

Nota: Esta Norma fue modificada de Norma Oficial Mexicana a Norma Mexicana, de acuerdo al Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de Noviembre de 1992.

NORMA MEXICANA NMX-AA-85-1986

PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION ATMOSFERICA - FUENTES FIJAS - GASOMETROS HUMEDOS - CALIBRACION - METODO DE SIFONEO

PREFACIO

En la elaboración de la presente norma participaron los siguientes organismos:

- SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA.
Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.
- DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL
Subdirección de la Calidad de Vida.
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACION
- CAMARA DEL PAPEL
- FERTILIZANTES MEXICANOS, S.A.
- PROCTER and GAMBLE DE MEXICO
- MEXALIT, S.A.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-AA-85-1986, PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION ATMOSFERICA - FUENTES FIJAS - GASOMETROS HUMEDOS - CALIBRACION - METODO DE SIFONEO.

1.- OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta Norma Mexicana establece dos procedimientos para la calibración de gasómetros húmedos, utilizados como estándares secundarios para la calibración de otros medidores de flujo gaseoso, empleados en el muestreo de contaminación atmosférica (ver fig. 1).

2.- REFERENCIAS

Esta norma se complementa con las siguientes Normas Mexicanas:

- NMX-AA-9 Determinación del flujo de gases en un conducto por medio del tubo de Pitot.
- NMX-AA-10 Determinación de la emisión de partículas sólidas contenidas en los gases que se descargan por un conducto.

3.- FUNDAMENTO

El volumen de agua desplazada por sifoneo de un recipiente conectado en serie con un gasómetro, es igual al volumen de aire que lo sustituye y que necesariamente pasará a través del gasómetro.

4.- APARATOS Y EQUIPO

El equipo que se describe a continuación es el adecuado a una capacidad del gasómetro hasta 5000 cm³ por revolución.

4.1 Gasómetro húmedo con capacidad hasta 5000 cm³ por revolución de la aguja mayor, con agujas indicadoras de las revoluciones del tambor, termómetro graduado de 273 a 373 K (0 a 100 C) y manómetro con graduación de 0 a 1.245 kPa (0 a 127 mm de agua). Si la escala del gasómetro, termómetro y manómetro están graduadas en otras unidades, calcular las equivalencias adecuadas antes de aplicar las fórmulas de esta norma.

4.2 Manómetro inclinado con graduación de 0 a 245.15 Pa (0 a 25 mm de agua y divisiones de 4.905 Pa (0.5 mm de agua).

4.3 Garrafón de vidrio con capacidad de 18 a 20 litros.

4.4 Tubo de vidrio de 0.6 cm diámetro con longitud suficiente para formar las conexiones que se indican en la fig. 1.

4.5 Recipiente de 250 cm³ para formar el saturador de humedad.

4.6 Tapones con perforaciones de 0.6 cm de diámetro, para el garrafón y el saturador.

4.7 Embudo de vidrio con tubo de descarga de 0.6 cm de diámetro.

4.8 Tres termómetros de vidrio que comprendan las temperaturas de 273 a 373 K (0 a 100 C) con divisiones de 1 K (1 C). Para indicar la temperatura dentro del garrafón, medir la temperatura del agua desplazada o sifoneada e indicar la temperatura ambiente.

4.9 Dos o más recipientes de plástico, con capacidad aproximada de 4 litros numerados 1 y 2 (ver Nota 1).

4.10 Mangueras flexibles de polietileno de baja densidad, de 0.6 cm de diámetro.

4.11 Pinzas Mohr (ver fig. 1).

4.12 Dos tubos de vidrio en forma de "T" de 0.6 cm de diámetro.

4.13 Balanza o báscula con capacidad de 10 Kg, y con precisión de 0.1 g.

4.14 Barómetro con divisiones de 1 mm de mercurio.

4.15 Higrómetro para medir de 0 a 100 % de humedad relativa, con divisiones de 2 % máximo. Si no se cuenta con higrómetro, utilizar psicrómetro de bulbo seco y húmedo efectuando correcciones por altitud.

4.16 Pinzas de Hoffmann para regular el flujo (ver 5.4.1).

4.17 Matraz volumétrico de 2000 cm³ o mayor.

gasómetro y un garrafón lleno de agua destilada, como se indica en la fig. 1. Además, conectar un manómetro inclinado y un embudo (parte punteada del diagrama). Instalar el termómetro para medir la temperatura del aire que proviene del gasómetro.

5.1.2 Ajustar la altura del garrafón, las longitudes de las mangueras y de las conexiones del tubo de vidrio de acuerdo con la fig. 1.

5.2 Verificación del equipo

5.2.1 Examinar cuidadosamente el gasómetro (fig. 2) para asegurarse de que no esté dañado. El tambor debe girar libremente sin frenarse en alguna posición.

5.2.2 Revisar que el tubo de nivel del gasómetro y su aguja estén bien limpios; de lo contrario, lavarlos con jabón y con alcohol y enseguida enjuagarlos bien con agua.

5.2.3 Asegurarse que la punta de la aguja del nivel esté bien afilada y limpia.

5.2.4 Verificar que los tornillos para nivelación colocados en la base del gasómetro estén perfectamente rectos para que giren libremente, pero que no estén flojos.

5.2.5 Asegurarse que la burbuja de nivel del gasómetro se pueda observar fácil y claramente.

5.2.6 Nivelar el gasómetro mediante los tornillos, para centrar la burbuja del nivel.

5.2.7 Llenar el gasómetro con agua destilada hasta un nivel ligeramente por arriba de la punta de la aguja indicadora del nivel de agua. Verificar que el gasómetro no presente fugas de agua, especialmente alrededor del tubo de nivel y del balero frontal de la flecha del tambor.

5.2.8 Ajustar el nivel del agua exactamente a la altura de la punta de la aguja valiéndose para ello de la pequeña válvula situada en la parte inferior del tubo del nivel.

5.3 Verificación de infiltraciones o fugas.

5.3.1 Mediante las pinzas de Mohr, cerrar la conexión al manómetro inclinado, tapar la entrada al saturador y aspirar por sifoneo el agua del garrafón hasta que la lectura del manómetro del gasómetro sea de 441.45 a 442.45 Pa (45 a 46 mm de agua); cerrar la descarga del sifón con las pinzas de Mohr y esperar cinco minutos. Si después de este tiempo la lectura del manómetro no varía, el sistema está libre de infiltraciones o fugas; de lo contrario localizarlas y eliminarlas.

5.3.2 Destapar la entrada del saturador y abrir la conexión del manómetro inclinado.

5.4 Igualación de condiciones.

5.4.1 Saturar con aire tanto el agua del gasómetro como la del garrafón poniendo a trabajar todo el tren de calibración, pero recogiendo el agua sifoneada. Al terminar de vaciar las tres cuartas partes del garrafón, regresar el agua sifoneada al garrafón. Repetir esta operación tres o más veces, aprovechando para ajustar la abertura de las pinzas de Hoffmann de modo que el flujo aproximado sea de 300 cm^3 por minuto.

5.4.2 Estabilizar la temperatura del sistema dejándolo armado un lapso de 24 horas.

6.1.2 Antes de iniciar la calibración, descargar por sifoneo algo de agua hacia el recipiente 1, observar cuidadosamente la aguja del gasómetro, cuando pase exactamente por el cero, iniciar la calibración al cambiar la descarga de agua al matraz volumétrico. Anotar, en ese momento, la lectura del gasómetro L_1 ($L_1 = 0$).

6.1.2.1 Anotar en la hoja tabular, la temperatura y presión (t_{m1} y P_{m1}) que indiquen el termómetro y manómetro colocados en el gasómetro, así como la temperatura y presión (t_{g1} y P_{g1}) en el garrafón.

6.1.2.2 Poco antes de llegar el agua al aforo del matraz, anotar la temperatura y presión (t_{m2} y P_{m2}) en el gasómetro, así como la temperatura y presión (t_{g2} y P_{g2}) en el garrafón.

6.1.2.3 Terminar cuando el nivel del agua sifoneada llegue al aforo cerrando la manguera de descarga mediante las pinzas de Mohr y anotar la lectura final del gasómetro (L_2).

6.1.2.4 Introducir un termómetro en el agua sifoneada al matraz, esperar cinco minutos, leer la temperatura y anotar en la hoja de datos llamándolo t , en C.

6.1.2.5 Determinar la humedad relativa (HR) mediante el higrómetro o con un psicrómetro (en este caso, utilizar la carta psicrométrica a la presión atmosférica local).

6.1.2.6 Con los datos obtenidos en 6.1.2.1 y 6.1.2.2 calcular el valor de la temperatura y presión en el gasómetro.

6.2 Precauciones.

Al terminar la calibración, vaciar el agua en el gasómetro para evitar su oxidación. En caso de que se rompa el termómetro del gasómetro, eliminar de inmediato todo el mercurio, ya que al amalgamarse con la soldadura de estaño, daña las uniones. Efectuar esta calibración cada 3 meses.

NOTA 1: En previsión de algún posible error en la manipulación repetir los pasos 6.1.2 a 6.1.2.6 las veces necesarias hasta tener la certeza de haber procedido correctamente. Para ello usar recipientes adicionales numerados "2A", "2B", etc. y en caso de terminarse el agua del garrafón, regresar el contenido de los recipientes empleados en las calibraciones precedentes.

V_{gc} = Volumen medido por el gasómetro y corregido en caso necesario ($L_2 - (L_2 - L_1)$).

V_m = Volumen del matraz volumétrico.

NOTA 2: En caso de duda, discrepancia o tercería, efectuar la calibración por medición del volumen desplazado y por pesado, calculando el volumen equivalente a las condiciones del gasómetro y comparar los resultados. El método por pesado o gravimétrico se describe a continuación:

8.- CALIBRACION

8.1 Método gravimétrico.

8.1.1 Registro de datos.

Preparar una hoja tabular de acuerdo al modelo ilustrado en la Tabla 2.

8.1.2 Antes de iniciar la calibración, pesar con aproximación de 0.1 gramos el recipiente 2, en el que se va a recibir el agua desplazada por sifoneo durante la calibración, y cuyo volumen se va a determinar. Llamar B al peso en gramos obtenido.

8.1.3 Antes de iniciar la descarga, observar cuidadosamente la aguja mayor del gasómetro; descargar por sifoneo el agua hacia el recipiente 1. Cuando la aguja pasa exactamente por el cero, iniciar la calibración cambiando la descarga de agua al recipiente 2 previamente pesado. Anotar la lectura del gasómetro en el momento de cambiar la descarga al recipiente 1 llamándola L .

8.1.4 Anotar en el registro de datos la temperatura y la presión (t_{m1} y P_{m1}) que indiquen el termómetro y el manómetro colocados en el gasómetro, así como la temperatura y la presión (t_{g1} y P_{g1}) en el garrafón.

8.1.5 Un poco antes de que termine la calibración, anotar la temperatura t_{m2} y la presión P_{m2} del gasómetro, y la temperatura t_{g2} y la presión P_{g2} en el garrafón.

8.1.6 Terminar la calibración cuando la aguja mayor del gasómetro dé un número completo de revoluciones, por ejemplo 2 ó 3. Cuando la aguja mayor pase por el cero, cambiar de nuevo la descarga hacia el recipiente 1 y anotar la lectura exacta del gasómetro en el momento de suspender el sifoneo al recipiente 2 llamándola L .

8.1.7 Pesar el recipiente 2 con el agua recibida, llamándolo B_2 al peso en gramos obtenido.

8.1.8 Inmediatamente después, anotar la lectura del barómetro llamándola P , en milímetros de mercurio. Introducir un termómetro al recipiente 2 para medir la temperatura del agua. Esperar cinco minutos y anotar la lectura, llamándola t , en Celsius.

8.1.9 Anotar la lectura del higrómetro llamándola HR, en % de humedad relativa. (ver 6.1.2.5).

8.1.10 Anotar t_1 , la temperatura ambiente en Celsius.

8.1.11 Calcular B , el peso del agua sifoneada para la calibración mediante la diferencia B_2 menos B_1 en gramos.

8.1.12 Calcular los valores medios de las temperaturas y presiones en el gasómetro (t_m y P_m) y en el garrafón (t_g y P_g) a partir de los datos obtenidos en 8.1.4 y 8.1.5.

8.2 Precauciones.

Efectuar esta calibración cada 3 meses.

Al terminar la calibración, vaciar el agua contenida en el gasómetro para evitar su oxidación.

En caso de que se rompa el termómetro del gasómetro, eliminar de inmediato todo el mercurio, ya que al amalgamarse con la soldadura de estaño, puede dañar las uniones soldadas.

NOTA 3: En previsión de algún posible error en la manipulación, repetir los pasos 8.1.2 a 8.1.12 las veces necesarias hasta tener la certeza de haber procedido correctamente. Para ello usar recipientes adicionales numerados "2A", "2B", etc. y en caso de terminarse el agua del garrafón, regresar el contenido de los recipientes empleados en las calibraciones precedentes.

TABLA 2

CALIBRACION DE GASOMETRO HUMEDO

FECHA _____ IDENTIFICACION DEL APARATO _____

DIRECCION _____

NOMBRE _____ PRUEBA No. _____

1. DATOS DIRECTOS

GASOMETRO:

RECIPIENTE No 2

Temperatura Inicial (t_{m1}) _____ C

Peso vacío (B₁) _____ g

Temperatura final (t_{m2}) _____ C

Peso con agua (B₂) _____ g

Lect. inicial manómetro (P_{m1}) _____ mmH₂O

Temperatura del agua (t_{g1}) _____ C

Lect. final manómetro (P_{m2}) _____ mmH₂O

GARRAFON

Lect. inicial gasómetro _____ cm³

Temperatura inicial (t_{g1}) _____ C

No. de vueltas _____

Temperatura final (t_{g2}) _____ C

Lect. final gasómetro _____ cm³

AMBIENTE

Lect. inicial manómetro (P_{g1}) _____ mmH₂O

Temperatura (t_{a1}) _____ C

Lect. final manómetro (P_{g2}) _____ mmH₂O

Lectura barómetro (P) _____ mmHg

Lectura higrómetro (HR) _____ %

Aceleración gravedad (g) _____ cm/seg

2. DATOS DERIVADOS

GASOMETRO

$$\frac{t_{m1} + t_{m2}}{2} = t_m \text{ _____ C}$$

Temperatura -----

$$\frac{P_{m1} + P_{m2}}{2} = p_m \text{ _____ C}$$

Pres. manom. -----
2

Volumen indicado (V) ----- cm³
i

Temp. absoluta (t_m + 273.16 = T_m) ____ K

Pres. absoluta (P + $\frac{P}{13.6}$ = P_m) ____ mmHg

GARRAFON

Temperatura $\frac{t_{g1} + t_{g2}}{g}$ = T ----- C

Pres. manom. $\frac{P_{m1} + P_{m2}}{m}$ = P ----- mm H₂O

Temp. absoluta (t_g + 273.16 = T_g) ----- K

Pres. absoluta (P + $\frac{P_g}{13.6}$ + P_g) ----- mmHg

RECIPIENTE 2

Peso de agua (B₂ - B₁ = B) ----- g

9.- CALCULOS

9.1 Densidad del agua en el recipiente 2.

$$D_o = 1.0001 + 1.4286 \times 10^{-5} t - 5.0569 \times 10^{-6} t^2 - 9.451 \times 10^{-9} t^3$$

en donde:

D_o = Densidad del agua en gramos por centímetro cúbico.

t = Temperatura del agua en el recipiente 2, en Celsius, determinada en 8.1.8.

9.2 Volumen específico del aire seco a temperatura y presión ambiente.

$$V_{as} = \frac{760}{P} - \frac{(1131493)}{P^2} - 72.743 \times T + 0.16788 \times T^2 - 0.000139706 \times T^3 + 15106.5$$

donde:

V_{as} = Volumen específico, centímetros cúbicos por gramos de aire seco.

P = Presión barométrica, mm de mercurio, determinada en 8.1.8.

T = Temperatura ambiente en grados Kelvin = temperatura t Celsius (determinada en 8.1.10) + 273.16.

9.3 Presión de vapor de agua.

$$P_{st} = 4.581 + 0.3325 t_1 + 0.0109774 t_1^2 + 1.64854 \times 10^{-4} t_1^3 + 3.63865 \times 10^{-6} t_1^4$$

en donde:

t₁ = Temperatura ambiente en Celsius, determinada en 8.1.10.

9.4 Humedad absoluta.

$$H = 0.62642 \times \frac{HR}{100} \times \frac{P_{st}}{P - \frac{HR}{100} \times P_{st}}$$

en donde:

- H = Humedad absoluta del aire, gramos de agua por gramos de aire seco.
- HR = Humedad relativa, % determinada en 8.1.9.
- P = Presión barométrica, mm de mercurio, determinada en 8.1.8.
- P_{st} = Tensión de vapor de agua a la temperatura ambiente (ver 9.3).

9.5 Volumen de la humedad en el aire ambiente.

$$V_v = 4.54822 \times \frac{H \times T}{P}$$

donde:

- V_v = Volumen de la humedad, cm³ por gramos de aire seco.
- H = Humedad absoluta, g de agua por g de aire seco (ver 9.4).
- T = Temperatura ambiente en Kelvin = temperatura t₁ en Celsius (determinada en 8.1.10) + 273.16.

9.6 Densidad del aire ambiente.

$$D_a = \frac{1 + H}{V_a + V_v}$$

donde:

- D_a = Densidad del aire ambiente, g/cm³
- H = Humedad absoluta del aire, g de agua por g de aire seco, determinada en 9.4.
- V_v = Volumen de la humedad en el aire, centímetros cúbicos de vapor de agua por gramo de aire seco calculado en 9.5.

9.7 Volumen de aire usado en la calibración (a condiciones del gasómetro).

$$V_m = \frac{B}{(D_o - D_a)} \cdot \frac{g}{g} \cdot \frac{P}{P_m} \cdot \frac{T}{T_g}$$

en donde:

V_m = Volumen de aire que paso por el gasómetro, cm^3

B = Peso del agua en el recipiente 2 (determinado en 8.1.11).

D_o = Densidad del agua en el recipiente 2, gramos por centímetro cúbico calculada en 9.1.

D_a = Densidad del aire ambiente, gramos por centímetro cúbico, calculada en 9.6.

g_c = 980.6 cm/seg^2 .

g = Aceleración local de la gravedad en centímetro por segundo al cuadrado.

$(g_c/g) = 1$, en caso de no conocer el valor de g .

P = Presión en el interior del gasómetro, mm de mercurio = P , presión m barométrica anotada en 8.1.8 menos la presión del manómetro del gasómetro P_m calculada en 8.1.12 y convertida a mm de mercurio ($\text{mm H}_2\text{O}/13.6$).

P_g = Presión en el interior del garrafón, mm de mercurio = P , presión barométrica anotada en 8.1.8 menos la presión del manómetro inclinado del garrafón, P_g calculada en 8.1.12 y convertida a mm de mercurio ($= \text{mm H}_2\text{O}/13.6$).

T_m = Temperatura en el gasómetro, en Kelvin, calculada partiendo de t_m , a su vez calculada en 8.1.12.

T_g = Temperatura del aire en el garrafón en Kelvin, igual a $t_g + 273.16$

9.8 Factor de calibración.

$$F = \frac{V_m}{V_i}$$

en donde:

V_m = Volumen de aire que pasó por el gasómetro, determinado en 9.7 en cm^3 .

V_i = Volumen de aire indicado por el gasómetro, cm^3 ($V_i = L_2 - L_1$)

Este factor debe quedar comprendido entre 0.985 y 1.015 en caso de rebasar estos límites, corregir el nivel del líquido en el gasómetro y repetir la calibración.

Si de cualquier forma no se satisfacen estos requisitos, el gasómetro requiere ajuste o reparación.

APENDICE A, DERIVACION DE LAS ECUACIONES.

A.1. A falta de datos experimentales específicos el aire húmedo en condiciones ambientales se considera como un gas ideal.

Justificaciones:

a) Factor de compresibilidad del aire seco a 1 atm y 300 K (80F).

$$Z = \frac{PV}{nRT} = 0.9997$$

(Hilsenrath et al., N.B.S. Circ. 564, 1955).

b) Factor de compresibilidad del vapor de agua 300 K (80F).

$$Z = 0.9977$$

(Calculado con datos de Keenan & Keyes "Thermodynamic Properties of Steam", 1936: para 300 K (80 F) presión de saturación 0.0345 atm, volumen específico 711.547 litros/g mol).

c) Factor de compresibilidad del aire saturado a 300 K (80 F) y 1 atm.

$$Z = 0.9954$$

(Calculado con datos de Keenan and Keyes y de John A. Goff y S. Gratch: humedad de saturación a 300 K (80 F) = 0.02233 kg/kg: volumen específico del aire saturado a 1 atm y 300 K (80 F) = 14.087 pies³/lb aire seco).

d) Según lo anterior, la ecuación PV = nRT es válida tanto para el aire seco, como para el vapor de agua, y en especial para el aire saturado. En este último caso, se comete un error de 0.04% al aplicar la ley de los gases ideales al aire saturado a 300 K (80 F) (26.7 C) y 1 atm.

A.2. Para el tren de calibración mostrado en la Fig. 3 la humedad del aire en el garrafón es la misma que la humedad de saturación en el gasómetro. Se considera que hay un buen contacto agua-aire en el saturador y en el medidor, y que no hay transferencia de agua-aire en el garrafón, al no haber allí contacto íntimo entre las fases durante el desplazamiento del agua por el aire.

A.3. El volumen del aire húmedo que pasó por el medidor, V_m, es igual al que entró al garrafón, corregido por la ley de los gases ideales a las condiciones del medidor.

$$V_m = V_g \times \frac{P}{P_m} \times \frac{T_m}{T_g}$$

A.4. El volumen del aire que pasó al garrafón es igual al volumen de agua que pasó a la cubeta.

$$V_g = V_c$$

A.5. El volumen de agua que pasó a la cubeta es igual al cociente de la masa de agua que pasó a la cubeta entre la densidad del agua.

$$V_c = \frac{M_c}{D_o}$$

A.6. La masa del agua es igual al peso del agua entre la aceleración local de la gravedad.

$$M_c = \frac{B''}{g}$$

A.7. El peso de agua (en dinas) es igual a la masa del agua (en gramos) multiplicado por la aceleración estándar de la gravedad (980.6 cm/seg²).

$$B'' = B' \times \frac{g}{c}$$

A.8. El peso del agua es igual al peso del agua indicado por la báscula más el peso de un volumen de aire ambiente igual al volumen de agua que pasó a la cubeta.

$$B' = B + P_a$$

A.9. El volumen de agua que pasó a la cubeta es igual a la masa de agua entre la densidad del agua (ver A.5, A.6, y A.7).

$$V_c = \frac{B'}{D_o} \times \frac{g_c}{g}$$

A.10. El peso del aire ambiente desplazado por el agua en la cubeta es igual a la masa del aire por la aceleración local de la gravedad entre la aceleración estándar de la gravedad (ver A.6 y A.7).

$$P_a = M_a \times \frac{g_c}{g}$$

A.11. La masa de aire es igual al producto del volumen del agua en la cubeta por la densidad del aire ambiente.

$$M_a = V_c \times D_a$$

A.12. Combinado A.9, A.10 y A.11.

$$P_a = B' \times \frac{D_a}{D_o}$$

A.13. Combinado A.8 con A.12,

$$B' = B + B' \frac{D_a}{D_o}$$

A.14. Arreglando la ecuación anterior,

$$B' = \frac{B}{1 - \frac{D_a}{D_o}}$$

A.15. Combinado A.9 con A.14

$$V_c = \frac{B}{D_o - D_a} \times \frac{g_c}{g}$$

A.16. Combinado A.15 con A.4 y con A.3 (utilizada en 9.7)

$$V_m = \frac{B}{D_o - D_a} \times \frac{g_c}{g} \times \frac{P_g}{P_m} \times \frac{T_m}{T_g}$$

A.17. La densidad del agua en la cubeta es:

$$D_o = 1.0001 + 1.4286 \times 10^{-5} t - 5.0569 \times 10^{-6} t^2 - 9.451 \times 10^{-9} t^3$$

En donde la densidad está en gramos por centímetro cúbico y la temperatura en Celsius.

La siguiente tabla justifica la validez de la ecuación anterior:

Y	Densidad calculada	Densidad real	Calc - Real ----- Real x 100
4	1.0000432	1.0000000	+0.00432
6	0.9999692	0.9999919	-0.0023
8	0.9998534	0.9998764	-0.0023
10	0.9996953	0.9997283	-0.0033
12	0.9994945	0.9995248	-0.0030
14	0.9992505	0.9992712	-0.0021
16	0.9989629	0.9989705	-0.0008
18	0.9986312	0.9986244	+0.0007
20	0.9982549	0.9982343	+0.0021
22	0.99783372	0.9978019	+0.0032
24	0.9973670	0.9973286	+0.0039
26	0.9968545	0.9968158	+0.0039
28	0.9962955	0.9962652	+0.0030
30	0.9956898	0.9956780	+0.0012
32	0.9950368	0.9950561	-0.0019
34	0.9943361	0.9944007	-0.0065
36	0.99358721	0.9937136	-0.0127
38	0.99278971	0.9929960	-0.0208
40	0.9919431	0.9922497	-0.0308

En esta tabla la densidad real está tomada de Smithsonian Physical Tables, tabla 287 (9a Ed. Rev., 1954) que tabula los datos de P. Chappuis, Bureau International des Poids et Mesures.

A.18. La densidad del aire ambiente es el recíproco del volumen específico del aire ambiente.

$$D_a = \frac{1}{V_{sa}}$$

A.19. El volumen específico del aire ambiente es igual a la suma de los volúmenes del aire seco más el de la humedad, dividida entre la suma de los pesos del aire seco más la humedad. Tomando como base al peso del aire seco = 1,

$$V_{as} = \frac{V_{as} + V_v}{1 + H}$$

En donde V_{as} es el volumen específico del aire seco, H es la humedad absoluta del aire en kg/kg y V es el volumen que ocupa la humedad H.

A.20. El volumen del aire seco es igual al volumen de aire seco a 760 mm Hg y T (K) corregido a la presión del lugar de la calibración por la ley de los gases ideales, (aprovechando A.1, a).

$$V_{as} = V_{asT} \times \frac{760}{P}$$

A.21. Aprovechando los datos experimentales publicados, el volumen específico del aire seco a 760 mm Hg y T (K) está dado por la ecuación:

$$V_{asT} = - \frac{1131439}{T^3} - 72.743 T^2 + 0.16788 T^3 - 0.000139706 T^3 + 15106.5 \text{ cm}^3/\text{g}$$

El uso de la ecuación anterior se justifica por los resultados tabulados a continuación:

F	K	³ cm /g	³ (ft /lb)	Calculado	Error, % Calc- Real/ Real
32	273.16	773.34	12.388	773.34	0
40	277.604	785.95	12.590	786.01	+ 0.008
46	280.94	795.44	12.742	795.50	+ 0.008
50	283.16	801.74	12.843	801.81	+ 0.009
56	286.493	811.23	12.995	811.26	+ 0.004
60	288.716	817.54	13.096	817.56	+ 0.002
66	292.049	826.96	13.247	827.00	+ 0.005
70	294.271	833.27	13.348	833.30	+ 0.004
76	237.604	842.70	13.499	842.75	+ 0.006
80	299.827	849.06	13.601	849.05	- 0.001
86	303.16	858.49	13.752	858.51	+ 0.002
90	305.382	864.79	13.853	864.82	+ 0.003
96	308.716	874.28	14.005	874.28	0
100	310.938	880.59	14.106	880.59	0
110	316.493	896.38	14.359	896.36	- 0.002

Los datos "reales" se tomaron de "Perry Chemical Engineers Handbook" 4a De. 1963, pág. 15-16

A.22. El volumen de la humedad se deduce de la ley de los gases ideales y del coeficiente de compresibilidad.

$$V_v = \frac{H}{18} \times \frac{82.0567 \times T \times 0.9977}{P} = 4.54822 \times \frac{H \times T}{P}$$

A.23. Sustituyendo A.19, A.20 y A.22 en A.18.

$$D = \frac{1 + H}{a \left[\frac{V}{a_s T} \times \frac{760}{P} + 4.54822 \times \frac{H \times T}{P} \right]}$$

A.24. La humedad del aire, H, en términos de la humedad relativa HR medida por el Psicrómetro, es:(utilizada en 9.4)

$$H = 0.62642 \times \frac{HR}{100} \times \frac{P}{P - HR} \times \frac{P_{st}}{100}$$

En donde P es la presión barométrica ambiente y P_{st} es la tensión de vapor del agua a t₁ C

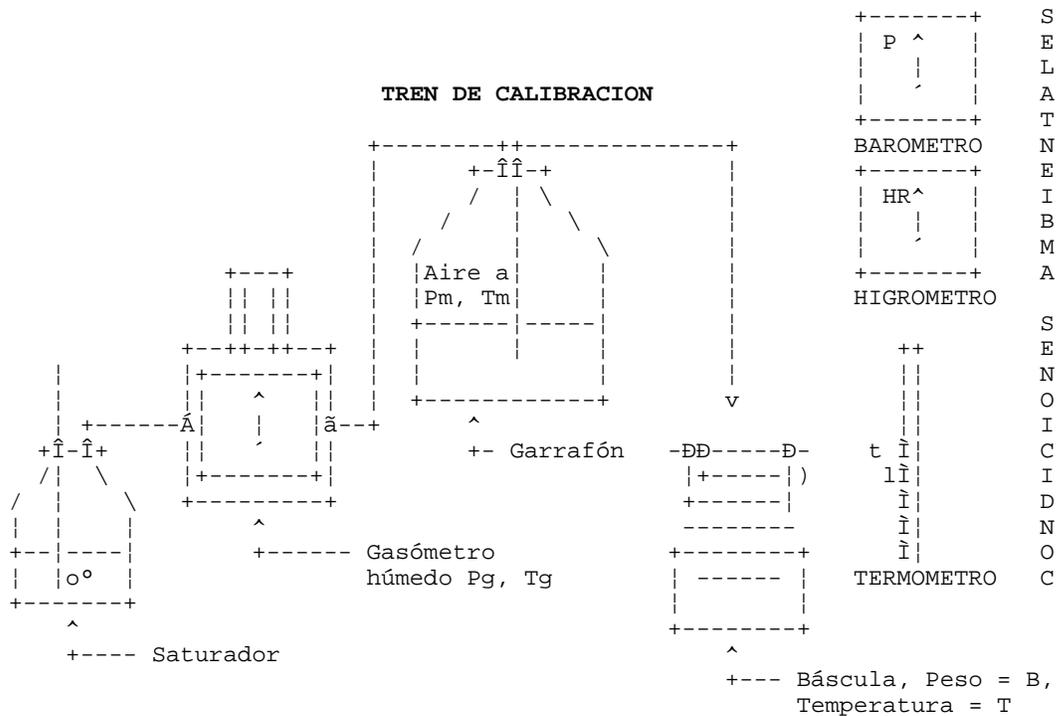
A.25. La tensión de vapor, en mm de mercurio, se da por la siguiente ecuación: (utilizada en 9.3)

$$P_{st} = 4.581 + 0.3325 t + 0.0109774 t^2 + 1.64854 \times 10^{-4} t^3 + 3.63865 \times 10^{-6} t^4$$

Para respaldar la validez de esta ecuación se tiene la siguiente tabla:

TEMPERATURA F	C	P _{st} Mm Hg	Calculado mm Hg	% Error Calc-Real ----- Real
32	0	4.581	4.581	0
36	2.222	5.376	5.376	0
40	4.444	6.291	6.292	+ 0.016
46	7.778	7.921	7.922	+ 0.013
50	10	9.205	9.205	0
56	13.333	11.475	11.472	- 0.026
60	15.556	13.249	13.243	- 0.045
66	18.889	16.360	16.352	- 0.049
70	21.111	18.775	18.767	- 0.043
76	24.444	22.980	22.975	- 0.022
80	26.667	26.220	26.220	0
86	30	31.826	31.834	+ 0.025
90	32.222	36.116	36.130	+ 0.039
96	35.556	43.495	43.506	+ 0.025
100	37.777	49.108	49.108	0

La tensión del vapor "real" aparece en Perry "Chemical Engineers Handbook", 4a Ed. 1963



10.- BIBLIOGRAFIA

- Perry, J.H.
Chemical Engineers Handbook
4a. Edition.
P 15- 16
1963.
- Hilsenrath et. al..
NBS Circ. 564
1955.
- Keenan and Keyes.
Thermodynamic Properties of Steam.
1936
- Smithsonian Physical Tables,
Table 287
9th Ed.
1954
- Quality Assurance Handbook Air Pollution Systems
Vol 3 Ej. 600/4-77-027-B
- ASTM-D-1071-78
Measurement of Gaseous Fuel Samples.