

AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE PESADA HIDROSTÁTICA PARA LA MEDICIÓN DE DENSIDAD LÍQUIDOS

L. J. Tovar, D. Ramos, L. O. Becerra, J. C. Diaz.
 Centro Nacional de Metrología
 km 4.5 carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro México
 Tel: +52 (442) 2-11-05-00 ext. 3525, Fax: +52 (442) 2 11 05 68
 ltovar@cenam.mx

Resumen: En el presente trabajo se presenta el desarrollo del proyecto para la automatización de un sistema de pesada hidrostática para la medición de la densidad de líquidos. El sistema automático es fundamental para el programa de materiales de referencia certificados en densidad del CENAM.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo desarrollado en un laboratorio de medición como el del laboratorio de densidad del Centro Nacional de Metrología (CENAM) consiste, en ocasiones, en una secuencia de actividades (figura 1) que pueden ser repetitivas por lo tanto demandan tiempo y atención del metrólogo que se encuentre realizando dicho servicio. Ese tiempo puede ser aprovechado en la realización de actividades como pueden ser investigación, desarrollo científico y tecnológico e incluso otras calibraciones.

Uno de los servicios que ofrece el laboratorio de densidad es la preparación de materiales de referencia certificados en densidad cuyo uso principal es la calibración de densímetros y otros materiales de referencia empleando el procedimiento "Calibración de la densidad de líquidos utilizando un patrón sólido de densidad" basado en el método de pesada hidrostática de los patrones sólidos de densidad (fig. 2). Para este sistema la automatización es el siguiente paso lógico a seguir ya que presenta varias ventajas y una excelente oportunidad de mejora, además la demanda de los materiales de referencia certificados es cada vez mayor en cuanto a cantidad y diversidad.

Para la automatización de dicho procedimiento no solo es necesario diseñar la parte mecánica y electrónica que brindara el movimiento autónomo al sistema, a su vez se debe considerar que para obtener la densidad del material de referencia es necesario desarrollar un serie de cálculos matemáticos que incluyen entre sus variables las condiciones ambientales (temperatura ambiental, presión atmosférica, humedad relativa y la temperatura del liquido), estas mediciones se obtienen de instrumentos de medición certificados; por tal motivo es indispensable el desarrollo de un *software* que sea capaz de comunicarse de manera puntual con cada uno de los instrumentos, además, el *software* debe ser capaz de identificar, registrar y almacenar los datos obtenidos.

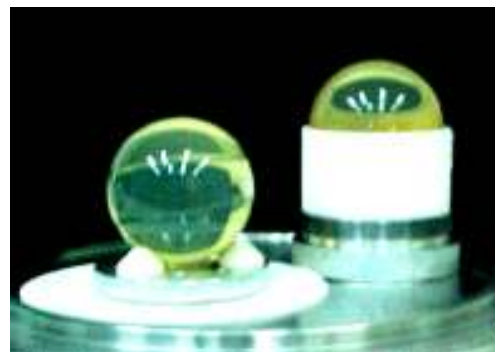


Fig. 2. Patrón Nacional de Densidad. Esferas fabricadas en zerodur Z-01 y Z-02

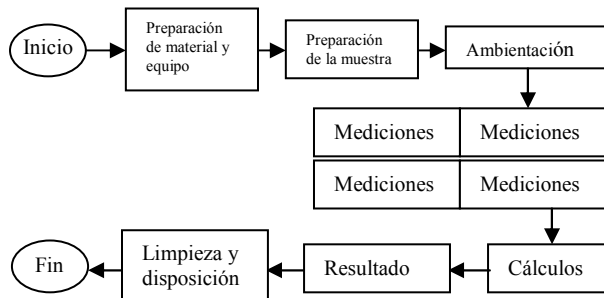


Fig. 1 Diagrama de medición de MR de densidad.

En el presente trabajo se muestra el proceso de la automatización y las pruebas realizadas al sistema automático.

2. DESARROLLO

Inicialmente se realizó un análisis del procedimiento para la medición de la densidad, con el objetivo de determinar el material y equipo necesario, dicho procedimiento se describe a continuación.

2.1. Calibración de la densidad de líquidos utilizando parón sólido de densidad

Este procedimiento tiene como objetivo la calibración de la densidad de líquidos, estos podrán ser utilizados en los procesos productivos de la industria en general o laboratorios de calibración o pruebas, así como para la certificación de los materiales de referencia en densidad (agua, pentadecano, etilenglicol, entre otros).

Equipo necesario:

- a) Instrumento para pesar con alcance de 1 kg y accesorios para suspensión inferior.
- b) Mesa diseñada para pesada hidrostática.
- c) Juego de pesas patrón E₁ o E₂.
- d) Baño térmico para controlar la temperatura del líquido.
- e) Contenedor para el líquido de calibración.
- f) Patrón sólido de densidad.
- g) Instrumentos para la medición de las condiciones ambientales.

Inicialmente se debe de dejar ambientar tanto el patrón sólido de densidad como el patrón de masa (se necesita controlar la temperatura del líquido a calibrar a 20°C ±0.004°C), esto toma de 24 h a 48 h. Antes de comenzar la calibración se tara el instrumento de pesada y cuidadosamente se cuelga el sólido en la suspensión sin que éste toque las paredes del contenedor. Se espera un tiempo de estabilización y se registra la lectura del instrumento para pesar, el siguiente paso es retirar el sólido de la suspensión, se debe evitar sacarlo del contenedor para evitar cambios térmicos en el patrón sólido, después, se coloca sobre el plato del instrumento para pesar, el peso equivalente del patrón sólido sumergido en patrones de masa, se espera un tiempo de estabilización y se registra el valor de masa, finalmente se registran las condiciones ambientales y se procede a realizar los cálculos de la densidad puntal del material de referencia empleando la siguiente fórmula.

$$\rho_{liq} = \frac{m_s - m_p + \rho_a \times V_p \times (1 + \alpha_p \times (t_a - 20)) - \Delta m - C_g}{V_s \times (1 + \alpha_s \times (t_l - t_{ref})) \times (1 - \beta \times (P - 101325))} \tag{1}$$

Donde:

- m_s* Masa del sólido patrón de densidad.
- m_p* Masa del patrón de acero inoxidable.
- ρ_a* Densidad del aire.
- V_p* Volumen del patrón de acero inoxidable.
- α_p* Coeficiente de expansión del acero inoxidable.
- t_a* Temperatura ambiente.
- Δ_m* Diferencia en masa.
- C_g* Corrección por gravedad.
- V_s* Volumen del sólido patrón.
- α_s* Coeficiente de expansión del material del sólido patrón.
- t_l* Temperatura del líquido.
- t_{ref}* Temperatura de referencia.
- β* Coeficiente de compresibilidad del material del sólido patrón.
- P* Presión sobre el sólido patrón.

Este procedimiento se debe de realizar con la intención de disminuir los errores aleatorios presentes en la medición.

2.2. Diseño del sistema mecánico

Como se explica en el procedimiento es necesario contar con un sistema que sea capaz de controlar el movimiento para la colocación de los patrones tanto en la parte superior de la balanza como en la inferior, por tal motivo el diseño sistema mecánico se dividió en dos partes (figura 3).

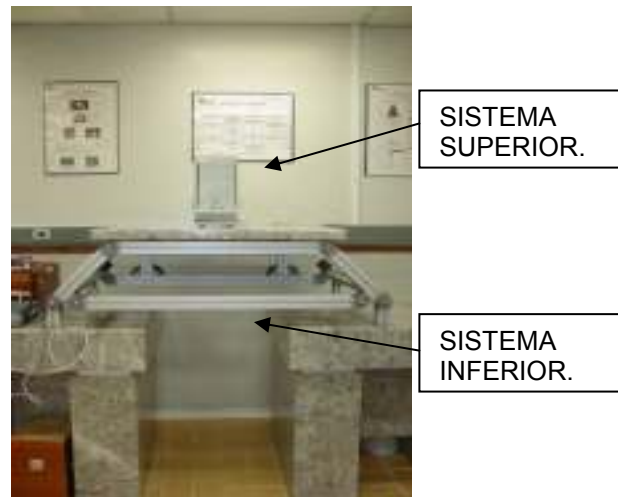


Fig. 3 Ubicación de las partes del diseño.

2.2.1. Sistema superior

En el sistema superior se deben colocar los patrones de masa en el instrumento para pesar que servirá de comparador entre los valores de masa de los patrones y un sólido de densidad conocida. El principio de funcionamiento del instrumento para pesar es la fuerza de compensación electromagnética o EMC (por sus siglas en inglés), debido esto es importante que los componentes que conformaran el sistema mecánico superior sean de un material que carezca en lo posible de magnetismo, para evitar influencia de fuerzas magnéticas que pudieran alterar las mediciones de la balanza.

Considerando lo anterior se elaboro el diseño mostrado en la figura 4.

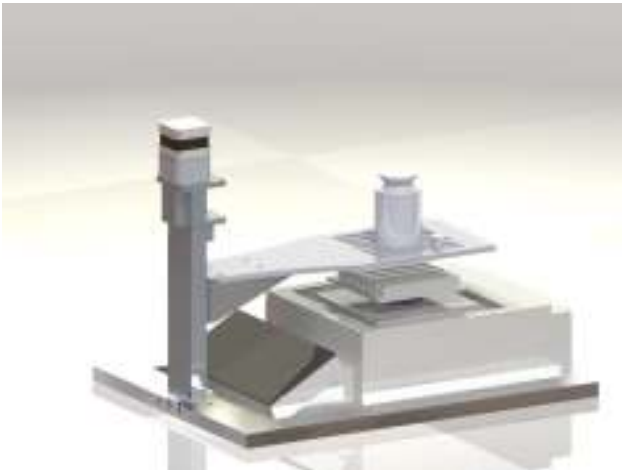


Fig. 4 Diseño del sistema superior.

El sistema superior consta de un actuador de movimiento lineal que proporciona un movimiento uniforme y delicado con el fin de colocar el patrón de masa sobre el receptor de carga del instrumento.

El material que se selecciono para la elaboración de las piezas del sistema es Aluminio (6061 T3) y Acero Inoxidable (304), los cuales tienen excelentes propiedades mecánicas además de carecer de propiedades magnéticas.

2.2.2. Sistema inferior

El sistema inferior tiene la tarea de colocar el patrón de densidad en el soporte de sujeción inferior del instrumento para pesar y cuenta con un baño termostático (utilizado para controlar la temperatura del material de referencia). En esta parte del

sistema la mayoría de los componentes se encuentran en contacto con líquido, por lo que es importante que el material de elaboración sea inoxidable. Con base a lo anterior se realizó el diseño mostrado en la figura 5.



Fig. 5 Diseño del sistema inferior.

De igual manera que el sistema superior, el movimiento de este sistema es generado por un actuador de movimiento lineal, el cual sujeta a la esfera cuando el sistema superior se encuentra pesando los patrones de masa, una vez que éste finaliza, el actuador coloca la esfera en una canastilla que se encuentra sujeta al receptor de carga inferior del instrumento, espera el tiempo de estabilización, se registra el dato de masa y la esfera regresa a su posición inicial.

El control de la temperatura del material de referencia es de suma importancia, ya que la más mínima variación afecta la densidad del líquido, el volumen de la esfera debido a su coeficiente de expansión térmica (fenómeno físico que afecta a todos los cuerpos sujetos a cambios de temperatura) y por lo tanto las indicaciones de la balanza. Para lograr un control de temperatura adecuado se utiliza una resistencia que calienta mediante pulsos eléctricos el líquido del baño termostático y conjuntamente alrededor del vaso se encuentra un serpentín de tubo de acero inoxidable en el cual fluye un líquido a una temperatura menor que la de la resistencia, el líquido está en movimiento gracias a un agitador que es controlado por un motor CA (corriente alterna), y el resultado de la diferencia de temperatura genera el control requerido de la temperatura.

Una vez finalizado el diseño mecánico se obtuvo el siguiente sistema, ver figura 6.

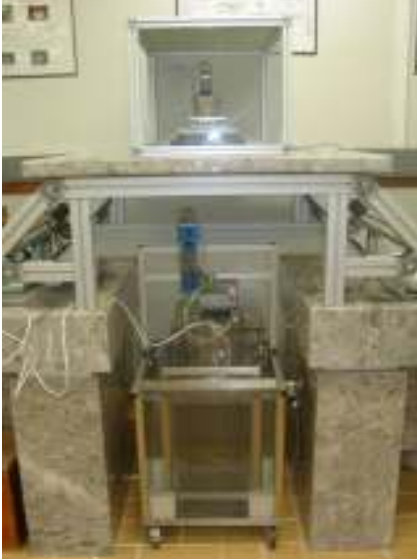


Fig.6 Sistema automático para la medición de materiales de referencia en densidad.

2.3. Control automático del sistema

El movimiento rotatorio de los actuadores lineales es generado por un par de motores CD (corriente directa) con moto-reductor, estos giran a una velocidad máxima de 50RPM y además cuentan con freno mecánico cuando no se encuentran energizados, esto es conveniente para evitar campos magnéticos en el sistema. Para el control de los motores se utilizó una DAQ 9401 (tarjeta de adquisición de datos) de National Instruments, este dispositivo es controlado por un software elaborado en LabView, donde se programan los tiempos y condiciones para el movimiento de cada uno de los motores CD, una vez que el ordenador envía los pulsos eléctricos a la DAQ, esta última los envía a un circuito electrónico (diseñado para este proyecto) que cuenta con un circuito integrado L298 (amplificador operacional), que amplifica los pulsos y los lleva al voltaje que necesitan los motores para su funcionamiento.

De esta manera se garantiza que el control del movimiento en los actuadores sea el correcto y necesario para la calibración del material de referencia.

2.4 Comunicación y registro de datos de los instrumentos

Para calcular la densidad del material de referencia, con la ecuación (1) se tienen que considerar no solo los valores de masa, es importante, de igual manera, conocer las condiciones ambientales con las que se lleva a cabo la calibración por tal motivo el laboratorio se cuenta con los instrumentos necesarios para monitorear las condiciones ambientales.

Cada uno de los instrumentos utilizados cuenta con un puerto de comunicación serial RS232, con el cual se puede conectar el instrumento a un ordenador en un puerto de comunicación serial compatible, sin embargo, para visualizar las indicaciones del instrumento se necesita elaborar un software específico, ya que cada instrumento tiene configuraciones diferentes. El desarrollo del software se elaboró de igual manera que el del control de la DAQ, en el programa LabView, con el fin de poder controlar, visualizar y registrar todo el sistema en conjunto desde un solo software ver figura 7.



Fig. 7 Software de control del sistema automático.

Todos los datos necesarios para calcular la densidad son almacenados en archivos *.xlsx y *.txt con los cuales el metrólogo lleva a cabo los cálculos correspondientes, obteniendo así, la densidad del material de referencia.

3. RESULTADOS

El sistema en funcionamiento fue probado con agua (como material de referencia) y con un patrón sólido de densidad conocida identificado como BK-7, el cual dará trazabilidad a las mediciones de densidad. Se realizaron 140 mediciones (figura 8) en aproximadamente 8 horas. Se ha monitoreado el control de la temperatura obteniendo variaciones de $\pm 0.003 \text{ }^\circ\text{K}$ y la desviación estándar de las mediciones fue de aprox. 0.57 mg.

Para validar las mediciones realizadas este sistema, se han comparado los valores medidos experimentalmente de la densidad del agua contra valores de la densidad del agua calculados mediante la fórmula de Tanaka (5). Esta comparación se realizó mediante el criterio del error normalizado, resultando un valor de 0.57, lo que indica que los resultados cumplen satisfactoriamente este criterio.

Con la desviación estándar de las mediciones se puede estimar la reproducibilidad del sistema y su respectiva estabilidad, seguidamente se calcula la densidad del líquido, esta queda dividida en 20 ciclos, con 7 series por ciclo, la densidad obtenida de cada una de las series por ciclo se promedia, para contar con un valor de densidad promedio. Los resultados obtenidos de la verificación del sistema son los siguientes.

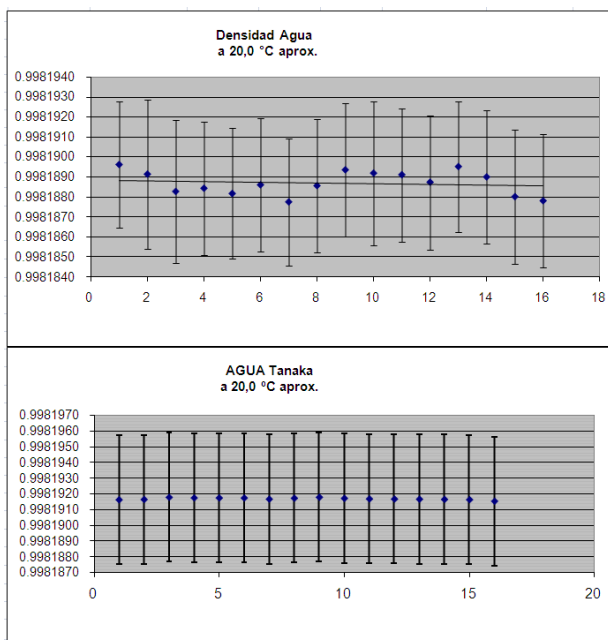


Fig. 8 Gráfica de resultados en la verificación.

| Medicion | Densidad | Inc. (k=1). | Inc. Rel | Temp | Presion | Densidad Tanaka | Inc. (k=1). |
|-------------|-----------|-------------|----------|--------|---------|-----------------|-------------|
| 1 | 0.9981896 | 0.0000016 | 1.6E-06 | 20.003 | 82950 | 0.9981916 | 0.0000021 |
| 2 | 0.9981891 | 0.0000019 | 1.9E-06 | 20.003 | 82912 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 3 | 0.9981883 | 0.0000018 | 1.8E-06 | 20.003 | 83144 | 0.9981918 | 0.0000021 |
| 4 | 0.9981884 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 83142 | 0.9981918 | 0.0000021 |
| 5 | 0.9981882 | 0.0000016 | 1.6E-06 | 20.003 | 83136 | 0.9981918 | 0.0000021 |
| 6 | 0.9981886 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 83125 | 0.9981918 | 0.0000021 |
| 7 | 0.9981877 | 0.0000016 | 1.6E-06 | 20.003 | 83109 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 8 | 0.9981886 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 83094 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 9 | 0.9981893 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 83080 | 0.9981918 | 0.0000021 |
| 10 | 0.9981892 | 0.0000018 | 1.8E-06 | 20.003 | 83068 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 11 | 0.9981891 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 83064 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 12 | 0.9981887 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 83054 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 13 | 0.9981895 | 0.0000016 | 1.6E-06 | 20.003 | 83027 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 14 | 0.9981890 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 83003 | 0.9981917 | 0.0000021 |
| 15 | 0.9981880 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.003 | 82961 | 0.9981916 | 0.0000021 |
| 16 | 0.9981878 | 0.0000017 | 1.7E-06 | 20.004 | 82892 | 0.9981915 | 0.0000021 |
| Valor medio | 0.9981887 | 0.0000034 | | 20.003 | 83035 | 0.9981917 | 0.0000041 |
| Desvest | 5.99E-07 | | | 0.0002 | 82.393 | | |

En 0.57

Tabla 1 Resultados de la verificación del Sistema.

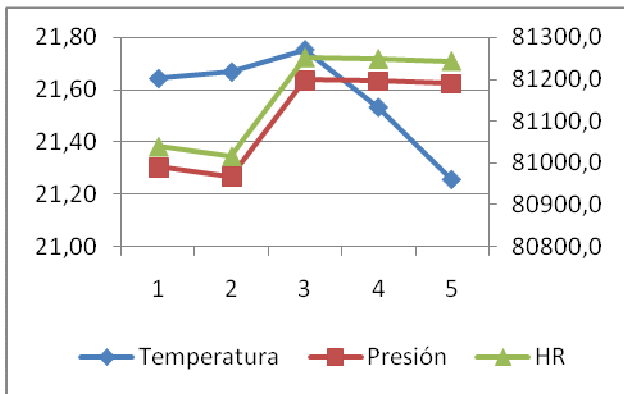


Fig. 9 Condiciones ambientales durante la verificación.

Temperatura = °C
 Presión = Pa
 Humedad Relativa (HR) = %

[4] José-María Fornóns García, ed.U.P.B. “El Método de los elementos finitos en la ingeniería de las estructuras”.

[5] M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto and N. Bignell, “Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports, Metrología” Vol. 38, 2001, 301-309.

4. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se presenta el desarrollo del sistema automático de pesada hidrostática para la medición de la densidad de líquidos, el cual será utilizado como parte del equipo requerido para la certificación de materiales de referencia certificados en densidad. El sistema automático de pesada hidrostática puede alcanzar valores de incertidumbre relativa en densidad del orden de $3,4 \times 10^{-6}$ para un nivel de confianza de aproximadamente 95%, para una temperatura de 20 °C.

Los resultados obtenidos por este sistema fueron validados en la medición de agua pura, mediante la comparación de los resultados experimentales contra los valores de agua calculados con la fórmula de Tanaka [5] cumpliendo satisfactoriamente el criterio de error normalizado.

REFERENCIAS

[1] Díaz J. Julio, Becerra S. Luis. “Caracterización de líquidos para ser usados como materiales de referencia certificados en densidad”. Simposio de Metrología 2010, Juriquilla, Querétaro.

[2] M. Kochsiek, M. Gläser, “Comprehensive Mass Metrology”. Editorial WILEY-VCH, Edición 2000

[3] Ramón Pallás Areny “Adquisición y distribución de señales”. Ed. Marcombo.