

# COLUMNA DE LÍQUIDO, MANÓMETRO PRIMARIO EN LABORATORIOS 'SECUNDARIOS'

G. Aranda, V. Aranda & S. Medrano

Laboratorio de Metrología. MetAs, S.A. de C.V.

Calle: Jalisco # 313. 49 000. Cd. Guzmán, Jalisco, México. [www.metas.com.mx](http://www.metas.com.mx)

01 (3) 4 13 61 23 & 4 13 16 91. [labmetas@guzman.podernet.com.mx](mailto:labmetas@guzman.podernet.com.mx)

**Resumen:** La columna de líquido, es el instrumento de medición de presión más antiguo, y de los más exactos en los alcances de 500 Pa a 200 kPa. La selección de la configuración de la columna y del fluido manométrico permite la medición de todos los tipos de presión: absoluta, barométrica, bajo vacío, vacío negativo, relativa y diferencial. Las ventajas de este instrumento como patrón de referencia primario, así como su diseño, fabricación y uso, están al alcance de los laboratorios de calibración 'secundarios', que requieren o están interesados en prestar servicios de calibración de alta exactitud. La adecuada selección de la configuración del instrumento, la capacidad de medición de los instrumentos auxiliares, el claro conocimiento de las magnitudes de influencia que afectan su operación, y buenas prácticas de operación y calibración del mismo; hacen del abuelo de la medición de presión un instrumento muy versátil y capaz, a pesar de su edad.

## INTRODUCCIÓN [1] [2]

Las columnas de líquido son el instrumento de medición primaria de presión más difundido y simple, la simplicidad de su método de medición permite que pueda ser fabricado para su uso como patrón de referencia de alta exactitud para la calibración de manómetros. Se presenta una revisión de los puntos más importantes a considerar al momento de diseñar y fabricar este instrumento, los puntos revisados son al igual útiles para el uso, operación y mejoramiento de las columnas de líquido.

El primer experimento documentado, utilizando vacío y columnas de líquido se realizó alrededor de 1640 por un joven italiano, Gasparo Berti, motivado por el efecto sifón, el experimento consistió básicamente de un barómetro de agua de 10,3 m de altura, lamentablemente la explicación de este experimento no pudo darse en ese tiempo.

El italiano Evangelista Torricelli quien tenía un claro concepto de la presión del aire, fabricó un instrumento para mostrar los cambios en la presión del aire entre 1643 y 1644, consistente de un tubo de vidrio cerrado en un extremo y lleno de mercurio, que al voltearlo en un recipiente con mercurio, mantenía una altura de mercurio de aproximadamente 76 cm, el cual fue el primer barómetro de mercurio, según se muestra en la figura 1.

Périer en 1648 fue la primera persona en utilizar la columna del experimento de Torricelli como un barómetro en la montaña Puy-de-Dôme (a solicitud de su cuñado Blaise Pascal), observando una diferencia de altura en la columna de mercurio de 7,5 cm menor en la cima de la montaña a la medida en la base de esta, esto debido a la diferencia de

altura de 1 000 m, siendo capaz de detectar diferencias de altura de la columna de aproximadamente 1 mm, obteniéndose por primera vez una relación entre la altura y la presión atmosférica.

Posteriores experimentos del francés Blaise Pascal utilizando un barómetro de mercurio y del alemán Otto von Guericke utilizando un barómetro de agua en 1660, reportan los primeros estudios de los cambios de la presión barométrica y su relación con las variaciones ambientales, de hecho a Otto von Guericke se le conoce como el primer meteorólogo (no confundir con metrólogo) de la historia.



Figura 1. Barómetro de mercurio de Torricelli, 1644

El barómetro se convirtió en un instrumento común a finales del siglo 17 cuando se fabricó de forma comercial en Inglaterra. Llegando al resto del continente europeo a principios del siglo 18.

## DEFINICIONES DE PRESIÓN

La definición básica de presión nos dice que es la fuerza ejercida por unidad de área en forma perpendicular y se expresa en  $\text{N/m}^2$  equivalente al pascal de símbolo Pa, esta definición se muestra en la ecuación (1) y es aplicable para la presión en sólidos (esfuerzo), líquidos (presión hidráulica) y gases (presión neumática).

$$P = \frac{M \cdot g}{A} \quad (1)$$

Para el caso de una columna vertical de fluido líquido o gas, aplica la definición expresada en la ecuación (2), esta ecuación es la que rige a los manómetros de columna de líquido, punto de interés en este documento.

$$P = r \cdot g \cdot h \quad (2)$$

La ecuación (3) mejor conocida como la ley de los gases, expresa la presión absoluta ejercida por un gas en un recipiente hermético a cierta temperatura,

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad (3)$$

esta ecuación es útil para determinar la diferencia de presión generada por la columna del gas utilizado para la presurización, columna de gas que se tiene cuando existe una diferencia de altura entre el nivel de referencia de la columna de líquido (menisco inferior) y el punto de interés (calibrando).

En las ecuaciones (1), (2) y (3) tenemos que:  $P$  = presión en pascuales Pa,  $M$  = masa en kg,  $g$  = aceleración de la gravedad en  $\text{m/s}^2$ ,  $A$  = área en  $\text{m}^2$ ,  $r$  = densidad del fluido en  $\text{kg/m}^3$ ,  $h$  = altura de la columna de fluido en metros m,  $n$  = cantidad de moles de gas en mol,  $R$  = constante de los gases =  $8,314\ 511\ \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $T$  = temperatura termodinámica absoluta en kelvins K,  $V$  = volumen ocupado por el gas en  $\text{m}^3$ .

## TIPOS DE PRESIÓN

### Presión absoluta (atmosférica, barométrica, vacío absoluto)

La medición de presión absoluta con columna de líquido, requiere del uso del mercurio como fluido manométrico, dado que de pretender utilizar agua o aceite se tendrían problemas por la alta velocidad de evaporación de estos fluidos al ser sometidos al vacío de referencia. La medición de presión absoluta requiere que la columna de referencia sea sometida a

alto vacío, con el propósito de lograr la presión de vapor del mercurio, esta presión de vapor es del orden de  $0,171\ \text{Pa}$  ( $1,28 \cdot 10^{-3}\ \text{Torr}$ ) a  $20\ ^\circ\text{C}$ , para lograr este vacío de referencia se requiere al menos de una bomba de medio vacío de tipo mecánica con doble etapa de paletas rotatorias, siendo muy recomendable una bomba de alto vacío del tipo turbo molecular o de arrastre molecular, la cual permite lograr de forma confiable la presión de saturación del mercurio.

### Presión relativa (positiva o manométrica)

La configuración de columna más utilizada para la medición de este tipo de presión son las de tipo U y las columna de tipo cisterna, con agua o mercurio en función del alcance deseado.

### Presión diferencial

La medición de presión diferencial demanda fuertemente el uso de columnas de mercurio, agua o aceite, para la calibración y ajuste de los manómetros utilizados en la determinación de otras magnitudes como son: flujo a través de orificios de restricción, la determinación de nivel al medir la presión ejercida por la columna del fluido en tanques ya sean cerrados o abiertos a la atmósfera o bien de la medición de presión diferencial en filtros y cuartos limpios. La configuración de manómetro más recomendada para la calibración de este tipo de manómetros, es la columna tipo U con mercurio o agua, en función del alcance de medición, la columna en U presenta la ventaja de que es posible medir la altura de la columna directamente en los dos meniscos, además si se tienen materiales que no se afecten por el contacto prolongado con el agua o mercurio es posible cambiar sin mayor problema el fluido manométrico.

### Presión negativa o vacío relativo

La medición de presión negativa o vacío relativo utilizando columnas de líquido solo es posible mediante el uso de mercurio como fluido manométrico, al igual que en los barómetros.

## TIPOS DE COLUMNAS DE LÍQUIDO

### Columna en U

Sin lugar a dudas la columna de líquido de tipo U es la configuración más popular para la medición de presión, tanto con mercurio, agua y aceites. La ecuación (4) rige la medición de presión con este tipo de columna.

$$p_1 = (r \cdot g \cdot h) + p_2 \quad (4)$$

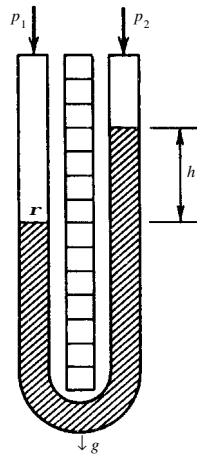


Figura 2. Columna de líquido tipo U [3]

Si la columna de fluido en el nivel superior está abierta a la atmósfera ( $p_2 =$  presión atmosférica) tendremos que  $p_1$  es una presión relativa; si la columna es sometida a vacío ( $p_2 =$  cero absoluto) (solo con mercurio) entonces  $p_1$  es una presión absoluta y la columna U se convierte en un barómetro.

### Cisterna

Fluido manométrico normalmente mercurio y agua con alcances de 150 a 3 000 mm de altura utilizando reglas con división mínima de 1 mm a 0,1 mm, se utiliza para la medición de presión relativa y negativa.

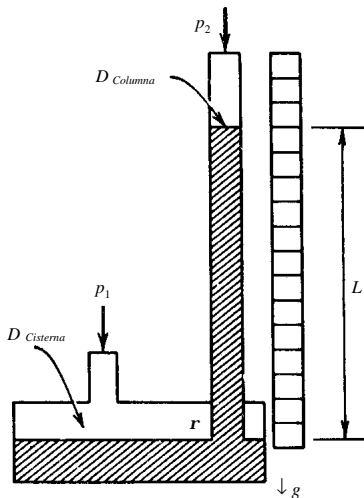


Figura 3. Columna de líquido tipo cisterna [3]

Las columnas de tipo cisterna requieren que la regla esté compensada para corregir la fracción de altura que se mueve la columna en la cisterna con respecto

a la posición inicial y que no es posible reajustar cuando la cisterna es opaca, la corrección se observa en la ecuación (5).

$$(p_1 - p_2) = r \cdot g \cdot L \cdot \left( 1 + \left( \frac{D_{\text{Columna}}}{D_{\text{Cisterna}}} \right)^2 \right) \quad (5)$$

### Barómetro

El barómetro de mercurio consiste de un tubo largo de vidrio, cerrado en un extremo, evacuado y lleno de mercurio. Existen básicamente dos tipos de barómetros de mercurio, el tipo Kew y el tipo Fortín, en el tipo Kew se requiere de llenar el tubo con una cantidad exacta de mercurio, dado que es posible observar solamente el menisco en la columna de medición, mientras que el menisco en la cisterna queda oculto, lo cual inhabilita el ajuste del barómetro por diferencias en la cantidad de mercurio. En el barómetro de tipo Fortín es posible ajustar el nivel del mercurio en el menisco inferior a través de la cisterna que es transparente, el barómetro de mercurio de tipo Fortín es el más exacto y difundido de ambos tipos.

El barómetro es un altímetro, a medida que se va ascendiendo en altitud, la presión atmosférica va disminuyendo. Los barómetros de mercurio miden la *presión atmosférica local*, no la informada al nivel del mar conocida como *presión barométrica* que oscila alrededor de los 1 013,25 hPa (760 mmHg) y que es utilizada para la calibración de altímetros y en las estaciones meteorológicas para la predicción del clima [4]. Para conocer la presión barométrica se requiere aplicar una corrección  $C_{\text{Altitud}}$  a la presión atmosférica local en función de la altitud geopotencial, ver ecuación (6).

$$P_{\text{Barométrica}} = P_{\text{Atmosférica}} + C_{\text{Altitud}} \quad (6)$$

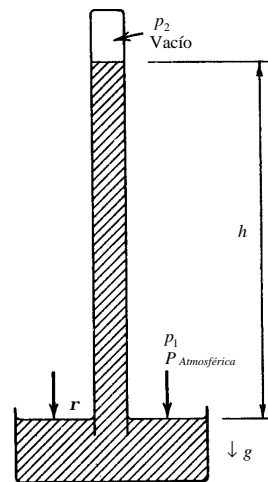


Figura 4. Barómetro de mercurio [3]

## Inclinada

Se utilizan con aceite con densidad relativa menor al agua (<1) para aumentar la sensibilidad de la medición en alcances de 25 a 100 mm y división mínima hasta de 1 mm. En el ámbito industrial se les conoce como *manómetros de tiro* [5], dado que son utilizados para medir la presión del suministro de aire de combustión a las calderas que arrastra los gases quemados hacia el exterior a través de la chimenea. Cuentan con un nivel, con el propósito de ajustar el ángulo de inclinación ( $\alpha$ ), para el cual fue diseñada la columna.

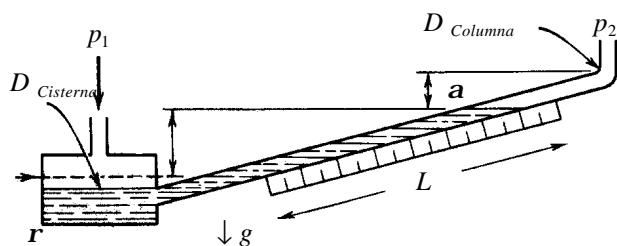


Figura 5. Columna inclinada [3]

La ecuación (7) muestra la corrección que se aplica en la columna de cisterna con columna de medición inclinada.

$$(p_1 - p_2) = r \cdot g \cdot L \cdot \left[ 1 + \left( \frac{D_{Columna}}{D_{Cisterna}} \right)^2 \right] \cdot \text{seno}(\alpha) \quad (7)$$

## FLUIDO MANOMÉTRICO

Para determinar la densidad del mercurio es recomendable considerar como referencia las ecuaciones del suplemento a la ITS-90 (International Temperature Scale of 1990) [6]. Mercurio tridestilado: densidad relativa 13,595 08 @ 0 °C & 13,545 85 @ 20 °C; punto de congelación -38 °C y coeficiente de expansión  $0,181 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

En el caso de la densidad del agua, lo más recomendable es considerar agua saturada de aire, dado que al presurizar las columnas es difícil mantener agua desaireada o libre de aire, para determinar la densidad del agua es recomendable tomar como referencia las ecuaciones corregidas para la ITS-90 obtenidas por Jones & Harris (1992) del NIST (National Institute of Standards and Technology) [7]. Agua destilada: densidad relativa 1,000 0 @ 4 °C & 0,998 21 @ 20 °C; punto de congelación 0 °C y coeficiente de expansión  $0,21 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . El agua se utiliza comúnmente como fluido manométrico en manómetros de columna vertical, normalmente requiere de un agente "humectante" para mejorar las características del menisco, al disminuir la tensión superficial del agua y lograr un

menisco más simétrico, como el concentrado fluorescente de color verde (sodium tetradecyl sulfate & triphenylmethane) [8] [9], aerosol OT100 ó Dreen [10], todos ellos con densidad relativa 1,000.

En el caso de aceites y otros líquidos como fluido manométrico se encuentra una gran y confusa variedad: Aceite violeta [8], densidad relativa 1,000; este aceite se utiliza en lugar del agua cuando se requiere de un menisco mejor formado. Petróleo [10]: densidad relativa 0,7731 @ 20 °C; coeficiente de expansión  $0,95 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Aceite keroseno [10] grado 40 a 41 de API (American Petroleum Institute), densidad relativa 0,8200 a 0,8204 @ 15,56 °C (60 °F). Aceite rojo [8] y aceite amarillo [8] para instrumentos, densidad relativa 0,826; son aceites derivados del petróleo, se utilizan como fluido manométrico en manómetros de columna inclinada y combinados. Aceite rojo de vaselina [9]: densidad relativa 0,851 @ 20 °C; punto de congelación -35 °C y coeficiente de expansión  $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Aceite silicón azul: densidad relativa 0,940; punto de congelación -100 °C y coeficiente de expansión  $1 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Aceite silicón MS 200/50: densidad relativa 0,966 @ 20 °C. Tetracloruro de carbono ( $\text{CCl}_4$ ): densidad relativa 1,593 @ 20 °C; coeficiente de expansión  $1,236 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Aceite azul [8], densidad relativa 1,910. Bromuro de etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$ ): densidad relativa 2,179 @ 20 °C. Tetrabromuro de etano ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_4$ ): densidad relativa 2,90 @ 20 °C; coeficiente de expansión  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Tetrabromuro de acetileno [8] & aceite pesado rojo de vaselina [9]: densidad relativa 2,964 @ 20/4 °C; coeficiente de expansión  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

## FACTORES DE CONVERSIÓN

Unidades columna de líquido	Pa
1 mmH <sub>2</sub> O (~4 °C) (~1 000 kg/m <sup>3</sup> )	9,806 65
1 mmH <sub>2</sub> O (4 °C) (999,972 kg/m <sup>3</sup> )	9,806 380
1 mmH <sub>2</sub> O (60 °F)	9,797 0
1 mmH <sub>2</sub> O (20 °C)	9,789 1
1 mmH <sub>2</sub> O (25 °C)	9,777 7
1 inH <sub>2</sub> O (~4 °C) (~1 000 kg/m <sup>3</sup> )	249,088 91
1 inH <sub>2</sub> O (39,2 °F)	249,082 0
1 inH <sub>2</sub> O (60 °F)	248,840 0
1 inH <sub>2</sub> O (20 °C)	248,64
1 inH <sub>2</sub> O (25 °C)	248,35
1 ftH <sub>2</sub> O (39,2 °F)	2 988,980
1 mmHg (0 °C)	133,322 368
1 Torr	133,322 368
1 inHg (0 °C) (ITS-90)	3 386,388
1 inHg (32 °F)	3 386,380
1 inHg (60 °F)	3 376,850
760 mmHg (0 °C) (exacto)	101 325
29,921 26 inHg (32 °F) (exacto)	101 325

Tabla 1. Unidades de columna de Hg & H<sub>2</sub>O [10] [11]

Para la medición de presión con columnas de líquido así como para sus diferentes aplicaciones, es tradicional el uso de unidades de columna de líquido  $\text{CH}_2\text{O}$  &  $\text{CHg}$ , estas unidades raramente son bien definidas, dado que es importante conocer las condiciones para las cuales estas unidades son válidas, las condiciones de referencia son en orden de importancia: a) la temperatura del fluido, b) la aceleración de la gravedad, c) la presión atmosférica, y por lo tanto la densidad del fluido.

Los factores de conversión indicados en la tabla 1 son validos para las condiciones de referencia indicadas, como son: aceleración de la gravedad, densidad y temperatura del fluido.

Aceleración de la gravedad normalizada (0 m sobre el nivel del mar, 45° latitud norte),  $g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$ .

Densidad del agua  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  a la temperatura de referencia y una atmósfera normalizada = 1 013,25 hPa. El agua presenta su densidad máxima de  $999,973\ \text{kg/m}^3$  @  $3,98\ ^\circ\text{C}$ , aunque se reconoce típicamente como  $1\ 000\ \text{kg/m}^3$  a  $4\ ^\circ\text{C}$ , lo cual provoca ciertas confusiones del orden de 27 ppm (partes por millón).  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  @  $3,98\ ^\circ\text{C} = 999,973\ \text{kg/m}^3$ .  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  @  $4\ ^\circ\text{C}$  ( $39,2\ ^\circ\text{F}$ ) =  $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ .  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  @  $15\ ^\circ\text{C}$  ( $59\ ^\circ\text{F}$ ) =  $999,102\ \text{kg/m}^3$ , temperatura de referencia utilizada en aeronáutica.  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  @  $15,56\ ^\circ\text{C}$  ( $60\ ^\circ\text{F}$ ) =  $999,015\ \text{kg/m}^3$ , temperatura de referencia utilizada por la CGA (Compressed Gas Association).  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  @  $20\ ^\circ\text{C}$  ( $68\ ^\circ\text{F}$ ) =  $998,207\ \text{kg/m}^3$ , temperatura de referencia utilizada en el diseño de orificios de restricción para la medición de flujo.

Densidad del mercurio  $\rho_{\text{Hg}}$  a la temperatura de referencia y una atmósfera normalizada = 1 013,25 hPa.  $\rho_{\text{Hg}}$  @  $0\ ^\circ\text{C}$  ( $32\ ^\circ\text{F}$ ) =  $13\ 595,08\ \text{kg/m}^3$ .  $\rho_{\text{Hg}}$  @  $15,6\ ^\circ\text{C}$  ( $60\ ^\circ\text{F}$ ) =  $13\ 556,8\ \text{kg/m}^3$ .  $\rho_{\text{Hg}}$  @  $20\ ^\circ\text{C}$  ( $68\ ^\circ\text{F}$ ) =  $13\ 545,8\ \text{kg/m}^3$ .

## RESULTADOS

La diferencia máxima entre los factores de conversión debido a las diferentes temperaturas de referencia, para unidades de columna de agua  $\text{CH}_2\text{O}$  puede ser hasta de 0,3%; para el caso de unidades de columna de mercurio  $\text{CHg}$  puede ser hasta del 0,28 %; por lo cual es necesario guardar especial atención en el factor de conversión seleccionado para la calibración de manómetros.

Normalmente las columnas de líquido al utilizarse como patrón de referencia se mantienen instaladas de forma permanente en un laboratorio del cual se requiere conocer la aceleración de la gravedad en el mismo, la aceleración de la gravedad puede

calcularse o medirse con una incertidumbre menor a  $\pm 100\ \text{ppm}$  cuando es calculada o menor a  $\pm 10\ \text{ppm}$  cuando es medida.

Considerando que se utilizan reglas para la medición de la altura de la columna de fluido, la dilatación térmica de las reglas puede contribuir con una incertidumbre de  $\pm 24,5\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$  en caso de que estas sean de aluminio ó  $\pm 11,5\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$  en caso de reglas de acero, siendo más crítico que la incertidumbre de las reglas la componente de incertidumbre debida a la resolución de la lectura obtenida en función de la forma del menisco.

La magnitud de influencia más significativa es la densidad del fluido manométrico, en caso de que el fluido manométrico sea mercurio puede contribuir con una incertidumbre de  $\pm 182\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ ; para el agua destilada  $\pm 207\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$  y en el caso de aceite rojo 0,826 de  $\pm 830$  a  $\pm 864\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ . Para conocer la densidad del fluido manométrico de forma adecuada es necesario conocer la temperatura del mismo, lo cual requiere de un termómetro con incertidumbre en el orden de unas cuantas décimas de grado Celsius.

## REFERENCIAS

- [1] V. Aranda, Medición de presión barométrica de alta exactitud, XIV seminario nacional de metrología, 1998.
- [2] V. Aranda, Manómetros de columna de líquido, CENAM, CNM-MMF-PT-001, 1998.
- [3] H. E. Soisson, Instrumentación industrial, Limusa, 1983. 60-69.
- [4] Princo Instruments, Inc., Instruction booklet for use with Princo Fortin type mercurial barometers, 2000.
- [5] W. H. Severns, H. E. Degler & J. C. Miles, La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases, Reverte mexicana, 1976. 208.
- [6] F. E. Jones & G. L. Harris, ITS-90 density of water formulation for volumetric standards calibration, J. Res. NIST, 97-3, 1992, 335.
- [7] ITS-90, Supplementary information for the international temperature scale of 1990, ITS-90, 1990. 117
- [8] Dwyer Instruments, Inc., Measurement of pressure with the manometer, 1998 controls & gages catalog, 1998, 20P-21P.
- [9] Bourdon Sedeme, Pressure and temperature calibration instruments, 1998, D15-D22.
- [10] ISA, Manometer tables, Recommended practice, ISA-RP2.1-1978.
- [11] H. Nava, F. Pezet, J. Mendoza & I. Hernández, El sistema internacional de unidades (SI), CNM-CENAM, MMM-PT-003, 1997, 98.