

Concepción de un instrumento digital para la medición de la densidad en líquidos

Christian C. García, Mariagne C. Lombana, Luis H. Martínez, Carlos E. Moreno, Pablo E. Moreno, Carlos F. Quintero, Henry A. García & Hoshdenk R. Ramírez

Resumen - En el presente artículo se concibe un instrumento digital para la medición de densidad en líquidos mediante la aplicación del principio de Arquímedes. En esta primera fase se hace una descripción conceptual de la propuesta y se definen parámetros generales para cada una de las etapas que se desarrollarán posteriormente, con base en los requisitos solicitados por el cliente para el sistema. De igual forma, se distribuyen las diferentes funciones entre los miembros del equipo de desarrollo.

Palabras clave: instrumento de medición de densidad en líquidos, descripción conceptual de la propuesta, parámetros generales, equipo de desarrollo.

I. INTRODUCCIÓN

A pesar del desarrollo de instrumentos electrónicos para toda clase de tareas en diferentes áreas científicas, aún existen algunas variables que se miden a partir de observaciones por parte del experimentador, en instrumentos generalmente bien diseñados y calibrados, que además cumplen con toda una serie de estándares, pero que de una forma u otra son propensos a generar errores sistemáticos, por el tiempo de uso o los efectos del ambiente, o incluso graves, si el experimentador no es idóneo para la tarea o los procedimientos empleados no son adecuados.

Un ejemplo de estas variables es la densidad de los líquidos. Actualmente, existen diversas formas de determinarlo: el método del picnómetro, que consiste en el uso de un “frasco de vidrio de volumen exacto y conocido (V_p)” [1], que se pesa, primero vacío (W_p), y luego con el líquido de interés (W_{pl}) y del cual se obtiene la densidad a partir de la ecuación:

$$\rho = \frac{W_{pl} - W_p}{V_p} \quad (1)$$

El otro método consiste en el uso de un densímetro, cuyo principio de funcionamiento es el principio de Arquímedes. Este último se fundamenta en la idea de que “la fuerza de flotación que actúa sobre un

cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido es igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo” [2]. En este orden de ideas, el instrumento consiste en “un flotador calibrado que se hunde en el fluido hasta que el peso del fluido que desplaza es exactamente igual a su propio peso” [3], arrojando una lectura de la densidad generalmente en g/cm^3 sobre el vidrio hueco en donde está graduado.

Como se observa, ambos métodos, a pesar de contar con buena documentación y fundamentación teórica, no han presentado cambios significativos en materia tecnológica, que puede presentar ventajas al disminuir considerablemente la probabilidad de cometer errores graves de lectura. Por esta razón, es de interés desarrollar un instrumento electrónico que permita medir la densidad de líquidos.

Actualmente existen algunos trabajos relacionados. En [4], se desarrolla un densímetro digital basado en una técnica similar a la del picnómetro. En este caso un sistema de procesamiento se encarga de ejecutar la ecuación 1 a partir de los datos obtenidos de una celda de carga, que se encarga de sensar el peso del líquido en un frasco con volumen conocido y previamente calibrado en el dispositivo.

En contraste con el método propuesto, en esta primera etapa de diseño, se concibe un dispositivo autónomo, portable, robusto e innovador, capaz de determinar la densidad de líquidos a partir del principio de Arquímedes, que se encuentren en un rango de 0 a 2000 kg/m^3 y con una resolución menor o igual a 0,05 kg/m^3 , con una alimentación de 5 V vía USB y un consumo de potencia inferior a 75 mW.

II. ANTECEDENTES

En la elaboración de un proyecto de ingeniería, es importante realizar una investigación enfocada en

el diseño y herramientas que permitan dar solución al problema planteado.

De esta manera, para la elaboración de esta propuesta, se realizó una búsqueda de artículos y documentos relacionados con la instrumentación electrónica para la digitalización del proceso de medición de la densidad de líquidos a partir del principio de Arquímedes. Algunas palabras clave fueron: *Liquid density measurement using archimedes principle, liquid density measurement using buoyancy method, electronic instrumentation to measure density.*

1. P. Megantoro, A. Widjanarko, R. Rahim, K. Kunal y A. Z. Arfianto, "The design of digital liquid density meter based on arduino" [4]

Este artículo tiene como objetivo el diseño de un sistema para la medición de la densidad de un líquido mediante el método del picnómetro, descrito anteriormente. El procedimiento usado, básicamente, automatiza esta lectura de densidad mediante la medición de la masa del líquido vertido en un volumen exacto y conocido, haciendo uso de una celda de carga, lectura que luego es procesada en un Arduino y desplegada en un display.

La etapa de procesamiento del Arduino debe considerar varias pruebas de calibración, tanto de la celda de carga, como de la expresión general de densidad $\rho = m/v$ (ρ : densidad, m : masa, v : volumen) que contemple variables del ambiente.

El esquema de la solución, mostrado en la figura 1, incorpora un sensor de temperatura que no es de interés para el proyecto en cuestión. No obstante, es un punto de partida para considerar la celda de carga como sensor principal de peso (o fuerza de empuje ejercida).

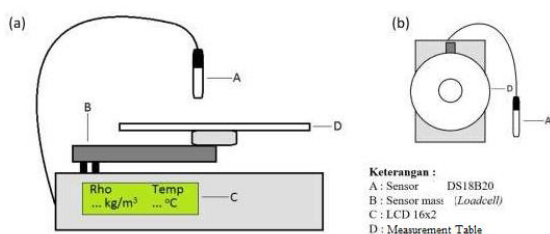


Fig 1. Diseño mecánico de la propuesta del artículo 1.
Obtenido de [4].

2. F. Handayani, U. Wahyono y S. Saehana, "Development of a microcontroller-based instrument for measuring liquid density" [5]

Este artículo, aunque tiene como objetivo la implementación de un método de enseñanza basado en una serie de actividades prácticas donde se aplican conceptos físicos, en el caso específico la densidad y la medición de la misma; también dedica un apartado a la implementación de un instrumento basado en un microcontrolador para determinar la densidad a partir de un análisis de la literatura disponible, aplicando el método utilizado en [4].

En la figura 2 se observa el sistema implementado:



Fig. 2 Diseño mecánico de la propuesta del artículo 2.
Obtenido de [5].

Se halla compuesto básicamente de una celda de carga, un Arduino UNO, un LCD, un módulo i²c y una fuente de alimentación de 12 V. Los autores hacen énfasis en el diseño mecánico, pues, "la disposición mecánica de los componentes afecta en gran medida a la precisión del instrumento de medición" [5]. Por esta razón, los autores sugieren dedicarle especial atención a la base de la celda de carga y la disposición de los demás componentes en torno a esta.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del instrumento, se realizaron pruebas considerando tres tipos de líquidos con diferentes densidades: agua, aceite de coco y agua salada. Posteriormente, al realizar la medición de cada densidad en los diferentes líquidos fue contrastada la información que arrojó el estudio con lo encontrado en la literatura. La mayor desviación estándar se halló para el aceite de coco y no fue superior a 0.045.

A pesar de que el artículo no es del todo técnico, sí que garantiza que el método empleado funciona,

sobre todo bajo la premisa con que se realizó el prototipo: aprendizaje del concepto físico y la implementación tecnológica que se desprende del estudio.

3. P. R Espindola, C. R Cena, D. C Alves, D. F Bozano, and A. M Goncalves, "Use of an Arduino to study buoyancy force" [6]

Este artículo aborda el problema de medición de fuerza de empuje a partir del principio de Arquímedes. Para tal fin, se desarrolla un sistema electrónico cuyo mecanismo de funcionamiento es similar al abordado en los laboratorios de física para medir la flotabilidad de un objeto.

El experimento consiste en medir el peso de un cuerpo completamente sumergido en un fluido a partir de un dinamómetro y una balanza. De tal manera, la fuerza de flotación se calcula a partir de la diferencia entre el peso del cuerpo en el aire y el peso del mismo completamente sumergido. Cabe resaltar que, a pesar de que el artículo se enfoca en la medición de la fuerza ocasionada por la flotabilidad, los autores sugieren que tal mecanismo se puede utilizar en la medición de densidades de fluidos.

El desarrollo electrónico consiste en un usar dos celdas de carga que se encuentran conectadas a un Arduino. Una de estas celdas se halla fijada en un soporte, encargándose de medir la fuerza vertical resultante de un cilindro. La otra celda de carga está dispuesta entre dos placas, funcionando como una balanza, ya que esta se encarga de determinar el peso de un Becker con líquido. Tal y como se evidencia en la siguiente figura:

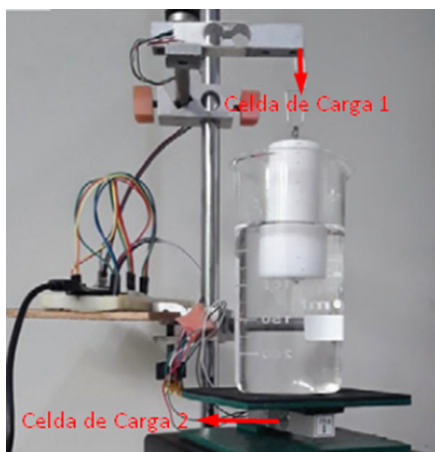


Fig 3. Sistema diseñado para la medición de la fuerza de empuje por la flotabilidad del objeto. Obtenido de [X]

4. C. Gianino, "Microcomputer Based Laboratory for Archimedes Principle and Density of Liquids" [7]

Al igual que en el anterior documento, Gianino parte del mismo método que se usa en laboratorios de física para la comprobación del principio de Arquímedes. De tal manera, que reemplaza el dinamómetro o la balanza hidrostática en la medición de la fuerza de flotación, por un sistema de microcomputadoras (MBL), el cual está conformado por un sensor de fuerza, un sensor de temperatura y un software para la adquisición de datos que está conectado a una computadora con su respectiva interfaz.

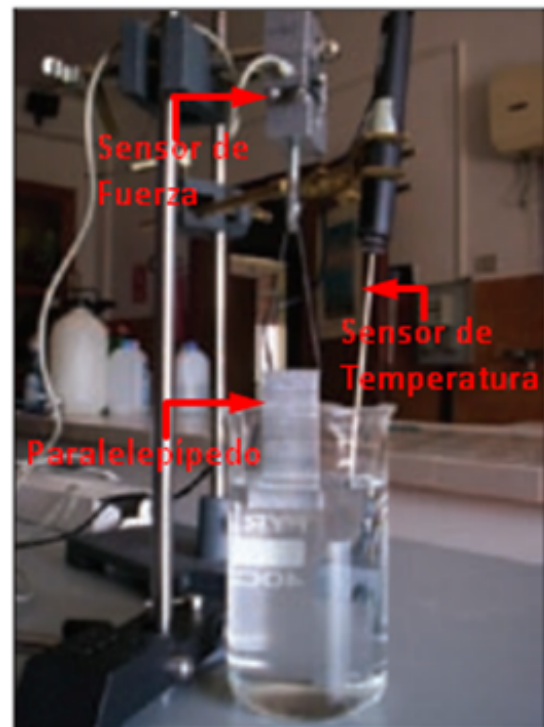


Fig 4. Sistema diseñado para la medición de la fuerza de empuje por la flotabilidad del objeto. Obtenido de [X]

Como se observa en la Fig 4, el sistema consiste en un paralelepípedo que cuelga de un sensor de fuerza, compuesto por un puente completo de galgas extensométricas, encargándose de medir la fuerza de flotabilidad que se ejerce sobre el paralelepípedo. A su vez, también se evidencia un sensor de temperatura, encargado de medir la temperatura del líquido, que es adquirida por el sistema de adquisición de datos, CassyLab,

permitiendo visualizar en pantalla los resultados del sensor de temperatura junto con el sensor de fuerza.

Por otra parte, cabe resaltar que el sistema diseñado, está configurado en un rango de 1.5 N, con una resolución del 0.1% del rango de medición, en donde las lecturas se muestran en promedio de más de 500 ms.

Ahora bien, como se evidencia tanto Espindola y Gianino, en sus respectivos artículos, contempla como variable de interés la fuerza de empuje que ejerce el líquido sobre un objeto de volumen fijo y, por esta razón, es el modelo más adecuado a seguir para el desarrollo del instrumento. No obstante, como se verá en el siguiente apartado, es importante tener en cuenta algunos factores.

III. CONCEPTO GENERAL DE LA SOLUCIÓN

Teniendo en cuenta que el principio de Arquímedes se encuentra definido por la ecuación:

$$E_p = \rho \cdot V \cdot g \quad (2)$$

Donde E_p es la fuerza de empuje ejercida por el líquido; ρ es la densidad del líquido de interés; V es el volumen del objeto sumergido; y g , la fuerza de la gravedad. Considerando a ρ como la variable de interés, basta con determinar la fuerza de empuje que ejerce el líquido sobre un objeto con volumen exacto y conocido.

A) Consideraciones previas

En la figura 3, se puede observar un esquema conceptual de cómo se podría abordar el problema, siendo la barra gris superior la celda de carga, que es uno de los sensores disponibles para determinar peso a partir de la deflexión ejercida sobre ella y el cilindro sumergido el objeto caracterizado para la tarea en cuestión:



Fig. 3 Esquema conceptual de la solución al problema.

Sin embargo, hay varias consideraciones importantes respecto a cómo se va a determinar esta fuerza de empuje:

- El rango de densidades de los líquidos a medir se encuentra entre 0 y 2000 kg/m³ por lo que el objeto de referencia debe poseer una mayor densidad, de lo contrario, “el peso del fluido desplazado cuando el cuerpo está totalmente sumergido será mayor que el peso del cuerpo” [2], de forma que el cuerpo flota. Si no se garantiza que la fuerza de empuje sea menor, la diferencia de pesos generará una fuerza neta hacia arriba, por lo que la celda de carga no arrojará ningún voltaje de salida considerable en sus terminales.
- El peso del objeto claramente debe ser lo suficientemente pequeño para que la fuerza de empuje, en comparación con la fuerza que ejerce la gravedad sobre el objeto, arroje valores lo suficientemente grandes para ser acondicionados en etapas posteriores.

B) Descripción de la propuesta

Tal y como se observa en la figura 3, para el diseño de este sistema se han de concebir los siguientes bloques:

- Etapa de alimentación del sistema.
- Etapa de sensado (Transductor de fuerza: celda de carga)
- Etapa de acondicionamiento de la señal
- Etapa de procesamiento digital (Microcontrolador)
- Etapa de visualización de la medición (Display)

- Etapa de recubrimiento y diseño estructural del sistema

El sistema de medición de densidad funciona a partir de un objeto bien definido suspendido sobre un sistema de medición de fuerza, el cual deberá someterse a una calibración y acondicionamiento de señal. Inmediatamente, esta señal es transmitida a la unidad de procesamiento, que se encargará de hacer los cálculos adecuados a partir de la ecuación 2, para finalmente visualizar la medición en un display.

C) Ingeniería básica

El sistema de referencia para la medición de la densidad del líquidos está basado en el diagrama de bloques de la siguiente figura:

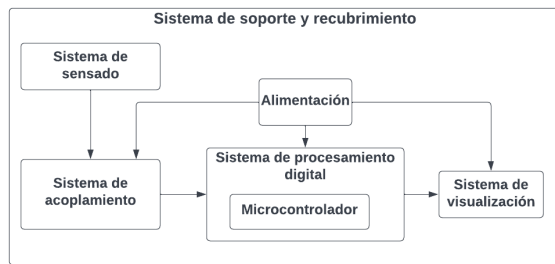


Fig. 4 Diagrama de bloques para obtención de la densidad en líquidos.

El sistema de sensado realiza la lectura del peso mediante una celda de carga, que determina la fuerza de empuje a partir de la diferencia de fuerzas que se ejerce cuando el objeto no se encuentra sumergido (mediante un proceso de calibración) y una vez lo está en el líquido de interés. Esta convierte el peso en una señal eléctrica.

Para el sistema de acoplamiento se hace uso de un módulo que funcione como transmisor entre la celda de carga y el sistema de procesamiento digital (microcontrolador).

El sistema de procesamiento digital procesa la señal analógica entregada por el sistema de acoplamiento. Esta señal es almacenada en una variable, que en conjunto con las variables ya definidas en la etapa de calibración (volumen del objeto y gravedad), se opera a través del algoritmo implementado en el microcontrolador cuya salida es enviada al sistema de visualización.

El sistema de visualización permite al usuario visualizar la densidad calculada, por medio de una pantalla LCD. El usuario, adicional a la visualización, también debe contar con un botón que le permita realizar el ajuste de cero y span.

- Especificaciones comunes a todos los bloques

Todos los sistemas tienen en común el voltaje de alimentación, el cual tiene como principal fuente un cargador de 5V (USB) y una limitación en cuanto a la potencia que puede ser consumida de 75 mW.

- Especificaciones del sistema de sensado y acoplamiento

Como se mencionó anteriormente, el sistema de acoplamiento funciona en conjunto con el sistema de sensado y entrega información proveniente de la celda de carga (peso), de este se tienen en cuenta varios aspectos para su transformación de mV a peso, entre estos están: lectura de celda de carga (mV), el voltaje de excitación y la sensibilidad recomendada expresada como mv / V .

Para la transformación se realiza el siguiente procedimiento: multiplicar la lectura de la celda de carga por el peso completo de la celda de carga, si esta lectura es de 8 mV y el peso máximo de la carga es de 5 kg, esto daría $40\text{mV} \cdot \text{kg}$. Ahora se divide el valor anteriormente calculado por la sensibilidad, el cual es 2 mV/V y al tener una tensión de 5V se obtiene una sensibilidad final de 10 mV, a partir de la cual se obtiene una lectura final de 4 kg.

Otro aspecto importante a recalcar es que el sistema de sensado no tiene una fuente de alimentación directa, esta hace uso de la alimentación que recibe el sistema de acoplamiento el cual es de 5V con un consumo máximo de 25 mW (el cual se presenta cuando el peso es el máximo permitido) . Por último, es fundamental hacer hincapié que las salidas de esta etapa son netamente analógicas y se dan a través del acoplamiento hacia el sistema de procesamiento digital

- Especificaciones del sistema de procesamiento digital

El sistema de procesamiento digital está enlazado directamente al sistema de sensado, el cual

transmite la señal eléctrica procesada y, a través de la codificación en el microcontrolador (la cual está basada en el cálculo teórico y en el cálculo de error de la medición), se permite generar la señal digital con el respectivo valor de la variable de interés y a su vez enviar el valor digital al sistema de visualización. También dependiendo de la interacción del push button se determina el cero y span determinado por el usuario.

-Especificaciones del sistema de visualización

El sistema de visualización está enlazado al sistema de procesamiento digital. Para este sistema se utilizará un módulo de pantalla LCD que trabaje a 5 V y que sea compatible con la plataforma de microcontrolador seleccionada. El módulo funciona con caracteres ASCII. Este módulo debe ir conectada a los pines del microcontrolador, el cual entrega el valor de la densidad previamente calculado, mientras el líquido es vertido en el recipiente y su densidad es calculada, la pantalla del LCD mostrará un mensaje de espera, una vez se calcule la densidad, este valor será mostrado en pantalla hasta que el líquido sea retirado, procedimiento que será garantizado por el microcontrolador, es decir en la etapa de procesamiento digital.

El módulo LCD debe tener la capacidad de mostrar números en un rango entre 0 a 2000 kg/m^3 , es decir, 4 cifras, además como se debe tener una resolución $\leq 0,05 \text{ kg/m}^3$, es decir, 2 cifras decimales más. Finalmente el módulo debe tener la capacidad para mostrar un total de 6 dígitos y además mostrar las unidades “ kg/m^3 ”.

-Especificaciones de los elementos de soporte y recubrimiento exterior.

Los elementos de soporte y el recubrimiento exterior tienen como objetivo principal la fijación, direccionamiento y protección de todos los componentes, asociados a las etapas previamente descritas, que conformarán el instrumento de medición. Cada una de sus partes deben ser interconectadas de forma tal que permita al usuario final hacer uso de este con la mayor facilidad posible y además, tener una adquisición de los datos acordes a la función del instrumento, estableciendo las condiciones de uso que se fijan

por medio de la estructura que soporta todas las etapas que lo conforman.

D) Responsabilidades de cada miembro.

Teniendo en cuenta los bloques desarrollados se decidió dividir el trabajo en 3 grupos, 2 grupos de 3 personas y un grupo de 2 personas. Estos se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- Desarrollo del sistema de sensado y acoplamiento:

- Pablo Elías Moreno Peralta
- Carlos Eduardo Moreno Bustamante
- Carlos Fernando Quintero Olaya

Este grupo se encargará específicamente de las etapas de sensado y acondicionamiento de la señal, teniendo en cuenta el funcionamiento del sensor y como la señal que genera será enviada al bloque de procesamiento.

- Desarrollo del sistema de procesamiento y visualización:

- Luis Hernando Martínez Mosquera
- Mariagne Catalina Lombana Cuero
- Henry Anzola García

Este grupo está encargado de las etapas de procesamiento y visualización, las cuales a través de la información recibida de los sensores, se se encargará de hacer todo el procesamiento de la señal teniendo en cuenta todas las consideraciones teóricas planteadas para que en la salida se encuentre la señal digital deseada para ser visualizada. Todo esto teniendo en cuenta los protocolos de comunicación utilizados, los parámetros recibidos y cómo se van a mostrar.

- Desarrollo de la infraestructura del sistema:

- Christian Camilo García Ceballos
- Hoshdenk Romo Ramírez

En este grupo se encargará de la estructura del dispositivo, es decir, el desarrollo de una carcasa que brinde protección a las piezas desarrolladas por los otros grupos teniendo en cuenta la integración que deben tener como un solo equipo.

Debido a ello los miembros de este grupo deberán trabajar directamente con los miembros de los otros grupos para poder estar al tanto del desarrollo hecho por los mismos y así se pueda hacer de manera más eficaz la estructura del dispositivo.

E) Metodología de trabajo

Para llevar a cabo el proyecto planteado se desarrolla un Roadmap, que incluye tanto la lista de actividades las cuales especifican el desarrollo de todo el proyecto y las personas encargadas de cada actividad. A su vez, cada actividad tiene una

prioridad y también está enlazada a una actividad de alta importancia (llamada *epic*). Además, se incluye una pestaña en la cual se informan problemas (*bugs*) y tareas de solución rápida (*sprint*).

Todo esto para controlar de manera más eficiente el trabajo de cada integrante y ser más efectivos en la comunicación entre grupos

| Aa proyecto final | Priority | Status | Epic |
|---|----------|---------------|-----------------|
| Formacion de los grupos | P1 🚩 | Complete 🟢 | FASE I |
| Selecccion del proyecto | P1 🚩 | Complete 🟢 | FASE I |
| concepcion del proyecto e ingenieria basica | P2 | Complete 🟢 | FASE I |
| analisis de costos y adquisicion de elementos | P2 | In Progress 🟡 | |
| desarrollo de la etapa de sensado y adquisicion | P1 🚩 | Not Started 🔴 | FASE II grupo 1 |
| pruebas de la etapa de sensado y adquisicion | P2 | Not Started 🔴 | FASE II grupo 1 |
| desarrollo de la etapa de procesamiento y visualizacion | P1 🚩 | Not Started 🔴 | FASE II grupo 2 |
| pruebas de la etapa de procesamiento y visualizacion | P2 | Not Started 🔴 | FASE II grupo 2 |
| desarrollo de la estructura del sistema | P1 🚩 | Not Started 🔴 | FASE II grupo 3 |
| integracion de las diferentes etapas | P1 🚩 | Not Started 🔴 | FASE III |
| Pruebas del equipo y revision de problemas | P2 | Not Started 🔴 | FASE III |
| Entrega proyecto final | P1 🚩 | Not Started 🔴 | FASE III |

Fig. 5 Lista de actividades en notion.

Para ver en detalle el desarrollo de la lista de actividades y su resolución se puede ingresar al link:

<https://kind-tenor-7e5.notion.site/e3b75c6e8f4c4588bc79c7193216f531?v=9af43f91dfce4d83902c6eb6a940da74>

El cronograma de estas actividades se encuentra en la siguiente tabla (tener en cuenta que el número de la actividad está en orden descendente como se muestra en la lista):

TABLA I
Cronograma de actividades

| | Semana | | | | | | | |
|-----|--------|---|---|---|---|---|---|---|
| Act | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|----|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 6 | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | |

REFERENCIAS

[1] "Práctica 3 - Densidad de líquidos". Vicerrectoría de Docencia | Universidad de Antioquia. <http://docencia.udea.edu.co/cen/tecnicaslabquimico/02practicass/practica03.htm> (accedido el 19 de mayo de 2022).

[2] W. T. Griffith, *The Physics of Everyday Phenomena: A Conceptual Introduction to Physics*. McGraw-Hill Higher Education, 2007.

[3] F. W. Sears, L. Durrell y H. D. Young, *Física Universitaria - Tomo 1*. Addison Wesley Longman, 1998.

[4] P. Megantoro, A. Widjanarko, R. Rahim, K. Kunal y A. Z. Arfianto, "The design of digital liquid density meter based on arduino", *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 1, n.º 1, 2020. Accedido el 19 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.18196/jrc.1101>

[5] F. Handayani, U. Wahyono y S. Sachana, "Development of a microcontroller-based instrument for measuring liquid density", *J. Phys.: Conf. Ser.*, Accedido el 21 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2126/1/012025>

[6] P. R Espindola, C. R Cena, D. C Alves, D. F Bozano, and A. M Goncalves, "Use of an Arduino to study buoyancy force", *Physics Education*, Vol. 53, N° 3, 2018. Accedido el 21 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.doi.org/10.1088/1361-6552/aaa93a>

[7] C. Gianino, "Microcomputer Based Laboratory for Archimedes Principle and Density of Liquids", *The Physics Teacher*, Vol. 46, 2008. Accedido el 29 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1119/1.2824002>