

Automatización de Experimento de Capacidad Calorífica a Baja Temperatura

Lizeth T. González V.^{1,*} and Edwin C. Laverde V.^{1,**}

¹*Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*

Resumen: Se diseñó un montaje digital con el objetivo de automatizar un experimento sobre el cálculo de la capacidad calorífica de diferentes materiales a baja temperatura. El circuito fue realizado utilizando un Arduino UNO, una celda de carga, un motor paso a paso, y otros elementos. Se probó con 3 muestras de materiales obteniendo resultados con porcentajes de error similares a los encontrados en el experimento realizado manualmente (menores al 15%), pero con una reducción significativa en el tiempo que conlleva su realización.

Palabras clave: Capacidad Calorífica, Automatización, Electrónica Digital, Arduino UNO, Celda de Carga, Motor Paso a paso.

I. INTRODUCCIÓN

La capacidad calorífica específica c se define como la cantidad de energía por unidad de masa que se le debe suministrar a una sustancia para aumentar su temperatura en una unidad. En 1896 Boltzmann construyó un modelo que explicaba el hecho de que las capacidades caloríficas molares de diferentes sólidos tomaran siempre un valor cercano a $25 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, este modelo consistía en considerar cada átomo de un sólido de tal forma que se comportara como un oscilador armónico formado por la interacción con los átomos a su alrededor [1]. Aunque este modelo clásico es buena aproximación a condición de ambiente, no es válido a bajas temperaturas, ya que según la tercera ley de la termodinámica, el valor de la capacidad calorífica molar debe tender a cero cuando la temperatura tiende a 0K.

En 1907, con la introducción de ciertas ideas sobre comportamientos cuánticos presentes en la naturaleza, Einstein construyó un modelo desde una perspectiva en la que los átomos absorben energía: asumiendo osciladores armónicos cuánticos [2]. Este modelo funcionaba para temperaturas cercanas a cero, aún así los datos experimentales no coincidían totalmente y años después Peter Debye propuso un modelo similar (asumiendo frecuencias diferentes para los osciladores) que coincidía de mejor forma.

Una forma de obtener el valor de calor específico de un material es calculando la razón entre el cambio de calor y de temperatura que se generan al entrar en contacto el material con alguna sustancia. Ese cambio de calor se puede evidenciar experimentalmente con el cambio de masa que le ocurre a una sustancia líquida al pasar a estado gaseoso, ese cambio está dado por la expresión (1), donde L es el calor latente de la sustancia [3].

$$\Delta Q = \Delta m L, \quad (1)$$

De este modo, si ΔQ es el calor transferido del material a una sustancia cuyo calor latente es L y cuya cantidad

de masa evaporada por la transferencia de calor es ΔM , la capacidad calorífica específica promedio del material estará dada por la expresión (2). Donde ΔT es el cambio de temperatura y m la masa del material.

$$\langle c \rangle = \frac{L}{m} \frac{\Delta M}{\Delta T}, \quad (2)$$

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A. Descripción del experimento

Un experimento utilizado para calcular valores de capacidad calorífica de diferentes materiales a bajas temperaturas consiste en medir el cambio de masa generado en nitrógeno líquido al sumergir una muestra de algún material en el mismo. Este experimento fue realizado con anterioridad utilizando una balanza donde se situaba un recipiente con nitrógeno líquido. Primero se dejaba unos segundos para registrar el cambio de masa ocasionado por la evaporación natural y luego se sumergía una muestra, causando así una evaporación y un cambio en la masa mayor al que se tenía antes. Finalmente, cuando la muestra alcanzaba la temperatura del nitrógeno (por la transferencia de todo el calor), el cambio de masa volvía a ser el de evaporación natural. Entonces se registraban datos por otros segundos más y finalizaba el experimento. El registro de datos de masa se realizaba tomando un video del proceso, el cual después se analizaba en el programa Tracker para obtener los datos de masa en función del tiempo, tomando datos cada 0.1 segundos.

El proceso anterior y el de obtener el valor de capacidad calorífica llevaban mucho tiempo, ya que las muestras tardaban más de un minuto en alcanzar el equilibrio, y para calcular sus capacidades se necesitaban las regresiones lineales de los datos iniciales y finales, es decir en total unos 3 a 4 minutos de datos que había que tomar manualmente. Con el objetivo de evitar esto, se desarrolló un montaje haciendo uso de la electrónica analógica y digital para así automatizar este experimento. En sí se automatiza la toma de datos y el cálculo de la capacidad calorífica, logrando entonces una reducción significativa del tiempo requerido para realizar este experimento.

* lgonzalezva@unal.edu.co

** elaverde@unal.edu.co

El montaje final se muestra en la figura 1, consta, en general, de los siguientes componentes: una balanza de madera que funciona utilizando una celda de carga (*a*); un motor paso a paso (*d*) que hace girar un palo de balsa al cual está amarrada la muestra para que así esta suba o baje automáticamente; una pantalla LCD (*e*) que muestra los valores de masa y mensajes relacionados al proceso como el valor calculado de la capacidad calorífica y otras solicitudes realizadas al usuario; un pulsador como botón (*g*) para que el usuario confirme algunos procesos; y una tarjeta Arduino UNO (*f*) que se encarga de controlar la pantalla y el motor, y de recibir los datos de peso de la celda de carga y del botón.

Las descripciones detalladas del circuito y del código utilizado se muestran en las siguientes secciones.

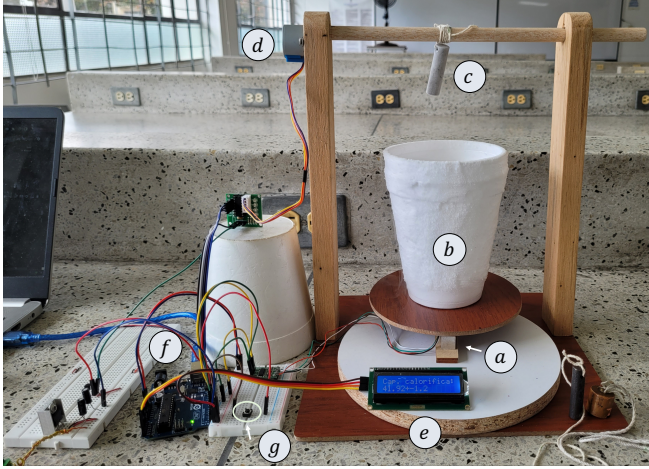


Figura 1: Foto del montaje final. Se muestran: *a*) la celda de carga, *b*) el recipiente con nitrógeno líquido, *c*) la muestra del material a medir, *d*) el motor paso a paso, *e*) la pantalla LCD, *f*) la tarjeta Arduino UNO, y *g*) el pulsador.

B. Descripción del circuito

En la figura 2 se muestra el diagrama del circuito con todos sus componentes. La celda de carga (*b*) se encuentra conectada al Arduino (*a*) por medio de su driver (*c*), el cual consta del módulo *HX711*, que es un conversor análogo-digital que se encarga de amplificar y enviar la señal tomada por la celda al Arduino [4]. Para que los datos medidos fuesen correctos, la celda tuvo que calibrarse con un objeto de un peso conocido.

Por otro lado se encuentra una pantalla LCD de 16x2 (*d*) utilizada con un adaptador I2C el cual facilita el uso de la LCD disminuyendo a 2 la cantidad de pines que salen de la pantalla para conectarse al Arduino [5]. El pulsador (*e*) se utilizó como botón para que el usuario confirmara distintos procesos.

Por último, se utilizó un motor paso a paso 28BYJ de 5V DC (*f*) para mover el palo de balsa que sube y baja

la muestra. Este se conecta a su driver (*g*) conformado por el circuito integrado ULN2003, el cual permite controlar la velocidad, dirección, y número de pasos de giro del motor [6]; utilizándolo por medio del Arduino se estableció la velocidad a 16 rev/min . Para alimentar a este motor no se usó la fuente del arduino, a pesar de que fuese de 5V, para evitar algún tipo de daño sobre este pues la presuntamente alta demanda de corriente del motor podía llegar a ocasionar problemas. Así, se utilizó una fuente externa constante de 5V utilizando una fuente de 9V y un regulador L7805. Debido a la alta demanda de corriente por parte del motor, se presenta un sobrecalentamiento del regulador de 5V siempre que el motor esté conectado a esta fuente, independientemente de si se está utilizando o no. Para evitar este sobrecalentamiento, se utilizó un transistor (*h*) con el colector conectado a la fuente externa de 5V, el emisor a la alimentación del driver del motor, y la base a un pin digital del Arduino, de tal forma que se podía mandar una señal para darle la orden al transistor de dejar pasar la corriente al driver cuando se estuviese usando el motor, y de no dejarla pasar cuando no se lo usara.

C. Descripción del código

El código implementado está dividido en 2 secciones, *una* que se encarga de todo lo correspondiente al comportamiento del arduino y los sensores, y *otra* que se encarga del análisis en tiempo real de los datos.

En lo que sigue se describirá el paso a paso del desarrollo del experimento para así ver cómo entra en juego cada parte del código implementado.

Naturalmente lo primero que se hace por parte del arduino es inicializar todos los sensores, y el canal Serial; por parte del archivo *.py*, que es el que se ejecuta, se crea un archivo *.csv* en el que se guardarán los datos recolectados, y se establece la conexión con el Serial (esto utilizando la librería *pyserial*) para así poder leer los datos recolectados.

Una vez se ha inicializado lo necesario, empieza la preparación del experimento. Para esto, primero se le pide al usuario escribir en la consola el símbolo atómico del material de la muestra que desea usar para el experimento. Dadas las muestras disponibles para este experimento, se configuraron los siguientes elementos posibles para este paso: Aluminio (Al), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn). El propósito de saber qué material se está usando es poder seleccionar la masa molar correcta para el posterior cálculo de la capacidad calorífica.

Luego de esto, se le pide al usuario colocar la muestra a utilizar (ya amarrada al palo) sobre la balanza. Una vez el arduino detecta que se ha colocado algo de por lo menos 10g sobre la balanza, se muestra el valor medido en la pantalla LCD, y se envía el valor a través del serial para ser almacenado por el archivo *.py* (también por el *.ino*).

Luego, se le pide al usuario presionar el botón para su-

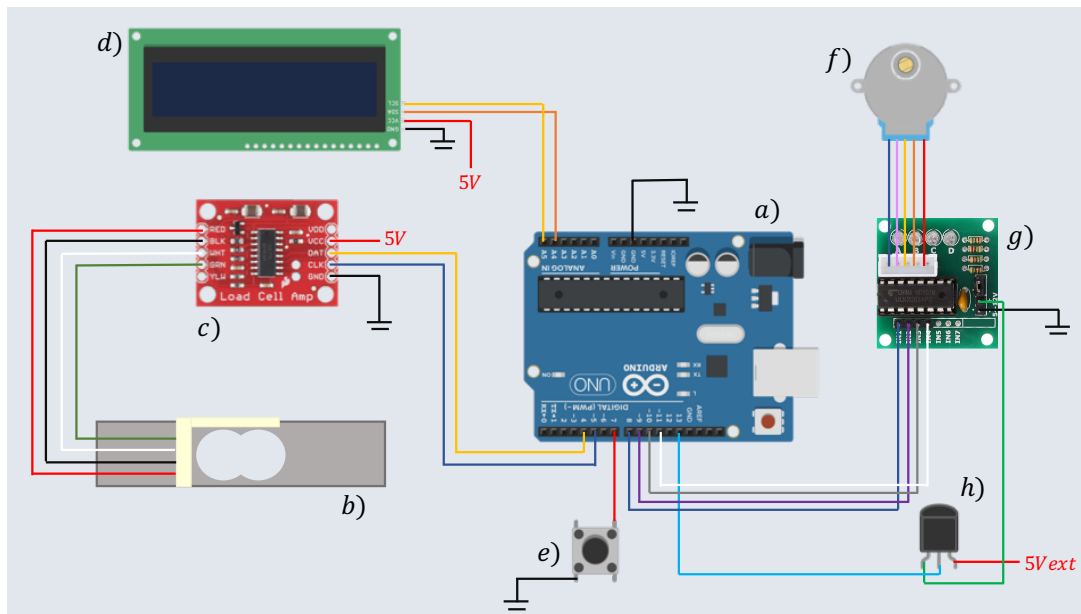


Figura 2: Diagrama del circuito utilizado con todos sus elementos. Se muestran: a) la tarjeta Arduino UNO, b) la celda de carga, c) el módulo HX711, d) la pantalla LCD, e) el pulsador, f) el motor paso a paso, g) el driver ULN2003, y h) un transistor.

bir la muestra a su posición inicial, enviando una señal al motor. Hecho esto, se le comunica al usuario que coloque el recipiente con el nitrógeno líquido sobre la balanza. Una vez se detecta el nitrógeno, todo está listo para comenzar la toma de datos del experimento. Así, el usuario debe presionar el botón para iniciar con el experimento, y entonces se le informa al archivo .py que este ha iniciado.

De esta manera, los datos recolectados por el arduino a partir de este momento son enviados aproximadamente cada 100ms por el serial para que el .py los lea. Ahora, el .py graficará estos datos cada 400ms para evitar una gran densidad de puntos, y se mostrarán en tiempo real en el computador.

Pasado un intervalo de tiempo dT , definido como 20s por conveniencia, se activará el motor para que empiece a bajar la muestra y esta se sumerja en el nitrógeno. En este paso, para que se tuviera un funcionamiento correcto hubo que tener en cuenta la manera en la que se hace mover el motor. Para mover el motor, hay que indicar la cantidad de pasos que se quiere que este dé, y para bajar la muestra se requerían más o menos unas 6 vueltas del motor, teniendo cada vuelta 2048 pasos (según el fabricante). El problema surge en el hecho de que al programa ejecutar la acción de mover el motor, no realizará nada más hasta que no se dé la cantidad de pasos especificada. Es decir, mientras la muestra baje, no se estarán enviando datos por el serial. Para resolver esto, se implementó una función que divide la cantidad total de pasos que se buscan dar, en 'paquetes' de 48 pasos, de manera que se pueden realizar otras tareas cada 48 pasos, manteniendo un aspecto continuo en el movimiento del motor. Además, dada la velocidad establecida del

motor (16rpm), y el tiempo de cómputo de la imprenta de datos, se puede conseguir que los datos se envíen aproximadamente cada 100ms, como se tenía normalmente.

Por otro lado, saber el momento en el que la muestra entre en contacto con el nitrógeno es crucial pues este se usará para el posterior cálculo de la capacidad calorífica. Para hallar este momento, el .py empieza a calcular las derivadas numéricas de los datos una vez la muestra empieza a bajar. Tener estas derivadas es de gran ayuda pues al ingresar la muestra en el nitrógeno habrá un aumento en la masa total (pues la muestra ha estado suspendida en el aire), que se verá reflejado como un aumento abrupto en el valor de las derivadas. Así, el .py analizará las derivadas en tiempo real y determinará en qué momento estas toman un valor mayor al que tenían anteriormente (pues el N se evapora a una tasa relativamente constante), lo que le permitirá saber el momento preciso en el que la muestra entra en contacto con el nitrógeno. En este momento es claro un problema adicional: los datos hasta este momento no incluyen la masa de la muestra. Sin embargo, dado que se conoce con gran certidumbre el momento en el que la muestra se sumerge en el nitrógeno, una solución parcial a este problema, es modificar los datos tomados antes de este momento, sumándoles el valor previamente medido de la muestra. Esta es una solución parcial pues si bien se tiene el momento en el que la muestra entra en el nitrógeno, no toda su masa será medida por la balanza entonces. La muestra seguirá bajando hasta que toque el fondo del vaso, y entonces la balanza sí medirá toda la masa de la muestra. Así, desde el momento en el que la masa entre en el nitrógeno hasta que toque el fondo del vaso, habrá un aumento en la masa total que

no será fácilmente predecible. Aún así, este hecho no presenta un problema muy grave pues para el cálculo de la capacidad calorífica es relevante conocer el momento en el que la muestra entra en contacto con el nitrógeno, y la masa total en ese momento, que de igual forma será la masa del nitrógeno más la de la muestra.

El siguiente momento clave en el experimento es cuando la muestra alcanza el equilibrio térmico con el nitrógeno. Es necesario hallar el momento en el que esto ocurre pues este dato se usará en el cálculo de la capacidad calorífica. Para encontrar este momento se tiene en cuenta que mientras la temperatura de la muestra baja para alcanzar la del nitrógeno, el ritmo al que la masa total cambia es considerablemente mayor al que se tenía cuando la muestra no había ingresado al nitrógeno, y al que se tendrá una vez se alcance el equilibrio térmico (que será la misma tasa de antes). De esta manera, se acude de nuevo al cálculo de las derivadas numéricas de los datos. En este caso, se evaluarán constantemente (a partir del momento en el que la muestra toque el fondo del vaso) los valores de las derivadas hasta que se detecte que estas han vuelto a estar en un rango pequeño alrededor del valor de las derivadas que se tenían antes de que la muestra ingresara.

Una vez se ha alcanzado el equilibrio térmico, y se ha detectado con éxito, el experimento básicamente ha concluido. Sin embargo, con el fin de tener datos luego de este equilibrio para realizar una regresión y hallar la capacidad calorífica, el programa seguirá tomando datos por otros 20 segundos (el dT definido antes), y entonces sí terminará la toma de datos. Hecho esto, el .py hará regresiones sobre los datos recolectados, utilizando la información de los tiempos de sumergimiento y equilibrio térmico que detectó, para así calcular el valor de la capacidad calorífica de la muestra que se usó. Entonces, solo queda 'desmontar' el experimento para que pueda ser usado de nuevo, por lo que el arduino hará que el motor suba la muestra a su posición inicial, para luego pedirle al usuario que retire el nitrógeno de la balanza, y entonces bajará de nuevo la muestra para que el usuario pueda disponer fácilmente de ella. Además, en lo que la muestra baja, se enseña el valor hallado de la capacidad calorífica en la pantalla LCD, y se muestra una gráfica final con todos los datos recolectados y las regresiones calculadas, concluyendo así finalmente el experimento.

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para comprobar el funcionamiento del proyecto se realizaron múltiples pruebas con distintos materiales. En la figura 3 se muestran los datos recolectados en una de estas pruebas cuando se usó una muestra de aluminio.

En la mayoría de pruebas realizadas se obtuvieron valores de capacidad calorífica cercanos a los que se encontraron para esos mismos materiales cuando se realizó el experimento manualmente, todas con errores por debajo

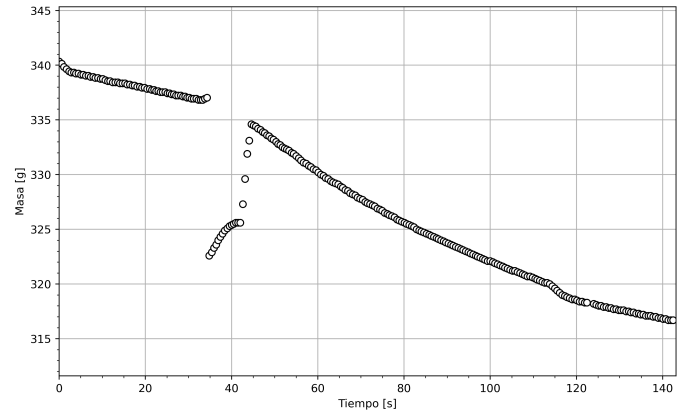


Figura 3: Gráfica de los datos tomados en tiempo real, para la muestra del aluminio.

del 15%. En el caso de la muestra de aluminio, se obtuvo, en el mejor caso, un valor de la capacidad calorífica de $c = 18,24 \pm 0,53$, valor que cuenta con un error respecto al valor teórico dado por la teoría de Debye de 2%. La última gráfica generada por el programa, con las regresiones calculadas, se muestra en la figura 4.

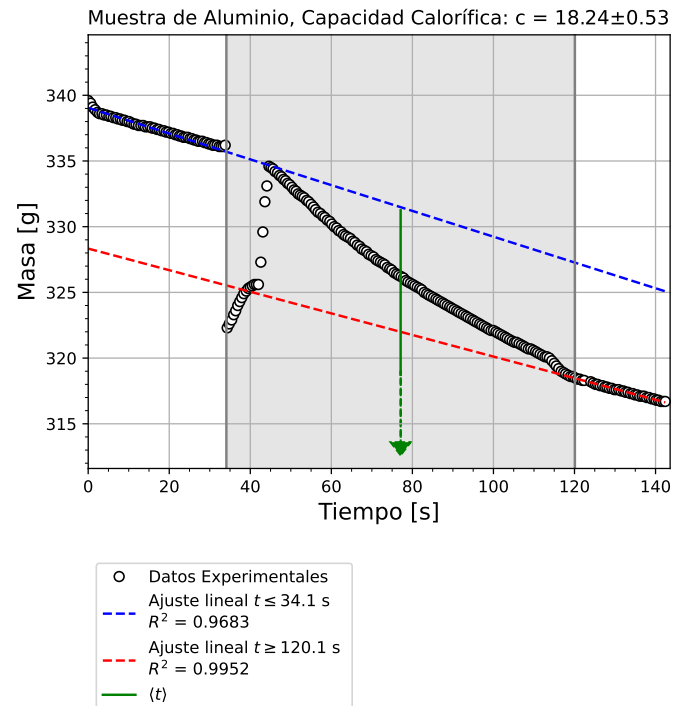


Figura 4: Gráfica generada automáticamente al finalizar el experimento. Se ven las regresiones utilizadas, sus valores R^2 , y el valor de c hallado.

IV. PROBLEMAS Y CONCLUSIONES

Se presentaron diversos problemas en el desarrollo del proyecto, entre ellos está el recalentamiento del regulador L7805 causado por la permanente conexión de la fuente externa con el motor. Esto se solucionó notando que el motor sólo necesitaba estar conectado a la fuente cuándo se necesitara su funcionamiento, es decir solo cuando la muestra suba o baje; entonces, se conectó el motor a la alimentación externa con un transistor de por medio, el cual se conectó a su vez al Arduino, de modo que desde allí se podía controlar el paso de corriente solo cuando se necesitara la subida o bajada de la muestra.

Otro problema presentado se debió al hecho de que la muestra permaneciera sin tocar la balanza durante la primera parte del experimento y debido a esto, al ser posteriormente sumergida en el nitrógeno, los datos aumentan repentinamente ocasionando que el cambio en masa no sea el real. Esto se arregló sumándole a los datos anteriores al momento en el que se sumerge la muestra, la masa de esta; aún así, el cambio de masa ocasionado por la entrada de la muestra en el nitrógeno hasta que esta toca el fondo es difícilmente predecible, ya que depende mucho del material de la muestra y de su volumen, por lo que la gráfica en ese momento no será continua. Esto no afecta el cálculo de la capacidad, pero podría ser solucionado de alguna forma, por ejemplo estableciendo un volumen inicial del nitrógeno siempre igual, y tomando datos de

este sumergimiento para intentar hacer un ajuste sobre ellos, y usar esto para modificar los datos de la masa en esos instantes.

El último problema que se tuvo fue el de hallar el momento en que la muestra llegaba a la misma temperatura del nitrógeno. Esto se resolvió calculando las derivadas de los datos desde el momento en que la muestra llegaba al fondo del vaso, verificando constantemente si estas derivadas habían vuelto a estar en un rango pequeño alrededor del valor de las derivadas que se tenían antes de que la muestra ingresara, momento en el cual se podía concluir que se había alcanzado el equilibrio térmico.

En conclusión, se logró construir un circuito y un código asociado para automatizar gran parte de un experimento para encontrar la capacidad calorífica de diversos materiales utilizando nitrógeno líquido. El programa diseñado se evaluó usando muestras de distintos materiales, generando gráficas como la mostrada en la figura 4, y se hallaron valores de capacidad calorífica cercanos a los encontrados realizando el mismo experimento de manera manual, la mayoría con errores relativos respecto a los valores esperados teóricamente de menos del 18%. Esto es de resaltar pues se logra obtener valores muy cercanos a los esperados igual que antes, pero con una reducción significativa en el tiempo que conlleva la realización del experimento. Así, el circuito y programas diseñados cumplen con el objetivo planteado inicialmente de manera satisfactoria.

-
- [1] S. H. Simon, *The Oxford Solid State Basics*, ch. 2, pp. 7–10. Oxford University Press, 2013.
 - [2] K. Krane, *Modern Physics*, ch. 11, pp. 334–338. John Wiley & Sons, INC., 2012.
 - [3] R. Resnick, D. Halliday, and K. Krane, *Physics*, vol. 1, ch. 23, pp. 523–526. John Wiley & Sons, INC., 2002.
 - [4] “Hx711 24-bit analog-to-digital converter (adc) for weigh scales.” https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf.
 - [5] “Using i2c: True digital to analog conversion on the arduino uno.” <https://techexplorations.com/guides/arduino/peripherals/i2c-pcf8591/>.
 - [6] “Uln2001a-uln2002a-uln2003a-uln2004a seven darlington arrays.” <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/25575/STMICROELECTRONICS/Uln2003.html>.
 - [7] “Arduino digital weight scale hx711 load cell module.” <https://www.viralsciencecreativity.com/post/arduino-digital-weight-scale-hx711-load-cell-module>.
 - [8] “Curso arduino - stepper motor.” https://github.com/johannperez/cursoArduinoJohannPerez/tree/main/Clase%2034/Clase_34_Stepper.
 - [9] “Todo sobre el sensor de peso con arduino.” https://www.electroallweb.com/index.php/2022/11/02/todo-sobre-el-sensor-de-peso-con-arduino/#CONEXIONES_DE_LOS_DISPOSITIVOS.
 - [10] “Strain gauge/load cell and how to use them to measure weight.” https://www.youtube.com/watch?v=1WFiKMSB_4M.