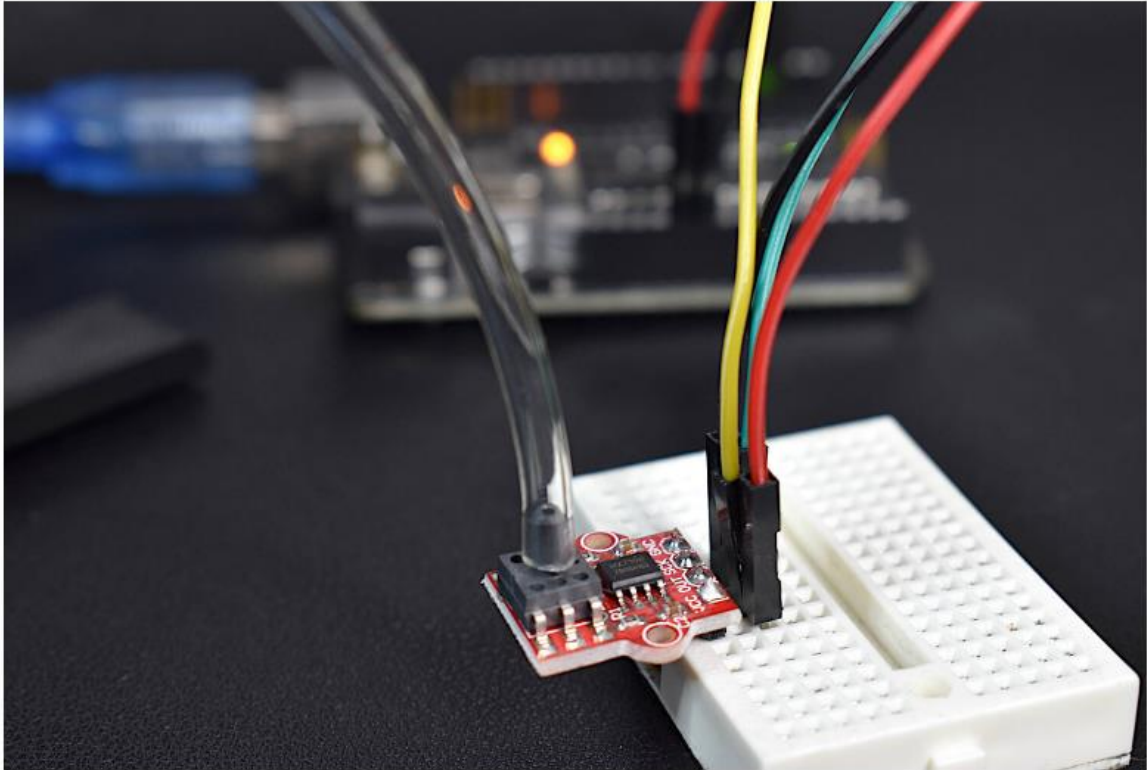


## Calibración del sensor de presión MPS20N0040D con Arduino

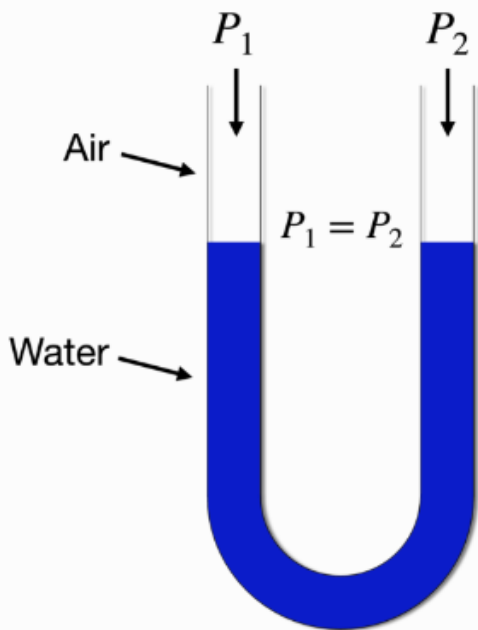


La presión se define como una fuerza distribuida uniformemente que actúa sobre una superficie con un área determinada. La medición precisa de la presión es esencial para aplicaciones que van desde pruebas de materiales hasta básculas, predicción de altitud de aeronaves y evaluación de funciones biológicas en humanos relacionadas con la respiración y el flujo sanguíneo [lea más sobre la medición de presión aquí]. En este tutorial, se usará un transductor de presión digital y un manómetro de presión analógico para medir la presión manométrica, donde el manómetro analógico se usa como herramienta de calibración para el sensor de presión digital. Se usará Arduino para leer el transductor de presión digital, un MPS20N0040D, y se usará un manómetro impreso en 3D para medir la presión analógica manualmente. Se demuestra la simplicidad y confiabilidad de un sistema analógico, junto con la facilidad de un sistema digital. Los sensores digitales a menudo se calibran con instrumentos analógicos, y la razón se vuelve evidente en los experimentos que siguen.

## Fondo del sensor de presión

Los sensores de presión funcionan bajo una variedad de principios físicos diferentes que incluyen: densidad y gravedad del fluido, piezoelectricidad, piezorresistividad, capacitancia eléctrica y resistividad eléctrica. El sensor de presión MPS20N0040D utilizado aquí tiene muy poca documentación y, por lo tanto, se desconoce su transducción eléctrica (conversión de presión a señal eléctrica). Es probable que utilice un elemento piezorresistivo como ocurre con muchos otros transductores de presión de bajo costo [consulte la serie MPR de Honeywell o los sensores MPXV700xxx de NXP Semiconductors, ambos piezoresistivos]. No es necesario conocer el método a través del cual funciona el sensor de presión, siempre y cuando conozcamos la sensibilidad y el rango del fabricante del sensor.

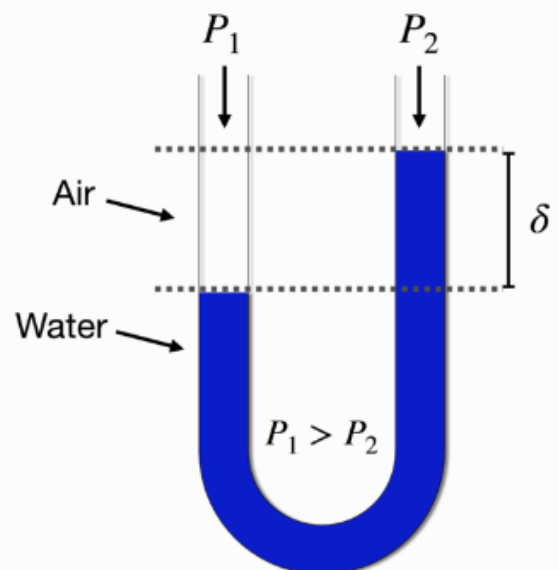
Ficha técnica del sensor MPS20N0040D consta de tres páginas de descripción e imágenes de baja calidad que no nos dice mucho sobre el comportamiento real del sensor, ni brinda información valiosa sobre las curvas de respuesta o información de calibración. Por ejemplo, la hoja de datos afirma que el rango de presión es de 0 a 40 kPa, pero también afirma 5,8 psi (correcto) Y 580 psi (incorrecto). La hoja de datos continúa indicando que el sensor tiene una compensación de voltaje de  $\pm 25$  mV y una salida de voltaje de escala completa de 50 mV - 100 mV. ¿Cuál es? 50mV o 100mV? Y si son ambos, ¿cuál es el calificador? El desplazamiento generalmente se asocia con el punto cero del rango de detección, por lo que quizás el rango sea de 50 mV (0 mV - 50 mV). El rango de voltaje y el rango de presión de operación son esenciales para interpretar la respuesta digital de un sensor y aproximarse a un valor de presión analógico. Por lo tanto,



Manómetro de tubo en U  
en equilibrio

El manómetro está en equilibrio en el manómetro de arriba porque el nivel del agua entre los lados izquierdo y derecho son equivalentes, lo que significa que sus presiones son las mismas en  $P_1$  y  $P_2$ . Si tuviéramos que ejercer una presión mayor en  $P_1$ , el manómetro se comportaría como se muestra a continuación:

Manómetro de tubo en U  
a presiones desiguales



La visualización anterior muestra que cuando se aplica una presión mayor en  $P_1$ , los niveles de agua cambian a lo largo del manómetro de tubo en U. Usando el principio de Bernoulli para fluidos incompresibles en dos puntos de medición diferentes, la relación entre la presión y la altura diferencial  $\delta$  se puede derivar para el escenario de un manómetro de tubo en U:

$$P_i + \frac{1}{2}\rho_i v_i^2 + \rho_i g h_i = P_j + \frac{1}{2}\rho_j v_j^2 + \rho_j g h_j$$

donde  $P$  es una medida de presión en un punto dado,  $\rho$  es la densidad de cada fluido,  $g$  es la aceleración debida a la gravedad,  $v$  es una velocidad (suponiendo cero en este caso), y  $h$  es la altura del fluido con respecto a nivel del suelo (definiendo su energía potencial). Los subíndices  $i, j$  simplemente representan dos puntos dados en el mismo continuo. Bajo el supuesto de que no hay velocidad, la ecuación anterior se simplifica a lo siguiente:

$$P_i + \rho_i g h_i = P_j + \rho_j g h_j$$

La siguiente suposición es que para la mayoría de los manómetros de tubo en U,  $P_2$  está abierto a la atmósfera. Así, usando la ecuación anterior, y asumiendo que debajo del punto  $\delta$  las presiones son iguales, surge la siguiente relación para la presión aplicada:

$$P_1 - P_0 = (\rho_2 - \rho_1)g\delta$$

La presión atmosférica se define aquí como  $P_0$ . Esta diferencia de presión también se puede escribir como presión manométrica, que simplemente se escribirá como  $P$  en el futuro:

$$P = (\rho_2 - \rho_1)g\delta$$

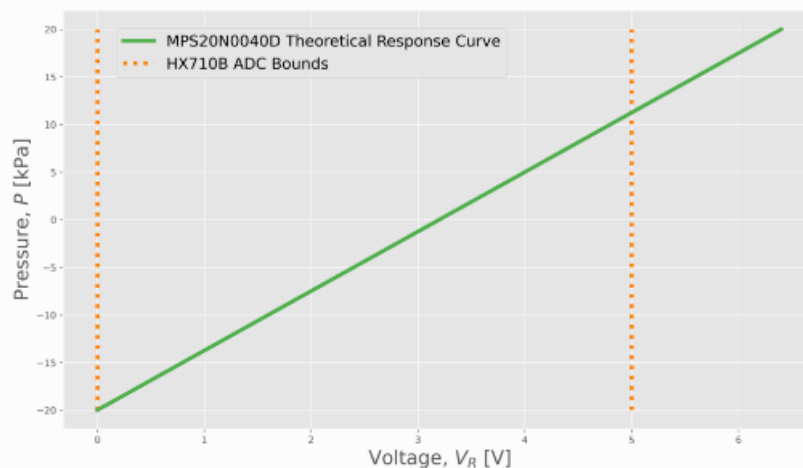
Esta es la definición estándar de medición de presión utilizando un manómetro de tubo en U. La altura del líquido,  $\delta$ , se puede medir fácilmente con un micrómetro o una regla con una medida precisa de la distancia. Las densidades también se pueden aproximar por sus valores estándar (e incluso a temperatura y presión específicas para una mayor precisión). Por último, una aproximación más precisa de la aceleración debida a la gravedad también puede dar como resultado un mayor rendimiento de un manómetro.

#### Transductor de presión MPS20N0040D

El MPS20N0040D, como se mencionó anteriormente, es un transductor de presión manométrica que se aproxima a la presión,  $P$ , dada en la última ecuación anterior. No hay mucho que decir sobre este sensor en este momento, ya que la hoja de datos es terriblemente vaga e indirecta. Por lo tanto, se supone que el MPS20N0040D en el futuro responde a 40kPa en un rango de 50mV. El sensor que se usa aquí está conectado a un Hx710B, que es un convertidor de analógico a digital (ADC) de 24 bits y un amplificador de señal con una amplificación establecida de 128. Por lo tanto, al aplicar 5 V al sensor, obtenemos una respuesta posible de 0V - 6,4V. Bajo el supuesto de linealidad (común para transductores de presión), la respuesta del MPS20N0040D se puede aproximar utilizando una relación de pendiente e intercepción entre la señal eléctrica y la presión medida:

$$P = \frac{V_R}{S} + \frac{b}{S}$$

donde el voltaje emitido por el sensor de presión,  $V_R$ , oscila entre 0 V y 6,4 V. La variable  $S$  es la sensibilidad del sistema, que se supone que es de 50 mV/40 kPa según la hoja de datos, y  $b$  es la compensación de CC que se supone que es de +25 mV. El HX710B limita la respuesta a 5V, por lo que el rango efectivo es limitado como tal. La respuesta teórica del MPS20N0040D se representa en la siguiente figura:

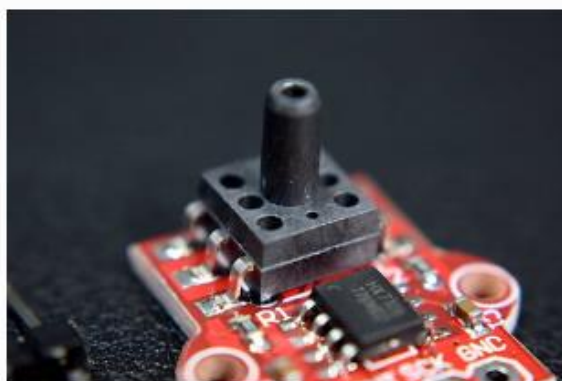


En la observación del gráfico anterior, el rango de trabajo del transductor de presión se puede aproximar entre -20 kPa y 12 kPa. Esta es la respuesta esperada registrable por el ADC. Es probable que esto no sea correcto debido a la naturaleza muy vaga de la hoja de datos; sin embargo, eso se determinará más adelante en este tutorial mediante la calibración con el manómetro analógico. En la siguiente sección, se presentará el diagrama de cableado y la lista de piezas para tomar medidas con una placa Arduino y un manómetro.

## Lista de piezas y configuración experimental

Los componentes principales utilizados en este experimento son la placa de conexiones MPS20N0040D y un manómetro analógico. Sin embargo, dado que se utilizan aire y agua, también se requieren algunos accesorios y tuberías. Por lo tanto, la lista de piezas y la configuración para el cableado y la configuración se enumeran a continuación como una forma de demostrar la repetibilidad de este experimento:

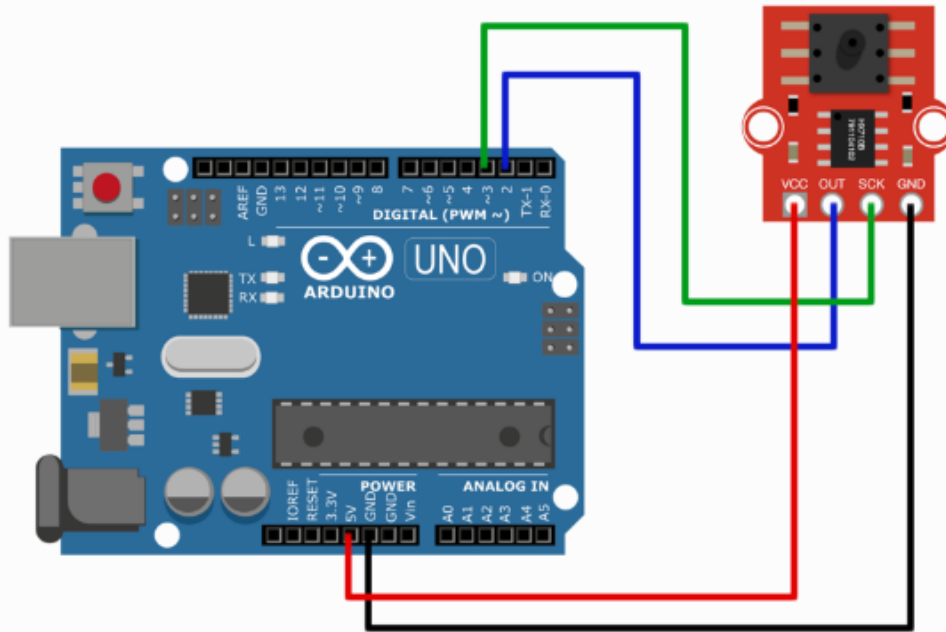
- MPS20N0040D Placa de conexión del sensor de presión con puerto
- Manómetro analógico de tubo en U -
- Tablero Arduino Uno
- Tubo acrílico de 2,5 mm (ID) x 4 mm (OD)
- Accesorio en T de 4 mm
- Mini Protoboard
- 4 cables puente
- Calibrador digital (6 pulgadas)
- Válvula de empuje de 4 mm
- Kit de jeringas múltiples para tubo ID de 2,5 mm
- Computadora Raspberry Pi 4



MPS20N0040D Placa de conexión del sensor de presión con puerto

\$12.00

El cableado entre el transductor de presión MPS20N0040D y la placa Arduino también se muestra a continuación:



El código Arduino utilizado para leer el MPS20N0040D se proporciona a continuación:

```
/*
Mediciones de presión con La placa de
conexión MPS20N0040D
con el voltaje de suministro HX710B/HX711 ADC
5V
*/
#include <QHX711.h>

const byte MPS_OUT_pin = 2 ; // OUT data pin
const byte MPS_SCK_pin = 3 ; // pin de datos de reloj
int avg_size = 10 ; // #pts para promediar sobre

QHX711 MPS20N0040D(MPS_OUT_pin, MPS_SCK_pin); // inicia La comunicación con el HX710B

configuración vacía () {
  Serial.begin( 9600 ); // iniciar el puerto serie
}

bucle vacío () {
  float avg_val = 0.0 ; // variable para promediar
  for ( int ii= 0 ;ii<avg_size;ii++){
    avg_val += MPS20N0040D.read(); // agregar varias lecturas de ADC
    delay( 50 ); // retraso entre lecturas
  }
  valor_promedio /= tamaño_promedio;
  Serial.println(avg_val, 0 ); // imprime el promedio
}
```

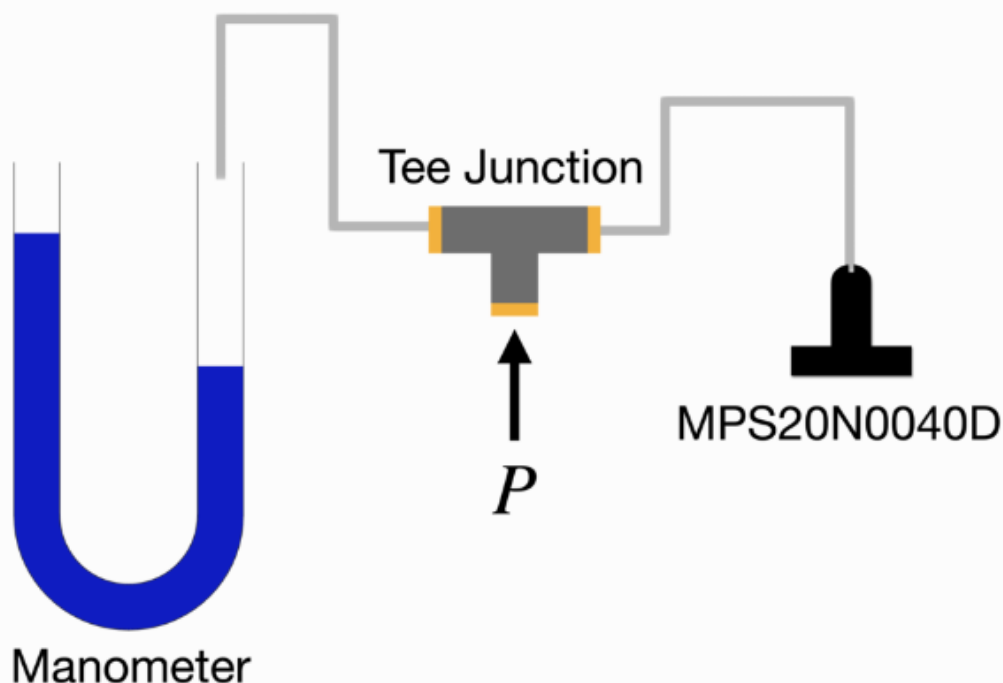
El código anterior simplemente promedia más de 10 lecturas de ADC de la placa de conexión MPS20N0040D y las envía al puerto serie. Esto permitirá la calibración de la salida del sensor en términos de la lectura de presión del manómetro.

### Configuración experimental

El manómetro y el sensor MPS20N0040D se conectarán a través de una configuración de tubería de presión de aire, donde se usará una unión en T para que se puedan aplicar diferentes presiones. También se recomienda utilizar una válvula o una jeringa para mantener constante la presión durante las mediciones. A continuación se muestra un diagrama de conexión de presión de aire simple con todos los componentes:



## Air Pressure Connection Diagram



La presión incidente,  $P$ , puede ser cualquier aplicación de presión: una bomba de bicicleta, respiración de los pulmones, una jeringa, una bomba de aire electrónica, etc. - el método para aumentar y disminuir la presión del aire en la unión en T no es importante. El requisito principal es que la presión debe ser lo suficientemente estática para medir mediciones consistentes y estables tanto a la altura de la columna del manómetro como a la señal digital del transductor.



## Calibración del transductor MPS20N0040D

El sensor de presión MPS20N0040D debe conectarse a la placa Arduino y conectarse al tubo de unión en T. El manómetro también debe conectarse a la unión en T. Y finalmente, el método elegido de aplicación de presión debe conectarse a la última entrada en la unión en T. El método de calibración implica variar la entrada de presión para cambiar la altura de la columna de agua en el manómetro de tubo en U. Esto nos permitirá registrar las medidas del manómetro (un calibrador es una medida precisa de la altura de la columna) y usar esas medidas de presión para ajustar la respuesta de voltaje del MPS20N0040D .

A continuación se muestra un video de demostración de la presión de entrada que afecta la altura de la columna de agua en el manómetro, así como la lectura en el MPS20N0040D :

<https://www.youtube.com/watch?v=myXmheqcO-s&list=TLGG05OOLnFihvUyODEyMjAyMg>

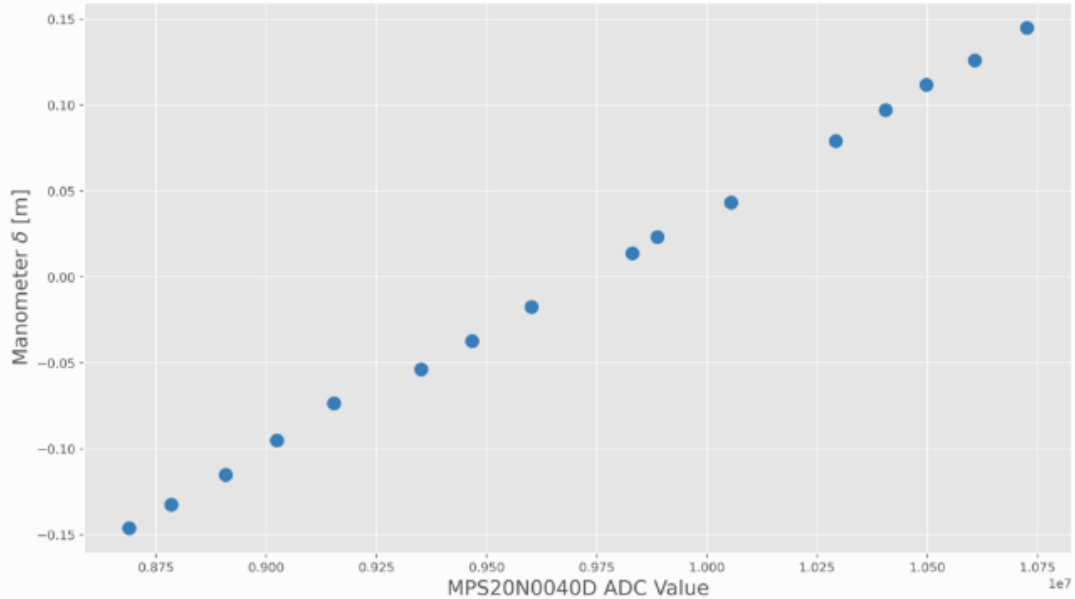
El proceso de calibración básico para el MPS20N0040D es similar al descrito en este documento . Esencialmente, la altura de la columna de agua en el manómetro debe variarse de manera que los diferentes valores puedan aproximarse a diferentes presiones, tanto positivas como negativas (empuje y succión). Aquí se utiliza una jeringa para cambiar la altura de la columna de agua del manómetro, así como una válvula de bola para evitar fugas de presión. Por lo tanto, las mediciones en diferentes valores de ADC del MPS20N0040D se pueden registrar junto con diferentes alturas de nivel de columna (medidas por el calibrador).

A continuación se muestra otro video de demostración del proceso de calibración, donde la válvula está cerrada y mantiene estable la altura de la columna del manómetro para tomar las medidas adecuadas:

<https://www.youtube.com/watch?v=rm9B6BWh3qs&list=TLGG2BP4s6W5bZMyODEyMjAyMg>

Después de tomar varios puntos de datos (tomamos alrededor de 8 negativos y 8 positivos), podemos observar la relación entre el valor ADC y la aproximación de la presión del manómetro.

Usando los 16 puntos de calibración adquiridos de las lecturas del ADC digital de la altura de la columna de agua del manómetro, los puntos se pueden graficar uno contra el otro para llegar a lo siguiente:



Y este es un resultado increíblemente importante. Tal como se esperaba, la respuesta digital del transductor de presión se relaciona linealmente con la altura de la columna del manómetro bajo presiones de entrada variables. Volviendo a la relación de presiones en función de la altura de la columna:

$$P = (\rho_2 - \rho_1)g\delta$$

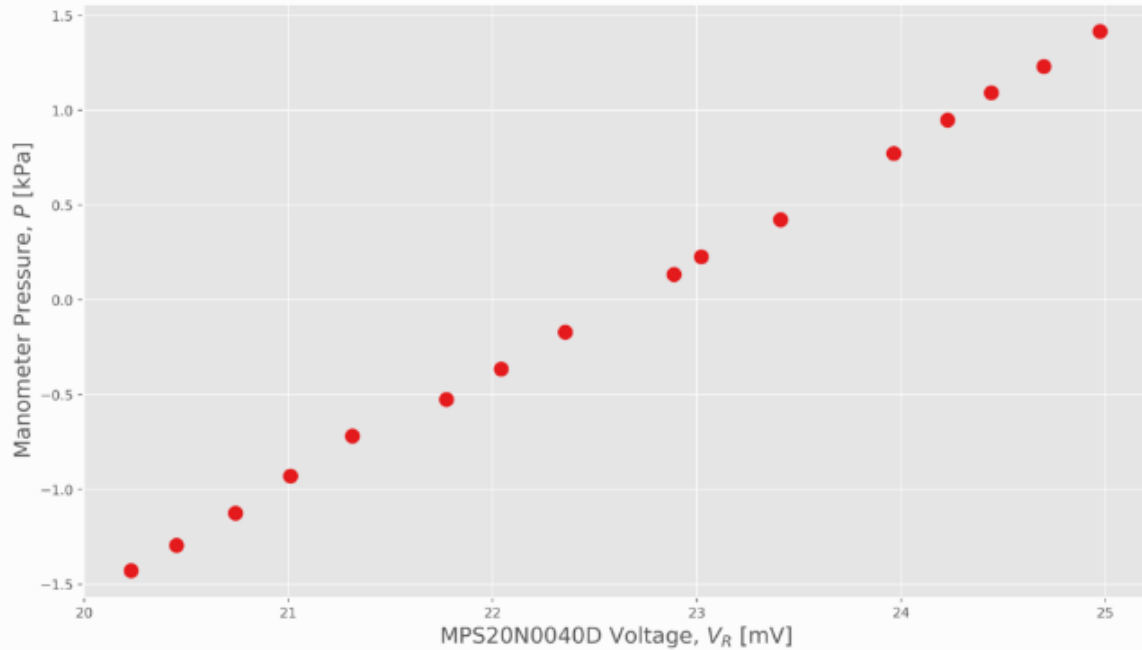
Ahora podemos aproximar la entrada de presión desde la altura del nivel del agua,  $\delta$ , las densidades del agua ( $\rho_2 = 997 \text{ kg/m}^3$ ) y del aire ( $\rho_1 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ), y la aceleración debida a la gravedad ( $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ). Una cosa a tener en cuenta es que todas estas variables (excepto  $\delta$ ) pueden cambiar con la variación de temperatura, geolocalización y presión atmosférica. Por lo tanto, deben incorporarse relaciones de densidad bajo presión y temperatura variables, junto con aproximaciones más precisas de la gravedad (usando latitud y longitud) para minimizar el error asociado con la presión derivada de la ecuación del manómetro.

A continuación, queremos ver la respuesta del ADC MPS20N0040D. Recordando que el HX710B amplifica la señal del transductor de presión en 128x y envuelve la respuesta alrededor de una señal de 0V - 5V, podemos enunciar la siguiente relación:

$$V_R = 5.0 \cdot \frac{X}{128 \cdot 2^{24} - 1}$$

donde  $X$  es la lectura del ADC promediada en el código Arduino y  $V_R$  es el voltaje aproximado emitido por el transductor MPS20N0040D antes de la amplificación .

Usando ambas representaciones del voltaje del sensor y la presión del manómetro, podemos construir la siguiente gráfica relacionando los dos:

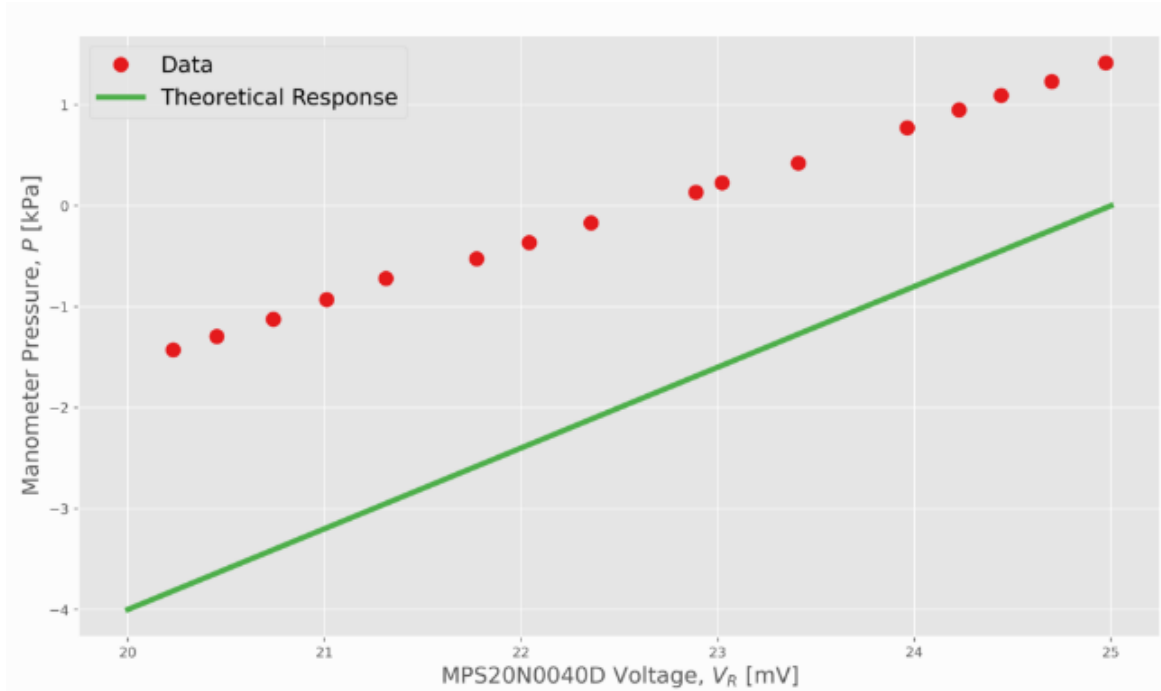


Arriba, finalmente podemos ver cómo la respuesta del sensor se relaciona con los valores de presión del mundo real. Y la respuesta es la esperada: el transductor de presión es cero alrededor de 25 mV (realmente más cerca de 22,6 mV), y los valores de presión están en el rango de kPa.

Ahora, si volvemos a la relación entre la salida de voltaje del MPS20N0040D , su voltaje de compensación y el rango de presión de operación, podemos comenzar a entender cómo se puede calibrar el sensor:

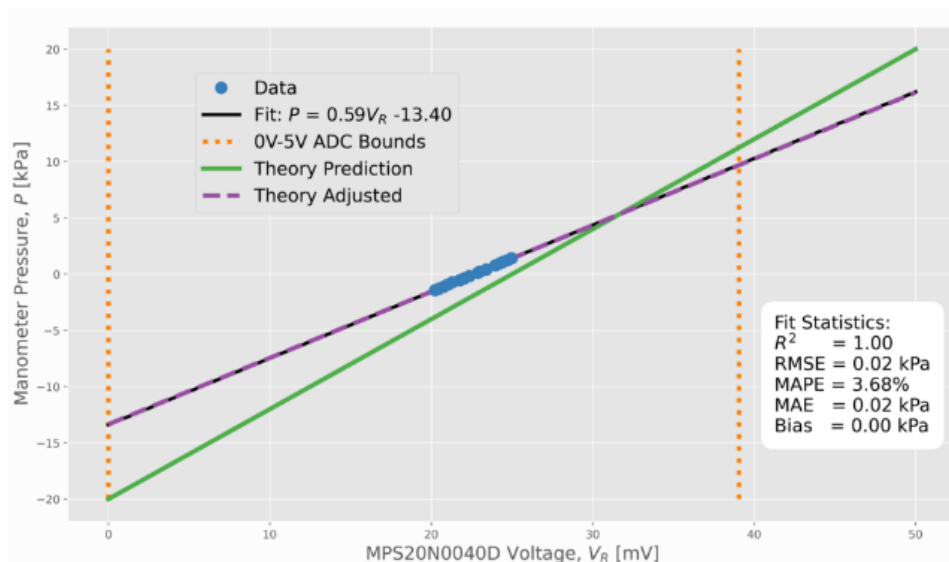
$$P = \frac{V_R}{S} + \frac{b}{S}$$

La ecuación anterior ahora tiene sentido, ya que tenemos tanto el valor  $V_R$  como el desplazamiento aproximado (en nuestro caso,  $b \approx 22,6$  mV). Implementando la afirmación original en la hoja de datos de que la compensación es de +25 mV y que  $S \approx 50$  mV/40 kPa, podemos graficar esto contra nuestros datos:



Es fácil ver que nuestros datos están muy desalineados con la teoría, pero el comportamiento es similar. Por lo tanto, estamos en el camino correcto, pero necesitamos hacer algunos ajustes. La primera es que podemos incorporar la nueva compensación como 22,6 mV, en lugar de 25 mV. Esto mejorará inmediatamente la relación entre los datos y la curva teórica. En segundo lugar, podemos intentar ajustar el valor de  $S$  usando una relación de mínimos cuadrados, lo que realmente reducirá el error entre la teoría y los datos.

Ajustando los datos y la compensación como se describe anteriormente, podemos llegar a la siguiente relación entre el voltaje MPS20N0040D y la presión incidente:



Usando la pendiente y la intersección del ajuste lineal de mínimos cuadrados, podemos hacer una mejor aproximación para el factor de sensibilidad,  $S$ . Para una presión aplicada cero, podemos encontrar el valor correspondiente para el voltaje (la compensación).

$$0 = \frac{V_R}{S} + \frac{b}{S}$$

Podemos ver cómo se derivó el valor de compensación de 22,6 mV (la intersección multiplicada por  $1/\text{pendiente}$ ), y ahora finalmente podemos ver cómo la pendiente del ajuste lineal se relaciona con la sensibilidad:

$$P = 0.59V_R - 13.4 = \frac{V_R}{S} - \frac{22.6}{S} \therefore S = \frac{1}{0.59}$$

Finalmente, podemos escribir la sensibilidad en términos del intervalo de voltaje de 50 mV:

$$S = \frac{1}{0.59} = \frac{50}{Y} \rightarrow Y \approx 29.5 \text{ [kPa]}$$

Por lo tanto, la sensibilidad es de aproximadamente 50 mV/29,5 kPa, que es una ligera desviación de los 50 mV/40 kPa indicados en la hoja de datos. Finalmente, podemos escribir la respuesta del transductor MPS20N0040D en términos de los parámetros derivados relacionados con sus características físicas y eléctricas:

$$P = \frac{29.5}{50} (V_R - 22.6)$$

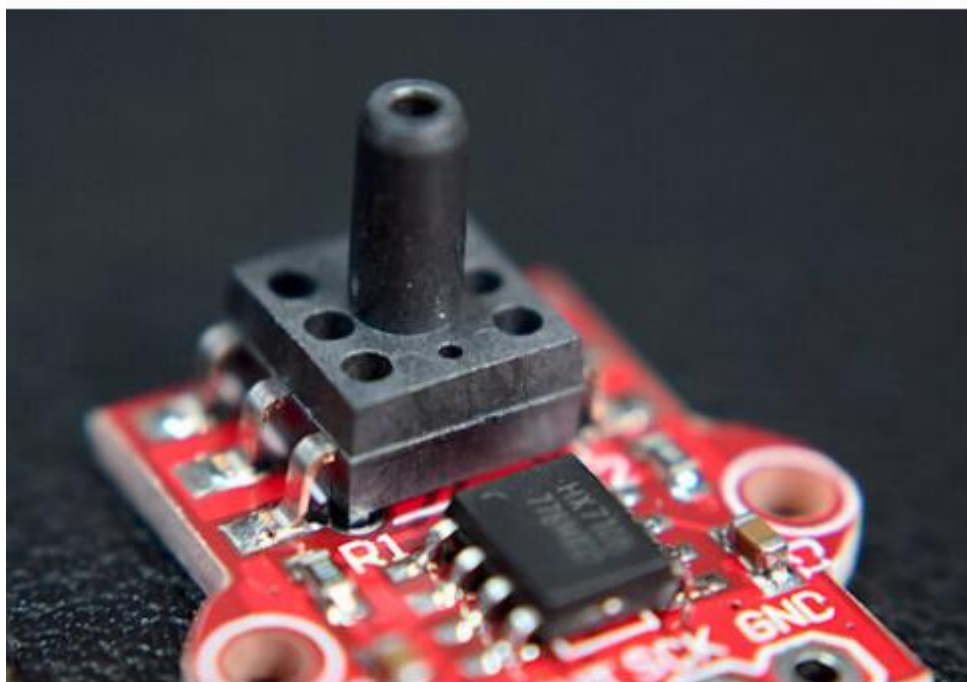
donde  $V_R$  es el voltaje generado por el MPS20N0040D en mV y  $P$  es la presión aproximada en kPa. Si quisiéramos pasar directamente de la salida ADC de la placa MPS20N0040D a presión, tomaría la siguiente forma:

$$P = \frac{29.5}{50} \left( \frac{128X}{5 \cdot (2^{24}) - 1} - 22.6 \right)$$

Y esta es la ecuación de presión calibrada final para la placa de conexión del transductor de presión MPS20N0040D que toma un valor ADC,  $X$ , y aproxima la presión,  $P$ , en kPa.

EL ERROR RESULTANTE (QUE SE MUESTRA EN EL GRÁFICO FINAL ANTERIOR) ES DE ALREDEDOR DEL 4 %, ¡LO CUAL ES REALMENTE NOTABLE CONSIDERANDO LO ECONÓMICO QUE ES EL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN!

Ahora que conocemos la sensibilidad, también podemos hacer declaraciones sobre la resolución del transductor de presión MPS20N0040D. El ADC HX710B tiene una resolución de 24 bits y sabemos que el sensor abarca 50 mV/29,5 kPa, por lo que esperamos que el ADC tenga una resolución de aproximadamente 1,76 bits/Pa, que es una resolución bastante alta para el rango que puede capturar. . En comparación, la resolución de 10 bits del ADC de Arduino es capaz de generar una resolución de 0,26 bits/Pa para otro sensor común, el MPXV7002DP. **Una cosa a tener en cuenta es que después de probar varios sensores, no todos coinciden en sensibilidad y compensación** . Por lo tanto, el usuario debe calibrar cada sensor para proporcionar una representación precisa de la presión.



## Conclusión

La placa de conexión del transductor de presión MPS20N0040D se presentó junto con su calibración mediante un manómetro analógico. El MPS20N0040D es una demostración significativa de la necesidad de calibración, donde se encontró que las declaraciones hechas en su hoja de datos eran falsas o innecesariamente vagas. Por lo tanto, se introdujo la teoría y la implementación de la manometría y la detección de presión. Uso de un microcontrolador Arduino y la placa de conexión MPS20N0040D(con un amplificador integrado), pudimos registrar valores digitales medidos por el transductor de presión y compararlos directamente con un manómetro. Después de medir varios puntos de datos positivos y negativos a diferentes alturas de la columna de agua en el manómetro, los valores se compararon con los medidos por el transductor de presión. Usando la suposición hidrostática, la presión se aproximó a partir de los niveles de agua del manómetro y se trazó en términos de los valores medidos en el sensor de presión digital. La relación entre los dos se ajustó utilizando un método de mínimos cuadrados lineales, lo que dio como resultado la calibración adecuada del MPS20N0040D. Las constantes del sensor de presión encontradas en el ajuste estaban cerca de las indicadas en la hoja de datos, pero lo suficientemente alejadas como para requerir una calibración adecuada. La compensación de CC se estableció en 22,6 mV, en lugar de 25 mV, mientras que la sensibilidad resultó ser de 50 mV/29,5 kPa, en lugar de 50 mV/40 kPa. Estos dos ajustes dieron como resultado un error del 4 % en comparación con las mediciones del manómetro, lo que indica una muy buena linealidad entre el transductor y el manómetro.