



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

*FACULTAD DE QUIMICA*

**REVISION DE TECNICAS DENSITOMETRICAS  
PARA MEDICIONES MASA/VOLUMEN  
DE ANALITOS**

(Trabajo escrito vía cursos de educación continua)

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**INGENIERO QUIMICO**

PRESENTA

**LUIS EDUARDO GAMAS RUIZ**



MEXICO, D. F.

EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA**

**REVISIÓN DE TÉCNICAS DENSITOMÉTRICAS PARA MEDICIONES  
MASA/VOLUMEN DE ANALITOS**

(Trabajo escrito vía cursos de educación continua)

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**LUIS EDUARDO GAMAS RUIZ**

**MÉXICO, D.F.**

**2004**

Jurado asignado:

Presidente.	MARÍA DE LOS ANGELES OLVERA TREVIÑO
Vocal	ADOLFO GARCÍA OSUNA
Secretario	MARÍA DEL SOCORRO ALPÍZAR RAMOS
1er Suplente	FILIBERTO RIVERA TORRES
2do Suplente	SARA ELVIA MEZA GALINDO

Sitio donde se desarrolló el tema: CYTNIS, S.A. DE C.V.

ASESOR DEL TEMA



---

QUÍMICO ADOLFO GARCÍA OSUNA

SUSTENTANTE



---

LUIS EDUARDO GAMAS RUIZ

A DIOS NUESTRO SEÑOR, POR QUIEN TODO ES

A JESUCRISTO NUESTRO SEÑOR, NUESTRO REDENTOR

A MIS PADRES LUIS FELIPE Y JULIA MERCEDES, SIN CUYO ESFUERZO  
ESTE TRABAJO NO HUBIERA PODIDO SER

A MI ESPOSA HILDA MARÍA, SIN CUYA COMPAÑÍA, FÉ Y APOYO ESTE  
TRABAJO NO HUBIERA PODIDO SER CONCLUIDO



A MIS HIJOS LUIS EDUARDO, JULIO CÉSAR Y ALEJANDRO ALBERTO, SIN  
QUIENES ESTE TRABAJO NO HUBIERA SIDO INSPIRADO

A NUESTRA AMADA MADRE CELESTIAL, LA SANTÍSIMA VIRGEN MARÍA DE  
GAUDALUPE

VEN ESPÍRITU SANTO

## INDICE

	Página
INTRODUCCIÓN.....	1
TÉCNICAS DE MEDICIÓN.....	5
HIDRÓMETROS.....	5
PICNÓMETROS.....	12
MEDIDORES DE DENSIDAD POR EL MÉTODO DE VIBRACIÓN O DENSÍMETROS.....	13
DESCRIPCIÓN.....	15
OTRAS TÉCNICAS.....	16
MEDICIÓN DE DENSIDAD POR ULTRASONIDO.....	16
MEDICIÓN DE DENSIDAD POR RADIACIÓN NUCLEAR.....	19
PATRONES DE MEDICIÓN.....	19
DISCUSIÓN.....	20
CONCLUSIONES.....	21

## INTRODUCCIÓN

La densidad se define como la masa,  $m$ , de una sustancia entre el volumen,  $V$ , que ocupa dicha masa expresada como:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Este término es aplicable a mezclas homogéneas, soluciones, sustancias puras y en general a la materia homogénea en estado sólido, líquido, gaseoso o plasma. Para un cuerpo no homogéneo la densidad varía de un lugar a otro. En este caso para obtener la masa,  $dm$ , localizada en un lugar en particular, el volumen  $dV$  que contiene a la masa es medido. Entonces la ecuación (1) se convierte en:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (2)$$

Dado que la densidad es un concepto estadístico, el volumen  $dV$  debe contener un gran número de moléculas para tener sentido físico<sup>1</sup>.

La incertidumbre estándar combinada<sup>19</sup>  $u_c(\rho)$  para la densidad como se expresa en la ecuación (1) es la siguiente:

$$u_c(\rho) = \sqrt{\left(-\frac{m}{V^2}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{1}{V}\right)^2 u^2(m)} \quad (3)$$

Donde  $u(V)$  y  $u(m)$  son las incertidumbres de la medición del volumen y de la masa respectivamente. Estas incertidumbres dependen del método de medición y están dadas por la trazabilidad de los estándares usados en cada uno de los casos. En el caso de la determinación de la masa, usualmente se usan incertidumbres de tipo "B" trazables a los estándares de pesas con tolerancias como lo fija la OIML, u Organisation Internationale de Métrologie Légale por sus siglas en francés, las cuales, para México, deben de estar referidas al Kg patrón No. 21 que se encuentra en el CENAM. Para el caso del volumen, en sólidos se determina por medición dimensional con métodos interferométricos con

incertidumbres tipo "B" de patrones con trazabilidad al patrón de la unidad básica de longitud que es el metro.

En líquidos el volumen puede ser determinado de dos maneras: 1) Usando un volumen calibrado medido directamente en una escala con la resolución deseada en un conducto cilíndrico de diámetro conocido y 2) usando la densidad del agua para obtener indirectamente el volumen. La incertidumbre y trazabilidad del primer método, a una temperatura dada, depende de la incertidumbre en la medición del diámetro del conducto de fluido y de la resolución de la escala usada. La trazabilidad por lo tanto depende de los estándares de dimensiones lineales usados. En el segundo caso, hay varios métodos para determinar la densidad del agua<sup>5,7,8</sup> que a su vez son dependientes de la medición de masas y de medición de volúmenes de sólidos determinados por métodos interferométricos, por lo que sus incertidumbres y trazabilidades son las mismas mencionadas arriba. Dada la dependencia en la temperatura, la densidad del agua se expresa a través de modelos matemáticos que cubren un intervalo dado de éstas, haciendo que la incertidumbre y trazabilidad del medidor de temperatura sean relevantes.

La densidad se expresa comúnmente en unidades de gramos por centímetro cúbico y libra por pie cúbico. Sin embargo, desde el punto de vista del Sistema Internacional de unidades fundamentales lo correcto es expresarla con la unidad básica de masa que es el kilogramo sobre la unidad básica de volumen que es longitud al cubo, o metro cúbico, por lo que la densidad se expresa en Kg/m<sup>3</sup>.

En relación muy cercana a la densidad se encuentra la densidad o gravedad específica. Esta se define como la razón de la densidad de un material sobre la de un estándar, normalmente la del agua destilada, expresándose:

$$S_{T_f, T_w} = \frac{\rho_f}{\rho_w} \quad (4)$$

Donde  $S_{T_f, T_w}$  es la gravedad específica tomando como referencia la temperatura  $T_f$  a la que fue medida la densidad  $\rho_f$  del material de interés, y  $T_w$  es la temperatura a la que fue medida la densidad  $\rho_w$  del agua.

En el caso de un gas el estándar es el aire, haciendo referencia a la temperatura y presión a las que se expresa la gravedad específica.

La gravedad específica es ampliamente usada para caracterizar todo tipo de materiales. Otro concepto relacionado es el volumen específico que se define como el volumen por unidad de peso, que siendo el recíproco de la densidad se usa principalmente para caracterizar soluciones de alta pureza de sustancias de interés como proteínas por ejemplo.

La densidad depende de la temperatura y en el caso de los gases, de la temperatura y presión. La temperatura utilizada como base para determinar o informar valores de la densidad no es la misma para todas las sustancias. Para los sólidos se usa  $273^{\circ}\text{K}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ), para muchos líquidos la temperatura de referencia es  $288.71^{\circ}\text{K}$  ( $15.56^{\circ}\text{C}$ ) y para los gases  $273^{\circ}\text{K}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ) y presión de  $101,325 \text{ N/m}^2$  ( $760 \text{ mmHg}$ ).

La densidad encuentra un gran uso en la industria para controlar procesos de producción. Entre otras en las industrias del papel, alimentos y bebidas, lechera, azucarera, etc. La industria del petróleo usa la densidad para caracterizar los diferentes tipos de petróleo, productos de refinación, control de fluidos críticos como etileno y dióxido de carbono y en un gran número de fluidos usados en los procesos en general. Es usada para control de calidad de materia prima y de productos finales. Se han desarrollado medidores de densidad con escalas específicas para algunas industrias como son la escala API para el petróleo, Brix para el azúcar, Sikes para determinar contenido de alcohol en bebidas alcohólicas y el lactómetro en la industria lechera.

También son usados para monitoreo ambiental de ríos y mantos acuíferos. La densidad del flujo sanguíneo se ha usado en investigación médica para determinar parámetros relacionados con la circulación sanguínea en animales<sup>3,4</sup>.

La densidad del agua es usada para la calibración de material de vidrio en el laboratorio mientras que la densidad del mercurio es requerida para ajustar y calibrar manómetros y termómetros de vidrio.

Existen varios métodos para determinar la densidad<sup>2</sup> de fluidos. El método más directo se basa en medir directamente la masa y el volumen y llevar a cabo la división. La masa se obtiene por métodos gravimétricos apropiados. La determinación del volumen se lleva a cabo por medio del uso de un

recipiente con medidas de volumen calibradas. Como se menciono anteriormente estos instrumentos son llamados picnómetros.

El método más antiguo para determinar la densidad está basado en el principio de Arquímedes, quien descubrió por primera vez que un sólido desplaza una cantidad de líquido igual a su masa al ser sumergido en éste. Aunque hay varios nombres con los cuales se conocen los medidores de densidad basados en este principio, el nombre más común es el de hidrómetro.

Otro método importante usado para la medición de volumen por el principio de Arquímedes es el método de pesada hidrostática usado para obtener densidades de gran exactitud. Su uso más común es para calibrar y certificar patrones por comparación con un estándar primario. Estos patrones normalmente son hidrómetros mientras que los patrones primarios son sólidos.

Uno de los métodos más modernos para determinar la densidad de fluidos está basado en la determinación de la frecuencia natural de vibración de una celda especialmente diseñada a la que se le añade el fluido de interés. La celda es mantenida bajo condiciones de temperatura controlada. Estos medidores permiten determinaciones sencillas y rápidas pudiéndose hacer la determinación en condiciones de flujo continuo en forma automatizada. Pueden medir densidades de gases y líquidos.

Los métodos más modernos para la medición de densidad se basan en ultrasonido y radiación. El método por ultrasonido carece de una precisión adecuada para competir con otros métodos y la radiación se usa en casos especiales en que su uso no es destructivo.

La medición de densidad de sólidos puede ser dividida entre los métodos para sólidos en forma de polvos y métodos en forma de bloques de cualquier forma geométrica. El volumen de un sólido con forma geométrica regular puede ser determinado por medio de la medición de sus dimensiones lineales y su pesado. Cuando no tiene forma geométrica regular se usa el método de Arquímedes por pesada hidrostática. También se usan el de botella de gravedad específica, en el que se pesa el volumen desplazado por la inmersión del sólido, y por flotación entre dos líquidos de densidades conocidas. La densidad de polvos se mide pesando y midiendo el volumen ocupado por el polvo.

Dadas las condiciones de gran intercambio comercial a nivel mundial existe un gran demanda por mejorar la exactitud de estos instrumentos y su calibración es trazada a patrones de gran exactitud, por ejemplo el CENAM en México tiene un patrón sólido con una incertidumbre relativa de  $1 \times 10^{-6}$  Kg/m<sup>3</sup>.



## TÉCNICAS DE MEDICIÓN.

### HIDRÓMETROS

Los hidrómetros esencialmente están clasificados en dos tipos: a) de volumen constante y b) de masa constante<sup>2</sup>. Existen múltiples variaciones en la construcción y forma de estos que finalmente está relacionada con la exactitud, resolución y precisión buscadas. En la forma más general un hidrómetro consta de un cuerpo cilíndrico con un bulbo en uno de sus extremos que se rellena de un material pesado usado para hundir el hidrómetro en el líquido problema, y en el otro por un extremo tubular cuya longitud depende del intervalo de densidades y la escala para la que se pretenda usar el hidrómetro.

a) En el hidrómetro de masa constante, que es el más usado, se usa en el extremo tubular una escala que marca la densidad de acuerdo al nivel de inmersión en solución y pueden ser calibrados para reportar la densidad o la gravedad específica. Diferentes escalas hacen de este hidrómetro ser llamado de diferentes maneras de acuerdo a sus diferentes usos.

b) En su uso, el hidrómetro de volumen constante se deja flotar hasta una marca específica grabada en el extremo tubular. En la parte superior de este se encuentra fijado un plato donde se colocan pesas que se adicionan o quitan para mantener la superficie del líquido en la misma posición con respecto a la marca grabada al sumergir el hidrómetro en diferentes soluciones.

Como se mencionó anteriormente, la hidrometría está basada en el principio de Arquímedes que puede ser expresado en términos de un balance de las fuerzas ejercidas sobre un hidrómetro al estar sumergido en el líquido problema. Se expresa de la siguiente manera considerando las siguientes fuerzas involucradas:

Fuerzas verticales hacia abajo: Su propio peso  $m_h g$ , el peso del aire que lo llena  $m_a g$ , el peso de la masa en el bulbo  $m g$ , y el peso de las pesas adicionadas  $M g$  en el caso del hidrómetro de volumen constante. "g" es la aceleración de la gravedad. Despreciando las fuerzas del aire y del peso del hidrómetro en comparación con las otras fuerzas, la fuerza neta hacia abajo se puede representar como  $(M+m)(1-(\sigma/\nabla))g$  donde  $\sigma$  es la densidad del aire y  $\nabla$  es la densidad de las masas  $m$  en el bulbo y  $M$  en el plato.

Tensión superficial actuando alrededor del extremo tubular expresada como:  $(\pi D)(T \cos \alpha)$ , donde  $(\pi D)$  es la circunferencia del extremo tubular, y  $(T \cos \alpha)$  es la fuerza de tensión superficial neta actuando hacia abajo.  $\alpha$  Es el ángulo de contacto entre la superficie del extremo tubular y el líquido.

En sentido contrario hacia arriba se tienen las siguientes fuerzas:

Fuerza boyante del volumen del líquido desplazado  $V_1$  con masa  $M_1=V_1\rho_1$ , y fuerza  $F_1=V_1\rho_1g$ .

Fuerza boyante del volumen  $v$  de aire en la porción del extremo tubular por sobre la superficie del líquido igual a  $v\sigma g$ .

Fuerza boyante ejercida por el aire en el líquido llevado hacia arriba por la tensión superficial. Considerando que la tensión superficial es una fuerza, dividiendo ésta por la aceleración de la gravedad se obtiene la masa de esta porción de líquido, esto es,  $(\pi D)(\Gamma \cos \alpha)/g$ , la cual podemos convertir a volumen a través de su densidad, obteniendo  $(\pi D)(\Gamma \cos \alpha)/g\rho_1$ . De esta manera considerando que este volumen de líquido es igual al volumen de aire desplazado, la fuerza boyante ejercida por el aire en el líquido llevado hacia arriba es  $(\pi D)\sigma(\Gamma \cos \alpha)/\rho_1$ .

El balance de fuerzas queda de la siguiente manera:

$$(M + m)\left(1 - \frac{\sigma}{\nabla}\right)g + (\pi D)(\Gamma \cos \alpha) = V_1\rho_1g + v\sigma g + \frac{(\pi D)(\Gamma \cos \alpha)\sigma}{\rho_1} \quad (5)$$

Dado que para obtener lecturas repetibles, el líquido debe mojar el extremo tubular apropiadamente,  $\alpha$  debe ser cero, y arreglando términos, esta ecuación se convierte en:

$$(M + m)\left(1 - \frac{\sigma}{\nabla}\right) + \frac{\pi D\Gamma}{g} = V_1\rho_1 + \left(v + \frac{\pi D\Gamma}{\rho_1 g}\right)\sigma \quad (6)$$

El diseño del hidrómetro, la dificultad de la operación experimental para calibrar a éste y la precisión deseada, son consideraciones en las que se sustenta la decisión para despreciar o no algunos de los términos de esta ecuación. Dado que la densidad del aire es aproximadamente un milésimo de la densidad de la mayor parte de los líquidos normalmente no se considera el segundo término del lado derecho de la ecuación.

Sin embargo, considerando que la tensión superficial de un líquido en condiciones estándar de temperatura y presión es aproximadamente 50 mN por metro y refiriéndonos a un hidrómetro con diámetro de extremo tubular de 5 mm, la contribución del segundo término del lado izquierdo de la ecuación es 0.08 g. Dependiendo de la aplicación y diseño, esta contribución puede o no ser relevante. Considerando el caso de un hidrómetro con un peso sustancialmente mayor que 0.08 g, para un hidrómetro de volumen constante la Ec. (5) se convierte en:

$$(M + m) \left( 1 - \frac{\sigma}{\nabla} \right) = V_1 \rho_1 \quad (7)$$

En la práctica se puede evitar el uso de las densidades  $\sigma$  y  $\nabla$  dada su dependencia en la temperatura. Esto se lleva a cabo usando la Ec. (6) y dividiendo la densidad del líquido  $\rho_1$  a determinar por una densidad de referencia, como la del agua  $\rho_w$ , para obtener la siguiente relación:

$$\frac{\rho_1}{\rho_w} = \frac{(M_1 + m)}{(M_w + m)} \quad (8)$$

Donde  $\rho_1/\rho_w$  describe la densidad o gravedad específica. Este instrumento se puede usar para medir densidad y gravedad específica de pequeños volúmenes de sólidos a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{W}{(M_2 - M_1)} = \frac{d_s}{\rho_w} \quad (9)$$

Donde  $d_s$  es la densidad del sólido,  $W$  es el peso de la muestra,  $M_1$  es el peso de las pesas adicionadas al peso  $W$  de la muestra que se encuentra colocado en el plato del hidrómetro y  $M_2$  es el peso de las pesas adicionadas cuando se pasa la muestra con su peso  $W$  al bulbo del hidrómetro.

Para un hidrómetro de masa constante la ecuación que describe el balance de fuerzas es la siguiente:

$$m + \frac{\pi D \Gamma}{g} = V_1 \rho_1 + \left( \frac{\nu + \pi D \Gamma}{\rho_1 g} \right) \sigma \quad (10)$$

Dada la dependencia en temperatura de las variables involucradas, estos hidrómetros se usan a una

temperatura de referencia marcada en el instrumento. Así mismo, ya que la masa de estos hidrómetros comúnmente puede ser de una masa tal que el término correspondiente a la tensión superficial no es despreciable, son clasificados como de baja, media y alta tensión superficial, misma que es especificada junto a la marca de temperatura. Estos hidrómetros son usados para medir densidades de líquidos dentro del intervalo de 600 a 2.000 Kg/m<sup>3</sup> usándose la siguiente clasificación:

a) Hidrómetros de baja tensión superficial. Son calibrados a 15 mN/m a 600 Kg/m<sup>3</sup>. La tensión superficial aumenta 1 mN/m por cada 20 Kg/m<sup>3</sup> hasta que la densidad llega a 980 Kg/m<sup>3</sup>. Por lo que la tensión superficial de un hidrómetro de baja tensión superficial a 980 Kg/m<sup>3</sup> es de 34 mN/m.

b) Hidrómetros de tensión superficial media. Con densidades por arriba de 980 Kg/m<sup>3</sup> y hasta 1300 Kg/m<sup>3</sup>, los valores de tensión superficial de referencia son 35, 40, 45 y 50 mN/m para densidades de 960, 970, 980 y 990 Kg/m<sup>3</sup> y es uniforme a 55 mN/m para hidrómetros de densidad de entre 1000 y 2000 Kg/m<sup>3</sup>.

c) Hidrómetros de alta tensión superficial. Consideran 75 mN/m en forma uniforme de 1000 a 2000 Kg/m<sup>3</sup>.

Debido a dificultades de construcción, no se cuenta con un hidrómetro que cubra todo el intervalo, sino que hay hidrómetros que cubren los intervalos de 20, 50, 100, 200 y 1000 Kg/m<sup>3</sup>. Las cinco series más importantes están mostradas en la siguiente tabla:

Nombre	Longitud de escala	Intervalo de medición Kg/m <sup>3</sup>	Intervalo de densidad entre graduaciones Kg/m <sup>3</sup>	Número de graduaciones.
L20	Larga	20	0.2	100
L50	Larga	50	0.5	100
M50	Media	50	1.0	50
M100	Media	100	2.0	50
S50	Corta	50	2.0	25
S50SP	Corta	50	1.0	50

Los prefijos de los nombres significan lo siguiente: L Long, M Medium, S Short y SP Special tolerance, por sus siglas en inglés.

El volumen del extremo tubular,  $v$ , fija la escala y el intervalo del hidrómetro de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$v = V(\rho_2 - \rho_1) \quad (11)$$

Donde  $\rho_2$  y  $\rho_1$  son las densidades correspondientes a la menor y mayor densidad del intervalo de medición del instrumento. La distancia entre graduaciones está dada por:

$$L_p = L \left( \frac{\rho_2}{\rho} \right) \left( \frac{(\rho - \rho_1)}{(\rho_2 - \rho_1)} \right) \quad (12)$$

Donde  $L_p$  es la distancia entre cada marca de graduación,  $L$  es el intervalo total y  $\rho$  es la densidad en cada graduación en particular. Entre menor sea  $L_p$  mayor son la resolución y la precisión del hidrómetro. El intervalo de precisión de estos instrumentos es de 0.1-0.05 Kg/m<sup>3</sup>.

Existen varios métodos para calibrar un hidrómetro de masa constante<sup>2</sup>. Los más comunes son: a) "sinker" (objeto con forma de hidrómetro de volumen y masa conocidas), b) "CuCow", c) comparación y d) pesada hidrostática. Todos usan el método de Arquímedes suspendiendo el hidrómetro en un recipiente con líquido de densidad, tensión superficial y temperatura conocidas, y comparando vs. estándares de densidad conocida.

a) En el método de "sinker" éste se mantiene en flotación, junto con el hidrómetro siendo calibrado, al tiempo que es suspendido del plato de una balanza y su masa aparente determinada. La densidad del líquido es igual a esta masa dividida por su volumen previamente determinado. La graduación del hidrómetro es corregida por medio del resultado pasando a formar parte de su documentación. La limitación principal de este método es que requiere un líquido a temperatura y tensión superficial controladas para cada graduación por lo que se requiere una gran cantidad de éste.

Además de la incertidumbre debida al paralaje en la lectura, la incertidumbre del método depende de la incertidumbre del método de peso y de la incertidumbre en la determinación del volumen del "sinker."

b) En el método de CuCow la graduación de la escala de densidad del hidrómetro es calculada por diferencia de peso mientras se observa la graduación siendo calibrada con densidad  $p$  y usando la densidad "d" de un hidrómetro calibrado de masa variable. En el procedimiento experimental, la

densidad  $\rho$  es obtenida pesando el hidrómetro en aire y en un líquido de densidad "d". Los pesos se obtienen a través de un aditamento fijo al plato de una balanza que tiene un mecanismo con engranes que permite elevar o hundir al hidrómetro en el medio de pesada. Así el hidrómetro se suspende en aire para llevar a cabo la pesada en este medio y en el líquido se deja hundir de tal manera que se logra que la graduación siendo calibrada esté al nivel de la superficie del líquido junto con el hidrómetro de referencia. La ecuación de cálculo de densidad se obtiene de la siguiente manera:

Sea  $m$  la masa del hidrómetro,  $V$  su volumen sumergido en el líquido cuando se deja flotar en el líquido de densidad  $d$ ,  $v$  el volumen del extremo tubular por sobre el nivel del líquido y  $\sigma$  la densidad del aire. Los subíndices indican los valores en diferentes tiempos. Cuando se pesa contra masa estándar de masa  $W_1$  y densidad  $\nabla$ , la ecuación de equilibrio de fuerzas es:

$$W_1 \left( 1 - \frac{\sigma}{\nabla} \right) = m - (V + v)\sigma \quad (13)$$

Flotando el hidrómetro en un líquido de densidad  $\rho$  con tensión superficial  $\Gamma_1$ , la ecuación de equilibrio es:

$$V\rho + v\sigma = m + \frac{\pi D\Gamma_1}{g} \quad (14)$$

El hidrómetro es hecho nuevamente flotar en un líquido de densidad  $d$  con tensión superficial  $\Gamma_2$ , de tal manera que se repita la marca siendo calibrada, manteniendo el mismo volumen  $V$ , obteniendo la siguiente ecuación de equilibrio:

$$Vd + v\sigma + W_2 \left( 1 - \frac{\sigma}{\nabla} \right) = m + \frac{\pi D\Gamma_2}{g} \quad (15)$$

Aquí se ha supuesto que la corrección debido a cambios en la densidad del aire y del volumen  $V$  del hidrómetro son despreciables, por lo que son las mismas en todas las ecuaciones. Sustrayendo (14) de (13),

$$W_1 \left( 1 - \frac{\sigma}{\nabla} \right) + \frac{\pi D \Gamma_1}{g} = V(\rho - \sigma) \quad (16)$$

Sustrayendo (15) de (13),

$$(W_1 - W_2) \left( 1 - \frac{\sigma}{\nabla} \right) + \frac{\pi D \Gamma_2}{g} = V(d - \sigma) \quad (17)$$

Finalmente dividiendo (16) entre (17), se obtiene la ecuación de cálculo

$$\rho = (d - \sigma) \frac{W_1 \left( 1 - \frac{\sigma}{\nabla} \right) + \frac{\pi D \Gamma_1}{g}}{(W_1 - W_2) \left( 1 - \frac{\sigma}{\nabla} \right) + \frac{\pi D \Gamma_2}{g}} + \sigma \quad (18)$$

El hidrómetro es calibrado en otras marcas de graduación variando la masa aparente  $W_2$  al ajustar su posición con el aditamento fijo al plato. El diámetro  $D$  es medido en cada graduación, las tensiones superficiales  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  son tomadas de la literatura. Entre más cercanas estén las marcas de la graduación del hidrómetro de masa variable se logra mayor resolución. Este método permite la calibración de un intervalo entre 600 a 2000 Kg/m<sup>3</sup>.

c) Como su nombre lo indica, en el método de comparación, la calibración se lleva a cabo vs. un hidrómetro de escala calibrada. Dado que las condiciones del líquido de calibración deben corresponder a las del estándar, se debe tener cuidado en mantener éstas. Además del control de temperatura se debe controlar el ambiente para evitar gases disueltos en el líquido de inmersión y cambios de tensión superficial por partículas cayendo del ambiente. Comparando las escalas del hidrómetro siendo calibrado y del estándar, se establecen factores de corrección que pasan a formar parte de la documentación del instrumento. La trazabilidad del estándar debe ser reportada vs. los patrones como se menciona al final de este trabajo.

d) En el método por pesada hidrostática<sup>2</sup> se suspende el hidrómetro desde el plato de una balanza obteniendo su peso en aire,  $M_a$ , y en un líquido,  $M_l$ . El líquido se mantiene bajo condiciones controladas de temperatura y tensión superficial. Las ecuaciones de equilibrio son las siguientes:

$$M_a \left(1 - \frac{\sigma}{\nabla}\right) = V(d - \sigma) \quad (19)$$

$$M_w \left(1 - \frac{\sigma}{\nabla}\right) = V(d - \rho_w) \quad (20)$$

Dividiendo se obtiene:

$$d = \frac{(M_a \rho_w - M_w \sigma)}{(M_a - M_w)} \quad (21)$$

Donde  $d$  es la densidad de la graduación siendo calibrada y  $\sigma$  y  $\rho_w$  son las densidades del aire y del líquido respectivamente.

Existen tipos especializados de hidrómetros con escalas específicas usados en diversas industrias. En la industria del petróleo se usan grados API, en la de bebidas se usa la escala Sikes junto con los alcoholímetros, los grados Brix son usados para determinar % de sacarosa en solución y un lactómetro es usado para determinar gravedad específica en leche. La escala Baume fue desarrollada en el siglo XIX y es precursora de los grados API.

### **PICNÓMETROS.**

Los picnómetros más comunes son los de recipiente. Básicamente son un recipiente cilíndrico con volumen y peso conocidos en el que se coloca la muestra y se pesa. La densidad es la relación entre la diferencia de pesos de pesada con el líquido de interés y la de del recipiente vacío dividido por su volumen.

El material del picnómetro puede ser vidrio, aluminio o acero inoxidable. Para manejar un volumen exacto del líquido, se cuenta con una perforación en la tapa del picnómetro por el que escapa el exceso de éste. Sus limitaciones son las siguientes:

La posición de la tapa no alcanza siempre la misma posición variando el volumen de medición en medición. La diferencia de tensiones superficiales hace que la altura del fluido en el capilar de la tapa no sea siempre la misma variando efectivamente el volumen. Y finalmente puede haber un perfil de temperatura no uniforme en el exterior de la botella o una temperatura no homogénea a lo largo del cuerpo del picnómetro.



Por estas razones estos instrumentos no son precisos prefiriéndose expresar sus especificaciones en términos de repetibilidad. Dos de sus variaciones más importantes son:

- Los picnómetros más comunes, están formados por tubos capilares de diámetros del orden de 1 mm doblados en forma de U con un bulbo en uno de los lados de la U. El tubo se encuentra graduado para volumen y el bulbo es de aproximadamente 45 ml. El volumen se obtiene mediante calibración con agua destilada libre de gases y de concentración isotópica conocida. El peso se obtiene por diferencia del peso entre el picnómetro vacío y con la muestra.

Estos instrumentos mejoran las características de los picnómetros de recipiente en que las variaciones de volumen son conocidas y factores de corrección pueden ser aplicados. La precisión de estos picnómetros es del orden de  $0.1 \text{ Kg/m}^3$ .

En común con los picnómetros de recipiente, la calibración de estos picnómetros se lleva a cabo usando agua destilada libre de gases disueltos y de concentración isotópica conocida.

- Los picnómetros Lipkin de similar forma pero de doble capilar son usados para trabajo con líquidos de baja volatilidad y viscosidad. Tiene similar precisión que los anteriores.

- El picnómetro de Bingham es usado para medir fluidos de alta viscosidad. Esta formado por un recipiente de vidrio con una cámara entre 2 y 25 ml de la cual sale un tubo capilar de 1.0-1.1 mm de diámetro seguido de un tubo de 6 mm rematado por un tapón esmerilado. La densidad se determina dividiendo su peso entre su volumen. Es calibrado con agua destilada como en los casos anteriores. Su precisión es del mismo orden del de Lipkin.

### **MEDIDORES DE DENSIDAD POR EL MÉTODO DE VIBRACIÓN O DENSÍMETROS.**

A diferencia de los métodos anteriores el método de vibración es un método indirecto que no depende de mediciones de peso y de determinación de volumen y no utiliza el principio de Arquímedes para medir la densidad.

Como su nombre lo indica, este método se basa en hacer vibrar un objeto que en la práctica puede ser un tubo hueco, longitudinal recto, doble tubo longitudinal recto, en U o en doble U, que es forzado a vibrar, dentro del cual se hace pasar el fluido de interés.

Otras configuraciones son un cilindro de paredes delgadas que se hace vibrar y un vibrador en forma de diapason. El cilindro es forzado a vibrar al ser colocado en el paso del fluido. El diapason es inmerso

dentro de tanques y recipientes. La vibración se logra a través de excitación electromagnética por lo que los objetos no están en contacto con fuentes exteriores de energía que pudieran alterar las condiciones de temperatura requeridas. La volatilidad y la tensión superficial del fluido no son factores en la medición. La frecuencia de oscilación varía entre 2-5 kHz.

El desarrollo del método de calibración se basa en la observación de que un objeto bajo estas circunstancias puede ser representado por un sistema masa-resorte bajo oscilaciones forzadas. Así, la frecuencia natural de oscilación de este sistema es:

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (22)$$

Donde  $W_n$  es la frecuencia natural de oscilación del sistema,  $k$  es la constante de Hook del resorte y  $M$  es la masa del objeto. Considerando que  $W_n = 2\pi f_n = 2\pi/T$ , donde  $f_n$  y  $T$  son la frecuencia y período de oscilación de las oscilaciones naturales, y observando que  $M = \text{Masa del Tubo, placas o barras} + \text{Masa del fluido}$ , la Ec. 23 puede ser expresada como sigue:

$$\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{M_u + \rho_f V_u}} \quad (23)$$

Donde  $\rho_f$  es la densidad del fluido y  $V_u$  es el volumen del tubo o el volumen entre las placas o barras.

Despejando la densidad del fluido:

$$\rho_f = \frac{k}{V_u (2\pi)^2} T^2 - \frac{M_u}{V_u} \quad (24)$$

Restando dos densidades representadas en la Ec. (11) se obtiene:

$$\rho_f - \rho_f = A_0 (T_f - T_f) \quad (25)$$

Donde  $A_0$  es una constante de calibración igual a  $K/V(2\pi)^2$ .

Para llevar a cabo la calibración se llevan a cabo dos mediciones obteniendo  $T_f$  y  $T_f$ . Partiendo de densidades conocidas y de estas mediciones se encuentra  $A_0$ . Éstas densidades deben conocerse con

gran exactitud y precisión por lo que normalmente se usa agua destilada, desgasificada de contenido isotópico conocido y aire.

En los medidores que usan flujo a través de un tubo, el control de temperatura se lleva a cabo por inmersión del tubo en una celda llena de helio inmersa a su vez en un baño de agua con control de alta precisión.

En el caso de los medidores cilíndricos de paredes delgadas y de diapasón, dado que la calibración se debe llevar a cabo bajo las condiciones de temperatura y flujo del fluido que se va a medir, las celdas de calibración son especiales para cada condición, especialmente para aquellas en la que se mide densidad bajo diferentes condiciones de flujo, temperatura y presión.

#### DESCRIPCIÓN

A) Los densímetros de tubo<sup>2,16</sup> longitudinal recto son principalmente usados en la industria para llevar a cabo mediciones de fluidos en línea y son construidos de diversos tamaños y formas con relaciones longitud a diámetro relativamente altas. Están firmemente anclados a un soporte. Los construidos de un solo tubo pueden ser de aproximadamente 20 cm. Tienen la ventaja de no ofrecer obstrucción al paso de flujo con caídas de presión mínimas. Sin embargo su tamaño no siempre es conveniente por lo que hay diseños de tubo con dos dobleces de 180° (doble U) que a su vez tiene la desventaja de tener altas caídas de presión y son difíciles de limpiar. Pueden ser construidos de diversos materiales incluyendo aluminio y acero inoxidable aunque también pueden ser construidos de vidrio. Trabajando en ambientes industriales son susceptibles de ser afectados por vibraciones externas que interfieren en la detección del período.

B) Los densímetros de doble tubo reducen el tamaño y la caída de presión con respecto a los de un solo tubo y pueden ser fácilmente limpiados. Su diseño en tandem alcanza un buen equilibrio dinámico ya que los tubos vibran en sentidos opuestos. Los nodos de vibración son fijados en los extremos de los tubos teniendo efectos mínimos en cuanto al método de sujeción al cuerpo de un ramal de tubería por ejemplo. Los principales problemas de estos instrumentos son el reducir el efecto de cargas en los extremos, y control de presión y temperatura. Para reducir el efecto de cargas en los extremos están construidos con juntas de expansión.

En todos los diseños de tubo usados en el campo, cuando trabajando con fluidos a altas presiones, puede suceder que la diferencia de presiones aumenta el estrés en la pared del tubo cambiando su rigidez, lo que puede ser significativo con respecto a las condiciones de calibración. Para compensar por estas diferencias son provistos con coeficientes de corrección de temperatura y presión con los que se corrigen automáticamente las lecturas de densidad. Estos equipos requieren de frecuentes calibraciones vs. varios líquidos de diferentes densidades, temperatura y presión para cubrir los intervalos para los que fueron diseñados. Su precisión se encuentra entre 0.15-1.0 Kg/m<sup>3</sup>.

C) El densímetro de tubo más popular es el de un solo tubo en forma de U. El tubo está rígidamente soportado en el punto en que entra y sale el líquido de tal manera que soporta la vibración producida en la U del tubo a través de un magneto adherido al tubo por y excitación electromagnética ejercida por un inductor externo. Se usan principalmente en el laboratorio. El tubo es manufacturado de un vidrio especial de nombre DURAN 50. La muestra puede ser introducida a través de una jeringa hipodérmica o se puede hacer pasar en forma continua un fluido. En este último caso se debe ajustar la temperatura del baño a la temperatura del fluido. En el caso de medidas estáticas, cuando las muestras están a diferente temperatura que la del baño termostático y dependiendo de la diferencia de temperatura, las muestras pueden tardar hasta 4 minutos en alcanzar un equilibrio de temperaturas. Manteniendo la temperatura +/- 0.01°C se obtiene un error máximo de  $1.5 \times 10^{-3}$  Kg/m<sup>3</sup>. El intervalo normal de temperatura es -10°C a 70°C, pero en casos especiales se puede hacer mediciones de hasta -180°C y de 150°C. En forma similar, el intervalo normal de presión es de 0-10 bar pero se pueden tener casos especiales de hasta 50 bar. Se pueden automatizar las lecturas por medio de un automuestreador con viales de 5 ml y optimizar los tiempos de llenado y de lavado entre muestras.

Estos medidores de densidad son totalmente automatizados y pueden ser calibrados usando agua destilada y aire bajo condiciones controladas. Debido a posibles diferencias en condiciones ambientales, la calibración con respecto a ambos fluidos requiere la calibración de los instrumentos usados para monitorear las condiciones de temperatura para el agua y de temperatura, presión atmosférica y humedad ambiental para el aire.

Gamas y Lee<sup>3,4</sup> llevaron a cabo la calibración de un sistema de medición continua de densidad de fluidos. Un densímetro Metler&Paar 602 W fue conectado a una interfase especialmente diseñada que

conecta el instrumento a una mini computadora PDP-11/20. Un baño a temperatura controlada a 37 °C permite la medición continua de la densidad sanguínea en perros in vivo. En vitro se simuló el sistema circulatorio del animal, haciendo fluir el fluido sanguíneo a través de un sistema de matraces Erlenmeyer de 1 litro que representaba la circulación central y el corazón. Se alteró la densidad del fluido sanguíneo a través de inyecciones de solución salina. Las mediciones continuas fueron comparadas vs. las obtenidas por medio del método gravimétrico y volumétrico para determinar la densidad sanguínea. La precisión nominal del instrumento era de  $1 \times 10^{-2} \text{ Kg/m}^3$ . Por medio de las mediciones realizadas, la precisión de las mediciones continuas de densidad del fluido sanguíneo fue determinada como  $3 \times 10^{-2} \text{ Kg/m}^3$ .

D) Los densímetros de un cilindro de paredes delgadas tienen una relación longitud a diámetro relativamente baja. Su grosor de pared es de 25 a 300  $\mu\text{m}$ . El grosor de la pared depende del intervalo de densidades que se va a medir. El cilindro se encuentra encapsulado por una cámara de volumen constante llena de un gas de referencia que a través de un sistema de control automatizado se mantiene a la misma presión que la del gas fluyendo a través del cilindro de medición. Están contruidos de materiales resistentes a la corrosión. Son instrumentos de alto precio debido a que su construcción es de alta precisión. Su precisión de medida de densidad varia entre 0.1 y 0.15%. Como en el caso de los densímetros de tubo recto y doble tubo requieren frecuentes calibraciones que se deben llevar a cabo bajo condiciones de laboratorio certificado lo que encarece su costo de operación. Salen de la fábrica con certificados de calibración vs. estándares certificados y su documentación incluye factores de corrección de temperatura y presión.

## **OTRAS TÉCNICAS**

### **MEDICIÓN DE DENSIDAD POR ULTRASONIDO.**

La relación entre la densidad  $\rho$  y la velocidad del ultrasonido "c" viajando a través de un medio está dada por la cantidad de ultrasonido que es reflejado en la interfase de este medio con otro y puede ser representada como:

$$\rho = \frac{Z}{c} \quad (26)$$

Donde Z es la impedancia acústica.

Recientes avances en transductores ultrasónicos, electrónica y software para procesamiento digital de señales ha permitido la medición de la velocidad del sonido, coeficientes de reflexión y amplitudes de dispersión impulsando el uso de la técnica<sup>9</sup>.

Así, cuando un pulso de ultrasonido golpea una interfase sólido-líquido, una fracción de la energía del pulso es reflejada, mientras que el resto de la energía es transmitida dentro del líquido. La fracción reflejada, esta dada por el coeficiente de reflexión R definido como:

$$R = \frac{(Z_l - Z_s)}{(Z_l + Z_s)} \quad (27)$$

Donde  $Z_l$  y  $Z_s$  son las impedancias acústicas del líquido y del sólido respectivamente. Invirtiendo esta ecuación nos queda:

$$Z_l = Z_s \frac{(1 + R)}{(1 - R)} \quad (28)$$

Esta es una relación bien conocida para medir la impedancia acústica del líquido que se determina por medio de un detector que recibe las reflexiones cerca de la fuente de ultrasonido, mientras que un detector colocado en el otro extremo del detector mide la velocidad del ultrasonido en el fluido.

Hauptmann<sup>10</sup> ha usado una celda de aproximadamente 1 litro para medir la densidad de aguas contaminadas de mantos acuosos de agua dulce. Su detector incluye un camino acústico de referencia usado en la determinación del coeficiente de reflexión, lo que permite una calibración en tiempo real por lo que el detector tiene una muy baja sensibilidad a cambios de temperatura. Sus mediciones tiene un error de 0.2% en un intervalo de temperaturas de 0-100°C.

Grenwood<sup>11,12</sup> la ha usado para realizar mediciones en tiempo real de líquidos y pastas en proceso. En este método se usa un detector en forma de un medio cilindro de Rexolita™ en el que se montan 5 sensores longitudinales y uno de onda cortante que se sumergen en el líquido problema. El coeficiente de reflexión es medido comparando los voltajes obtenidos cuando el detector es sumergido en el líquido problema entre el obtenido cuando se sumerge en un líquido de referencia, generalmente agua. El sensor opera midiendo los coeficientes de reflexión a dos ángulos de incidencia y resolviendo

automáticamente las ecuaciones para cada ángulo, obteniendo la densidad del líquido y la velocidad del ultrasonido en el mismo. Su precisión es del orden de  $0.1 \text{ Kg/m}^3$

#### MEDICIÓN DE DENSIDAD POR RADIACIÓN NUCLEAR

Estos medidores de densidad miden la densidad a través de la medición de energía de radiación Gamma al pasar a través del material siendo probado. La unidad usa una fuente de radiación que puede ser Cesio o Cobalto y un detector de centelleo como detector. Esta técnica ha sido usada en la industria del cemento, maderera y en casos en que manejan desecho peligroso. Son extremadamente exactos aunque caros.

#### **PATRONES DE MEDICIÓN**

Como se ha discutido anteriormente, la determinación de patrones de densidad esta basada en la determinación de la masa por medio de una balanza de exactitud adecuada siguiendo los procedimientos convencionales, y por la determinación del volumen por el método de pesada hidrostática en líquidos y por medición dimensional en sólidos. Aunque de alta dificultad este último método se usa para realizar mediciones de alta exactitud en la determinación de patrones. Sin embargo, ya que el método de pesada hidrostática es el más usado en la determinación de volúmenes de sólidos y normalmente se refiere a la densidad del agua, el agua actúa como estándar primario la mayoría de las veces. Las ventajas de usar agua como estándar primario son las siguientes<sup>2</sup>: Alta disponibilidad, bajo costo, facilidad de manejo y seguridad, es líquida dentro de un amplio intervalo de temperaturas, no necesita limpieza, su densidad es conocida con exactitud adecuada para el trabajo rutinario.

Sin embargo para ser usada como estándar primario, el agua tiene las siguientes desventajas: Su densidad pasa a ser incierta en el orden de  $0.01 \text{ Kg/m}^3$  debido a concentraciones desconocidas de gases disueltos<sup>7</sup>, contaminación y una concentración isotópica normalmente desconocida, alta tensión superficial causa serios problemas durante el trabajo de pesada hidrostática además de que varía por contaminación de la interfase aire-agua. Actualmente los estándares primarios están constituidos por sólidos esféricos con volúmenes determinados por medio de la unidad de longitud a través de técnicas interferométricas. Las ventajas principales por las que éstos estándares son usados son las siguientes: su volumen y masa son trazables a las unidades fundamentales de longitud y masa, metro y kilogramo

respectivamente; es posible comparar las densidades de dos sólidos a una precisión que es mejor que la que se obtiene comparando los volúmenes de sólidos en agua<sup>5,6,8</sup>; a densidad de un líquido desconocido puede ser determinada mucho más fácil a través de patrones sólidos de densidad conocida que comparando la densidad del líquido con la densidad del agua.

Los materiales de los patrones sólidos deben tener las siguientes características: ser estables respecto al tiempo, ser homogéneos, debe ser buen conductor de electricidad y calor, de superficie dura, inerte a gases atmosféricos, de bajo coeficiente de expansión, inerte al agua y a la mayoría de los líquidos, no debe ser caro, debe ser de fácil maquinado.

Los estándares sólidos han sido construidos de un material cerámico llamado Zerodur, de cuarzo y de silicón. El Zerodur es un material cerámico que llena la mayoría de los requerimientos antes expuestos excepto que se informa que se encoge con el tiempo.

Ínter comparación de patrones de silicón utilizados para la determinación del número de Avogadro, muestran una diferencia de +/- 0.159 ppm<sup>13,14,15</sup>.

## **DISCUSIÓN**

La densidad es un importante parámetro físico que es usado ampliamente en el laboratorio de investigación, por ejemplo en la determinación del número de Avogadro, y en metrología en la calibración de material de vidrio, manómetros de columna y termómetros y en la industria en la caracterización de materias primas y productos intermedios y finales.

Dadas las dificultades de lograr llevar a cabo mediciones rápidas y de precisión con hidrometría, su uso ha sido limitado en la industria. Sin embargo a partir de la introducción de los densímetros por el método de vibración se abrió la posibilidad de usar la densidad en una forma más amplia. Los densímetros de tubo en U son de particular interés en el laboratorio y aunque pueden ser usados para llevar a cabo mediciones en línea dentro de procesos industriales, son aventajados por aquellos densímetros que son fabricados específicamente para uso industrial como son los de tubo, cilíndricos de paredes delgadas y de diapasón. Es relevante mencionar que a estos equipos pueden medir la densidad de gases lo que los hace aventajar a todos los otros métodos. En particular debido a su fácil uso y mayor precisión han desplazado a los hidrómetros cuando su costo y la aplicación lo justifican.



En general la medición de densidad puede competir con métodos cuantitativos en los que se lleva a cabo una variación de alguna característica mensurable del analito al cambiar la concentración de éste. Debido a su amplio uso la espectroscopía UV/Vis se ofrece como un competidor de relevancia de las medidas de densidad. Esto es particularmente cierto cuando uno examina más de cerca la precisión de los métodos espectroscópicos, la cual no es únicamente dependiente del instrumento en si mismo. De acuerdo a la ley de Lambert y Beer, la absorción A de una solución es una función directa de la absorbancia molar, la longitud de paso de luz y de la concentración. Por su relación inversa con la transmitancia, se demuestra<sup>17</sup> que el error de concentración relativa cuando un espectrofotómetro tiene una "resolución" de 0.001 unidades de absorbancia es de aproximadamente 2.75 cuando la absorbancia es de 0.4343 y aumenta hasta 20% cuando la absorbancia es de 0.002 y de 2.000. En muchos casos ajustar la concentración del analito a estos niveles de error implica un reto para el analista que desarrolla el método y para el que lo usa rutinariamente. A partir de datos de densidad de varias soluciones publicados por Mettler<sup>18</sup> se encuentra que la precisión de un densímetro es de aproximadamente 0.05 Kg/m<sup>3</sup>, o 50 mg/L. Aunque la resolución de estos equipos es menor que el de un espectrofotómetro, el manejo de la muestra es mucho menor y no requiere diluciones por lo que al final podría reducir el error de la medición en comparación con métodos espectrofotométricos que requieran pesadas y diluciones.

Finalmente, los métodos basados en técnicas por ultrasonido tiene un tremendo potencial especialmente en el área de proceso ya que no requieren de manejo de muestra, son no invasivas y se pueden aplicar fácilmente. Además de detectar densidad, estos instrumentos son capaces de medir viscosidad y esfuerzo cortante. Aunque ya se han llevado importantes avances por el momento su precisión es su mayor limitante ya que es de solo 1 Kg/m<sup>3</sup>.

## **CONCLUSIONES**

Los usos de la determinación de la densidad de analitos requieren de determinaciones de fácil uso y precisiones del orden de 0.05 Kg/m<sup>3</sup>. El mantenimiento de patrones de alta precisión es necesario para el desarrollo de nuevos métodos de mayor precisión. Los nuevos desarrollos están permitiendo mediciones en línea que abren el campo de aplicaciones más allá de lo que se está haciendo con otras técnicas instrumentales cuantitativas.

## REFERENCIAS

1. Alonso M, Finn E., "Fundamental University Physics," Vol. 1, Addison-Wesley, 1967.
2. Gupta, S.V., "Practical Density Measurement and Hydrometry," Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2002.
3. Gamas L., Lee, J.S. "A density indicator method to measure pulmonary blood flows," Journal of Applied Physiology, 60(1): 327-334, 1986.
4. Lee, J.S., Gamas, L. "On the use of a density meter for the measurement of red blood cells and plasma volumes," FASEB 1983.
5. Patterson J.B., Morris E.C., "Measurement of Absolute Water Density, 1°C to 40°C," Metrologia, 31(4), 277-288, 1994.
6. Mosca, M., Peuto A., "Data adjustment in density measurement of solid bodies by hydrostatic comparison with solid density standards," Metrologia, 34(October 1997), 401-416.
7. Watanabe H., Izuka K., "The influence of dissolved gases on the density of water," Metrologia, 21(1), 19-26, 1985.
8. Tanaka, et all, "Recommended Table for the density of water between 0°C and 40°C based on recent experimental reports," Metrologia, 38(August 2001), 301-309.
9. Pappas R., et All, "Ultrasonic Instrumentation and Hardware," 2002 Annual Meeting and Food Expo – Anaheim, California.
10. Hauptmann P., "Ultrasonic Diving Probe for density measurements in inland waters," [www.uni-magdenburg.de/imos](http://www.uni-magdenburg.de/imos)
11. Greenwood M., Bamberger J., "Measurement of viscosity and shear wave velocity of a liquid or slurry for on-line process control," Ultrasonics 39(2002) 623-630.
12. Greenwood M., Bamberger J., "Ultrasonic sensor to measure the density of a liquid or slurry during pipeline transport," Ultrasonics 40(2002) 413-417.
13. Peuto M., et all., "Comparison of silicon density standards at NRLM and IMGC," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 43(2), 242-246, 1993.

14. Sacconi A., et al., "The IMGc volume-density standards for the Avogadro Constant," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 44(2), 533-537, 1995.
15. Peuto A., Sacconi A., "Volume density measurements for IMGc Avogadro experiment," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 40(2), 103-107, 1991.
16. Solatron Mobrey. [www.solartronmobrey.com](http://www.solartronmobrey.com).
17. Willard H., Lynne M., Dean J., "Métodos Instrumentales de Análisis," C.E.C.S.A., Tercera Edición en español, 1971.
18. Mettler, [www.mettler.com](http://www.mettler.com).
19. NMX-CH-140-IMNC-2002, Guía para la expresión de incertidumbres en las mediciones.