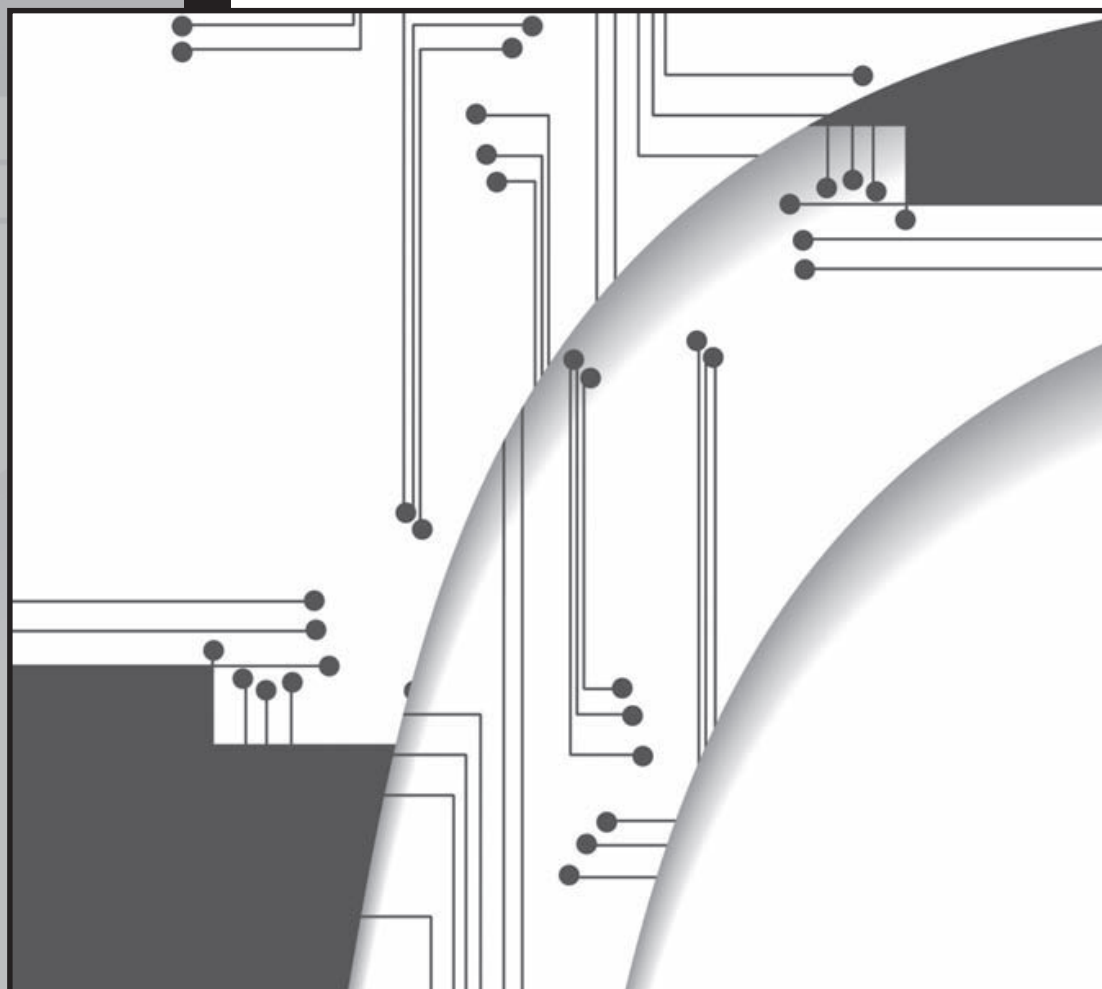




Descarga en tu
computadora

8

Sensores de flujo y presión



¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

- ▶ Para la lectura de este capítulo es necesario tener conocimientos básicos acerca de la relación entre el flujo, la presión y las leyes básicas que rigen su comportamiento, además de conocer los principios de transducción capacitivo, piezoeléctrico, ultrasónico y magnético.

Objetivo general

- ▶ Conocer los distintos tipos de sensores usados para la medición de variables físicas, como la presión y el flujo, además de distinguir entre diferentes principios de transducción usados en dichos sensores para medir el mismo tipo de variable física.

Objetivos particulares

- ▶ ■ Identificar los tipos de sensores usados para la medición de presión.
- ▶ ■ Identificar los tipos de sensores usados para la medición de flujo.

8.1 Sensores de presión

Un sensor de presión **es un transductor**, en general de voltaje, **entre la fuerza aplicada en un área determinada y una señal eléctrica**. Por esta razón, es importante especificar que un sensor de presión es una aplicación específica de sensores de fuerza; asimismo, lo que distingue a los sensores de fuerza convencionales de los sensores de presión es que los sensores de presión, en general, cuentan con diafragma, el cual es el área efectiva en la que se mide la fuerza ejercida. De esta manera, es posible determinar la fuerza por unidad de área.

La *cantidad* de presión en un fluido, ya sea un líquido o un gas, se define como la fuerza por unidad de área. En el sistema internacional de unidades, la unidad para la medición de la presión son los pascuales, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$; si se compara el valor de un pascal con la presión barométrica¹ se puede ver que esta es pequeña, pues a nivel del mar una atmósfera de presión es aproximadamente 100 kPa. Debido a que la mayoría de los sensores de presión usan a la presión barométrica como valor de referencia, en este caso resulta más conveniente usar las unidades de medición como los bares; un bar tiene su equivalencia con atmósferas de presión como $1 \text{ atm} = 1.03525 \text{ bares}$, por lo que a lo largo de este capítulo se usan los bares como unidad de medición.

Clasificación de los sensores de presión

Los sensores de presión está divididos en dos grandes grupos, diferenciales o absolutos, como se muestra en el esquema de la figura 8.1; ya sean diferenciales o absolutos, este tipo de sensores tiene la capacidad de medir presión estática, presión dinámica o presión total.

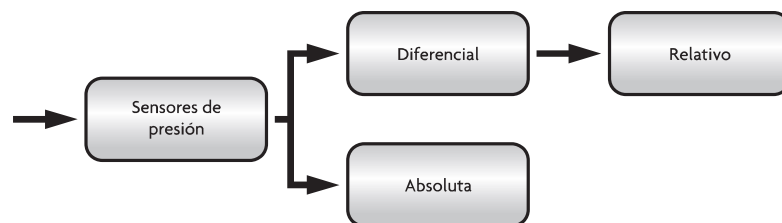


Figura 8.1 Clasificación de los sensores de presión.

Los **sensores de presión absoluta** (P_{abs}) (véase figura 8.2) tienen una cámara sellada, la cual contiene la presión de referencia (P_{ref}); en general, se escoge vacío para la representación de la presión cero, con la finalidad de evitar compensaciones complejas por la variación de presión que existiría en la cámara de referencia debida a cambios de temperatura.

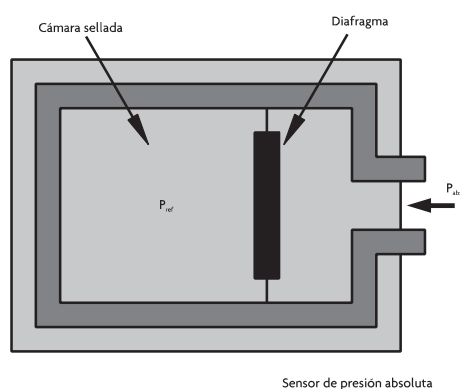


Figura 8.2 Sensor de presión absoluta.

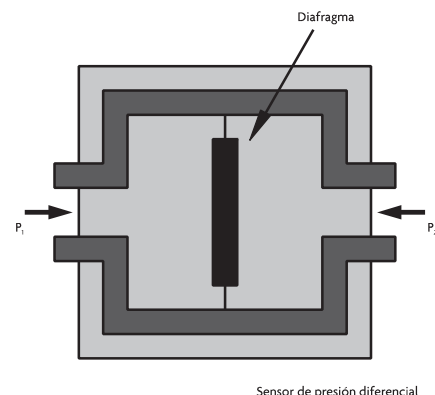


Figura 8.3 Sensor de presión diferencial.

¹ La presión barométrica es una forma de referirse a la presión atmosférica local, y se distingue de la presión atmosférica por una corrección debido a la altitud geopotencial local.

Los **sensores de presión diferenciales** (véase figura 8.3) funcionan, tal como su nombre lo indica, bajo el precepto de una diferencia de presiones entre una presión de referencia dada (P_1) y una segunda presión detectada (P_2). Si la presión de referencia es la presión barométrica, entonces se dice que el sensor es un **sensor de presión relativo**.

En sensores de presión diferenciales, el diafragma debe ser diseñado de tal modo que pueda lidiar con cambios de temperatura, humedad o cualquier condición ambiental a la que esté expuesto. De manera general, en estos sensores el fluido que esté midiendo el sensor en P_1 y P_2 es el mismo.

Otra forma de clasificar los sensores de presión es por el principio de transducción que utilizan; en la figura 8.4 se muestra la clasificación de este tipo de sensores.

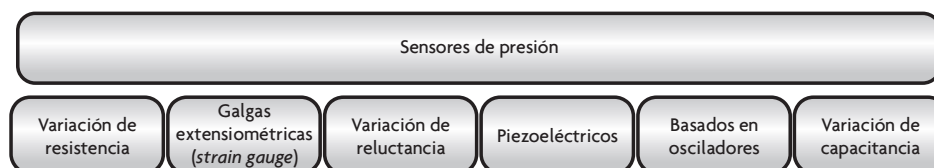


Figura 8.4 Clasificación de sensores de presión por su principio de transducción.

En todo este capítulo se utiliza la clasificación anterior, de acuerdo con su principio de funcionamiento.

Sensores de presión basados en variaciones de resistencia

En este tipo de sensores se usa el principio de transducción resistivo, de tal manera que el elemento móvil de un potenciómetro está acoplado en forma mecánica al diafragma sensitivo por medio de un tubo de Bourdon; en este caso, el desplazamiento mecánico que experimenta el diafragma es transmitido al elemento móvil del potenciómetro. Si dicho potenciómetro forma parte de un circuito eléctrico, el voltaje entre sus terminales cambiará de manera proporcional al cambio de presión (véase figura 8.5).

Si se supone que el circuito cuenta con un voltaje de alimentación V , entonces la variación de voltaje V_0 está dada por la ecuación 8.1:

$$V_0 V \frac{R_x}{R_0} \quad (8.1)$$

donde:

R_x : resistencia debida a un cambio en la presión

R_0 : resistencia debida a la presión de referencia (ya sea vacío, presión atmosférica o alguna otra presión de referencia)

Entre las principales ventajas de este tipo de detección destacan:

- Bajo costo.
- No requiere de amplificadores adicionales.
- Tecnológicamente es robusto.
- Es adaptable a muchas aplicaciones.

Por otro lado, las desventajas de este principio de operación son:

- Presenta una histéresis alta.
- Altamente sensitivo a vibraciones.

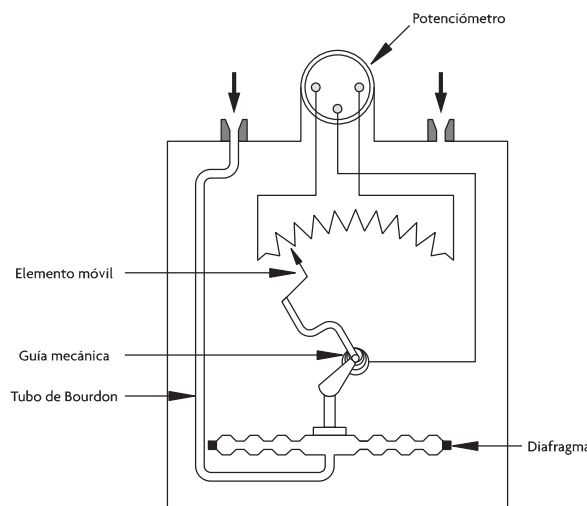


Figura 8.5 Sensor de presión basado en el principio de variación de resistencia.

Sensores de presión basados en galgas extensométricas (*strain gauge*)

En este principio de transducción se usan los materiales piezoresistivos, de tal manera que se configura una galga extensométrica con estos. Esta galga extensométrica tiene la tarea de detectar el cambio de presión y traducirlo en un cambio de resistividad, con lo que se deriva un cambio en la resistencia del sensor. Existen múltiples configuraciones de galgas extensométricas para implementar un sensor de presión; en la figura 8.6 se muestra la clasificación de las galgas extensométricas.

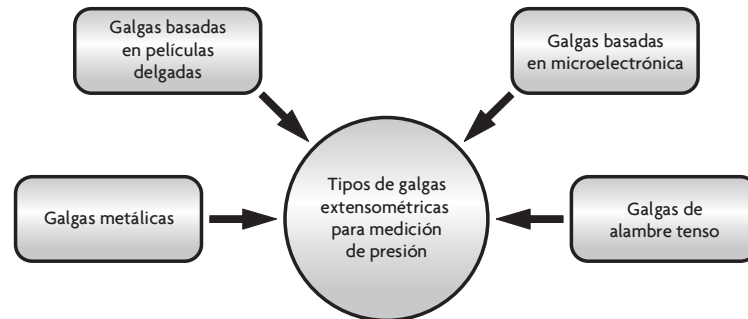


Figura 8.6 Tipos de galgas extensométricas para medición de presión.

Galgas metálicas

En este tipo de galgas, una red resistiva formada por cuatro resistencias en configuración de puente de Wheatstone se encarga de realizar la transducción entre la deformación inducida en el material (metálico en este caso) y un cambio en el voltaje de salida del puente. Las resistencias internas son las responsables de medir el cambio de manera tangencial y las resistencias externas de detectar el cambio de manera radial (véase figura 8.7).

Las principales ventajas de este tipo de detección son:

- Bajo costo.
- Resistencia a vibraciones.
- Adaptación simple a un circuito eléctrico.

Por otro lado, este tipo de detección tiene la desventaja de que el factor de galga es bajo, comparado con el resto de las configuraciones presentadas aquí.

Galgas basadas en películas delgadas

En este tipo de configuración la película delgada es el diafragma sensible a la presión, con lo que se forma el arreglo resistivo de la galga, de tal manera que depende del tipo de película que se use el factor de galga que se obtiene. Por ejemplo, con películas metálicas delgadas, el factor de galga va desde 2 hasta 4; en películas resistivas, el factor de galga se encuentra entre 10 y 20; para el caso de películas semiconductoras, el factor está alrededor de 100. Al igual que las galgas metálicas, estas tienen las mismas ventajas:

- Bajo costo.
- Resistencia a vibraciones.
- Adaptación simple a un circuito eléctrico.

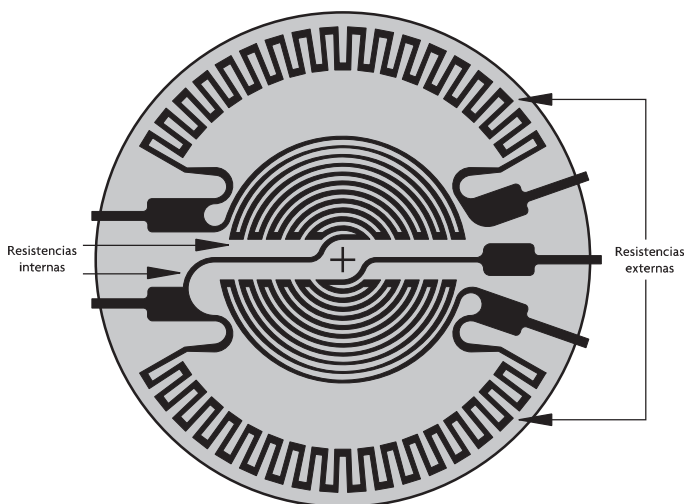


Figura 8.7 Galga metálica para detección de presión.

Mientras que su desventaja es:

- No soporta grandes cargas eléctricas debido a la naturaleza de las películas delgadas.

Galgas basadas en microelectrónica

Este tipo de galgas (véase figura 8.8) se basa en el uso de la tecnología microelectrónica para su implementación; su elemento sensor es un sustrato, en general de silicio monocristalino tipo N (esto se logra difundiendo impurezas donadoras), y una piezorresistencia tipo P (esto se logra difundiendo impurezas aceptoras). Para implementar este tipo de detección se realiza un proceso de metalización para formar los electrodos que constituirán los extremos de la piezorresistencia detectora. De esta manera, se forman cuatro resistencias iguales que, en conjunto, forman el puente de Wheatstone. Este tipo de detección tiene la ventaja de una alta miniaturización; sin embargo, presenta una alta dependencia de la temperatura, ya que de manera parásita se forma una unión PN, que induce un diodo.

Entre las principales ventajas de este tipo de principio de funcionamiento están:

- Bajo costo de producción en masa.
- Factor de galga alto.
- Tiene sensores muy pequeños (de alrededor de 1 mm²).

Por otra parte, la desventaja que tienen es una alta dependencia de la temperatura, de tal manera que sus temperaturas de operación no deben rebasar los 120 °C, aproximadamente.

Galgas de alambre tenso

Este tipo de galgas se forma al colocar un alambre tenso sobre la superficie detectora, el cual se recubre con plásticos; cuando el alambre experimenta la presión del medio, registra un cambio. Este tipo de galgas es poco utilizado debido a su alta sensibilidad a la vibración y su alta fragilidad (véase figura 8.9).

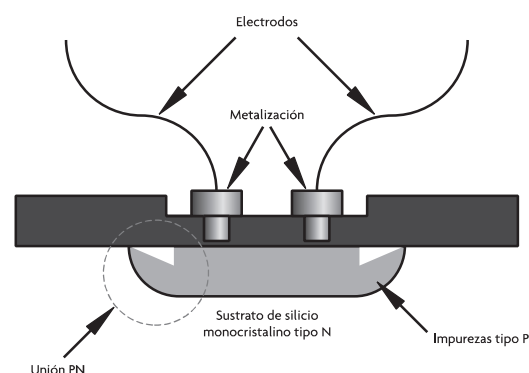


Figura 8.8 Galga extensométrica basada en tecnología de microelectrónica para mediciones de presión.



Figura 8.9 Galgas de alambre tenso para medición de presión.

Ejercicio de aplicación

Uso de un sensor de presión

Objetivo

Medir la presión manométrica de la línea de un circuito neumático a través del sensor MPX2010 con el uso del Arduino Uno®.

Material

- Arduino Uno®
- Sensor de presión MPX2010
- Amplificador de instrumentación AD620
- Amplificador operacional TL084
- 2 resistencias de 1 kΩ, 4 de 10 kΩ
- 2 baterías de 9 V
- Potenciómetro de 10 kΩ

- Caimanes
- Compresor
- Válvula neumática
- Mangueras neumáticas

Desarrollo

Descripción del sensor MPX2010

El MPX2010 (véase figura 8.10) es un sensor que mide la diferencia de presión entre sus dos terminales superiores de entrada; su voltaje de salida diferencial es directamente proporcional a esta presión y tiene un rango útil de medición de 0 a 10 kPa.

La descripción de pines del sensor es la siguiente:

- V_S . Voltaje de alimentación del sensor de 10 V.
- $+V_{OUT}$. Salida diferencial positiva.
- $-V_{OUT}$. Salida diferencial negativa.
- **GND**. Voltaje de referencia (tierra).



Figura 8.10 Sensor de presión MPX2010.

El comportamiento del sensor se describe en la gráfica de la figura 8.11.

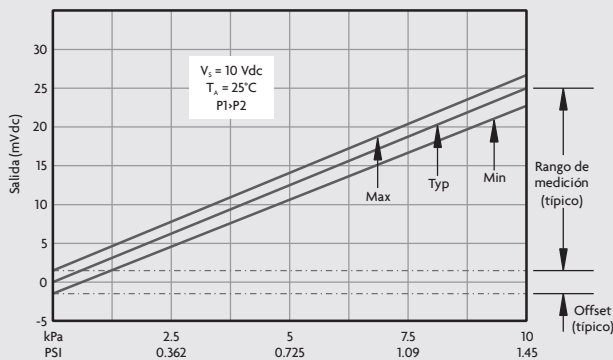


Figura 8.11 Gráfica de voltaje diferencial vs. presión del sensor MPX2010.

Ecuación representativa del sensor

Al graficar algunos puntos de la curva típica del sensor MPX2010 (con un voltaje de alimentación de 10 V), y con base en el hecho de que la ganancia del amplificador de instrumentación es de 100, al aplicar una regresión lineal se obtiene su ecuación característica:

$$\text{Presión (kPa)} = 3.8371 \times (\text{voltaje}) + 0.0286 \quad (8.2)$$

Si se considera el valor de la ordenada al origen como despreciable, entonces:

$$\text{Presión (kPa)} = 3.8371 \times (\text{voltaje}) \quad (8.3)$$

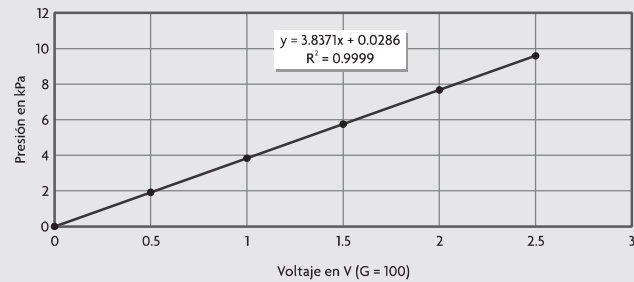


Figura 8.12 Gráfica y ecuación de la curva del sensor MPX2010.

Voltaje (mV)	Voltaje	Presión (kPa)
0	0	0
5	0.5	2
10	1	3.85
15	1.5	5.75
20	2	7.75
25	2.5	9.6

Tabla 8.1 Tabla de datos para la gráfica de la figura 8.12

Construcción del circuito

Sensor de presión
MPX2010

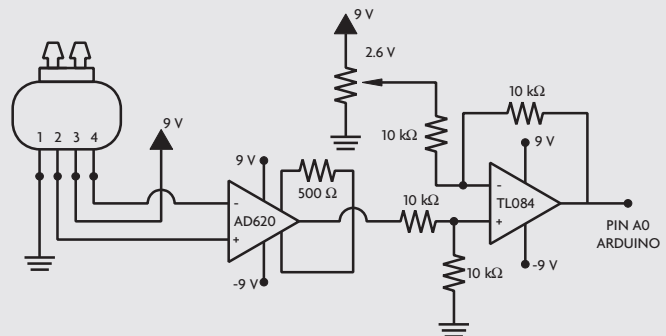


Figura 8.13 Diagrama del circuito para medir la presión en una línea neumática.

Como la señal de salida del sensor MPX2010 es diferencial, resulta necesario calcular esa diferencia; para eso se utiliza un sensor de instrumentación (también es adecuado un restador). La matrícula utilizada es el AD620, cuya ganancia está en función de la resistencia R_G :

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1$$

Si se propone una resistencia R_G de $500\ \Omega$ (2 resistencias de $1\ \text{k}\Omega$ en paralelo):

$$G = \frac{49.4\text{k}\Omega}{R_G} + 1 = 99.8 \approx 100$$

Es posible que la señal diferencial del sensor tenga ruido, mismo que también se amplifica. Estas señales pueden afectar la lectura final. Para suprimirlas a la salida del sensor de instrumentación se introduce un restador que permite calibrar la lectura. Si no se aplica ninguna presión adicional a la atmosférica en las terminales superiores, la salida del amplificador tendría que ser cero; si no es así, el potenciómetro del restador se ajusta hasta alcanzarlo.

La señal de salida de este circuito se conecta al PIN A0 del Arduino® para su procesamiento. La figura 8.14 muestra el montaje físico del circuito descrito en la figura 8.13.

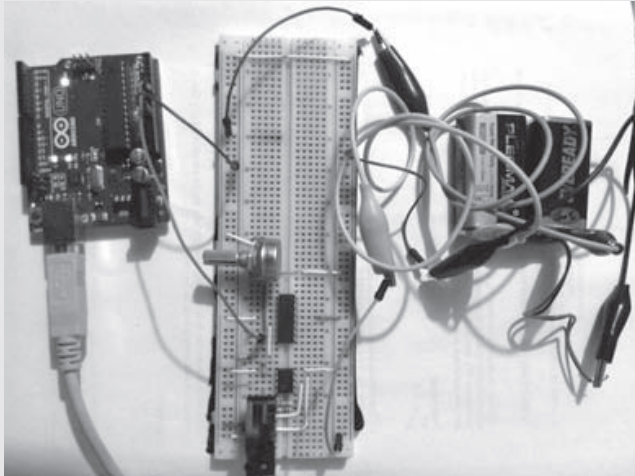


Figura 8.14 Montaje del circuito que mide la presión en una línea neumática.

Código

Descripción del código

El siguiente programa realiza la lectura y conversión analógico-digital (ADC) de la señal del sensor MPX2010 (acondicionada con antelación). Con este valor y con base en la ecuación 8.3 se obtiene la diferencia de presión entre las terminales del sensor. Por último, se indica este valor en el monitor serie.

```

//*****Sensor de presion*****
//*
//*El sensor de presion MPX2010 mide la
diferencia de presion que existe
//*entre sus dos terminales de entrada
y es directamente proporcional a

```

```

//*el voltaje entre sus dos terminales
electricas de salida. Para
//*calcular la diferencia entre estas dos
terminales se requiere del uso
//*de un amplificador de instrumentacion o
bien un amplificador
//*operacional configurado como restador.
//*
//*Con un amplificador de instrumentacion
se restan y amplifican
//*las señales del sensor. A esta señal se le
aplica un voltaje de
//*offset para ajustar dicha señal.
//*****
//Se declaran las variables a emplear
intreadSensor;
floattensionSensor, presion;

voidsetup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
comunicacion serie a 9600 baudios
}

voidloop()
{
    readSensor = analogRead(A0); //Lectura del
voltaje del sensor
    //(previamente tratado)
    tensionSensor = 0.00478*readSensor;
    //Conversion de unidades a volts
    presion = 3.8371*tensionSensor;
    //De acuerdo con la hoja de datos del
    //sensor y considerando que se aplico una
amplificacion de 100 (en el
    //amplificador de instrumentacion) obtenemos
la ecuacion que relaciona
    //el voltaje medido con la presion existente
en el sensor.
    //Esta ecuacion es: presion = 3.8371 * voltaje
    Serial.print("Presion: ");
    //Imprimimos el resultado. Recordando que
esta dado en kPa
    Serial.print(presion);
    Serial.println(" kPa");
}

```

Pruebas

Para medir la presión, una de las terminales del sensor se conecta a la línea neumática alimentada por un compresor, misma que puede regularse con ayuda de una válvula (véase figura 8.15).

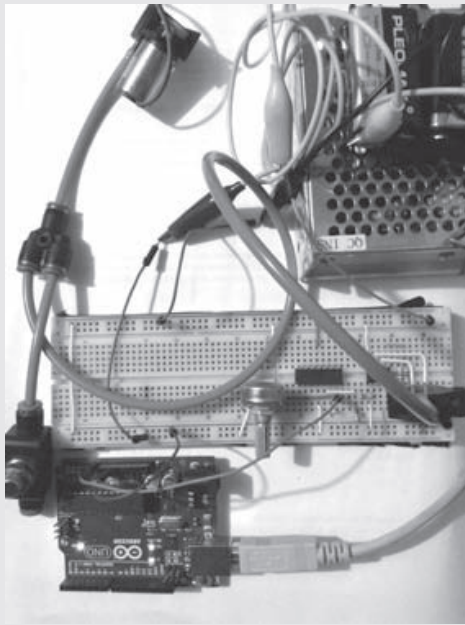


Figura 8.15 La línea neumática alimentada por un pequeño compresor se conecta al sensor de presión MPX2010. El flujo es regulado por una válvula.

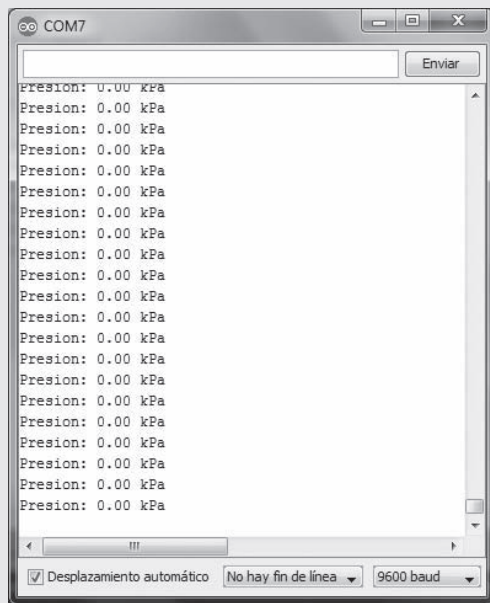


Figura 8.16 Con el compresor apagado, la presión en la línea es cero.

Con el compresor apagado, la lectura que registra el sensor es presión cero (véase figura 8.16). En tanto, con el compresor encendido y la válvula cerrada por completo (evitando la fuga de aire) se registra la máxima presión que provee el compresor: 11.49 kPa (véase figura 8.17).

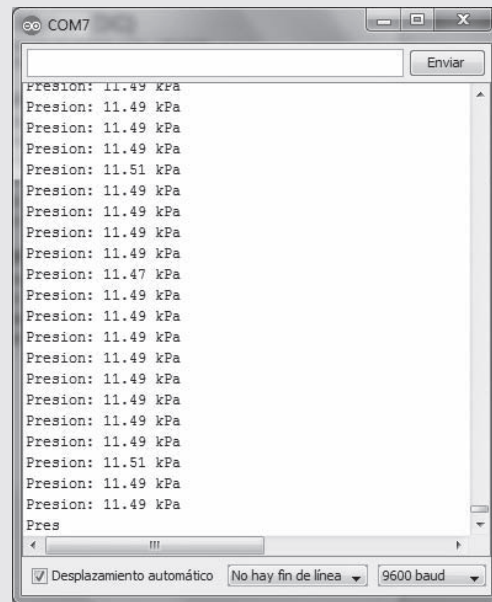


Figura 8.17 Con la presión máxima en la línea con el compresor encendido y la válvula de escape cerrada por completo se tienen 11.49 kPa.

Al abrir un poco la válvula y liberar presión en la línea, se tiene una presión de 10.96 kPa, ligeramente menor que con la válvula cerrada.

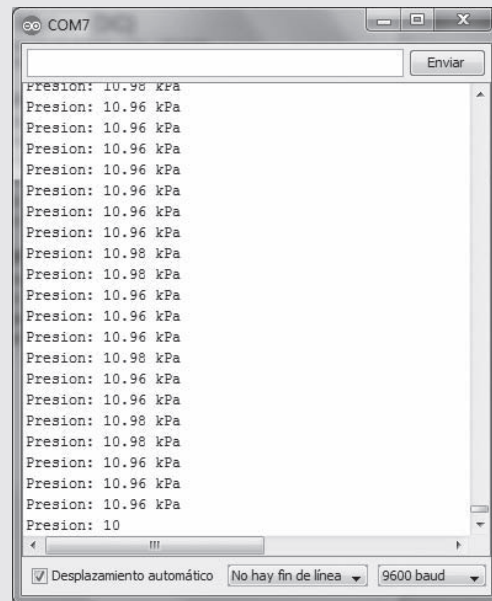


Figura 8.18 Al abrir un poco la válvula, la presión en la línea baja es de 10.96 kPa.

Sensores de presión basados en variación de reluctancia

Este tipo de sensores de presión se basa en la variación de reluctancia de un circuito magnético, misma que se obtiene al exponer un diafragma, en este caso de algún material ferromagnético, que constituye el elemento sensor, a la presión. Cuando el diafragma se aproxima o se aleja del circuito magnético induce un cambio de reluctancia, el cual es procesado por el circuito de acondicionamiento de la señal (para mayor detalle véase el capítulo 5, Sensores de nivel y proximidad). Además de los sensores basados en diafragmas, uno de los sensores más utilizados para transducir la presión ejercida sobre un elemento es el LVDT.

Algunas de las ventajas de este tipo de sensores de presión basados en un elemento de variación de reluctancia son:

- Presentan una resolución muy alta.
- Tienen una señal sumamente estable en un ambiente libre de ruido electromagnético.

Por otro lado, una de sus grandes desventajas es su alta sensibilidad ante vibraciones mecánicas.

Sensores de presión con materiales piezoeléctricos

En este tipo de sensores se emplean materiales piezoeléctricos como elemento de detección, debido a que, como es sabido, un material piezoeléctrico tiene la característica de transformar un esfuerzo aplicado a un voltaje. El principio de aplicación es el siguiente: una pequeña placa de área conocida, con características piezoeléctricas, se coloca de manera normal a la fuerza que ejerce la presión a detectar; así, cuando la presión se incrementa o disminuye, el elemento piezoeléctrico genera un voltaje proporcional a la compresión o la extensión de dicha placa. Luego, por medio de electrodos metálicos, es posible leer el voltaje generado por el circuito piezoeléctrico. Los materiales piezoeléctricos más utilizados para estos propósitos son cuarzo, PVDF, titanato de bario y sal de Seignette.

En este caso, el rango de medición del sensor estará determinado por el esfuerzo máximo soportado por el material piezoeléctrico y los electrodos metálicos.

Existen dos configuraciones básicas para implementar este tipo de sensores (véase figura 8.19); la primera consiste en colocar discos de material piezoeléctrico interconectados entre sí, con la cual es posible incrementar la resolución del sensor. Otra posible configuración consiste en superponer dos tiras de material piezoeléctrico, mismas que estarán colocadas de tal modo que tengan polaridades opuestas, de esta manera se verá incrementado el voltaje a la salida.

Estas estructuras están auxiliadas por un resorte que ayuda a linealizar la señal, controlando el desplazamiento debido a la presión aplicada. Entre las principales ventajas de estos sensores destacan:

- Fácil miniaturización.
- Compatibilidad de fabricación con procesos de microelectrónica (lo que los hace menos costosos).
- Ancho de banda amplio.
- Sensitividad baja a la vibración.

Por otro lado, entre sus desventajas se encuentran:

- Sensitividad alta a la temperatura.
- Dificultad para hacer mediciones de presiones estáticas, debido a que el voltaje generado por el material piezoeléctrico es bajo.

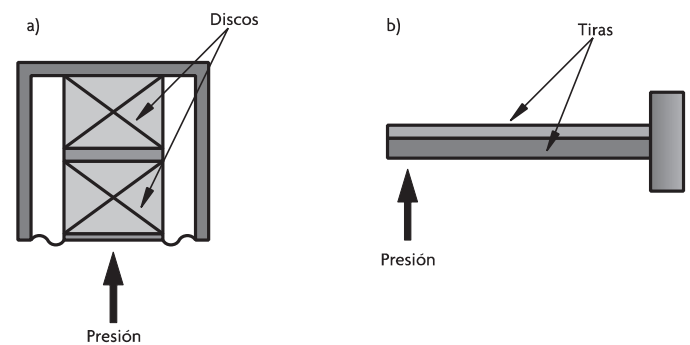


Figura 8.19 Principio de transducción piezoeléctrico usado en sensores de presión. a) Configuración de disco. b) Configuración de tira.

- Requerimiento de circuitos de acondicionamiento de señal robustos, por lo que el tipo de cable requerido para la medición es especializado, pues tiene la posibilidad de atenuar la señal de lectura.

Sensores de presión basados en osciladores (sensores de fuelle)

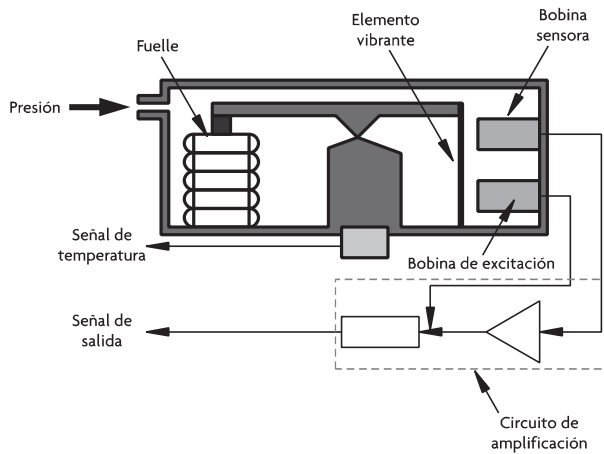


Figura 8.20 Sensor de presión basado en el principio de fuelle-vibración.

Este tipo de sensores de presión (véase figura 8.20) se basa en el acople mecánico entre un elemento vibrante y un fuelle mecánico. Antes de tratar el funcionamiento de este tipo de sensores conviene aclarar que un fuelle es un dispositivo mecánico que se encarga de contener aire para después expelerlo con una presión y dirección determinadas. En el caso de este tipo de sensores, el fuelle capta la presión a detectar y la traduce en la vibración del elemento vibrante. El elemento vibrante formará parte de un circuito magnético que tiene la tarea de transducir la vibración inducida por el fuelle a una señal de voltaje cambiante en el tiempo. La bobina excitadora se encarga de inducir el campo en el elemento vibrante, el cual induce el campo en la bobina de medición; de este modo, la señal presente en la bobina de medición es transformada en una señal de voltaje mediante circuitos amplificadores. Este tipo de sensores cuenta con un medidor de temperatura embebido que permite compensar las variaciones de presión debidas a esta variable física. Otro importante uso de estos sensores de temperatura embebidos es para que el usuario final tenga una medición más completa.

Para que este tipo de transducción tenga éxito se requiere que el elemento vibrante esté fabricado de material ferromagnético, esto con el fin de que pueda interactuar con el campo emitido por la bobina excitadora. La vibración del elemento depende del tipo de material de que está construido, así como de su densidad y su módulo de Young, además de su longitud, volumen y de la cantidad de presión emitida por el fuelle. Matemáticamente, la frecuencia de vibración puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{A\rho_d}}$$

donde:

f : frecuencia

L : longitud

F : fuerza

ρ : densidad

A : área de sección transversal

El modelo del sensor de fuelle puede representarse por medio de la siguiente ecuación:

$$P = X(f - f_0) + Y(f - f_0)^2 + Z(f - f_0)^3$$

donde:

P : presión

f : frecuencia

f_0 : frecuencia en estado inicial

X, Y, Z : constantes propias del sensor

Este tipo de sensores también se desarrolla en tecnología de microelectrónica; en este caso, son llamados sensores de estado sólido de presión o sensores MEMS de presión. En estos solo cambia el elemento de transducción; en este caso, el circuito con las bobinas y el amplificador son reemplazados por circuitos de lectura especializados. En la figura 8.21 se muestra un corte transversal de un sensor de presión basado en el principio de oscilación.

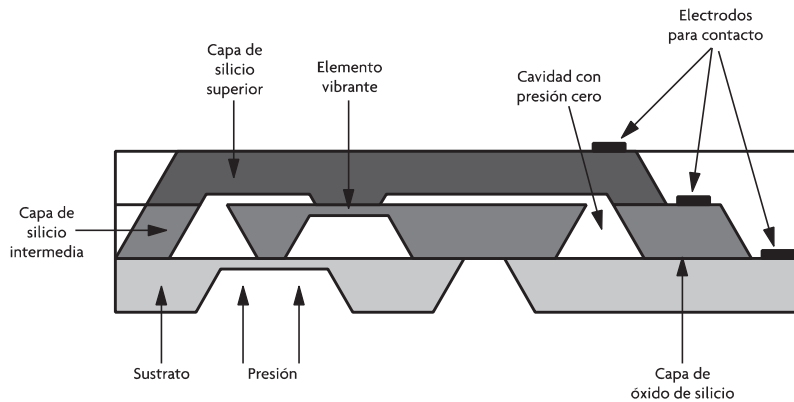


Figura 8.21 Sensores de presión basados en sensores de estado sólido.

Entre las principales ventajas que presenta este tipo de sensores destacan:

- Su exactitud.
- Presión y resolución excelentes.
- Bajo costo.

Por otro lado, una de sus principales desventajas es su limitado ancho de banda, debido a las características físicas del elemento oscilador.

Ejercicio de aplicación

Altímetro

Objetivo

Medir altitud, presión barométrica y temperatura a las que se encuentra el sensor MEMS MPL3115A2, con el uso de Arduino Uno®.

Material

- Arduino Uno®
- Sensor de altitud MPL3115A2
- Push-button
- 1 resistencia de 10 k Ω
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

Desarrollo

Descripción del sensor de altitud MPL3115A2

El MPL3115A2 es un sensor que mide la presión barométrica de un lugar y a partir de esta calcular su altitud; además,

también mide la temperatura del medio. El sensor puede comunicarse con otros dispositivos mediante el protocolo de comunicación serie I2C. La resolución para la altitud/presión barométrica es de 20 bits, mientras que para la temperatura es de 12 bits.

El sensor cuenta con dos señales de interrupciones, las cuales se activan cuando una nueva adquisición de datos está disponible, cuando un número de muestras es almacenado en el sistema FIFO o cuando se detecta un cambio en la presión/altitud o temperatura.

La descripción de pines del sensor es la siguiente:

- **INT2.** Señal de Interrupción 2 del sensor.
- **INT1.** Señal de Interrupción 1 del sensor.
- **SDA.** Línea de datos del protocolo I2C
- **SCL.** Señal del reloj del protocolo I2C
- **VCC.** Voltaje de alimentación de 3.3 V
- **GND.** Voltaje de referencia (tierra)

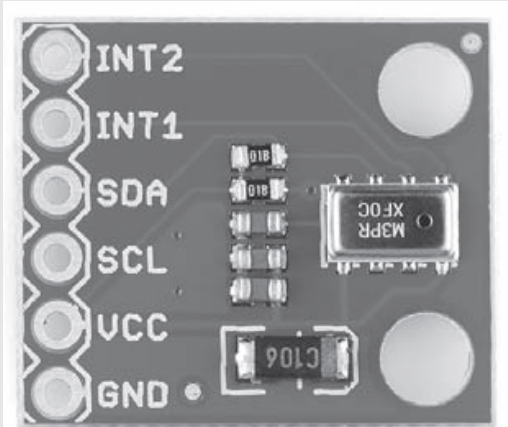


Figura 8.22 Sensor de presión/altitud.

Construcción del circuito

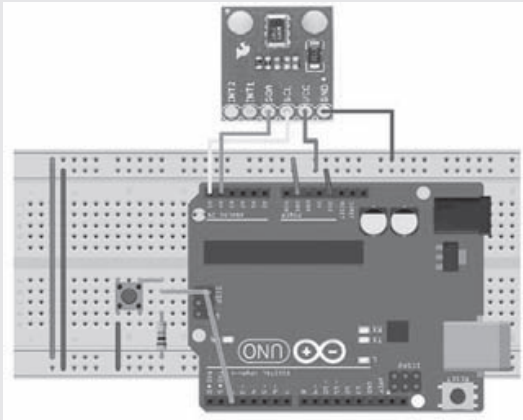


Figura 8.23 Diagrama del circuito para medir la presión, altitud y temperatura del medio.

Los pines para la comunicación I2C del sensor MPL3115A2 SDA y SCL se conectan a los pines analógicos A4 y A5, respectivamente, que corresponden a los pines configurados por la librería Wire.h para la comunicación TWI.

Un push-button se conecta con una resistencia pull-down, lo que se utiliza para hacer intercambios entre los modos de presión o altitud, que se despliegan en el monitor serie.

Código

Descripción del programa

El siguiente programa:

- Configura el tiempo mínimo entre muestras en 130 ms.
- Si la variable `select = false`, el sensor se configura como altímetro.
- Lee los 20 bits correspondientes a la altitud con una resolución de 30 cm y los convierte a decimal para imprimirlos en el monitor serie.

- Si la variable `select = true`, el sensor se configura como medidor de presión barométrica.
- Lee los 20 bits de la presión barométrica con una resolución de 2 Pa y los muestra en el monitor serie.
- Realiza la lectura de la temperatura con una resolución de 12 bits y los convierte a grados Celsius para imprimirlos en el monitor serie.

```

/*****Altímetro*****/
/*
//El MPL3115A2 es un sensor que mide la
presion atmosferica del lugar y
//calcula la altura a la que se encuentra
sobre el nivel del mar.
//Tambien detecta la temperatura local en
grados Celsius. Se comunica
//con otros dispositivos mediante el protocolo
I2C. Consta de una
//resolucion menor de 30 cm y 2 pascuales.
//
//En el siguiente programa se obtendra la
altura en m, la presion*
//atmosferica en Pa y la temperatura local
en °C del sensor. Con un*
//push-button se alternara entre la altitud
y la presion.
//
/*****/

//Libreria que hace posible la comunicacion I2C
#include <Wire.h>

#define ADDRESS 0X60 //Direccion I2C del
sensor MPL3115A2

#define OUT_P_MSB 0x01 //Lectura del MSB de la
altura/presion. No es //necesario definir la
direccion para el LSB pues el valor del
//comando se incrementa en forma automatica.
Consultar la hoja de datos para //mas detalle
#define OUT_T_MSB 0x04 //Lectura del MSB de la
temperatura

#define CTRL_REG1 0x26 //Registro de Control 1
#define DR_STATUS 0X00 //Registro STATUS

//La variable 'select' conmuta entre los modos
altura/presion
booleanselect = false;

voidsetup()
{
  Wire.begin();//Se inicia la comunicacion I2C,
  Arduino se establece como
  //maestro
  Serial.begin(9600); //Se inicia la
  comunicacion serie a 9600 baudios
  attachInterrupt(0, altpre, FALLING); //
  Interrupcion para la
  //conmutacion entre los modos altitud/presion.
  La interrupcion se

```

```

//activa en el PIN DIG 2 con los flancos de
bajada. La interrupcion
//activa la funcion altpre.
overSampleRatio(5); //Se define el tiempo
entre muestras de 130 ms.
}

voidloop()
{
    //Altimetro
    if (select == false)
    {
        modoAltimetro(); //Se configura al
        sensor en modo altmetro
        longreadAltura = readAP(); //Se lee la
        altura del sensor
        floatint_altura = (float) (readAltura>>
        8); //Parte entera de la
        //altura
        floatdec_altura = (float) ((readAltura>> 4)
        & (0x0F)) / 16;
        //Parte decimal de la altura
        float altura = int_altura + dec_altura; //
        Se calcula la altitud
        //final
        Serial.print("Altitud: "); //Se imprime
        el valor de altura
        //calculado
        Serial.print(altura);
        Serial.print("m ");
    }
    //Medicion de la presion
    else
    {
        modoBarometro(); //Se configura al sensor
        para la medicion de presion
        longreadPresion = readAP(); //Lectura de la
        presion
        floatint_presion = (float) (readPresion>>
        6); //Parte entera de la
        //presion
        floatdec_presion = (float) ((readPresion>>
        4) & (0x03)) / 4;
        //Parte decimal de la presion
        floatpresion = int_presion + dec_presion;
        //Calculo de la presion
        //final
        Serial.print("Presion: "); //Se imprime
        el valor de presion
        //calculado
        Serial.print(presion);
        Serial.print("Pa ");
    }
    //Temperatura
    floattemp = readTMP(); //Lectura de la
    temperatura local en
    //grados Celsius
    Serial.print("Temperatura: "); //Se imprime el
    valor de la temperatura
    Serial.print(temp);
    Serial.println(" C");
}

```

```

}

voidaltpre()
{
    //Antirrebotes. Se esperan 20 ms para ignorar
    los rebotes y
    //posteriormente se pregunta de nuevo por el
    estado del PIN
    //Se invierte la variable 'select' para
    cambiar de modo altitud/presion
    if (digitalRead(3) == LOW)

        delay(20);
    if (digitalRead(3) == LOW)
        select = !select;
}

longreadAP()
{
    oneShot(); //Se toma una lectura

    bytexpdr = leerIIC(DR_STATUS); //Hasta que el
    bit 2 del registro
        //STATUS (el bit PDR)
    while(pdr & 0x02 == 0) //sea igual a 1
    se continuara con la
        //lectura de los registros
        delay(1); //es decir,
    hasta que no exista nueva
        //informacion disponible
        //no se
    continua con la lectura.

    //Si existe informacion disponible se procede
    a leer los registros
    correspondientes
    Wire.beginTransaction(ADDRESS); //Se inicia la
    comunicacion I2C con el
    //sensor
    Wire.write(OUT_P_MSB); //Este comando
    permite comenzar con
    //la lectura de los registros desde el MSB. No
    se necesita escribir el
    //comando para la lectura del CSB y LSB, pues
    el sensor se direcciona
    //en forma automatica.
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(ADDRESS, 3); //Lectura del
    MSB, CSB y LSB
    bytemsb = Wire.read();
    bytcsb = Wire.read();
    bytelsb = Wire.read();

    //Se concatenan los 3 bytes
    long pressure = (long) msb<< 16 | (long) csb<< 8
    | (long) lsb;

    return pressure;
}

floatreadTMP()
{

```

```

oneShot();           //Se toma una lectura

bytepdr = leerIIC(DR_STATUS); //Se espera
hasta que se tenga
//disponible una nueva lectura
while(pdr & 0x02 == 0)      //Revisando
el bit PDR del registro
//STATUS
    delay(1);
Wire.beginTransaction(ADDRESS); //Se inicia
la comunicacion I2C con
//el sensor
Wire.write(OUT_T_MSB);      //Se
comienza la lectura de la
//temperatura
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(ADDRESS, 2); //Lectura
del MSB y LSB
byte msb = Wire.read();
byte lsb = Wire.read();
float dec_tmp = (float) (lsb >> 4) / 16; //Parte
decimal de la temperatura
float tmp = (float) (msb) + dec_tmp; //Se suma
la parte decimal con la
//parte entera

return tmp;
}

//Se
habilita al sensor para tomar una sola lectura
void oneShot()
{
    byte ost1 = leerIIC(CTRL_REG1); //Se pone en 0
el bit 2 del registro de
//Control 1 para preparar al sensor para una
nueva lectura
    byte ost0 = ost1 & 0xFD;
    escribirIIC(CTRL_REG1, ost0);

    ost1 |= 0x02;           //Se pone en 1
el bit 2 del registro de
    escribirIIC(CTRL_REG1, ost1); //Control 1 para
tomar una lectura.
}

void modoBarometro()
{
    byte modoP = leerIIC(CTRL_REG1);
    modoP &= 0x7F;          //Se pone en 0
el bit 7 del reg.
    escribirIIC(CTRL_REG1, modoP); //de Control 1
que habilita al sensor
//como medidor
de presion
}

void modoAltimetro()
{
    byte modoA = leerIIC(CTRL_REG1);
    modoA |= 0x80;          //Se pone en
1 el bit 7 del reg. de

```

```

    escribirIIC(CTRL_REG1, modoA); //Control 1
que habilita el modo
//altimetro
}

void overSampleRatio (byte sampleRatio)
{
    sampleRatio <= 3; //Se escribe <101> en los
bits 3~5(OST) del Registro
    byte reg = leerIIC(CTRL_REG1); //de Control 1,
para configurar la
    reg |= sampleRatio;           //velocidad de
muestreo a 130 ms
    escribirIIC(CTRL_REG1, reg);
}

//Lectura I2C
byte leerIIC (byte add)
{
    byte reading;
    Wire.beginTransaction(ADDRESS); //Se inicia
la comunicacion I2C con
//el dispositivo de la direccion ADDRESS
    Wire.write(add); //Se escribe el comando
para leer algun registro
    Wire.endTransmission(false);

    Wire.requestFrom(ADDRESS, 1); //Se lee el
registro establecido por
//el comando
    reading = Wire.read();

    return reading;
}

//Escritura I2C
void escribirIIC (byte add, byte valor)
{
    Wire.beginTransaction(ADDRESS); //Se inicia
la comunicacion I2C con
//el dispositivo de la direccion ADDRESS
    Wire.write(add); //Se escribe en un
comando «add» un «valor»
    Wire.write(valor);
    Wire.endTransmission(); //Se finaliza la
comunicacion I2C
}

```

Pruebas

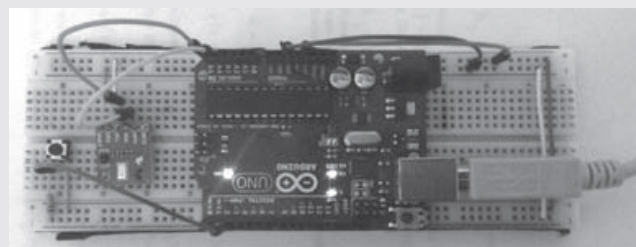


Figura 8.24 Altimetro/medidor de presión barométrica. El modo se alterna cada que se presiona el push-button.

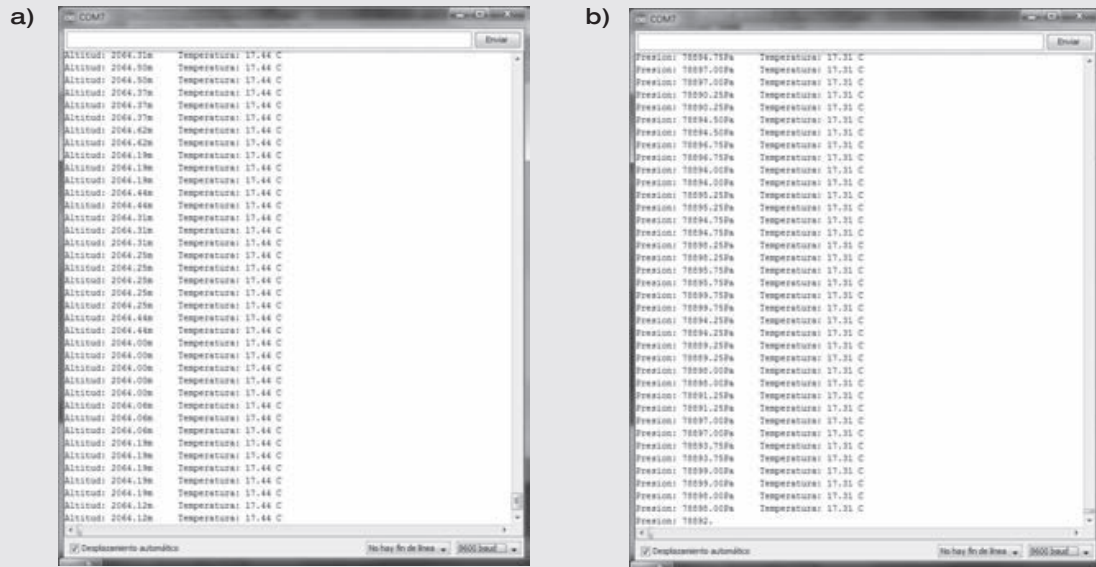


Figura 8.25 a) Altitud en metros sobre el nivel del mar. b) Presión barométrica medida en el lugar.

Sensores de presión basados en medición de capacitancia variable

Este tipo de sensores se basa en el principio de transducción de capacitancia variable, de tal modo que la transducción es entre la fuerza ejercida sobre un diafragma de área conocida y el desplazamiento de uno de los electrodos que forman el capacitor variable; así, a mayor presión, mayor desplazamiento del diafragma.

Para explicar cómo funciona este sensor es necesario recordar cómo se calcula un capacitor con respecto a su geometría:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

donde:

C : capacitancia

d : distancia entre electrodos

ϵ_r : permitividad relativa del medio

ϵ_0 : permitividad del vacío

A : área de traslape

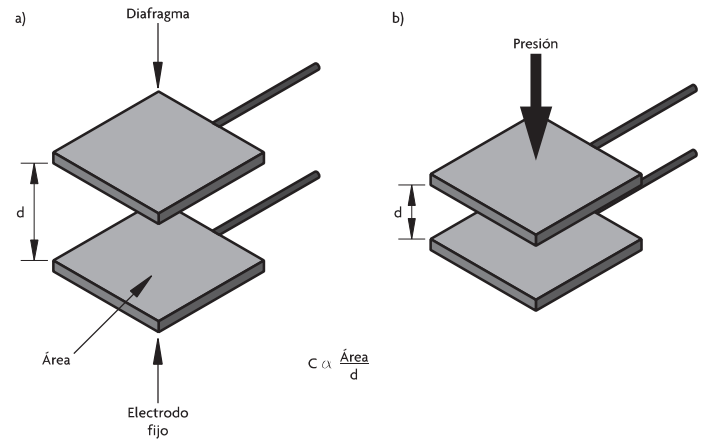


Figura 8.26 Sensor de presión basado en el principio de variación de capacitancia. a) Capacitor de placas paralelas. b) Capacitor como sensor de presión.

De acuerdo con la figura 8.26, es posible observar que cuando se aplica la presión sobre el diafragma existe un cambio en la distancia entre los electrodos, suponiendo que el electrodo opuesto esté fijo. Así, el cambio de capacitancia puede calcularse con la ecuación:

$$\frac{C}{d} = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d^2}$$

Este tipo de sensores suele implementarse como un sensor MEMS de estado sólido, debido a su baja dependencia de la temperatura y su bajo consumo de potencia, comparado con sensores pie-

zoresistivos o piezoeléctricos; otra ventaja es que al ser un sensor MEMS y tener tamaños muy pequeños, es posible afirmar que, a pesar de la naturaleza de la ecuación anterior, el sensor trabaja de manera lineal dentro de los rangos propuestos por los fabricantes.

En este tipo de sensores se suele distinguir dos arquitecturas básicas de detección, la primera consiste en implementar un principio de capacitancia diferencial, y la segunda en fabricar una micro-masa que tiene la función de electrodo móvil.

Sensores capacitivos de presión basados en capacitancia diferencial

Este principio de funcionamiento consiste en medir la diferencia de capacitancia entre dos transductores capacitivos el primero es el elemento de referencia (elemento sensitivo a la presión P_1) y el segundo transductor es sensitivo a la presión que se desea medir (elemento sensitivo a la presión P_2).

Esta configuración de sensor de presión presenta un compromiso entre sensibilidad y linealidad; esto significa que a mayor sensibilidad, menor linealidad (véase figura 8.27). Esto se debe principalmente a que cuando el diafragma sensitivo percibe la presión, la proximidad a la placa paralela no es uniforme, de tal manera que cuanto más aumenta la presión, la forma que describe el diafragma será más parecida a la de un objeto cóncavo, disminuyendo mucho la linealidad del sensor.

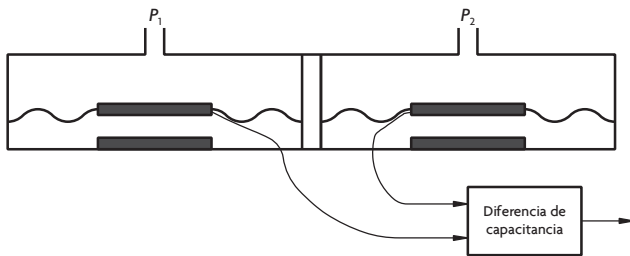


Figura 8.27 Sensor de presión basado en el principio de capacitancia diferencial.

Sensores capacitivos de presión basados en una masa móvil

Como se menciona en la sección anterior, el principal problema que presentan los sensores capacitivos de presión basados en capacitores de placas paralelas y diafragmas planos es su alta no linealidad cuando el área de traslape es grande, ya que su desplazamiento cada vez es menos uniforme. Con el fin de evitar estos problemas, la arquitectura de sensores capacitivos de presión basados en

una masa móvil ha ganado popularidad entre los sensores MEMS de presión.

Este tipo de sensores constan de un elemento de masa móvil acoplado mecánicamente al diafragma sensitivo, de tal manera que el desplazamiento de la masa móvil será proporcional a la diferencia de presiones y a la rigidez del diafragma.

El desplazamiento en el diafragma puede calcularse por medio de la ecuación:

$$y = k_x(P - P_0)$$

donde:

y : desplazamiento en el eje y

k_x : rigidez del diafragma en dirección x

P : presión aplicada

P_0 : presión de referencia

Así, la capacitancia equivalente para C_1 y C_2 cambiará de manera opuesta (véase figura 8.28):

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 - y}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 + y}$$

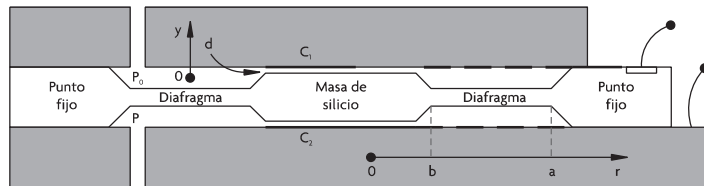


Figura 8.28 Sensor de presión capacitivo basado en el principio de masa móvil.

donde:

d_0 : distancia inicial

Al calcular la diferencia de capacitancia entre C_1 y C_2 es posible incrementar la sensibilidad del sensor. Una de las principales ventajas que tiene este principio de transducción es que a pesar de que el diafragma se sigue deformando de manera cóncava o convexa, induce un movimiento lineal en la masa móvil. Por otro lado, la desventaja que presentan es su dificultad de fabricación.

Manómetros

El manómetro es un instrumento utilizado para la medición de la presión en los fluidos, en general determinando la diferencia entre la presión del fluido y la presión local. Una configuración básica para un manómetro es un tubo de vidrio con forma de U, el cual se llena con un líquido (por lo común mercurio). Si los extremos A y B (véase figura 8.29) del tubo lleno de líquido se dejan sin conexión, considerando que se encuentran a la misma altura, el líquido tendrá alturas iguales dado que existen presiones iguales. Ahora, si se aplica un flujo con una presión diferente a la atmosférica por el extremo B, existirá un cambio en la altura del líquido, la cual será proporcional a la diferencia de presiones (véase figura 8.30).

Para la medición de presiones con manómetros de este tipo (también conocidos como manómetros de columna) se suele agregar una escala conocida que relacione la altura del líquido con la presión aplicada, conociendo una presión de referencia, la cual puede ser la atmosférica. Además de la forma en U, los manómetros de columna también son comunes en forma de tubo inclinado, los cuales siguen el mismo principio de funcionamiento.

Otro tipo de manómetro muy popular es el manómetro de Bourdon (véase figura 8.31), considerado un instrumento mecánico que emplea como elemento sensitivo un tubo metálico curvado (denominado tubo Bourdon), de sección transversal aplanada. Debido a que un extremo del tubo del manómetro de Bourdon es cerrado, la presión que se va a medir se aplica por el otro extremo. En el caso de este manómetro, a medida que la presión aumenta, el tubo tiende a adquirir una sección circular y enderezarse. El movimiento del extremo cerrado mide la presión interior y provoca el movimiento de una aguja, la cual se desplaza sobre una escala.

Los manómetros son elementos muy utilizados para la medición de presiones en sistemas neumáticos e hidráulicos, así como para la medición de flujos de fluidos.

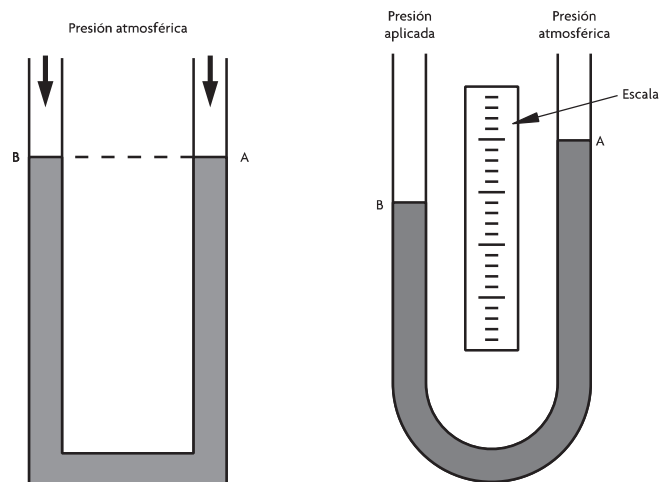


Figura 8.29 Manómetro en U a presión atmosférica.

Figura 8.30 Manómetro en U con presión aplicada.

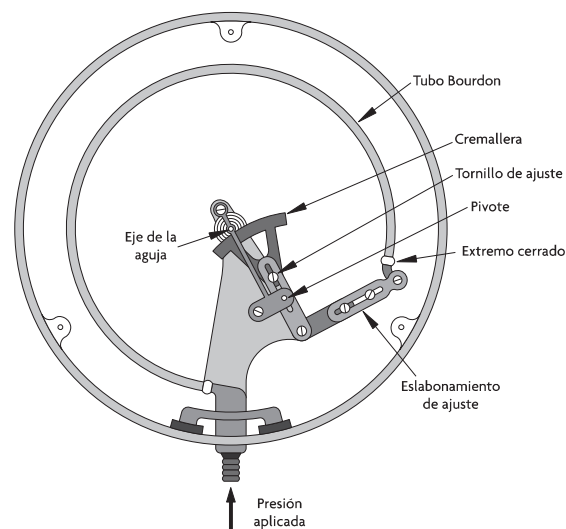


Figura 8.31 Manómetro de Bourdon.

8.2 Sensores de flujo

La medición del flujo de líquidos o gases tiene un amplio campo en diversos procesos industriales, donde además juega un papel en extremo relevante, ya que la medición de flujos sirve como base para controlar el desarrollo del proceso de manera adecuada.

La detección del flujo de un líquido o gas se puede realizar de tres formas distintas. Una es la medición vectorial, en la cual la velocidad y dirección del fluido deben ser detectados; un segundo tipo de medición es la detección del flujo volumétrico, y el tercer tipo de medición es la de flujo másico. Para la medición de flujo en cualquiera de sus tres variantes se suele emplear distintas técnicas.

Para entender los principios de funcionamiento de los sensores de flujo, primero es necesario definir algunos conceptos básicos. Así, lo primero es definir qué es un flujo y qué unidades de medida se usan para cuantificar su magnitud.

Un **flujo** se define como la cantidad de sustancia que pasa por una sección determinada durante un instante dado. Por su parte, la **unidad de medida** utilizada en el sistema internacional para cuantificar el flujo es m^3/s . Una relación muy utilizada para medir el flujo de un gas o fluido es:

$$Q_v = vA \quad (8.4)$$

donde:

Q_v : flujo volumétrico

v : velocidad de la sustancia

A : área del conducto

De la ecuación 8.4 se ve que si se conoce el área del conducto por el cual circula el fluido y su velocidad, es posible calcular el flujo volumétrico. Varios métodos de detección de flujo en conductos cerrados se basan en esta sencilla expresión; no obstante, lo que se detecta en realidad es la velocidad del fluido.

Cuando lo que se requiere es una medición vectorial del fluido, es posible determinar la dirección del flujo si se conocen las diferencias de presión en el conducto, ya que el flujo siempre irá de la zona de mayor presión a la de menor presión; así, para una medición vectorial se requiere medir tanto la velocidad de un fluido como sus presiones. Aunque a primera vista parece más compleja la labor de una medición vectorial respecto a una de flujo volumétrico, en realidad la medición vectorial se puede llevar a cabo solo si se conoce la diferencia de presiones entre dos secciones del conducto, lo que permite conocer de forma directa la dirección de flujo, y con el uso de la ecuación de Bernoulli (ecuación 8.5) podemos conocer las velocidades tomando como base las diferencias de presiones.

$$P_1 + \frac{\rho_d v_1^2}{2} + \rho_d g y_1 = P_2 + \frac{\rho_d v_2^2}{2} + \rho_d g y_2 \quad (8.5)$$

donde:

P_1 : presión en el punto 1

P_2 : presión en el punto 2

ρ_d : densidad del fluido

g : aceleración de la gravedad

v_1 : velocidad del fluido en el punto 1

v_2 : velocidad del fluido en el punto 2

y_1 : altura del fluido en el punto 1

y_2 : altura del fluido en el punto 2

La ecuación de Bernoulli establece una relación entre la presión, la velocidad y la altura de un flujo en un punto (estable, no viscoso e incompresible) respecto del mismo flujo en otro punto. Para observar la relación existente entre las presiones y las velocidades se considera que ambos puntos están a la misma altura; así, la ecuación 8.5 se simplifica como:

$$P_1 + \frac{\rho_d v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_d v_2^2}{2} \quad (8.6)$$

Si se considera que el conducto tiene un área de sección menor en el punto 2 que en el punto 1, ¿cómo serán las velocidades y presiones de un punto respecto al otro? Para responder a esto es necesario recurrir a la ecuación de continuidad, la cual establece que para un flujo incompresible que fluye a través de un conducto de área variable, el flujo másico es igual en cualquier parte del conducto.

$$m = \rho_a V \quad (8.7)$$

donde:

m : masa

V : volumen

Ahora bien, primero se define el flujo másico como la cantidad de masa de una sustancia que pasa por una determinada sección durante un instante. Como podrá recordarse, esta definición es bastante similar a la definición del flujo volumétrico. Entonces, como se vio antes, se usará la ecuación 8.4, que define al flujo volumétrico para encontrar una expresión que defina al flujo másico, la cual, para el caso planteado de un flujo incompresible, se obtiene usando la relación de masa-volumen (ecuación 8.7) y la ecuación de flujo volumétrico; así, la ecuación para el flujo másico (Q_m) queda de la forma siguiente:

$$Q_m = \rho_{vd} \quad (8.8)$$

Así, la ecuación de continuidad para el caso que se analiza queda como:

$$\rho_1 d_1 A_1 = \rho_2 d_2 A_2 \quad (8.9)$$

Si en la ecuación 8.9 se considera que la densidad del fluido es constante, entonces esta se puede reducir a:

$$d_1 A_1 = d_2 A_2 \quad (8.10)$$

De la ecuación 8.10 se puede deducir que si el área del conducto en el punto 2 es menor al área en el punto 1, para que se mantenga la igualdad en la ecuación de continuidad la velocidad en el punto 2 deberá ser mayor a la velocidad en el punto 1. Volviendo a la ecuación de Bernoulli que se había planteado para ver la relación existente entre las velocidades y presiones, ahora ya se sabe que la velocidad en el punto 2 será mayor a la velocidad en el punto 1; entonces, para que el balance de la ecuación 8.6 se mantenga, la presión en el punto 2 debe ser menor a la presión en el punto 1, entonces la relación entre la diferencia de presiones y la diferencia de velocidades en un fluido se escribe como:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_d}{2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (8.11)$$

Por último, se puede calcular la velocidad del fluido en un punto si, con base en las presiones, la ecuación 8.11 se expresa en términos de una sola velocidad. Lo anterior se puede lograr si se despeja alguna de las dos velocidades de la ecuación 8.10; en este caso, al despejar la velocidad en el punto 1, la expresión resultante sería:

$$v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (8.12)$$

Sustituyendo la ecuación 8.12 en la ecuación 8.11 se obtiene:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_d}{2} \left(v_2^2 - \left(v_2 \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right) \quad (8.13)$$

Si de la ecuación 8.13 se despeja v_2 , entonces se habrá encontrado la velocidad en el punto 2 con base en las diferencias de presión (ecuación 8.14); así, midiendo solo las presiones se podría realizar una medición vectorial.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_d \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \quad (8.14)$$

Como se mencionó antes, este cálculo sería válido para el caso de un fluido no viscoso; por tanto, no toma en cuenta la fuerza de fricción presente entre el fluido y el conducto, la cual se opondría al flujo del fluido, variando así el flujo volumétrico.

Si ahora se considera la viscosidad dinámica del fluido para definir el flujo volumétrico del mismo por el conducto, primero se debe considerar el régimen del flujo³ que se presenta en el proceso a medir.

Para definir el régimen en que se encuentra un flujo se utiliza el número de Reynolds, el cual es una relación adimensional que relaciona la inercia del fluido con la fuerza de fricción presente entre el fluido y el conducto, y se calcula con la ecuación 8.15, para el caso de conductos de sección circular.

$$Re = \frac{vd\rho_d}{\eta} \quad (8.15)$$

donde:

Re: número de Reynolds

d : diámetro del conducto

η : viscosidad dinámica del fluido

Por una parte, si el número de Reynolds resulta menor a 2000, se dice que el flujo está en régimen laminar; por tanto, el perfil de velocidades del fluido estará definido por una parábola, teniendo el fluido su máxima velocidad al centro de la sección transversal, como se observa en la figura 8.32 a). Pero, por otra parte, si el número de Reynolds es mayor a 4000 se dice que el flujo está en régimen turbulento, con un perfil de velocidades irregular, pero con la misma velocidad promedio en toda la sección transversal, como se observa en la figura 8.32 c). Para valores intermedios del número de Reynolds se pueden tener flujos laminares, turbulentos o mixtos, según la velocidad y viscosidad del fluido y el tipo de conducto, como se ve en la figura 8.32 b).

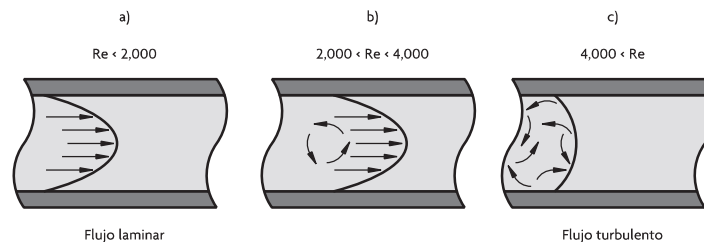


Figura 8.32 Regímenes de flujo.

El cálculo del flujo volumétrico considerando los efectos de la viscosidad se deberá realizar según el régimen del flujo; para un flujo laminar el flujo volumétrico viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q_v = \frac{\pi r^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L} \quad (8.16)$$

³ El régimen de un flujo se define por la combinación del efecto de gravedad y viscosidad, y se relaciona en forma directa con el perfil de velocidades de un fluido dentro de un conducto.

La ecuación anterior es mejor conocida como la ecuación de Poiseuille.

Por último, cuando se requiere medir el flujo de gases es importante tener en cuenta la ecuación general de los gases (ecuación 8.17), de la cual se puede decir que para cada variación de presión o temperatura existe una variación en el volumen del gas. Por tanto, es importante considerar las condiciones de operación de presión y temperatura cuando se hacen mediciones del flujo de gases,

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (8.17)$$

A continuación se presentan los distintos principios de operación de los sensores de flujo para fluidos monofásicos en conductos cerrados.

Sensores de presión diferencial o deprimógenos

Son los sensores de flujo más antiguos para realizar la medición del flujo volumétrico en una tubería cerrada. Este tipo de sensores miden las diferencias de presión antes y después de un obstructor, conocido como elemento primario. Con las presiones medidas, y dado que es conocida la forma del obstructor, es posible calcular el flujo dentro del conducto. Los elementos primarios más usados para sensores de flujo son:

- **Placa de orificio.** Los sensores que usan platos de orificio son los más sencillos y baratos, en cuanto a medición de flujo se refiere, ya que simplemente se usa una placa con un orificio de dimensiones y ubicación específicas, la cual se coloca dentro del conducto, y se miden las presiones del fluido antes y después de la placa, con el fin de determinar el flujo volumétrico (véase figura 8.33).
- **El tubo Venturi.** Un tubo Venturi (véase figura 8.34) se compone de tres secciones. La sección de entrada, tiene un diámetro igual al del conducto y una parte cónica que concluye en un diámetro igual al diámetro de garganta; en esta sección es donde se mide la primera presión. La segunda sección se conoce como la **garganta**, y es donde se lleva a cabo la medición de la segunda presión. Por último, se tiene **la salida**, que es la tercera sección, la cual tiene una parte cónica que inicia con un diámetro igual al de garganta y termina con el diámetro del conducto.

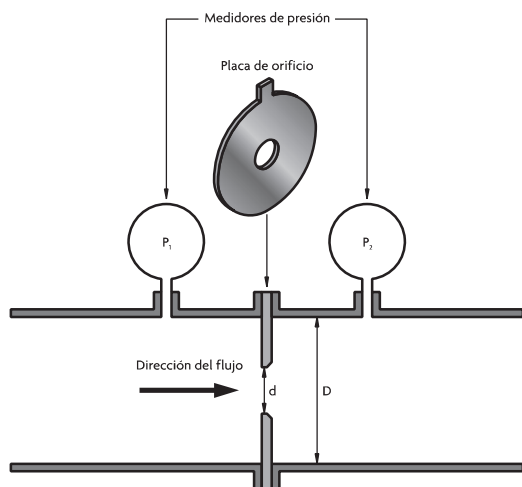


Figura 8.33 Sensor basado en una placa de orificio.

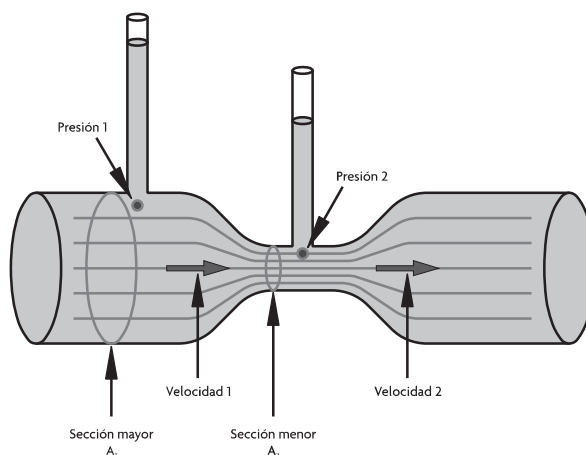


Figura 8.34 Tubo Venturi.

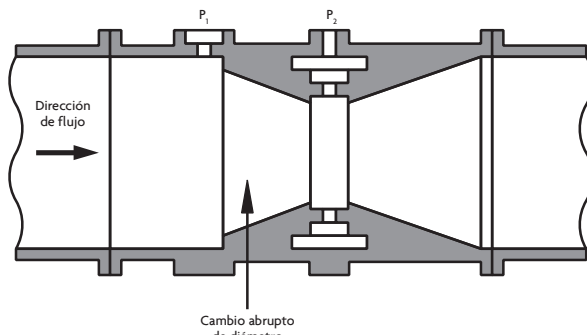


Figura 8.35 Tubo de Dall.

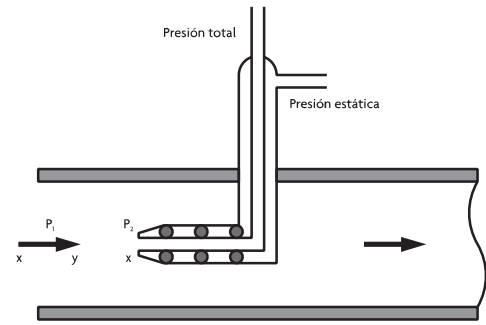


Figura 8.36 Tubo de Prandtl.

Cuando se desea usar un tubo Venturi es importante que el flujo de entrada sea uniforme, por lo que es indispensable que el tubo se instale entre dos tramos largos y rectos del conducto.

- **El tubo de Dall.** Es una variación del tubo Venturi, donde la sección de entrada termina con un cambio abrupto de diámetro seguido de una reducción cónica hasta una pequeña garganta a la cual le sigue una sección cónica uniforme de salida. En este, las presiones se toman al igual que en el tubo Venturi: a la entrada y en la garganta del tubo (véase figura 8.35).

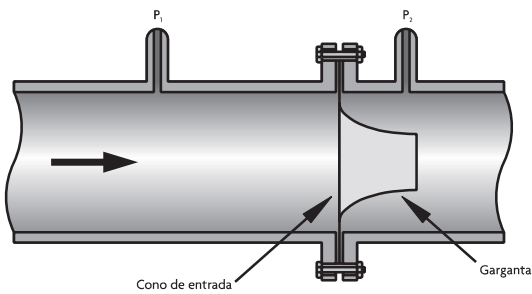


Figura 8.37 Tobera.

- **El tubo de Prandtl.** La idea de un tubo de Prandtl (véase figura 8.36) es combinar en un solo instrumento un tubo de Pitot, que mide la presión total del fluido, y un tubo piezométrico o manómetro, que mide la presión estática del fluido. En el tubo de Prandtl se mide la diferencia de estas dos presiones y utilizando la ecuación de Bernoulli se puede conocer la velocidad del fluido y después el flujo volumétrico.
- **Tobera.** Las toberas pueden considerarse como una variación del plato de orificio, aunque, a diferencia de este, la tobera tiene una sección cónica que termina en una garganta similar al tubo Venturi, por lo que las presiones se miden antes y después de la tobera (véase figura 8.37).

Los sensores de flujo de presión diferencial basados en platos de orificio, tubos Venturi y toberas están normados por las regulaciones ISO 5167, API 2530 y DIN 1952.

Sensores de área variable

Al igual que los sensores de presión diferencial, los sensores de área variable usan un obstructor del flujo; aunque, a diferencia de los sensores deprimógenos, en estos la presión se mantiene constante y lo que cambia es el área por la que circula el fluido. El cambio del área se obtiene al desplazarse el obstructor, debido a un aumento del flujo volumétrico en el conducto.

El sensor de área variable más común es el rotámetro (véase figura 8.38), que se compone de un tubo de sección cónica dentro del cual también se coloca un obstructor de perfil cónico, mismo que es desplazado cuando se hace pasar un flujo por el rotámetro; en este caso, el obstructor se mueve hasta alcanzar un punto de equilibrio, ya que para medir el flujo se mide la distancia que el obstructor se desplazó.

Se prefiere que los rotámetros sean de vidrio, ya que sobre este material es posible colocar una escala como en un termómetro, la cual permite una lectura directa del flujo; sin embargo, para grandes presiones, lo común es que los rotámetros se fabriquen de metal, donde la lectura del desplazamiento se hace mediante el uso de otro sensor, el cual mide el desplazamiento del obstructor. Es importante mencionar que el material con el que se fabrica el obstructor depende de la presión de operación, así como del régimen de flujo y del fluido a detectar.

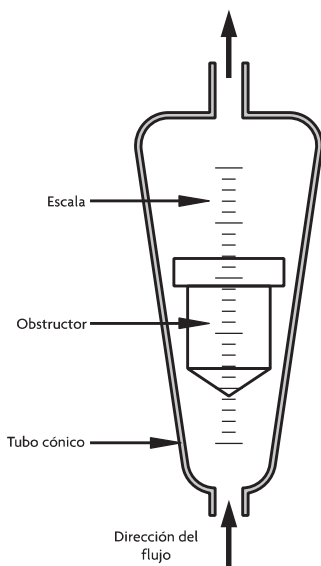


Figura 8.38 Rotámetro.

Sensores de turbina

Como su nombre lo indica, el principio de funcionamiento de estos sensores es una turbina, la cual se coloca dentro del conducto, sobre la cual se hace incidir el flujo, provocando que esta gire. La velocidad angular de la turbina será casi proporcional a la velocidad del fluido (véase figura 8.39). En este tipo de sensores lo que se mide, entonces, es la velocidad angular de la turbina, lo cual por lo común se hace con un encoder magnético.

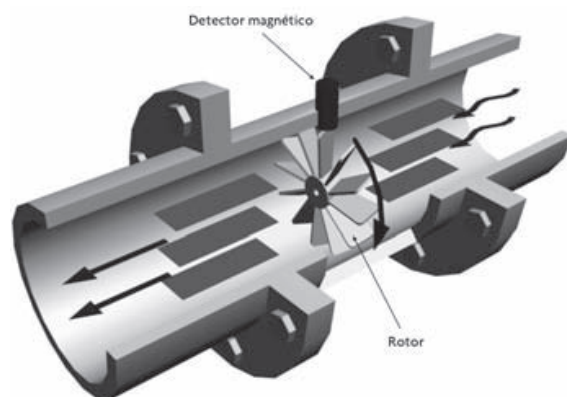


Figura 8.39 Sensor de turbina.

Sensores de desplazamiento positivo

Los sensores de desplazamiento positivo (véase figura 8.40) miden el flujo desplazando volúmenes conocidos del fluido, lo que se logra con el uso de elementos mecánicos, por lo común rotacionales, contenidos en cámaras de volumen conocido. Cuando un flujo intenta pasar por la cámara ocasiona que los elementos mecánicos roten, lo que permite el paso del fluido a la cámara. El flujo continuo causa un movimiento cíclico de los elementos mecánicos que se ve acompañado de un alojamiento y desalojo del fluido en las cámaras; dado que el volumen de las cámaras es conocido, si se conoce a cuántas revoluciones por unidad de tiempo se mueven los elementos mecánicos, se puede calcular el flujo volumétrico.

Cuando se miden líquidos con los sensores de desplazamiento positivo, los elementos mecánicos que más se utilizan son los engranes elípticos o discos, mientras que para la medición de gases se prefieren los diafragmas.

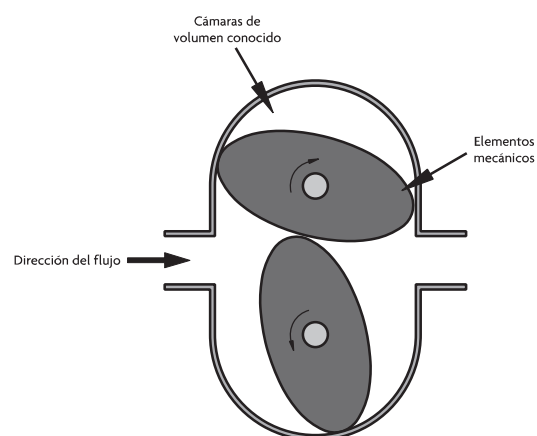


Figura 8.40 Sensor de desplazamiento positivo.

Sensores electromagnéticos

Los sensores de flujo electromagnéticos se basan en la ley de inducción de Faraday, la cual establece que cuando un conductor se desplaza de manera perpendicular a un campo magnético, el voltaje inducido será proporcional a la velocidad de desplazamiento del conductor; en este caso, el conductor será el fluido a medir, por lo que es importante hacer notar que el voltaje inducido será independiente de la presión, temperatura o viscosidad del fluido. Entonces, para conocer el flujo volumétrico a través del uso de este tipo de sensores, primero se mide la velocidad del flujo y luego se usa el dato de área del conducto.

Este tipo de sensores se compone de dos unidades (véase figura 8.41): 1) **la unidad de generación de campo magnético**, la cual consiste en una bobina que se acopla alrededor de la sección del conducto sobre la cual se medirá y una fuente de excitación (de CA o CD), que en conjunto generan el campo magnético necesario para realizar la medición, y 2) **la unidad de medición**, la cual consiste en dos electrodos perpendiculares al eje de la bobina, que se acoplan al conducto para medir el voltaje inducido, entrando directamente en contacto con el fluido, y una etapa de amplificación de señal, ya que los voltajes inducidos no alcanzan valores mayores a unos cuantos mV. Dado que los conductos son fabricados, por lo común, con materiales conductores, como el acero inoxidable, para tener una buena lectura del voltaje inducido se incluye un aislante, para evitar que el voltaje inducido se disipe en la tubería. Otro punto importante es que el recubrimiento

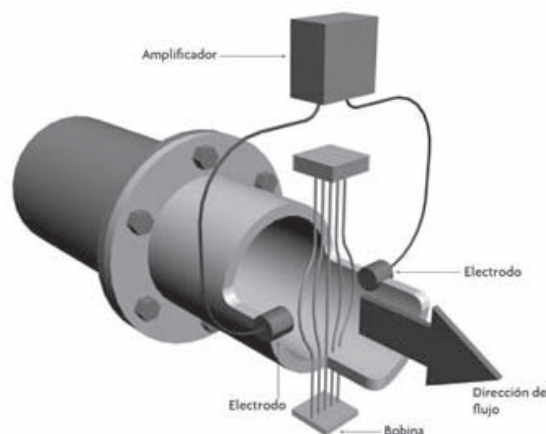


Figura 8.41 Sensor electromagnético de flujo.

de la bobina que utilizan estos sensores por lo común se hace con acero al carbono, de manera que el campo magnético se concentre dentro de la zona de interés para realizar la medición.

Entre las ventajas de estos sensores destacan:

- No poseen partes móviles.
- No obstruyen el conducto.
- Están disponibles para un amplio rango de diámetros.
- Su precisión no se ve afectada por cambios de temperatura o viscosidad.

Por otra parte, su mayor limitación es que los fluidos a medir deben tener una conductividad relativamente alta.

Sensores ultrasónicos

Existen dos principios de funcionamiento básicos para estos sensores: el efecto Doppler y el principio del tiempo de tránsito.

Los sensores que se basan en el efecto Doppler usan un emisor y un receptor ultrasónicos, los cuales se alinean de tal manera que la onda ultrasónica (por lo común de 1 MHz) no se transmita de manera perpendicular a la dirección de flujo (véase figura 8.42).

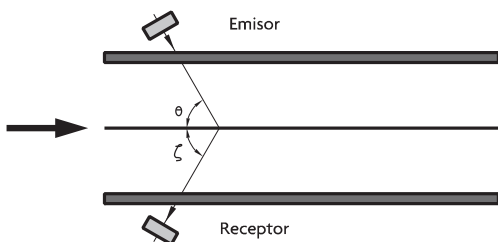


Figura 8.42 Configuración de un sensor de flujo ultrasónico basado en el efecto Doppler.

Lo que miden estos sensores es la velocidad del flujo, lo que logran comparando las frecuencias de la onda emitida y la recibida; una vez conocida la velocidad, se calcula el flujo volumétrico.

Los sensores que se basan en el principio de tránsito utilizan un par de transductores ultrasónicos colocados de tal forma que se encuentren diametralmente opuestos y su línea de transmisión forme un ángulo θ respecto a la dirección del flujo (véase figura 8.43). La diferencia en los tiempos que le toma a la onda emitida por el ultrasónico 1 llegar al ultrasónico 2, y viceversa, es lo que interesa medir en este tipo de sensores; esa diferencia de tiempo está dada por:

$$\Delta t = \frac{2dv \cos \theta}{v_s^2} \quad (8.18)$$

donde:

v_s : velocidad del sonido

v : velocidad del fluido

d : distancia entre ultrasónicos

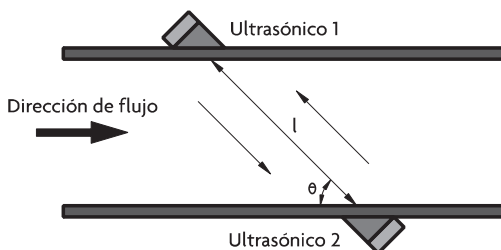


Figura 8.43 Configuración de un sensor de flujo ultrasónico basado en el tiempo de tránsito.

De la ecuación 8.18 se observa que, dado que la velocidad del sonido es una constante, la relación entre la velocidad del fluido y la diferencia de tiempos es lineal. Sin embargo, las dificultades para implementar este tipo de sensores se basan en que las diferencias de tiempo son muy pequeñas ($< \mu s$) y que el valor de V varía según la temperatura. Para aumentar la precisión del sensor y que, además, pueda trabajar de manera adecuada con flujos turbulentos, por lo común se usan arreglos de múltiples sensores.

Sensores de vórtice

Estos sensores se basan en el hecho de que después de que un flujo pasa un obstáculo se forman vórtices. Este fenómeno se conoce como la calle de vórtices de Karman. Así, para la medición del flujo con estos sensores se coloca un obstáculo en la parte media del conducto; de esta manera, al tiempo

que el flujo pasa el obstáculo, se forman vórtices en ambos lados del obstáculo. La frecuencia con que aparecen los vórtices resulta proporcional a la velocidad del fluido; por tanto, dicha frecuencia también es proporcional al flujo volumétrico. Los vórtices generados se contabilizan mediante el uso de sensores de presión, capacitivos, piezoeléctricos o ultrasónicos, los cuales se colocan a los lados del obstáculo (véase figura 8.44).

Estos sensores se emplean cuando se presentan flujos turbulentos con números de Reynolds entre 3 000 y 10 000, pues por debajo de estos valores no se presentan vórtices, y por tanto el sensor resulta inútil.

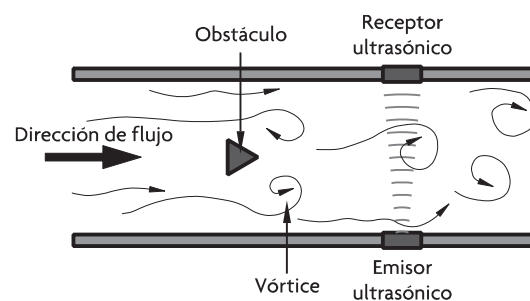


Figura 8.44 Sensor de vórtice con detector ultrasónico de vórtices.

Sensores de Coriolis

Como su nombre lo indica, este tipo de sensores se basa en el efecto Coriolis. Se caracterizan por ser sensores que permiten la medición directa del flujo másico, el cual constituye una cantidad muy importante en la mayoría de los procesos de la industria química.

El principio básico de funcionamiento de los sensores de Coriolis es hacer fluir la sustancia a detectar por una manguera flexible, la cual se encuentra oscilando. Cuando el fluido pasa por las mangueras que oscilan, se generan fuerzas de Coriolis que actúan sobre las partículas del fluido, las cuales, a su vez, provocan que las mangueras se tuerzan, lo que tiene como consecuencia un desfase en la oscilación de las mangueras respecto a los puntos fijos A y B (véase figura 8.45), donde se colocan sensores de proximidad; así, la diferencia en el tiempo de registro de estos sensores es el parámetro de interés para calcular el flujo másico por medio de la relación:

$$Q_m = \frac{k_s}{8r^2} \Delta t \quad (8.19)$$

donde:

k_s : rigidez del sistema

r : radio de la manguera

Las variantes de sensores de Coriolis donde las mangueras son rectas funcionan de manera muy similar; la única diferencia radica en que la medición que se realiza en estos es la de la frecuencia de oscilación, la cual es proporcional al flujo másico. Los sensores que se usan para medir dichas frecuencias por lo común se montan sobre las mangueras mismas, no en puntos de referencia estáticos (véase figura 8.45).

Los sensores basados en el efecto Coriolis son bastante precisos y poco sensitivos a factores como cambios de presión, temperatura, densidad o viscosidad del fluido, lo cual representa una gran ventaja respecto al resto de los sensores que se han presentado antes; sin embargo, resultan más costosos.

Es importante resaltar el hecho de que las oscilaciones de la manguera deben ser en dirección perpendicular a la dirección de flujo para que exista el efecto Coriolis. Otro punto importante es que estos sensores tienen aplicación en la medición de flujos bifásicos.

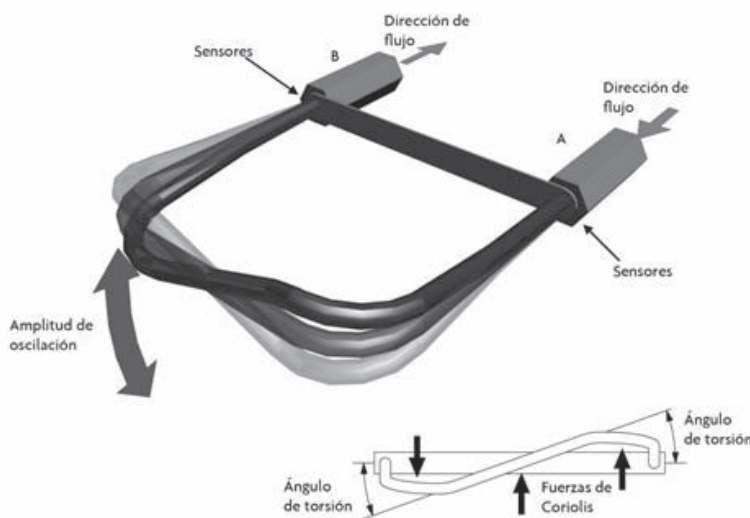


Figura 8.45 Funcionamiento de un sensor de Coriolis.

Sitios de Internet

www.omega.com

<http://www.flowmeters.com>

<http://www.yokogawa.com/us/products/field-instruments/flow-meters>

<http://www.automation.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/flow-measurement>

<http://www.tricorflow.com/home.html>