

Capítulo 2. CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS

1. INTRODUCCIÓN

En este segundo capítulo se reflejan los resultados obtenidos por el sistema sensor de CO₂, una vez integradas todas las partes del nodo.

En primer lugar se presenta la configuración del convertidor analógico digital de la placa Arduino. A continuación se muestra la caracterización de la impedancia de salida del sensor TGS4161, después se expone la placa de acondicionamiento de señal, así como la manera de establecer la ganancia y la tensión de offset.

Por último se presenta la calibración del sensor de CO₂ obteniendo sus propios parámetros, y se presentan los resultados obtenidos a corto plazo.

2. CONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR A/D PARA EL TGS4161

Para obtener el valor de la concentración de CO₂ en el ambiente necesitamos hacer uso del convertidor A/D del microcontrolador. El sensor TGS4161, en este caso, nos proporciona a su salida una fuerza electromotriz (EMF) que varía en función de la concentración de CO₂. El objetivo es obtener a través del convertidor A/D la tensión convertida a digital, lista para ser registrada. El convertidor que se ha utilizado es el que se encuentra integrado en la placa Arduino.

El microcontrolador elegido en el capítulo 1 incorpora un convertidor A/D de 10 bits. El conversor A/D está compuesto por seis canales (A0-A5) configurados para recibir cualquier señal analógica y un terminal para introducirle un voltaje de referencia.

El voltaje de referencia indica el rango de la conversión A/D, puede ser seleccionado como el mismo voltaje con el que alimentamos el conversor A/D, con el voltaje de referencia interno o con un voltaje de referencia externo (V_{REF}).

Para obtener el resultado de la conversión A/D, se debe consultar el valor del pin asignado al sensor de CO₂, aplicando la siguiente conversión:

$$ADC = \frac{V_{IN} \times 1024}{V_{REF}}$$

Donde V_{IN} es el voltaje de entrada por el canal analógico y V_{REF} es el voltaje de referencia seleccionado.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA IMPEDANCIA DE SALIDA DEL TGS4161

El fabricante del sensor no especifica la impedancia de salida. Por lo tanto se ha utilizado un método alternativo para poder medir su valor. El método a implementar consiste en un divisor de tensión formado por dos resistencias. Se plantea un modelo del sensor como un generador, que se compone de una fuente de tensión E (EMF) y su respectiva resistencia interna R_i . A este generador se le conecta a la salida una resistencia R de valor conocido formando dicho divisor de tensión.

Cuando la resistencia de calentamiento del sensor está alimentada y el sensor está expuesto a una concentración constante de CO_2 , la tensión que entrega el sensor es constante.

Las medidas se han realizado en el laboratorio bajo las siguientes condiciones:

Concentración $CO_2 = 0,08 \%$ (Concentración normal de CO_2 en el ambiente)

Temperatura = 29 °C

En primer lugar se ha medido la tensión en vacío que entrega el sensor. Se ha utilizado un amplificador operacional a la salida en modo seguidor de tensión como recomienda el fabricante del sensor y un voltímetro a la salida. El amplificador operacional TLC271 utilizado, cumple con las especificaciones que requiere el fabricante del sensor, que son una corriente de bias menor de 1 pA y una impedancia de entrada mayor de 100 GΩ. La figura 23 muestra el circuito utilizado para la medida de tensión que entrega el sensor en vacío.

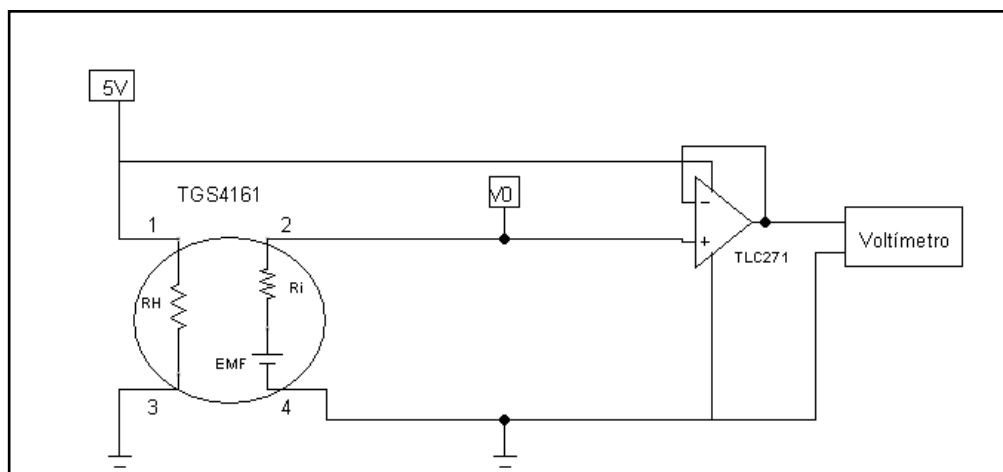


Figura 23. Circuito de medida de la tensión del sensor TGS4161.

El valor obtenido de V_0 que se corresponde con la EMF que entrega el sensor y que es la misma tensión que se mide en el voltímetro, ha sido de 440 mV.

$$E = EMF = V_0 = 440 \text{ mV}$$

Una vez obtenido este valor, conectamos una resistencia de valor conocido ($R=100M\Omega$) a la salida del sensor y medimos la tensión entre sus terminales también a través del circuito seguidor de tensión como muestra la figura 24.

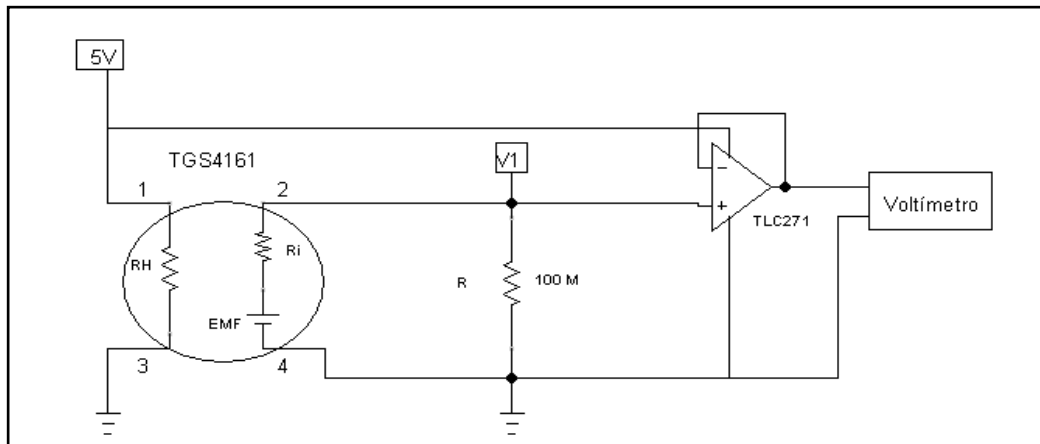


Figura 24. Circuito de medida para la caracterización de la impedancia del sensor TGS4161.

El valor obtenido de la tensión $V1$ en este circuito ha sido de 140 mV. De esta manera hemos obtenido todos los valores de tensión necesarios para poder calcular la resistencia interna (R_i) del sensor, extraída de la expresión del divisor de tensión:

$$V1 = \frac{E \cdot R}{R_i + R}$$

Aislando R_i de la expresión anterior se obtiene:

$$R_i = \frac{E \cdot R}{V0} - R = 214,28 M\Omega \sim 200 M\Omega$$

La impedancia de salida del sensor TGS4161 para estas condiciones de trabajo es de 200 MΩ.

4. SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

Tal y como indica la hoja de características del sensor, el TGS4161 debe de estar acondicionado a su salida por un circuito de amplificación de la señal, ya que su tensión de salida varía entre los 220 y los 490 mV. El fabricante propone un amplificador inversor por ello, se ha diseñado y realizado el siguiente circuito:

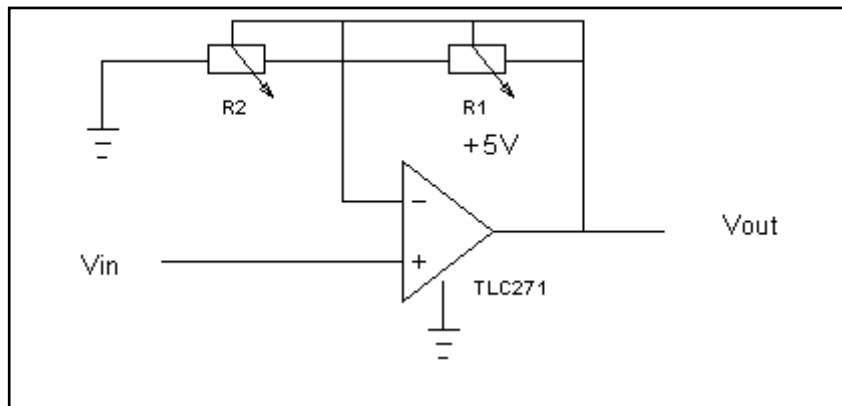


Figura 25. Circuito inversor para el acondicionamiento de señal.

Como la tensión máxima que puede proporcionar el sensor TGS4161 es de 490 mV y queremos trabajar con valores intermedios del convertidor A/D, se propone una ganancia de valor 5 para el sistema de amplificación.

Para obtener la ganancia adecuada de nuestro sistema y que pudiera ser modificada en cualquier momento, se introdujo en el circuito inversor dos potenciómetros R1 y R2 de valor 20K, siendo la ganancia del circuito la siguiente:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = G = \frac{R2 + R1}{R1}$$

El procedimiento que se ha seguido para establecer la ganancia a nuestro circuito de acondicionamiento ha sido la de conectar a la entrada del circuito un potenciómetro, variando el valor del potenciómetro se ha conseguido una tensión de 0,5V a la entrada del A.O, sabiendo que queremos obtener una ganancia de 5, se ha ido variando los potenciómetros R1 y R2 hasta establecer en la salida un valor de 2,5 V y así tener la ganancia deseada.

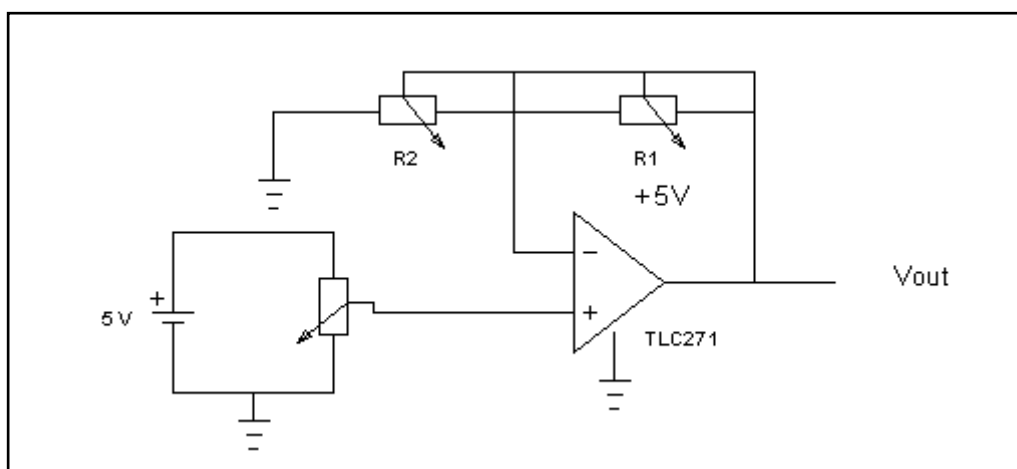


Figura 26. Circuito para establecer la ganancia al A.O.

En cuanto a la tensión de offset se ha incluido en el circuito de acondicionamiento de señal un divisor de tensión con un potenciómetro, entre los pines 1 y 5 del AO, variando el valor de R3 se ha conseguido eliminar la tensión residual tal y como indica la hoja de características del TLC271, este circuito se puede ver en la siguiente figura:

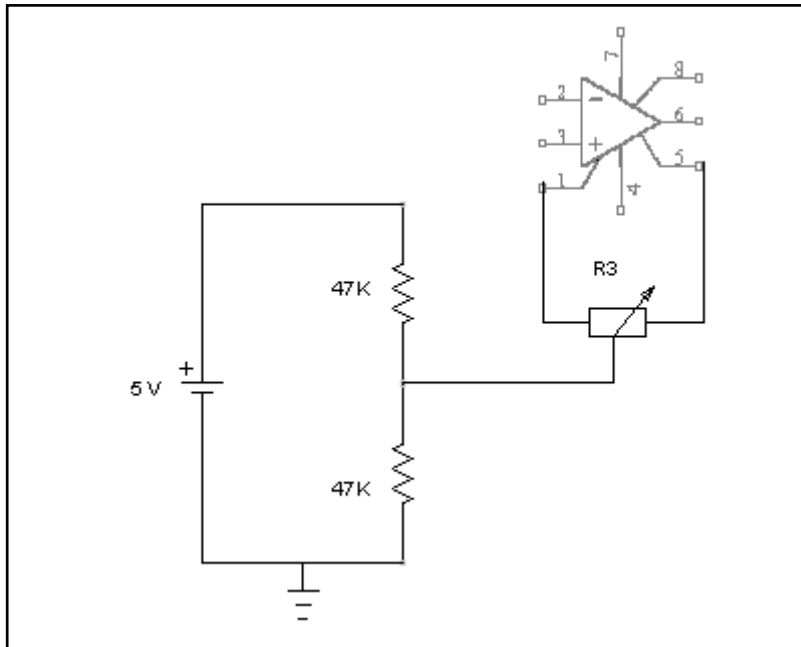


Figura 27. Circuito para eliminar la tensión de offset.

Un amplificador operacional no puede suministrar más de la tensión con la que se alimenta, normalmente el nivel de saturación es del orden del 90% del valor con el que se alimenta. Cuando se da este valor se dice que satura y no está amplificando, como las tensiones que se están manejando con el sensor TGS4161 son pequeñas y no llegan a 5 V, se ha decidido alimentar el circuito de acondicionamiento de la señal a 5V, desde uno de los pines de la placa de Arduino.

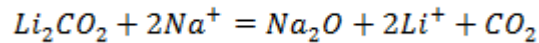
5. MEDIDAS DE CO₂

Se va a realizar una calibración teórica ya que no se dispone de ningún instrumento de calibración para el sensor de CO₂ (TGS4161) escogido para el sistema.

Acto seguido se presentan los resultados obtenidos a corto plazo ya que la concentración de CO₂ no varía a lo largo del día de una manera considerable.

5.1 Calibración

Cuando se expone un sensor químico al gas de CO₂ se produce la siguiente reacción electroquímica:



Como resultado de la reacción electroquímica se genera una fuerza electromotriz (EMF) en función de la cual podemos obtener la concentración de CO₂.

Para calibrar el sensor de CO₂ hay que obtener el valor constante (E_c) incluido en la ecuación de Nernst. Para obtener este valor hay que medir el valor de energía electromotriz (EMF) a la salida del sensor conociendo el valor de la concentración de CO₂ en el ambiente. También es necesario conocer el valor de la temperatura ambiental en ese momento.

$$E_c = EMF + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \log[P(CO_2)]$$

P (CO₂): Presión parcial de CO₂ (ppm)

EC: Valor constante (V)

T: Temperatura (K)

R: Constante de gas (J/ (mol·K))

F: Constante de Faraday(C/mol)

La calibración se llevó a cabo en el laboratorio donde había una temperatura de 29,12°C y se obtuvo una salida del amplificador de 2,180 V. Para obtener el valor de EMF se dividió por la ganancia, que comprobada experimentalmente se obtuvieron 5, y se obtuvo una EMF de 436,16 mV. Ya que en el laboratorio no se dispone de un medidor de CO₂ la concentración de CO₂ se tomó como referencia 380 ppm, valor aproximado que proporciona el ministerio de medio ambiente. Las constantes de Faraday ($F=9,649 \cdot 10^4$ C/mol) y de gas ($R=8,314$ J/ (mol·K)) son conocidas. A partir de la ecuación y los valores expuestos anteriormente obtenemos:

$$E_c = 436,16 \cdot 10^{-3} + \frac{(29,12 + 273,15) \cdot 8,314}{2 \cdot 9,649 \cdot 10^4} \cdot \ln 380 = 5135,168 \text{ mV}$$

Una vez que conocemos el valor constante del sensor TGS4161 obtenemos la siguiente ecuación que relaciona la energía electromotriz a la salida del sensor con la concentración de CO₂.

$$EMF = 513,516 \cdot 10^{-3} - 0,013022 \cdot \ln[P(CO_2)]$$

Una vez conocemos la ecuación que relaciona la EMF y la concentración de CO₂ obtenemos la curva de respuesta del sensor TGS4161 a 29,12 °C representada

en la siguiente figura.

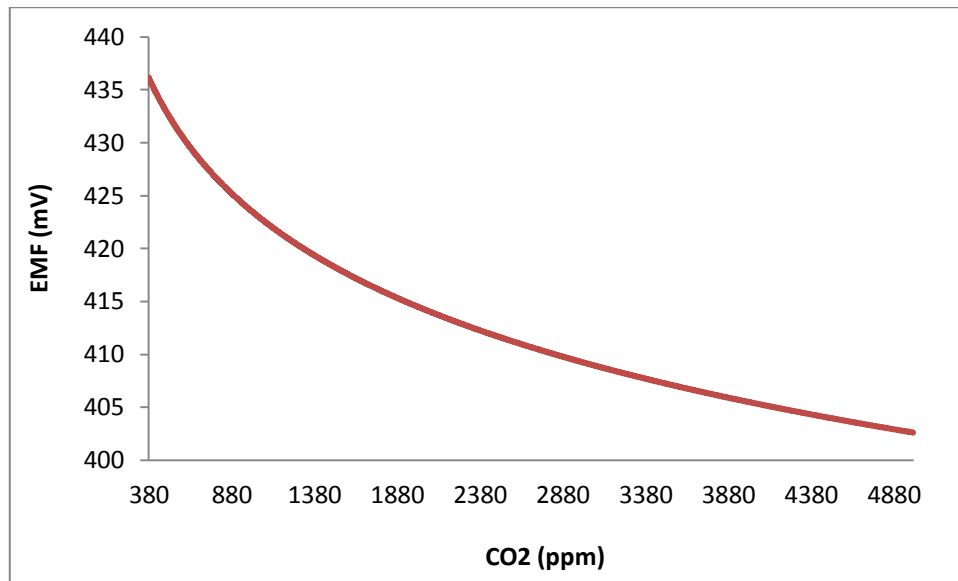


Figura 28. Curva de respuesta del sensor TGS4161.

Cabe recordar, que como se ha comentado anteriormente, se realiza una calibración teórica puesto que para obtener el valor de E_c tomamos como concentración de CO_2 una concentración aproximada debido a que no se dispone de un medidor de CO_2 .

A pesar de la inexactitud de la calibración observamos que el valor a 380 ppm (436,163 mV) de la curva respuesta está dentro del rango de valores de EMF (220~490 mV) a 380 ppm proporcionado por el fabricante.

5.2 Resultados

Los resultados obtenidos son a corto plazo ya que a lo largo del día no se producen cambios notables en la concentración de CO_2 en el ambiente.

Una de las fuentes de CO_2 es la exhalación en el aliento humano, para observar las variaciones se ha introducido el sistema sensor de CO_2 en una caja de cartón completamente cerrada. Mediante un tubo muy fino se exhala dentro de la caja y se observa que a medida que vamos exhalando la fuerza electromotriz (EMF) va decreciendo.

Número de exhalaciones	EMF del sensor TGS4161 (mV)
0	447,18
1	424,96
2	410,23
3	405,66
4	400,83
5	396,33

Tabla 5. Fuerza electromotriz (EMF) en función del número de exhalaciones.

Observamos que a la quinta exhalación el valor de EMF se estabiliza y no decrece más. Ya que no disponemos de ninguna manera de saber la concentración exacta atribuimos el valor de la quinta exhalación a la máxima concentración de CO₂ (5000 ppm) que nos proporciona el TGS4161. Cabe destacar que no coincide con la respuesta teórica calculada anteriormente (Figura 28), aunque sí que está dentro de los valores establecidos por las especificaciones del fabricante.

En la siguiente figura se observa como varían los valores de EMF en función del número de exhalaciones. Como se puede apreciar cuando aumentamos el número de exhalaciones el valor de la fuerza electromotriz (EMF) del sensor decrece y sigue una curva que se aproxima a la de una función exponencial.

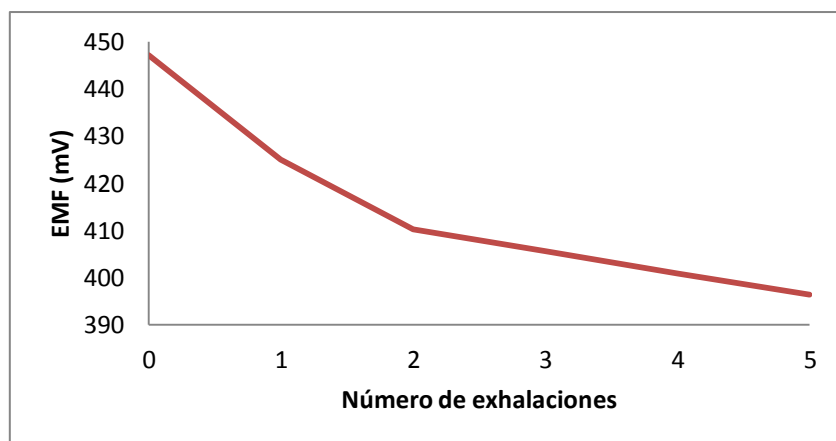


Figura 29. Fuerza electromotriz (EMF) en función del número de exhalaciones.

Si se compara la curva de respuesta del sensor TGS4161 teórica (Figura 28) con la curva respuesta del sensor TGS4161 obtenida experimentalmente vemos que tienen una forma parecida. La curva teórica sigue una ecuación experimental mientras que la curva obtenida experimentalmente se aproxima.

Si miramos los datos técnicos del TGS4161, se observa que la variación de EMF desde 350 ppm a 3500 ppm está comprendida entre 44 y 72 mV. Como vemos en la anterior tabla la variación de EMF desde una concentración aproximada de 380 ppm y una concentración aproximada de 5000 ppm es de 47,79 mV. Por lo tanto vemos que se comprueba experimentalmente que la variación está dentro de los márgenes establecidos por el fabricante.

Debido a que no se ha podido calibrar ni caracterizar el sensor TGS4161, el sistema final no tendrá la capacidad de proporcionar datos de concentraciones concretas. En cambio sí que estará capacitado para dar un aviso cuando se esté llegando a valores cercanos a 5000 ppm, concentración máxima captada por el TGS4161.

