice 1).

$\bar{V}_G$  = Velocidad promedio del gas en m/seg.

de la ecuación 2.20 podemos obtener

$$V = \bar{V}_G \times A \times 60 \dots\dots\dots 2.21$$

donde:

$V$  = Gasto volumétrico del gas en  $m^3$ /min., a condiciones de la chimenea.

60 = Factor de conversión de  $m^3$ /seg. a  $m^3$ /min. para cuando se requiera tener este volumen a condiciones estandard (760 mm Hg y 0°C) podemos concluir:

$$V_{STD} = V \times \frac{P_G}{760} \times \frac{273}{T_G} \dots\dots\dots 2.22$$

$V_{GT}$  = Gasto volumétrico del gas en  $m^3/\text{min.}$  a condiciones estandard (760 mm Hg y  $0^\circ\text{C}$ ).

$P_G$  = Presión absoluta en la chimenea en mm de Hg.

$T_G$  = Temperatura en  $^\circ$  absolutos en la chimenea ( $^\circ\text{K}$ ).

2.3 DESARROLLO DE LA TECNICA

2.3.1 Seleccionar el tipo de tubo pitot y manómetro que han de usarse según sean las condiciones de prueba -- siguiendo el criterio del inciso 2.1 de este trabajo.

2.3.2 Marcar en el tubo de pitot las profundidades calculadas ( $R_n$ ) para hacer las mediciones a través de la sección transversal de la chimenea según inciso 1.2 ---- (apéndice 1, 2 y 3).

Para señalar estas distancias debe partirse exactamente de la mitad del diámetro de la punta de dicho instrumento.

Estas marcas para que se conserven durante la pruebas recomendable hacerlas, según la experiencia, con cinta para aislar de electricista o cinta de teflón -- cuando las temperaturas sean demasiado altas; ceñidas encima con alambre delgado.

2.3.3 Apretar bien sin forzar las conexiones para las mangueras.

2.3.4 Fijar firmemente el manómetro, y en el caso de ser inclinado, que es el más recomendable a usar, nivélese con la burbuja.

2.3.5 Cargar el manómetro con un aceite coloreado cuya densidad sea muy parecida a la del agua, hasta que el menisco llegue a cero, y si se cuenta con un tornillo --

de fijación para la escala del manómetro efectúese un ajuste final más fino.

2.3.6 Enchufar dos mangueras de hule a las conexiones para estas en el tubo de pitot.

2.3.7 Conectar el manómetro a los extremos libres de las mangueras, cuidando que sean las apropiadas.

La manguera que venga de la presión dinámica del tubo de pitot debe conectarse al menisco de diámetro mayor en el manómetro inclinado.

2.3.8 Ajustar de nuevo a cero el nivel del aceite, protegiendo el tubo de pitot de las corrientes de aire.

2.3.9 Oprimir con los dedos las mangueras conectadas al tubo de pitot, para evitar movimientos bruscos o la expulsión del líquido contenido en el manómetro; inserte el tubo de pitot en el ducto hasta la profundidad a la que se desee medir, con la punta orientada en -- contra de la corriente, cuidando de no rozarlo con -- las paredes del ducto para evitar taponamiento de los orificios con hollín, polvo u otro tipo de suciedades.

2.3.10 El espacio libre entre el tubo de pitot y el puerto de muestreo debe ser cerrado, rellenándolo con cualquier medio apropiado.

2.3.11 Soltar paulativamente las mangueras permitiendo que -

Las presiones actúan lentamente en ambos extremos -  
del manómetro.

2.3.12 Anotar la lectura del manómetro inclinado en la co -  
lumna (3) de presiones-velocidad de la figura 2.5.

2.3.13 Desplazar el tubo de pitot al siguiente punto de -  
muestreo, anote la nueva lectura del manómetro y re-  
pita esta operación en cada punto de medición.

2.3.14 Verificar el cero del manómetro cada 4 ó 5 medicio--  
nes o tantas veces como se estime conveniente, de --  
acuerdo con la práctica.

2.3.15 Si el número de mediciones es pequeño, medir las -  
temperaturas (de bulbo seco y bulbo húmedo) antes y-  
después de ellas, si éste es grande, hacerlo a inter-  
valos más o menos regulares de 15 minutos.

Para medir tanto las temperaturas de bulbo seco como  
bulbo húmedo se sigue el criterio del inciso 2.1.3;-  
cuidando de usar para la de bulbo húmedo, un capu --  
chón limpio y agua destilada.

2.3.16 Medir la relación de la presión del gas en la chime-  
nea a la presión atmosférica, utilizando el mismo ma-  
nómetro inclinado cuando la lectura quede dentro de-  
su rango de medición, cuando éste no sea el caso úse  
se un manómetro en "U", uno de cuyos extremos se co-  
nectará al ramal de presión estática del tubo de pi-



tot y el otro quedará expuesto a la presión atmosférica, pero protegiéndolo de las corrientes de aire, esto puede hacerse usando una bolita de algodón. - Este valor medido es denominado presión estática de la chimenea.

- 2.3.17 Se debe determinar la densidad o la gravedad específica del gas usando para ello su composición, para lo cual se utiliza el aparato Orsat descrito en el inciso 2.1.4 cuyo manejo se describe en este punto.
- 2.3.17.1 Se toma una muestra representativa de los gases de combustión, procurando tomarla del centro de la chimenea y a través de un filtro, nivelando el agua entre D y E (ver figura 2.4), para tener seguridad de que el gas está a la presión atmosférica se mide su volumen haciendo uso de las graduaciones de la probeta D.
- 2.3.17.2 Abrir la llave c y manipulando el frasco E se obliga el gas a entrar en contacto con el reactivo de la probeta C, con lo cual se absorbe el CO<sub>2</sub> del gas.
- 2.3.17.3 Regresar el gas restante a la probeta D, cierre la llave c y se nivela el agua entre D y E, haciendo nuevamente una lectura del volumen del gas, lectura que será menor que la anterior. La diferencia de lecturas nos dá el volumen de CO<sub>2</sub>.

- 2.3.17.4 Abrir la llave b y se obliga así al gas a pasar a la probeta B en donde se absorbe el  $O_2$  del gas.
- 2.3.17.5 Regresar el gas a la probeta D y se igualan los niveles del agua, leyendo el nuevo volumen del gas. - La diferencia de lecturas será el volumen de  $O_2$ .
- 2.3.17.6 Abrir ahora la llave a y se absorbe el CO.
- 2.3.17.7 Regresar el gas a la probeta D para leer el volumen de CO.
- 2.3.17.8 Por diferencia sacar el volumen de  $N_2$ .
- 2.3.17.9 Dividir los volúmenes parciales del  $CO_2$ ,  $O_2$ , CO y  $N_2$  entre el volumen original de la mezcla, y así se obtendrán las fracciones volumétricas o el análisis de gas de combustión en porcentos.
- 2.3.17.10 Los aparatos comerciales de Orsat difieren en sus detalles de operación y construcción y se recomienda leer cuidadosamente las instrucciones que traen consigo antes de operarlos.
- 2.3.18 En el caso de gases de combustión, generalmente es suficiente considerar su densidad igual a la del aire a las mismas condiciones de presión y temperatura.

## 2.4 HOJA DE REGISTRO Y CALCULOS

Por medio de este último inciso se va a tratar de explicar el uso de la hoja de registro que se ha elaborado para facilitar los cálculos de esta prueba y la cual se anexa como figura 2.5.

En primer término se anotan los datos generales necesarios.

En la columna denominada como punto, se registran los puntos de medición auxiliándose por las figuras que se encuentran en la parte superior derecha.

En la segunda (Rn), se vá calculando para cada punto este valor según inciso 1.2., (apéndice 1, 2 y 3).

En la señalada como H se ván registrando las lecturas del manómetro.

Y en la siguiente, como lo indica  $\sqrt{H}$ , se usa para tabular los valores de la raíz cuadrada de los datos de la columna anterior, los cuales se pueden obtener directamente del apéndice 4.

En la tablita destinada para el análisis de gases se hacen los cálculos indicados por el inciso 2.2.3.

El valor de la presión absoluta ( $P_C$ ) es igual a la Presión barométrica del lugar + la presión estática medida según inciso 2.3.16.

El cálculo de % H<sub>2</sub>O se realiza por medio de la ecuación 2.1 y apéndice 5 ó 6 (cartas psicrométricas) y 7 (presiones de vapor a diferentes temperaturas), ver inciso 2.2.2.

El de V<sub>G</sub> según ecuación 2.20, inciso 2.2.5 quedando en función de  $\sqrt{H}$  cuyos valores serán tomados para cada punto de la columna  $\sqrt{H}$ , o el de  $\sqrt{H}$  promedio si se quiere obtener la velocidad promedio de los gases en la chimenea.

V y V<sub>STD</sub> de las ecuaciones 2.21 y 2.22 inciso 2.2.6.



CAPITULO III.- DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE SOLIDOS  
EN LOS GASES.

Habiendo sido medido el gasto o volumen de gas que fluye en la chimenea por unidad de tiempo como se describe en el capítulo anterior, puede entonces determinarse la concentración de partículas sólidas acarreadas por esos gases que no es más que su peso en ese volumen.

En resumen este método consiste únicamente en separar una cantidad medida de gas de la corriente que fluye en el ducto y determinar el peso de los sólidos contenidos en ese volumen conocido.

3.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO NECESARIO.

La selección del equipo para efectuar esta separación está en función del tipo y cantidad del suspensóide, así como de la temperatura y el contenido de humedad del gas de acarreo.

3.1.1 MEDIO FILTRANTE O DE CAPTACION.

El método más generalmente usado para separar los suspensóides de la muestra del gas de acarreo es, haciéndolo pasar a través de cualquiera de los siguientes medios filtrantes.

3.1.1.1 Cartuchos de algodón.

3.1.1.2 Cartuchos de papel.

3.1.1.3 Filtros de fibra de vidrio.

3.1.1.4 Impactores

3.1.1.5 Filtros de membrana.

3.1.1.6 Filtros de malla y papel filtro, (cámara tar).

3.1.1.1 CARTUCHOS DE ALUNDUM.

Son usados cuando el gas de acarreo posee alto contenido de humedad, sustancias químicas corrosivas - o alta temperatura (fig. 3.1). Cuando hay condensación son más fáciles de poner al peso (peso constante) original que los de papel, eliminándoles el - agua.

Tienen poros muy finos para lograr una alta eficiencia de colección, por lo que generalmente ofrecen - elevada resistencia al flujo. Esta resistencia debe determinarse y compensarse para muestrear el --- gasto deseado.

También hay cartuchos burdos de este tipo y cuando éstos se usan debe verificarse su eficiencia, mediante un colector secundario, por ejemplo cartucho de papel o filtro de membrana.

Al ser capaz de soportar altas temperaturas, este cartucho puede insertarse dentro de la corriente de gases inmediatamente atrás de la boquilla de muestreo, eliminando así la limpieza de la sonda y colectándose una muestra seca.

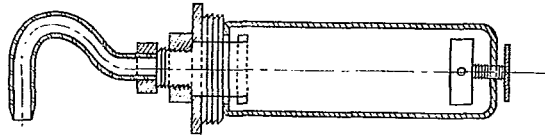


Fig. 3.1.- Portafiltros para cartuchos de Alundum.

### 3.1.1.2 CARTUCHOS DE PAPEL.

Estos cartuchos poseen alta eficiencia, son relativamente baratos y pueden usarse hasta temperaturas de 150°C y 100 mm de Hg de presión si están secos, - si la temperatura del gas de arrastre es menor que ésta, el portafiltro puede colocarse dentro de la corriente, o si se coloca afuera se puede precalentar, aislar térmicamente o se puede usar un calentador eléctrico para mantener la temperatura arriba del punto de rocío, en caso de temperaturas mayores de 150°C se pueden utilizar tubos de muestreo largos para disminuir su temperatura, ya que a temperaturas y presiones mayores a las indicadas, se puede romper el cartucho.

Cuando la carga de polvo es muy grande, estos no son apropiados para usarse debido a que se obstru -



yen rápidamente, (el portafiltros es casi igual -  
que el que se usa para los cartuchos de Alundum).

### 3.1.1.3 FILTROS DE FIBRA DE VIDRIO.

Son usados con temperaturas hasta de 400°C y 150 -  
mm de Hg.

Son eficientes únicamente para partículas grandes -  
por lo que es conveniente acompañarlos con un fil -  
tro posterior de papel.

El portafiltros es similar al que se usa con los -  
cartuchos de Alundum y papel, solo que de mayor ta -  
maño. Deben de mantenerse secos a fin de evitar ta  
ponamiento de los poros.

### 3.1.1.4 IMPACTORES.

Cuando se usa un tren de impactores el primero debe  
estar operando en seco. Si después del tren se uti  
liza un cartucho de papel, el último impactor debe-  
estar trabajando en seco, para que atrape la hume -  
dad de los impactores anteriores.

Cuando la temperatura de los gases de acarreo es al  
ta, los impactores pueden sumergirse en agua fría o  
usarse algún otro medio refrigerante.

Los impactores húmedos actúan como condensadores, -  
por lo que es necesario medir cuidadosamente el con  
densado en cada impactor, antes y después del mues-  
treo.

El volumen total servirá para calcular el gasto de gas extra que no se registró en el medidor de flujo y el peso de los sólidos se obtiene evaporando el líquido, si se trata de partículas finas uniformemente suspendidas en el líquido, se pueden evaluar al microscópico.

Es necesario tener cuidado de considerar las reacciones que puedan ocurrir entre los componentes del gas y el material colectado en húmedo.

#### 3.1.1.5 FILTROS DE MEMBRANA.

Estos filtros son hechos a base de ésteres de celulosa, sirven para colectar partículas muy pequeñas (menores de una micra), tales como coloides, bacterias y materiales radioactivos.

Los portafiltros son muy semejantes a la cámara de alquitranes, que se describe posteriormente.

El gasto de muestreo lo fijan los fabricantes en función de su porosidad y del tamaño de los poros. Son solubles en solventes orgánicos y pueden quemarse quedando solamente trazas de ceniza, algunos se hacen transparentes con aceite de inmersión, facilitando su examen al microscopio.

#### 3.1.1.6 FILTROS DE MALLA Y PAPEL FILTRO (CAMARA DE ALQUITRANES).

Son usados para vapores no acuosos, por ejemplo, -

aceite, alquitrán, brea, etc.

La cantidad colectada puede ser determinada pesando el filtro antes y después de la prueba; haciendo una extracción con un solvente apropiado y posteriormente analizando la solución o separando el solvente y pesando los sólidos; también se puede usar un método colorimétrico de comparación visual.

Este último método es utilizado para medir la eficiencia de los equipos colectores, en cuyo caso se muestrea a la entrada y a la salida de éste, prolongando la prueba de la salida hasta que el color del filtro iguale al de la entrada, entonces se determina la eficiencia mediante una comparación de los volúmenes muestreados en ambos lados.

A continuación se describe parte por parte el equipo que constituye todo el tren de muestreo, (fig. 3.2), no sin antes aclarar que puede ser usado con cualquiera de los medios filtrantes anteriores.

### 3.1.2 BOQUILLA DE MUESTREO

Con el objeto de extraer una muestra uniforme de gas con sólidos suspendidos se usa una boquilla de diámetro definido y predeterminado, el cual depende del equipo de colección, la velocidad en el ducto, y la cantidad (peso) de muestra requerida.

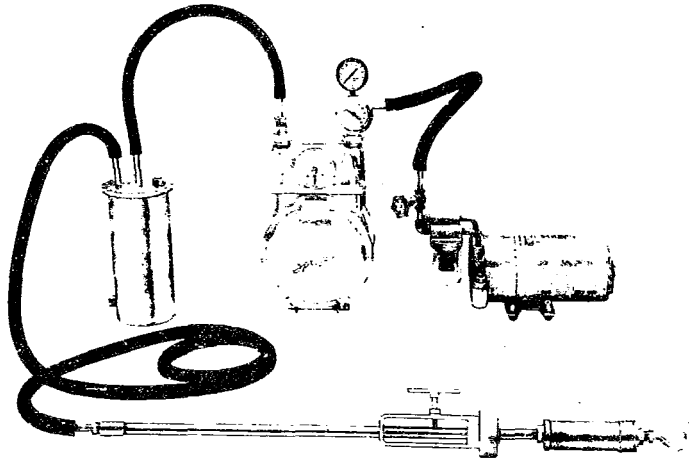


Fig. 3.2.- Tren de muestreo.

Los diámetros de las boquillas más comunes son -  
1/4", 3/8", 1/2" y 5/8" (0.625 cm, 0.94 cm, 1.25 cm  
y 1.56 cm); de los cuales el seleccionado será el -  
capaz de mantener un flujo isocinético.

### 3.1.3 SONDA DE MUESTREO.

Esta es usada con el fin de alcanzar todos los pun-  
tos o posiciones de prueba dentro de la chimenea.  
Su diámetro debe ser suficiente para proporcionar -  
la adecuada rigidez, para soportar el peso del por-  
tafiltros y de ella misma, cuando se trate de gran-  
des profundidades.

El material de construcción debe ser el adecuado pa-  
ra soportar grandes temperaturas sin sufrir altera-  
ciones.

3.1.4 SOPORTE.

Este es semejante a un tornillo de banco y su objeto es mantener la sonda de muestreo, el portafil --tros y la boquilla, en una posición fija cuando sea requerida.

3.1.5 CONDENSADOR.

La humedad contenida en los gases muestreados debe ser condensada por dos razones muy importantes:

La primera es que se necesita conocer el volumen de agua o humedad contenida en la muestra, para lo - cual se medirán los condensados al final de la prueba y así comprobar el % de humedad calculado, mediante las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, con la ayuda de la carta psicrométrica.

La segunda es que esta humedad podría perjudicar al gasómetro si llegara a penetrar en él con los gases de la muestra.

Debe tener suficiente capacidad para retener el líquido total acumulado de una prueba completa y permitir su recuperación al final de ésta para medir - su volumen.

El condensador puede ser metálico y para los casos de alta corrosividad, de vidrio o algún otro material resistente, siempre y cuando posean unas bue -

nas características de transferencia de calor.

### 3.1.6 GASOMETRO.

Este instrumento es indispensable para medir el flujo total muestreado.

El más recomendado a usar es el de diafragma o medidor en seco.

En el gasómetro es necesario que esté incluido a la salida de este un medidor para la presión de succión de los gases y otro para la temperatura existentes en este medidor con el fin de tener estos datos y poder hacer los cálculos y correcciones correspondientes.

Si se desea puede tenerse un medidor de velocidad, como por ejemplo un rotámetro aparte de este totalizador, con el fin de facilitar la prueba.

### 3.1.7 FUENTE DE VACIO.

Esta puede ser un eyector y en el caso de no haberlo una bomba de vacío que cumpla con las condiciones, tanto del gasto como de la presión de succión, necesarios para trabajar en cada caso.

3.2 DEDUCCION Y DISCUSION DE LAS FORMULAS EMPLEADAS.

3.2.1 Ya teniendo la velocidad del gas en cada punto de terminado en la sección transversal de la chimenea y conociendo el principio del muestreo isocinético ya explicado también en las generalidades, se sabe que a esas velocidades específicas, es a las que se debe muestrear, para que la prueba sea confiable, - por lo que se usará un medidor de flujo (gasómetro) para lograr esa condición y por consiguiente se debe tener una ecuación que permita calcular un gasto volumétrico para cada punto de la prueba, a las condiciones del medidor y en las unidades necesarias - para la operación.

Dicha ecuación se presenta y se deduce a continuación.

Se parte de la ley combinada de los gases:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots\dots\dots 3.1$$

donde se puede definir como:

$P_1 = P_G$  = Presión absoluta del gas, medido en la chimenea (mm de Hg).

$V_1 = V$  = Volumen o gasto del gas, en las condiciones de la chimenea.

$T_1 = T_G$  = Temperatura absoluta del gas muestreado.

$P_2 = P_M$  = Presión absoluta del gas en el medidor y esta a la vez:

$$P_M = P_b - P_S \dots\dots\dots 3.2$$

donde:

$P_b$  = Presión barométrica (mm de Hg).

$P_S$  = Presión de succión o de vacío promedio en el medidor (mm de Hg).

$V_2 = V_M$  = Volumen de la muestra de gas, medida por el medidor en cada punto de la prueba en un tiempo determinado  $m^3/M$ .

$T_2 = T_M$  = Temperatura promedio de los gases, en el medidor (absolutos).

sustituyendo en la ecuación 3.1.

$$\frac{P_G}{T_G} = \frac{(P_b - P_S) V_M}{T_M} \dots\dots\dots 3.3$$

Por medio de la ecuación 2.21 podemos definir a  $V$  como:

$$V = \bar{V}_G \times A \times 60 \dots\dots\dots 2.21$$

como gasto promedio o

$$V = V_G \times A' \times 60 \dots\dots\dots 2.21'$$

como gasto en cada punto y donde

$\bar{V}_G$  = Velocidad promedio del gas muestreado (m/seg.)



$V_G$  = Velocidad del gas en un punto dado de la chimenea, o sea velocidad del gas en la boquilla de muestreo (m/seg.).

A = Area efectiva de la sección transversal de la chimenea (m<sup>2</sup>).

A' = Area de la sección transversal de la boquilla de muestreo, (m<sup>2</sup>), la cual equivale a:

$$A' = \frac{\pi d^2}{4} \times 10^{-4} \dots\dots\dots 3.4$$

donde:

d = diámetro de la boquilla de muestreo en cm.

Sustituyendo 3.4 en 2.21' queda:

$$V = V_G \times \frac{\pi d^2}{4} \times 10^{-4} \times 60 \dots\dots\dots 3.5$$

Sustituyendo 3.5 en 3.3:

$$\frac{P_G (V_G \times \frac{\pi d^2}{4} \times 10^{-4} \times 60)}{T_G} = \frac{(P_b - P_s) V_M}{T_M}$$

despejando  $V_M$  y rearmreglando nos dá la ecuación final:

$$V_M = \frac{P_G \times V_G \times \frac{\pi d^2}{4} \times 10^{-4} \times T_M}{T_G \times (P_b - P_s)} \times 60$$

$$V_M = \frac{60 \pi}{4} \times 10^{-4} \times \frac{T_M}{T_G} \times V_G \times d^2 \times \frac{P_G}{(P_b - P_s)}$$

$$V_M = 47.2 \times 10^{-4} \times \frac{T_M}{T_G} \times V_G \times d^2 \times \frac{P_G}{(P_b - P_s)} \dots\dots\dots 3.7$$

3.2.2 Al medir el volumen de agua que atrapó el condensador para comprobar la humedad, es necesario también convertir ese volumen de agua  $V_a$  a un volumen de vapor  $V_v$  en condiciones del medidor, para poder hacer las correcciones necesarias en el volumen (gasto) medido en un tiempo conocido.

Para facilitar estos cálculos también es necesario una ecuación, en las unidades específicas necesarias, que no es más que la ley combinada de los gases (Boyle y Charles) corregida.

$$PV = nRT \dots\dots\dots 3.8$$

donde:

$$P = P_M = P_b - P_s \dots\dots\dots 3.2$$

$V = V_v =$  Volumen de vapor a condiciones del medidor ( $m^3$ ).

$n' =$  No. de moles y la cual podemos descomponer.

$$n' = \frac{W}{M} \dots\dots\dots 3.9$$

donde:

M = Peso molecular del agua = 18

W = Peso (g)

a la vez.

$$W = \rho V \dots\dots\dots 3.10$$

sustituyendo 3.10 en 3.9 queda:

$$n' = \frac{\rho V}{M} \dots\dots\dots 3.11$$

$\rho$  = Densidad del agua = g/cc.

V = Va = Volumen medido de agua (c.c.)

R = Constante de los gases =  $0.0624 \frac{\text{m}^3 \text{ mm Hg}}{\text{°K mol}}$

T =  $T_M$  = Temperatura promedio de los gases en el -  
medidor (°K) sustituyendo 3.2 y 3.11 en --  
3.8 resulta:

$$(P_b - P_g) V_V = \frac{\rho V_a}{M} \times R \times T_M \dots\dots\dots 3.12$$

despejando  $V_V$ :

$$V_V = \frac{\rho V_a}{M} \times R \times T_M \dots\dots\dots 3.13$$
$$\frac{\rho V_a}{(P_b - P_g)}$$

dándole valor a  $\rho$  , R y M, nos dá:

$$V_V = \frac{1 V_a}{18} \times 0.0624 \times T_M$$
$$\frac{\rho V_a}{(P_b - P_g)}$$

rearrreglando y efectuando operaciones queda final -  
mente:

$$V_V = 0.00346 \times \frac{V_a \times T_M}{(P_b - P_S)} \dots\dots\dots 3.14$$

3.2.3 Para corregir  $V_M$  por condensados se tiene:

$$F_C = \frac{V_m}{V_m + V_V} \dots\dots\dots 3.15$$

de donde:

$F_C$  = Factor de corrección por condensados.

$V_m$  = Volumen total, medido en el gasómetro durante -  
todo el transcurso de la prueba ( $m^3$ ).

$V_V$  = Volumen de vapor del agua condensada, converti-  
da a condiciones del medidor ( $m^3$ ).

$$V_{M_{CORR.}} = V_M \times F_C \dots\dots\dots 3.16$$

3.2.4 La humedad contenida en el gas muestreado a condi -  
ciones del medidor es calculada por la siguiente --  
ecuación

$$H_M = \frac{V_m \times P.V}{(P_b - P_S)} \dots\dots\dots 3.17$$

o sea

$H_M$  = Humedad o volumen de agua remanente, contenida  
en el volumen muestreado a condiciones del -  
medidor.

3.2.5 De aquí que el % de humedad en volumen del gas -  
muestreado puede ser calculado:

$$\% \text{ HUMEDAD EN VOLUMEN} = \frac{V_V + H_M}{V_V + V_m} \times 100 \dots\dots 3.18$$

que sirve para comprobar el valor anteriormente -  
calculado con la ecuación 2.1.

3.2.6 Para convertir el volumen total muestreado, a con -  
diciones de la chimenea, se puede emplear la siguien  
te expresión:

$$V_{tG} = V_{tM} \frac{T_G}{T_M} \times \frac{(P_b - P_S)}{P_G} \dots\dots\dots 3.19$$

donde:

$V_{tG}$  = Volumen total muestreado a condiciones de la-  
chimenea ( $m^3$ ).

$V_{tM}$  = Volumen total muestreado a condiciones del me  
didor ( $m^3$ ).

$$V_{tM} = (V_m + V_V) \dots\dots\dots 3.20$$

3.2.7 Finalmente el resultado de concentración de polvos-  
es calculada como:

$$\text{GRAMOS}/m^3 = \frac{W_t}{V_{tG}} \dots\dots\dots 3.21$$

3.2.8 Y las cantidades de partículas sólidas emitidas a la naturaleza por unidad de tiempo se expresa como:

$$\frac{Kg}{hr} = \frac{g}{m^3} \times V \times 60 \times 10^{-3} \dots\dots\dots 3.22$$

3.3. DESARROLLO DE LA TECNICA.

3.3.1 Antes de efectuar las pruebas definitivas para de -  
terminar el contenido de aerosoles en el gas que --  
circula por el ducto, es aconsejable efectuar una -  
prueba exploratoria, cuya finalidad es calcular el -  
gasto correcto de muestreo y el tiempo adecuado de -  
duración, para lo cual es necesario conocer aproxi -  
madamente la temperatura, velocidad, humedad y la -  
concentración de sólidos, por lo que en el desarro -  
llo de esta técnica se tratará de explicar este mé -  
todo y el definitivo.

3.3.2 Seleccionar el medio filtrante o de captación que -  
ha de usarse, según sean las condiciones del sus -  
pensoide y del gas de acarreo, siguiendo el crite -  
rio del inciso 3.1.1.

3.3.3 Numerar los filtros, secarlos en la estufa a 120°C  
pasarlos y anotar los pesos correspondientes.

3.3.4 Seleccionar la boquilla de muestreo conociendo las -  
condiciones de trabajo.

3.3.5 Ensamblar la sonda de muestreo con el portafiltros -  
cuidando que quede herméticamente sellada, para tal  
objeto úsese empaques de asbesto previamente humede -  
cidos.

3.3.6 Marcar en la sonda de muestreo las profundidades -

calculadas de prueba (Rn) en la misma forma que al tubo pitot como se muestra en el inciso 2.3.2.

3.3.7 Conectar herméticamente el tren de muestreo siguiendo la siguiente secuencia (fig. 3.2).

- a) Boquilla de muestreo.
- b) Portafiltros o sonda.
- c) Sonda o portafiltros.
- d) Manguera de hule para vacío.
- e) Condensador.
- f) Manguera de hule para vacío.
- g) Entrada del gasómetro (medidor seco de gases).
- h) A la salida debe ir conectados el termómetro y el indicador de vacío.
- i) Manguera de hule para vacío.
- j) Fuente de vacío.

Al hacer el montaje se debe cuidar que no haya fugas apretando fuertemente y usando cinta de asbesto o teflón en la cuerda de los ensambles a manera de empaque.

3.3.8 Verificar la hermeticidad del tren, tapando con el dedo pulgar o índice el orificio de la boquilla y aplicando 250 mm Hg de vacío con la fuente.



En el caso de que el vacío y la aguja del medidor - de gasto no se estabilicen buscar y eliminar la fuga o falta de hermeticidad.

3.3.9 Para el muestreo preliminar o exploratorio elegir - el punto cuya velocidad sea la más cercana al promedio aritmético de todas las determinadas, en el - cual se hará la prueba hasta que se pueda observar - por medio del vacío que la muestra es bastante re - presentativa.

Para calcular el gasto de muestreo se utiliza la - ecuación 3.7.

Donde:

$T_M$  Se considera como temperatura ambiente para - este muestreo exploratorio.

Esta ecuación se resuelve en función de la presión - de vacío o succión que es la única incógnita, y se - vá despejando conforme varía éste.

Al darle valores a  $P_S$  va dando los valores de  $V_M$  - estas cantidades van a ser el gasto necesario para - muestrear en ese punto y con ese vacío.

La humedad usada para calcular la velocidad del -

gas es obtenida como dato o información, o es calculada provisionalmente mediante la temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo y una carta psicrométrica.

- 3.3.10 Introducir la sonda en el ducto con la punta de la boquilla dirigida corriente abajo, para que no penetre gas mientras ésta se calienta hasta su temperatura y en esta forma se evita la condensación de la humedad y que se introduzca polvo a la sonda --- (del depositado en el puerto de muestreo o en las paredes del ducto).
- 3.3.11 Ajustar las agujas del gasómetro a un valor de cero girándolas en sentido contrario al de su trayectoria normal.
- 3.3.12 Colocar la punta de la sonda en el punto elegido --- apuntando corriente arriba, abrir la válvula de succión e inmediatamente tómense los datos de temperatura del gasómetro y ajústese el vacío con el gasto tratando de que se cumpla la ecuación 3.7.
- 3.3.13 Controlar que el vacío permanezca constante hasta --- que el gasto disminuya notablemente.
- 3.3.14 Regular el gasto de tal forma que coincida con su vacío correspondiente, al sustituir en la ecuación-  
3.7.

- 3.3.15 Continuar la prueba, hasta observar por el vacío, - que es una muestra bastante representativa (120 ó - 150 mm Hg).
- 3.3.16 Para finalizar, tomar las temperaturas, presiones - y el gasto total del gasómetro.
- 3.3.17 Sin interrumpir la operación de la bomba sacar la - sonda del ducto, limpiarla perfectamente con cepi - llo flexible y sacudirla para eliminar el material - que se haya adherido, una vez terminada la limpieza - parar la bomba.
- 3.3.18 Medir el volumen de condensados, poner el filtro - a peso constante, pesar y hacer todos los cálculos - indicados por la hoja de registro (figura 3.3).
- 3.3.19 El tiempo total de muestreo se divide entre el nú - mero de puntos de prueba en la sección transversal - para obtener así el tiempo de muestreo en cada pun - to para la experiencia definitiva.
- 3.3.20 Con el tiempo de muestreo, la temperatura en el - medidor y el % de humedad obtenidos en la prueba ex - ploratoria se puede realizar la definitiva con da - tos reales, ya no estimados.

3.3.21 Para la prueba definitiva se sigue la misma secuencia de operación solo que en lugar de efectuarse en el punto de velocidad promedio se realiza a través de toda la sección transversal (en todos y cada uno de los puntos de muestreo), muestrándose lapsos iguales de tiempo en cada uno.

### 3.4 HOJA DE REGISTROS Y CALCULOS.

Como parte final de este capítulo se anexa la hoja de registro para los cálculos de la medición de concentración (fig. 3.3).

En su parte superior se anotan los datos generales del sistema, en la misma forma que en la hoja de velocidad.

En la columna denominada como punto, se registran los puntos de medición, estos deben ser los mismos que para la medición de velocidad.

En la segunda (TIEMPO) se tabula el tiempo en que se van haciendo las lecturas, estos intervalos entre punto y punto deben ser constantes para que sea una muestra representativa.

En la última ( $V_M$ ), se calcula para cada punto este valor por medio de la ecuación 3.7. Cuando el lapso de tiempo en cada punto sea bastante grande a la vez que el incremento de presión de vacío, se requerirán varios cálculos y varias lecturas para cada punto.

Este valor multiplicado por el tiempo de prueba en-

ese punto y sumado al valor anterior de la columna-3 va dando el volumen acumulativo muestreado, el --cual tiene que ir coincidiendo con el dato leído en el contador totalizador del gasómetro y cuyo valor-- al final de la prueba nos va a dar el valor  $V_m$  (volumen total medido en el gasómetro durante el transcurso de la prueba  $m^3$ ).

La cuarta y quinta columna sirven para registrar -- las lecturas del manómetro y del termómetro instalados a la salida del gasómetro a fin de poder hacer-- las correcciones posteriores.

Los cálculos se efectúan por medio de las ecuacio -- nes desarrolladas en este capítulo.



CAPITULO IV.- DISCUSION DEL METODO Y LOS RESULTADOS DE ACUERDO CON EL REGLAMENTO PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA ORIGINADA POR LA EMISION DE HUMOS Y POLVOS.

Como esta tesis es puramente técnica se hará una discusión solamente de los artículos del reglamento que establezcan únicamente normas de este tipo.

A continuación se citan los artículos en los que podría haber aplicación o relación de este método para poder comentarlos posteriormente.

ARTICULO 20.- En toda operación, proceso o actividad industrial, la emisión de polvos no deberá exceder de las cantidades indicadas en la tabla número uno, en relación al peso del proceso correspondiente, o en la tabla número dos, en relación al volumen de gas en la fuente, en metros cúbicos.

ARTICULO 21 Las tablas número uno y dos, empleadas para la evaluación de las emisiones de polvo a que se refiere el artículo anterior, son las siguientes:



T A B L A 1		
Peso del Proceso	Emisión Máxima Permitida Kg/h	
Ton/h	Industria Nueva	Industria Existente
0.025	0.489	0.652
0.050	0.780	1.040
0.100	1.239	1.652
0.200	1.974	2.632
0.300	2.589	3.452
0.400	3.141	4.188
0.500	3.648	4.864
0.750	4.788	6.348
1.000	5.805	7.740
1.250	6.741	8.988
1.500	7.617	10.156
2.000	9.237	12.316
2.500	10.725	14.300
3.000	12.120	16.160
3.500	13.437	17.916
4.000	14.694	19.592
4.500	15.900	21.200
5.000	17.064	22.752
6.0	19.281	25.708
8.0	23.382	31.176
10.0	27.153	36.204
15.0	35.625	47.500
20.0	43.200	57.600
25.0	50.166	66.888
30.0	55.572	74.096
35.0	57.462	76.616
40.0	59.127	78.836
45.0	60.564	80.752
50.0	61.926	82.568
60.0	64.269	85.693
70.0	65.556	87.408
80.0	68.052	90.736
100.0	71.154	94.872
500.0	95.436	127.248
1000.0	107.313	143.084
3000.0	130.080	172.650

La interpolación de los datos de esta tabla para peso de proceso hasta 28.5 toneladas por hora, para industria nueva debe hacerse usando la ecuación:  $E = 5.805 p^{0.67}$  y para industria existente debe hacerse usando la ecuación  $E = 7.740 p^{0.67}$ . La interpolación y extrapolación de los datos para pesos de proceso mayores de 28.5 toneladas por hora para industria nueva debe llevarse a cabo usando la ecuación  $E = 75.648 p^{0.11} - 54.42$ . Para industria existente la interpolación y extrapolación de los datos para pesos de procesos mayores de 28.5 toneladas por hora debe efectuarse usando la ecuación:  $E = 100.864 p^{0.11} - 72.56$ . En donde E= relación de emisión - kilogramos/hora y P= peso del proceso en toneladas/hora.

T A B L A 2

Volumen de gas en la Fuente - M <sup>3</sup> Normal, por Minuto.	Concentración Industria Nueva mg/m <sup>3</sup> Normal, - por Minuto.	Concentración Industria Existente mg/m <sup>3</sup> Normal, por - Minuto.
100	849.0	1132.0
125	795.0	1060.0
150	750.0	1000.0
175	714.0	952.0
200	684.0	912.0
300	600.0	800.0
400	543.0	724.0
500	510.0	680.0
750	444.0	592.0
1000	405.0	540.0
1500	357.0	476.0
2000	324.0	432.0
3000	285.0	380.0
4000	258.0	344.0
5000	240.0	320.0
7500	210.0	280.0
10000	192.0	256.0
15000	168.0	224.0
20000	154.2	205.6
30000	135.0	180.0
40000	123.0	164.0
50000	114.0	152.0

ARTICULO 22 Cuando la aplicación de la tabla uno no sea -  
posible, se aplicará la número dos.

ARTICULO 23 Cuando más de una fuente de operación o combi -  
naciones de éstos que forman parte de una fuen -  
te de operación múltiple, sean ventiladas a -  
través de chimeneas separadas, debe ser determi -  
nada por la siguiente fórmula:

$$E_f = E_t \frac{p_f}{p_t}$$

E<sub>f</sub>= La emisión permitida a cada una de las chi -  
meneas por separado que ventilan la fuente -  
de operación de que se trate.

E<sub>t</sub>= La emisión total permitida para la fuente -  
de operación múltiple.

P<sub>f</sub>= Es el peso del proceso correspondiente a la  
fuente de operación u operaciones ventila -  
das a través de chimeneas separadas.

P<sub>t</sub>= Es peso total del proceso para la fuente de  
operación múltiple.

ARTICULO 24 La emisión de polvos deberá referirse a condi -  
ciones normales de temperatura (25°C) y de pre -  
sión (760 mm. de mercurio).

Los artículos 20, 21, 22 y 23 limitan las can -

tidades permitidas de sólidos emitidos por las fuentes contaminantes. Estas cifras están expresadas en kg/hr y mg/m<sup>3</sup> normal, por minuto, por lo que es pertinente agregar a nuestras hojas de registro las conversiones necesarias para que las unidades de los resultados sean iguales a las reglamentadas para poder establecer una comparación y por consiguiente dar un dictamen.

El artículo 24 marca que estos resultados en las unidades anteriores, no tan solo deben ser dados en éstas, sino a las condiciones normales de (25°C y 760 mm Hg) por lo que aparte de corregidos a las condiciones de la chimenea es necesario también hacerlos a las condiciones normales.

Por estas razones se debe desarrollar una nueva hoja de registro que las cumpla, para que la prueba pueda cumplir su objetivo, (Esta nueva hoja de registro se anexa como apéndice número ocho.)

Las correcciones hechas se describen a continuación:

De la ecuación 2.25

$$V = \bar{V}_G \times A \times 60 = m^3/M \dots\dots\dots 2.25$$

Como se sabe esta V está en las condiciones -  
de la chimenea y se quiere transformar a condi-  
ciones normales del reglamento 760 mm Hg, 25°C-  
(298°K), para lo cual:

$$V_{CORR} = V \times \frac{P_G}{760} \times \frac{298}{T_G} = (m^3/M)_{CORR} \dots\dots 4.1$$

$$\text{Corrigiendo } V_{TM} (m^3) \times \frac{298}{T_M} \times \frac{(P_b - P_s)}{760} = m^3_{CORR} \dots\dots 4.2$$

Lo mismo con la concentración:

$$\text{Conc.} = \frac{W_t (g) \times 10^{-3}}{V_{CORR} (m^3)} = \frac{mg}{m^3} \dots\dots\dots 4.3$$

Para el cálculo de los kg/hr según reglamento:

$$\text{kg/hr}_{CORR} = \text{CONC.}_{(CORR)} \left( \frac{mg}{m^3} \right) \times V_{CORR} \left( \frac{m^3}{hr} \right) \times \frac{1}{10^6} \frac{mg}{kg}$$

$$\text{kg/hr}_{CORR} = \text{CONC.}_{(CORR)} \times V_{CORR} \times 10^{-6} \dots\dots 4.4$$

CAPITULO V.- EJEMPLO.

Con el fin de ilustrar el presente trabajo se anexa este ejemplo, análisis que fué realizado con el propósito de conocer las emisiones de una empresa.

Al realizarse este trabajo la empresa proporcionó la temperatura de los gases en el medidor de gasto y el % de humedad, datos de una prueba similar que se había realizado poco tiempo atrás con el fin de conocer su problema e instalar el equipo de control de emisiones apropiado, lo cual facilitó la prueba eliminándose así el muestreo exploratorio.

Debido a que todos los cálculos realizados se hacen en la hoja de registro del apéndice 8 no hubo necesidad de anexar hojas de cálculos.

Este ejemplo se encuentra desarrollado en la siguiente hoja.

EMPRESA X CHIMENEA Nº 1 DE 1 ORIGEN CALDERA LOCALIZACION NAVE Nº 23  
 LUGAR DE 11 D ANTES DESCARGA MUSTREO Nº 2 FECHA 30-NOV-1972 HORA 9:00 HOJA 1 DE 1  
 MEDICIONES

PUNTO	Rn	H	√H	VELOC m/seg.	TIEM-PO	GASOMETRO			VM m <sup>3</sup> /M
						VOLUMEN m <sup>3</sup>	PS mmHg.	T °C	
N1	102.00	.129	.361	6.46	14:35	.036	25	21	.0072
2	88.50	.129	.361	6.46	40	.077	50	22	.0083
3	80.30	.083	.289	5.17	45	.110	38	22	.0065
4	67.75	.111	.332	5.94	50	.147	38	22	.0075
5	52.50	.129	.361	6.46	55	.189	50	22	.0083
6	30.60	.156	.395	7.06	15:00	.236	75	23	.0095
7	30.60	.202	.450	8.04	05	.290	75	23	.0108
8	52.50	.210	.458	8.20	10	.345	75	23	.0112
9	67.75	.202	.450	8.04	15	.399	75	23	.0108
10	80.30	1.75	1.323	23.70	20	.449	38	23	.0300
11	88.50	1.75	1.323	23.70	25	.599	38	24	.0300
12	102.00	1.65	1.285	23.00	30	.653	75	24	.0308
E1	102.00	.083	.289	5.17	40	.690	38	24	.0065
2	88.50	.129	.361	6.46	45	.732	63	25	.0085
3	80.30	.129	.361	6.46	50	.774	63	25	.0085
4	67.75	.202	.450	8.04	55	.827	63	27	.0106
5	52.50	.210	.458	8.20	16:00	.882	75	28	.0110
6	30.60	.202	.450	8.04	05	.935	75	28	.0106
7	30.60	.184	.430	7.70	10	.986	75	28	.0103
8	52.50	.202	.450	8.04	15	1.039	75	28	.0106
9	67.75	.202	.450	8.04	20	1.092	75	28	.0106
10	80.30	.147	.385	6.90	25	1.138	75	28	.0092
11	88.50	.120	.346	6.20	30	1.179	75	28	.0083
12	102.00	.102	.320	5.73	35	1.216	63	28	.0075
TOTALES				216.01			1467	597	
Nº DE PUNTOS				24			24	24	
PROMEDIO				9			61.1	25	

ANALISIS DE GASES				
COMPONENTE	% VOLUM.	M	(100-% H2O) 10 <sup>2</sup>	BASE HUMEDA
CO2	.115	44	.60	3.03
O2	.080	32	.60	1.53
CO		28		
SO2		64		
H2O	.400	18		7.20
N2	.805	28	.60	13.52
TOTAL				25.28
M DEL AIRE				29
GRAVEDAD ESPECIFICA (Gd)				0.873

TG = 464 °K	TH = °K
HR = %	P.V. = mmHg
D = 210 cm.	A = 3.5 m <sup>2</sup>
FS = 1.83	PE = -0.381 mmHg
PG = 657.5 ± 0.33 = 657.17 mmHg	
PFDP = 43.9839 g	TME = 299 °K
PFAP = 42.6282 g	d = 0.625 cm
PN = 1.3557 g	Va = 299 C.C.

% H<sub>2</sub>O VOL. =  $\frac{x}{100} = 0.40\%$

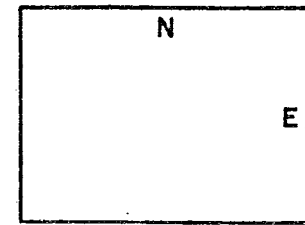
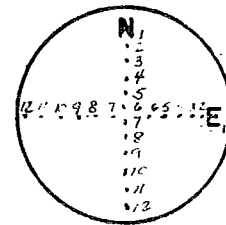
$V_G = 0.87 \cdot (0.83) \sqrt{\frac{760 \times 1.00 (464)}{657 \cdot 0.873}} \sqrt{H}$

$V_G = (17.9) \sqrt{H} = \text{m/seg.}$

$V = 9 \times 3.5 \times 60 = 1890 \text{ m}^3/\text{M}$

$V_{STD.} = 1890 \times \frac{657}{760} \times \frac{273}{464} = 960 \text{ m}^3/\text{M}$

$V_{CORR.} = 1890 \times \frac{657}{760} \times \frac{298}{464} = 1150 \text{ m}^3/\text{M}$



Ps	VM/√H	Ps	VM/√H	Ps	VM/√H	Ps	VM/√H
0	.0212	50	.0230	100	.0250	150	.0275
10	.0216	60	.0234	110	.0255	160	.0280
20	.0219	70	.0238	120	.0260	170	.0285
30	.0222	80	.0242	130	.0265	180	.0290
40	.0226	90	.0246	140	.0270	190	.0296

$V_M = 0.00472 \left( \frac{299}{464} \right) (17.9) \left( \frac{657.17}{675.5 - P_s} \right)^2 \sqrt{H}$

$V_M = (13.95) \left[ \frac{1}{657.5 - P_s} \right] \sqrt{H}$

$V_V = 0.00346 \left( \frac{299 \times 298}{657.5 - 61.1} \right) = 0.516 \text{ m}^3$

$V_{TM} = (1.216) + (0.516) = 1.732 \text{ m}^3$

$V_{TG} = (1.732) \left( \frac{464}{299} \right) \left( \frac{657.5 - 60}{657.2} \right) = 2.44 \text{ m}^3$

$V_{T, CORR.} = (1.732) \left( \frac{298}{299} \right) \left( \frac{657.5 - 60}{760} \right) = 1.36 \text{ m}^3$

$CONC._{CORR.} = \left( \frac{1.356 \text{ g}}{1.36 \text{ m}^3} \right) 10^3 = 996 \text{ Mg/m}^3$

$(\text{Kg/hr})_{CORR.} = \left( \frac{996 \text{ Mg}}{\text{m}^3} \right) \left( \frac{1050 \text{ m}^3}{\text{M}} \right) \times 60 \times 10^6 = 62.7$

Fig. 5.1.- Ejemplo



## C O N C L U S I O N E S

Como se había expresado al iniciar este -  
trabajo, la medición de concentración de sólidos en emi-  
siones de fuentes contaminantes es muy importante por -  
que es aplicable para resolver muchos problemas de carac-  
ter técnico, social y económico.

Es por eso que el desarrollo de esta tesis,  
así como la relación que se le hace con el "Reglamento-  
para la Prevención y Control de la Contaminación Atmos-  
férica originada por la emisión de Humos y Polvos", -  
van encaminados con el propósito de que en una forma u-  
otra, pueda servir a cualquier persona interesada, así-  
como al personal de la Dirección General de Investiga -  
ción de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente -  
encargada de evaluar las emisiones de las empresas en -  
forma individual para poder dictaminar su contribución-  
a este grave problema, y poder encontrarle una solución.

A P E N D I C E 1  
 ZONAS DE AREAS IGUALES PARA MEDICIONES EN SECCIONES CIRCULARES

DIAMETRO Cm	AREA m <sup>2</sup>	NUMERO DE AREAS IGUALES	RADIOS (CM) A LOS PUNTOS DE					
			ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E	ZONA F
20	.0324	2	5.00	8.75				
25	.0507	2	6.25	10.93				
30	.0730	2	7.50	13.12				
35	.0994	3	6.25	11.25	13.75			
		2	8.75	15.00				
		3	7.50	12.50	15.95			
40	.0130	2	10.0	17.50				
		3	8.10	13.70	18.75			
45	.0164	2	11.25	19.70				
		3	9.40	15.95	20.6			
50	.0203	3	10.30	19.80	23.1			
		4	9.00	15.33	19.70	28.45		
55	.0246	3	11.25	19.40	25.00	-	-	
		4	9.70	16.9	21.55	25.60		
60	.0292	3	12.20	21.25	27.50	-	-	
		4	11.25	15.95	23.75	25.60		
65	.0342	3	13.70	23.15	30.00	-	-	
		4	11.55	20.00	25.60	30.30		
70	.0398	3	13.45	24.75	31.90	-	-	
		4	12.50	21.55	27.50	32.60		
75	.0457	4	13.45	23.15	29.70	35.00	-	-
		5	11.55	20.60	26.60	31.25	35.62	
80	.0519	4	14.05	24.40	31.60	37.40	-	-
		5	12.50	21.85	28.45	33.70	38.17	
90	.065	4	15.95	27.50	35.60	41.90	-	-
		5	14.05	24.75	39.30	37.50	42.75	
105	.090	4	18.75	31.95	41.60	48.90	-	-
		5	16.25	28.75	37.20	43.75	49.63	

120	.116	4	21.20	36.60	47.50	56.30	-	-	
		5	18.75	32.80	42.50	50.00	57.25		
		6	17.50	30.00	39.75	46.10	51.90	57.50	
135	.148	4	24.05	41.20	53.50	63.10	-	-	-
		6	18.75	33.75	43.75	51.50	58.12	64.40	
150	.182	4	26.6	45.90	59.00	70.00	-	-	-
		6	21.85	37.50	48.40	57.30	64.40	71.90	
165	.221	4	29.70	51.25	65.00	76.80	-	-	-
		6	24.05	41.25	53.50	63.10	70.62	79.00	
180	.267	4	31.95	55.00	71.00	84.00	-	-	-
		6	26.25	45.00	58.10	68.75	78.20	86.60	
195	.309	4	34.70	59.45	71.75	91.00	-	-	-
		6	28.40	48.75	63.25	74.74	84.45	93.50	
210	.358	4	37.20	63.5	82.75	97.75	-	-	-
		6	30.60	52.50	67.75	80.30	88.50	102.00	
225	.411	4	40.00	68.75	88.75	105.00	-	-	-
		6	32.80	56.25	72.75	86.00	97.50	108.25	
240	.468	4	42.50	73.00	94.75	111.20	-	-	-
		6	35.00	60.00	77.50	91.50	104.00	115.00	
270	.592	6	39.10	67.50	87.25	103.25	117.00	129.25	
300	.730	6	43.40	75.00	96.75	114.75	130.00	143.75	
330	.885	6	48.80	82.50	106.50	125.75	143.00	158.12	
360	1.037	6	52.25	90.00	116.25	137.50	156.00	172.12	

A P E N D I C E 2

DISTANCIAS DE LA ORILLA DE LA CHIMENEA AL PUNTO DE MUESTREO  
O MEDICION EN % DEL DIAMETRO DE LA CIRCUNFERENCIA.

NUMERO DE AREAS	2	3	4	5	6
PUNTO No.					
1	6.2	4.4	3.3	2.2	2.0
2	25.0	14.7	10.5	8.2	6.7
3	75.0	29.4	19.5	14.5	11.8
4	93.8	70.6	32.1	22.7	17.7
5		85.3	67.9	34.4	25.0
6		95.6	80.5	65.5	35.4
7			89.5	77.3	64.6
8			96.7	85.5	75.0
9				91.8	82.3
10				97.8	88.2
11					93.3
12					98.0

A P E N D I C E 3

NUMERO DE PUNTOS DE MEDICION (SUBAREAS) PARA SECCIONES TRANS-  
VERSALES RECTANGULARES EN FUNCION DE SU AREA.

AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL (m <sup>2</sup> )	NUMERO DE PUNTOS DE PRUEBA
Menores de $20 \times 10^{-2}$	9
(20 a 225) $\times 10^{-2}$	12
Mayores de $225 \times 10^{-2}$	20 ó más

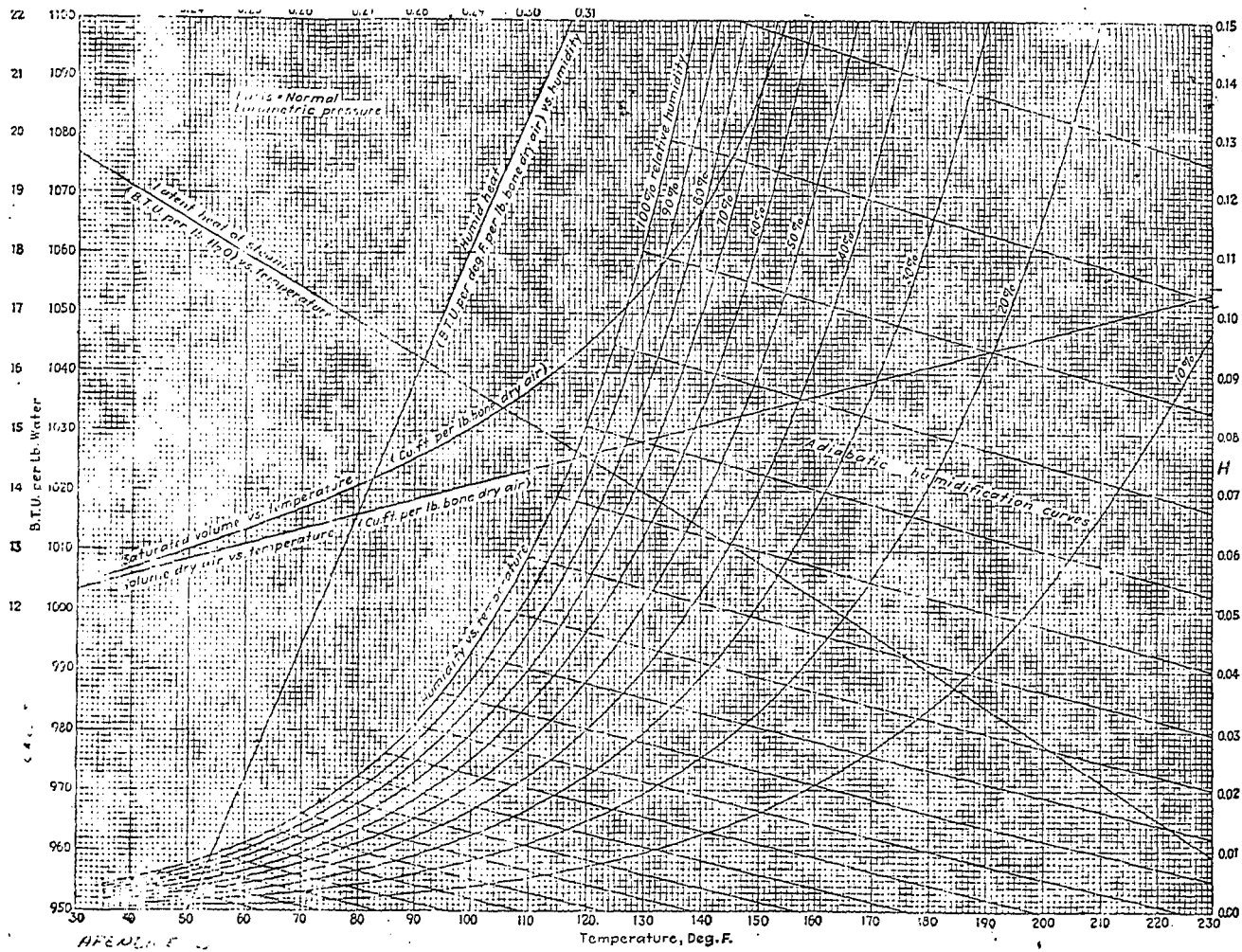


QUIMBOA

A P E N D I C E 4

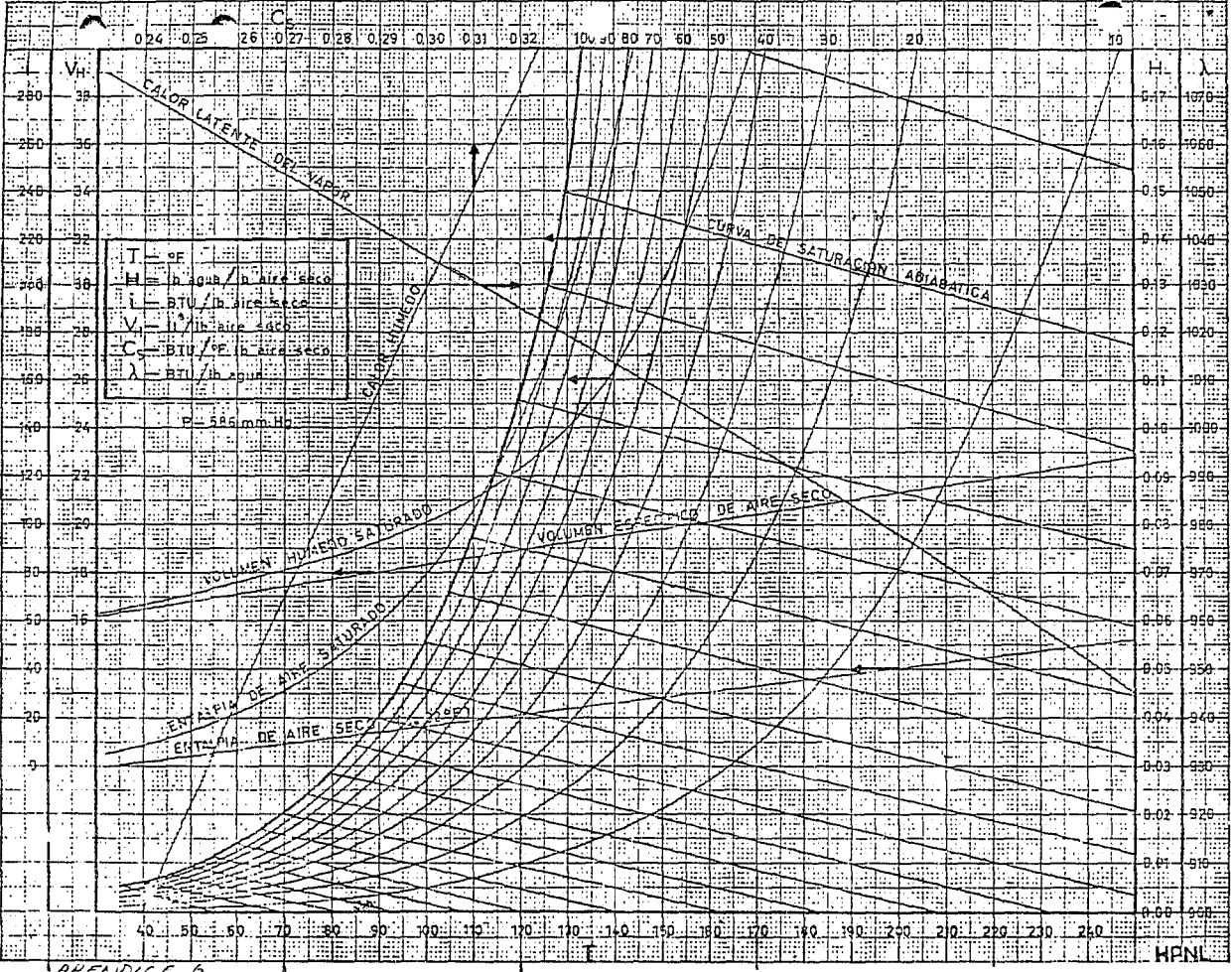
RAICES CUADRADAS DE H

H	$\sqrt{H}$	H	$\sqrt{H}$	H	$\sqrt{H}$	H	$\sqrt{H}$
H	H	.45	.671	.90	.949	1.35	1.162
.01	.100	.46	.678	.91	.954	1.36	1.166
.02	.141	.47	.685	.92	.959	1.37	1.170
.03	.173	.48	.695	.93	.964	1.38	1.175
.04	.200	.49	.700	.94	.970	1.39	1.179
.05	.224	.50	.707	.95	.974	1.40	1.183
.06	.245	.51	.714	.96	.980	1.41	1.187
.07	.265	.52	.721	.97	.985	1.42	1.192
.08	.283	.53	.728	.98	.990	1.43	1.196
.09	.300	.54	.735	.99	.995	1.44	1.200
.10	.316	.55	.742	1.00	1.000	1.45	1.204
.11	.332	.56	.748	1.01	1.005	1.46	1.208
.12	.346	.57	.755	1.02	1.010	1.47	1.212
.13	.361	.58	.762	1.03	1.015	1.48	1.217
.14	.374	.59	.768	1.04	1.020	1.49	1.221
.15	.387	.60	.775	1.05	1.025	1.50	1.225
.16	.400	.61	.781	1.06	1.030	1.51	1.229
.17	.412	.62	.787	1.07	1.034	1.52	1.233
.18	.424	.63	.794	1.08	1.039	1.53	1.237
.19	.436	.64	.800	1.09	1.044	1.54	1.241
.20	.447	.65	.806	1.10	1.049	1.55	1.245
.21	.458	.66	.812	1.11	1.054	1.56	1.249
.22	.469	.67	.819	1.12	1.058	1.57	1.255
.23	.480	.68	.825	1.13	1.063	1.58	1.258
.24	.490	.69	.831	1.14	1.068	1.59	1.261
.25	.500	.70	.837	1.15	1.072	1.60	1.265
.26	.510	.71	.843	1.16	1.077	1.61	1.269
.27	.520	.72	.849	1.17	1.082	1.62	1.273
.28	.529	.73	.854	1.18	1.086	1.63	1.277
.29	.539	.74	.860	1.19	1.091	1.64	1.281
.30	.548	.75	.866	1.20	1.095	1.65	1.285
.31	.557	.76	.872	1.21	1.100	1.66	1.288
.32	.566	.77	.878	1.22	1.105	1.67	1.292
.33	.574	.78	.883	1.23	1.109	1.68	1.296
.34	.583	.79	.889	1.24	1.114	1.69	1.300
.35	.592	.80	.894	1.25	1.118	1.70	1.304
.36	.600	.81	.900	1.26	1.122	1.71	1.308
.37	.608	.82	.906	1.27	1.127	1.72	1.312
.38	.616	.83	.911	1.28	1.131	1.73	1.315
.39	.625	.84	.917	1.29	1.136	1.74	1.319
.40	.632	.85	.922	1.30	1.140	1.75	1.323
.41	.640	.86	.927	1.31	1.145	1.76	1.327
.42	.648	.87	.933	1.32	1.149	1.77	1.330
.43	.656	.88	.938	1.33	1.153	1.78	1.334
.44	.663	.89	.943	1.34	1.158	1.79	1.338



APPLIED

Temperature, Deg. F.









BIBLIOGRAFIA

- 1.- ASTM Designation: D 2828-71 ; "Standard Method for Sampling Staks for Particulate Matter".
- 2.- Avalos y Vez, León; "Generadores de Vapor"; Subsecretaría de Enseñanzas Técnica y Superior; Instituto Politécnico Nacional; Patronato de Publicaciones. México 1962.
- 3.- Barrón Orozco, David; "Muestreo de Aerosoles en Chimeneas y Ductos"; Secretaría del Mejoramiento del Ambiente.
- 4.- D. Yaffe, Charles y otros; "Enciclopedia of Instrumentation for Industrial Higiene"; Technical editors, 1956; University of Michigan.
- 5.- Ekman, Frank; Technical Director; Report No. 177 "Instructions of Sampling Particulates"; National Dust Collector-Corporation; copyrighted-1962.
- 6.- E. Treybal, Robert; "Mass Transfer Operations"; 2a. Edición; Mc. Graw Hill Book Company.
- 7.- G. Brown, George y Otros; "Operaciones Básicas de la Ingeniería Química"; Editorial Marin, S.A. 1965.
- 8.- Kanter, C.V., Lunche, R. G., Fudurick, A.P.; "Techniques of Testing for Contaminants from combustion Sources". JAPCA, Vol. 6 No. 4, Feb. 1959.
- 9.- L. Morrow, N. y otros, Esso Research and Engineering Co.; Chemical Engineering. January 24, 1972.
- 10.- Maron y Prutton, ED. Limusa Wiley, S.A.; 1a. Edición México 1968.
- 11.- M. Barrow, Gordon "Química-Física para cursos de facultades de Ciencias y de Escuelas Técnicas Superiores", Editorial Reverté, 1964.
- 12.- Mc. Cabe and Smith, "Unit Operations of Chemical Engineering", Mc. Graw-Hill Book Company, 2a. Edición.

- 13.- Perry, John; "Chemical Engineers" Handbook"; International Student Edition; Fourth Edition.
- 14.- S. Foust, Allan; "Principios de Operaciones Unitarias"; Compañía Editorial Continental; Tercera Edición, 1969.
- 15.- Werner Strauss (University of Melbourne, Victoria, Australia) "Air Pollution Control" Part I; Willey-Interscience, 1971.
- 16.- Western Precipitation; "Methods for Determination of Velocity, Volume, Dust and mist content of Gases"; Bulletin W.P.-50; Corporation, 1956.