

# Sistema de Flujo Controlado por Masa

Juan Pablo Castillo <sup>1</sup>, Danilo Fernández <sup>2</sup>, Daniel Santiago Martínez<sup>3</sup>, Dylan Mateo Zambrano <sup>4</sup>

## Abstract

Se construyó una balanza que funciona mediante una galga extensiometrífica, o un sensor de deformación que funciona variando la impedancia a medida que el material se deforma. Este sensor se conecta a un módulo HX711 que completa un puente de wheatstone utilizando las impedancias del sensor, transforma los datos análogos a digitales y los envía mediante comunicación serial a un computador utilizando un Arduino. Adicionalmente, se construyó una bomba de agua que transporta líquido de un contenedor a otro. También se establecieron varias estrategias de control con el fin de detener el flujo una vez se tiene un volumen deseado

## Keywords

Balanza — Sensor — Masa y Volumen — Calibración con múltiples puntos — Flujo — Control

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica, Universidad de los Andes

## Contents

Datasheet	1
1 Calibración	1
2 Instrucciones de uso	1
2.1 Uso de la balanza	1
2.2 Uso del sistema de dosificación de agua	2
3 Diagrama Circuital	4
4 Identificación de Partes	4
4.1 Balanza	4
4.2 Bomba de agua	5
5 Especificaciones Técnicas	5
6 Caracterización de mediciones	6
6.1 Balanza	6
6.2 Bomba de agua	7
7 Funcionamiento dosificación de agua	8
References	8

## 1. Calibración

Se calibró la balanza utilizando el método de múltiples puntos con el fin de ajustar la curva a diferentes niveles de masa. Para la linealización de las medidas se hicieron trece medidas de masa en un rango de 0g a 1000g, el resultado de la linealización fue el siguiente:

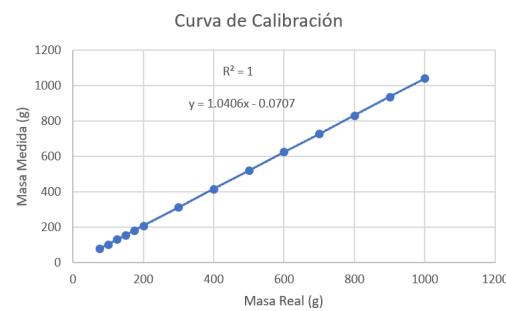


Figure 1. Curva de calibración de la balanza

Se puede apreciar que para corregir el valor se debe modificar el valor dado por el sensor para el ajuste de la pendiente de la recta. Para ello se multiplica por 1.040g y se resta 0.070g. El ajuste de la recta presenta un valor de  $R^2 = 1$ . La medida del peso "real" se hizo con la balanza del laboratorio ML06 de la Universidad de los Andes.

## 2. Instrucciones de uso

### 2.1 Uso de la balanza

Para utilizar la balanza de manera correcta, se debe conectar el Arduino Uno de la manera que se indica en la imagen a continuación.

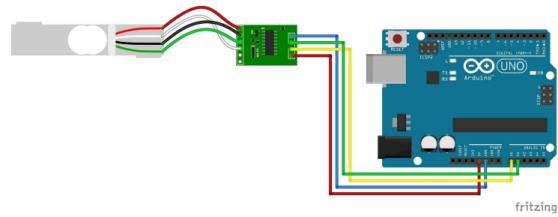
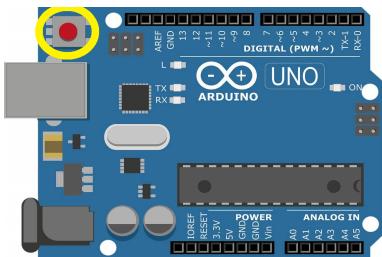


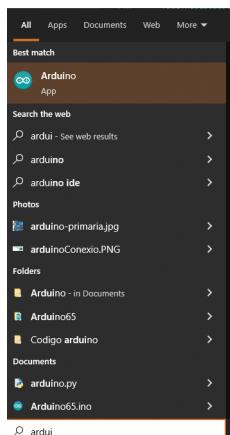
Figure 2. Diagrama de Conexión

1. Se debe poner la balanza en un sitio estable y sin irregularidades ni inclinaciones.
2. Cuando la balanza no tenga ningún peso encima, se debe oprimir el botón de reset del arduino mostrado en la imagen a continuación.



**Figure 3.** Botón Reset de Arduino

3. Una vez el arduino fue reiniciado con éxito, se espera 5 segundos y se abre el IDE de arduino en un computador, el IDE se puede encontrar utilizando el buscador de Windows y escribiendo "Arduino".



**Figure 4.** Busqueda para el IDE de arduino

4. Se abre el IDE, y se busca el botón mostrado a continuación en la parte superior izquierda de la ventana de arduino con el fin de abrir el monitor serial.



**Figure 5.** Busqueda para el IDE de arduino

5. Una vez se abre el monitor serial, se puede ver el peso del objeto sobre la balanza en el monitor serial. La respuesta de la balanza debe verse como la imagen a continuación

```
::: Universidad de los Andes :::
::: Instrumentación Electrónica - 2210:::
-: Balanza de instrumentación :-
Factor Cero: -31676
espere...
::: ¡BALANZA VACÍA! :::
espere...
... 3 ... 2 ... 1 ... 0
::: ¡Coloque un objeto! :::

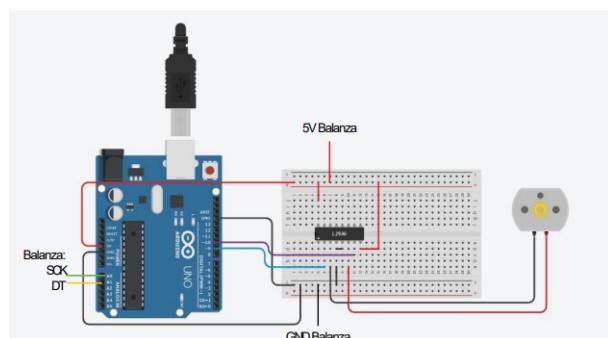
Midiendo: 0.0 g
Midiendo: 0.0 g
Midiendo:
```

**Figure 6.** Monitor Serie

## 2.2 Uso del sistema de dosificación de agua

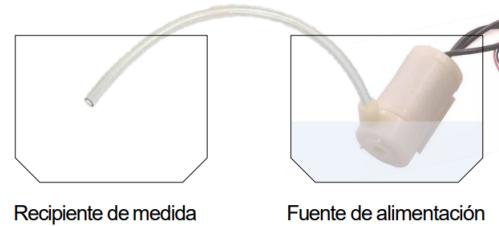
Se van a utilizar 3 elementos fundamentales: La mini bomba de agua sujetada a la manguera; dos envases y la balanza ensamblada anteriormente.

Antes de iniciar, se debe verificar que las conexiones del arduino uno, la balanza y la bomba de agua están de la siguiente manera:



**Figure 7.** Diagrama de conexión

1. El primer paso, luego de verificar que las conexiones están correctas, es verter agua en alguno de los dos envases.
2. A continuación se debe buscar un sitio sin muchas irregularidades para realizar el montaje mostrado a continuación:



Recipiente de medida      Fuente de alimentación

**Figure 8.** Montaje del sistema.

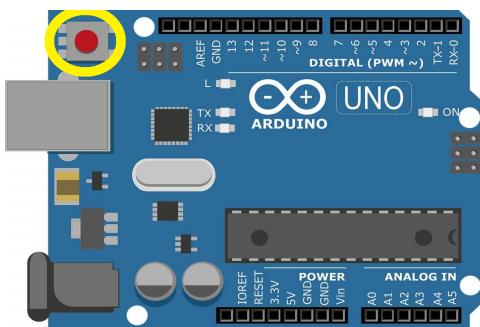
La fuente de alimentación es el envase en el cuál se vertió agua. Dentro de este se va a introducir la bomba

de agua de tal manera que la manguera alcance a sobresalir del agua lo suficiente como para que su salida se conecte con el recipiente de medida que se va a llenar. El recipiente de medida es el elemento que se va a llenar de agua, por ello, la manguera siempre debe apuntar hacia él mientras se efectúa el proceso de llenado. Este elemento se va a colocar encima de la balanza.



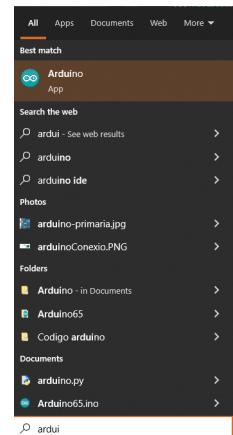
**Figure 9.** Manera correcta de colocar la manguera

3. Ahora, con el vaso encima de la balanza, se va a oprimir el botón reset de arduino, mostrado en la imagen a continuación.



**Figure 10.** Botón reset del arduino

4. Una vez el arduino fue reiniciado con éxito, se espera 5 segundos y se abre el IDE de arduino en un computador, el IDE se puede encontrar utilizando el buscador de Windows y escribiendo "Arduino".



**Figure 11.** Busqueda para el IDE de arduino

5. Se abre el IDE, y se busca el botón mostrado a continuación en la parte superior izquierda de la ventana de arduino con el fin de abrir el monitor serial.



**Figure 12.** Busqueda para el IDE de arduino

6. Ahora la balanza comienza su funcionamiento. Para ello, se tiene que dejar el recipiente en el cual se va a verter el agua encima. Esto es con el fin de que el punto cero sea el peso del envase y el único peso que cuente sea el del agua que se vierte.

```
::: Universidad de los Andes :::
::: Instrumentación Electrónica - 2210:::
-: Balanza de instrumentación :-
Factor Cero: -31676
espere...
::: ¡BALANZA VACÍA! :::
espere...
... 3 ... 2 ... 1 ... 0
::: ¡Coloque un objeto! :::

Midiendo: 0.0 g
Midiendo: 0.0 g
Midiendo:
```

**Figure 13.** Monitor Serie

En este caso la bomba deja de funcionar a los 250 ml, sin embargo, el valor en el cual se detiene la bomba se puede cambiar modificando la variable **volumenDeseados**.

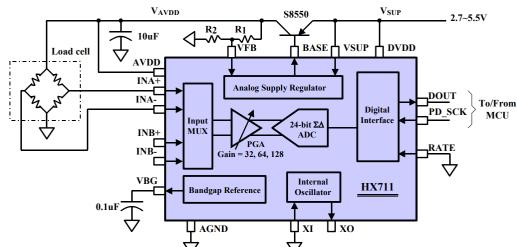
```

float calibration_factor = -104.16;
float units;
float volumenDeseado = 250; //en mL
float densidad = 1;

```

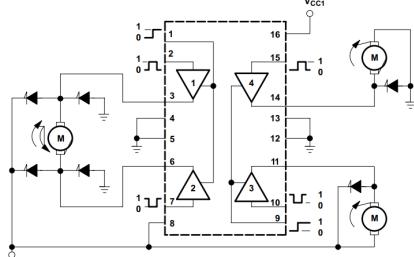
**Figure 14.** Variable volumenDeseado

### 3. Diagrama Circuitual



**Figure 15.** Diagrama circuitual de la balanza

1



**Figure 16.** Diagrama circuitual de la etapa de control de la bomba

2

La balanza está basada en un sensor resistivo que va conectado a unas resistencias en configuración puente de wheatstone con el fin de detectar un cambio de voltaje a medida que se agrega masa a la balanza. La salida del puente de wheatstone va a un multiplexor que selecciona cuál puente de wheatstone se va a leer (pues se puede leer dos cargas a la vez). La salida del multiplexor se amplifica utilizando con un amplificador con ganancia programable, se convierte a una salida digital mediante el ADC de 24 bits, se sincroniza con el reloj del arduino mediante un oscilador de cristal y se envían los datos hacia el mismo para ser mostrados en el monitor serial utilizando la interfaz digital del HX711.

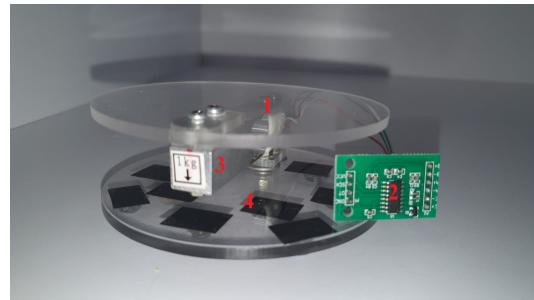
El reloj del HX711 tiene una salida con el fin de sincronizar otros equipos digitales que pueden ser incorporados en un sistema más amplio.

En cuanto al control del flujo de agua, se tiene la etapa de control de la bomba utilizando un puente H. La función

del puente H es encender los motores mediante modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar la velocidad del motor, que en términos prácticos controla el flujo de la bomba. A menor porcentaje de ciclo activo en señal PWM, menor flujo de agua. El comportamiento se describe más arriba en la sección [curva de calibración].

### 4. Identificación de Partes

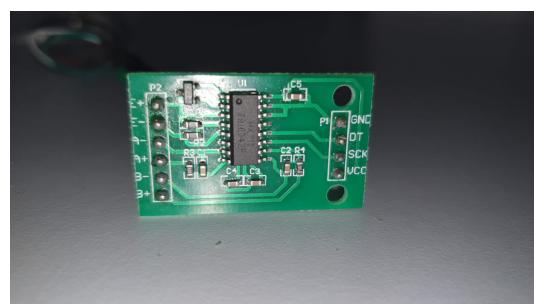
#### 4.1 Balanza



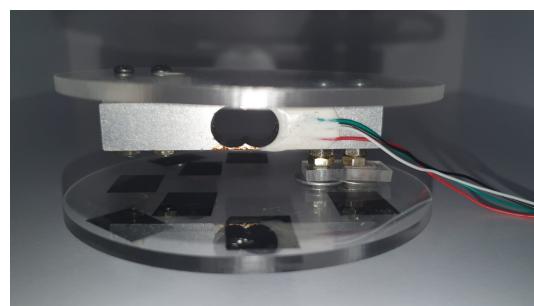
**Figure 17.** Foto del producto

A continuación se presentan las partes que componen la balanza, donde es posible observar que en la figura anterior están señaladas.

1. Placa donde se pone el peso.
2. Controlador HX711.
3. Galga extensiométrica.
4. Base.



**Figure 18.** Controlador HX711 de cerca



**Figure 19.** Galga extensiométrica de cerca

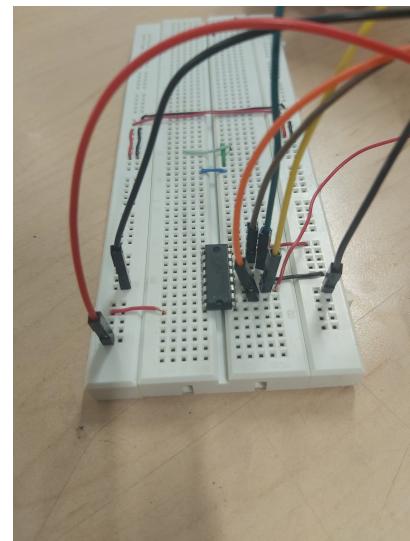
<sup>1</sup>Recuperado de: data sheet HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

<sup>2</sup>Recuperado de: Datasheet L293x Quadruple Half-H Drivers

## 4.2 Bomba de agua

A continuación se presentan las partes que componen la bomba de agua:

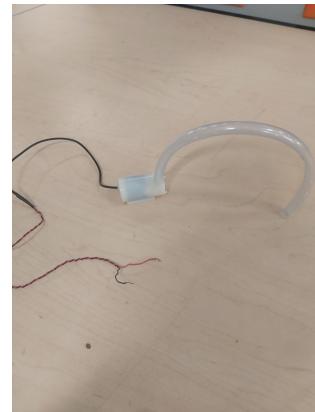
- Envases
- Puente H L293D
- Balanza
- Bomba de agua



**Figure 22.** Puente H



**Figure 20.** Envase de alimentación



**Figure 23.** Bomba de agua con manguera



**Figure 21.** Envase de medida

## 5. Especificaciones Técnicas

Especificaciones Técnicas		
Parametro	Valor Mínimo	Valor Máximo
Masa Soportada (g)	0	1200
Error en la medición (g)	-0.1	0.1
Tensión de Entrada al Arduino (V)	5	12
Bits de salida del HX711	-	24
Frecuencia del reloj (MHz)	1	20

**Figure 24.** Especificaciones técnicas

Considerando 24 bits de salidas del controlador HX711, así como un voltaje de alimentación de 5v, es posible calcular la resolución del dispositivo con la siguiente expresión:

$$r = \frac{F_s/2^{24}}{F_s} = \frac{5_v/2^{24}}{5_v} = 5.960464478 \cdot 10^{-8} \quad (1)$$

Adicionalmente, de manera experimental como se puede observar en las mediciones de la siguiente sección, la balanza

del presente informe permite una adecuada medición de objetos alrededor de 1,2kg, conservando un error relativo cercano al 0,016%.

En cuanto a la bomba de agua, se va a utilizar una minibomba de agua de 6V. Esta bomba tiene un diámetro exterior de 7.5 mm y un diámetro interno de 4.7 mm. Su diámetro exterior es de 24 mm, su largo es de 46 mm y su altura es de 33 mm.

Para su operación se va a utilizar un puente H L293D el cual es un monolítico integrado de alta corriente con cuatro canales perfecto para el control de motores y la conmutación de transistores. Este puente H puede utilizarse en procesos de conmutación de hasta 5 kHz.

## 6. Caracterización de mediciones

### 6.1 Balanza

Para la caracterización en cuanto al error relativo se realizaron cuatro pruebas de medición. Utilizando así, objetos medidos en la balanza de referencia del laboratorio MI06, contemplando que esta tiene un error absoluto de 0,1gr.

En primer lugar, se realizó la medición acumulada de objetos de alrededor de 250 gr obteniendo un error relativo promedio de 0,002%.

Medición 1 Acumulada			
Objeto	Peso	Referencia	Error relativo
Panela 4	263,2	263,2	0,000%
Panela 3	518,3	518,2	-0,019%
Panela 2	778,1	778,1	0,000%
Panela 1	1022,6	1022,7	0,010%

**Figure 25.** Medición acumulada de pesos de alrededor de 250 gr.

En segundo lugar, se realizó la medición acumulada de objetos de alrededor de 50 gr obteniendo un error relativo promedio de 0,029%.

Medición 2 Acumulada			
Objeto	Peso	Referencia	Error relativo
Bolsa 1	45,8	45,8	0,000%
Bolsa 2	91,6	91,6	0,000%
Bolsa 3	136,8	136,8	0,000%
Bolsa 4	179,2	179,1	-0,056%
Bolsa 5	221,4	221,2	-0,090%

**Figure 26.** Medición acumulada de pesos de alrededor de 50 gr.

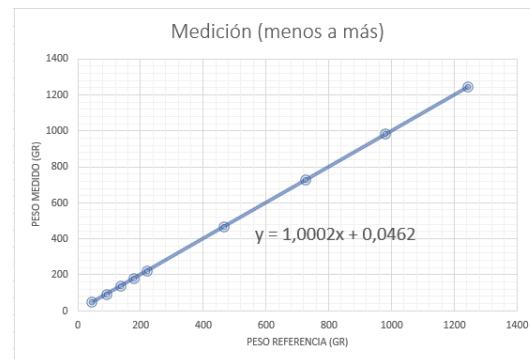
En tercer lugar, se realizó una histéresis iniciando por la acumulación de pesos de alrededor de 50 gr y la progresiva adición de pesos de 250 gr, obteniendo un error relativo promedio de 0,031%. En esta se puede observar que el peso

acumulado alcanza una medición adecuada aún superando 1,2 kg.

Medición 3 Acumulada (menos a más)			
Objeto	Peso	Referencia	Error relativo
Bolsa 1	45,8	45,8	0,000%
Bolsa 2	91,6	91,6	0,000%
Bolsa 3	136,8	136,8	0,000%
Bolsa 4	179,2	179,1	-0,056%
Bolsa 5	221,4	221,2	-0,090%
Panela 1	466	465,8	-0,043%
Panela 2	726	725,7	-0,041%
Panela 3	981	980,7	-0,031%
Panela 4	1244,1	1243,9	-0,016%

**Figure 27.** Medición acumulada de pesos en histéresis de pesos menores a mayores.

En la siguiente gráfica se graficaron las mediciones empleadas como referencia y los datos experimentales con el proceso planteado, se puede observar que la correlación entre estos datos es muy cercana en tanto a la proximidad de la pendiente a uno.



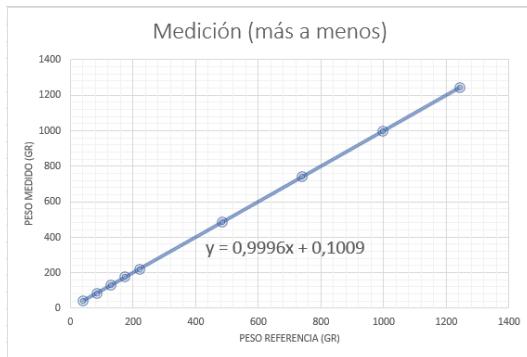
**Figure 28.** Medición acumulada de pesos en histéresis de pesos menores a mayores.

Finalmente, se realizó una histéresis iniciando con un peso acumulado con elementos de alrededor de 250 gr y 50 gr, retirando en cada iteración uno a uno en el orden descendente de la tabla. Se obtuvo un error relativo promedio de 0,18%.

Medición 4 Acumulada (más a menos)			
Objeto	Peso	Referencia	Error relativo
Inicial	1243,3	1243,9	0,048%
Panela 1	999,2	999,3	0,010%
Panela 2	739,3	739,4	0,014%
Panela 3	484,5	484,4	-0,021%
Panela 4	221,3	221,2	-0,045%
Bolsa 1	175,4	175,4	0,000%
Bolsa 2	129,7	129,6	-0,077%
Bolsa 3	84,4	84,4	0,000%
Bolsa 4	42	42,1	0,238%

**Figure 29.** Medición acumulada de pesos en histéresis de pesos mayores a menores.

En la siguiente gráfica se graficaron las mediciones empleadas como referencia y los datos experimentales con el proceso planteado, se puede observar que, al igual que en el anterior set de mediciones, la correlación entre estos datos es muy cercana en tanto a la proximidad de la pendiente a uno.



**Figure 30.** Medición acumulada de pesos en histéresis de pesos mayores a menores.

Es posible considerar una histéresis muy reducida e incluso despreciable en tanto es poco significativo para la medición del peso mediante la utilización del instrumento diseñado.

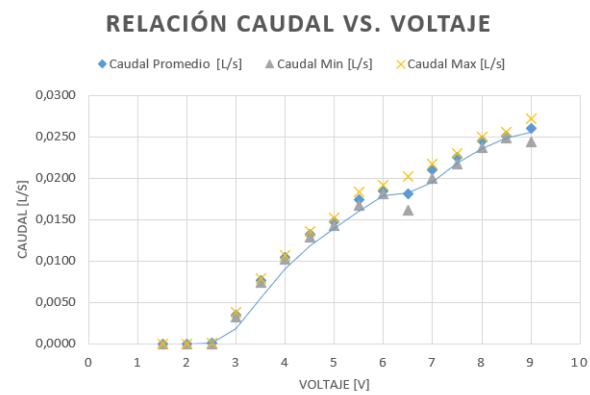
## 6.2 Bomba de agua

Para la realización de la curva de caracterización de la bomba de agua se recolectaron datos de caudal promedio efectuando tres mediciones por cada nivel de voltaje desde 1.5 V hasta 9 V en pasos de 0.5 V. A continuación se muestra la tabla con los resultados de las mediciones:

Recolección de datos				
Voltaje [V]	Caudal Promedio [L/s]	Caudal Min [L/s]	Caudal Max [L/s]	Caudal medido [L/s]
1,5	0,0000	0	0	0
2	0,0000	0	0	0
2,5	0,0000	2E-17	0,0001	2E-17
3	0,0035	0,0032	0,0038	0,0032
3,5	0,0076	0,0074	0,0078	0,0074
4	0,0105	0,0102	0,0107	0,0102
4,5	0,0132	0,0128	0,0135	0,0135
5	0,0147	0,0142	0,0152	0,0142
5,5	0,0174	0,0167	0,0183	0,0171
6	0,0184	0,0181	0,0191	0,0181
6,5	0,0180	0,0161	0,0202	0,0178
7	0,0210	0,0217	0,0217	0,0213
7,5	0,0225	0,0217	0,023	0,0217
8	0,0245	0,0237	0,025	0,0249
8,5	0,0251	0,0248	0,0255	0,0248
9	0,0260	0,0244	0,0272	0,0264

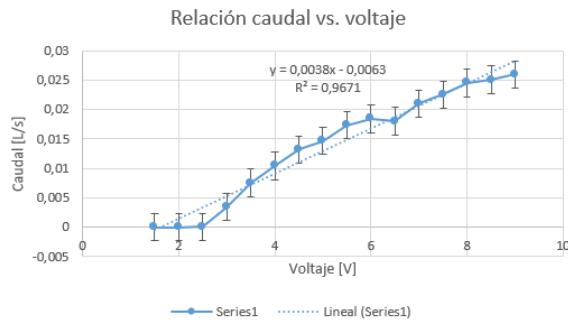
Para esto, por cada nivel de voltaje entre 1.5 V y 9 V, se hicieron mediciones de tiempo junto con el peso medido por la balanza en cada uno de los instantes para caracterizar el cambio del volumen con respecto al tiempo. Los datos de estas mediciones se utilizaron para calcular el caudal de cada una de las pruebas.

A continuación se muestra la curva de caracterización conseguida mediante este procedimiento:

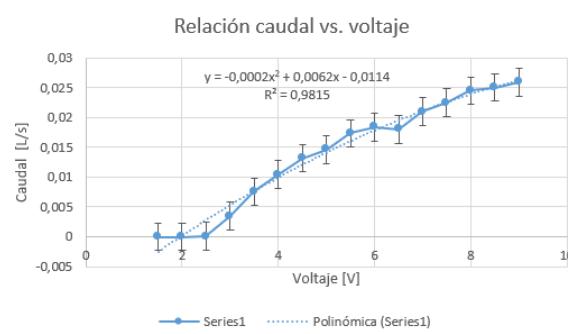


**Figure 31.** Curva de caracterización

La curva mostrada es la representación del voltaje en voltios versus el caudal en litros sobre segundo. Se pude ver que la curva no parece comportarse de manera lineal. Se puede observar que al final, esta curva parece tender a llegar a un punto de saturación en el cual el motor no puede girar más rápido a pesar del voltaje que se le aplique. Debido a la elevada corriente en niveles de voltaje muy altos, esta bomba de agua se puede quemar. También se puede observar una zona muerta que se encuentra en el rango entre 1.5 V y 2.5 V. En esta zona, el voltaje no es lo suficientemente elevado como para arrancar el motor. El primer dato en el cual el motor comienza a funcionar es a los 3V.



**Figure 32.** Ajuste Lineal



**Figure 33.** Ajuste polinómico

Se intentaron realizar ajustes a la curva (polinómico y lineal), no obstante, estos ajustes no encajaron en la gráfica.

- $600 \text{ ml} \leq \text{Volumen deseado} \leq 1000 \text{ ml}$ : Para este rango, el último porcentaje toma un valor de 98,5% y opera de la misma manera como se explica en el primer párrafo de esta sección.

## References

- 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales HX711, recuperado de: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf)
- L293x Quadruple Half-H Drivers, Recuperado de: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf>

## 7. Funcionamiento dosificación de agua

Para la dosificación de agua, se definieron los siguientes intervalos con respecto al volumen deseado. En cada intervalo se explica la modificación del control para cada rango. Sin embargo, el funcionamiento general consiste en la determinación del 40%, 60%, 80% y 97%, modificando el Var (el valor enviado de PWM al motor) que varía la potencia de funcionamiento de la bomba, iniciando en 1023. Este valor Var, se ajusta al porcentaje del volumen deseado que alcanzó, en la proporción 100% - porcentaje alcanzado de volumen deseado %. Así mismo, al lograr el 80% del volumen objetivo, en cada iteración de la medición el valor Var, decrece en 12. Finalmente, al alcanzar el 97% del volumen deseado o valores negativos, el PWM toma un valor de 0.

- Volumen deseado  $\leq 25 \text{ ml}$ : Para este rango, la variable Var, inicia en 300 y opera de la misma manera como se explica en el primer párrafo de esta sección.
- $25 \text{ ml} \leq \text{Volumen deseado} \leq 100 \text{ ml}$ : Para este rango, la variable Var, inicia en 512 y opera de la misma manera como se explica en el primer párrafo de esta sección.
- $300 \text{ ml} \leq \text{Volumen deseado} \leq 600 \text{ ml}$ : En este intervalo, el funcionamiento es tal como se explica, sin la realización de ninguna variación.