



Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

DESING OF A CO₂ SENSOR WITH ARDUINO

Autor

Javier Casas Ros

Directores

Raúl Igual Catalán
María Abián Vicén

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, Universidad de Zaragoza

Año
2021

Resumen

El presente trabajo engloba el diseño y la implementación de un sistema electrónico programable hecho con Arduino cuya función es medir la cantidad de CO₂ en espacios cerrados con la finalidad de controlar la ventilación de los mismos y así evitar o disminuir los contagios frente al Covid-19.

Este trabajo consta de dos procesos experimentales en los cuales se realizan distintas pruebas para poder medir la validez del sensor diseñado; uno de los procesos es con el sensor al aire libre y el otro con el sensor encapsulado. Así, el trabajo finaliza con el diseño 3D de una caja cuya función es encapsular el sensor diseñado.

Abstract

This work deals with the design and implementation of a programmable electronic system made with Arduino whose function is to measure the amount of CO₂ in closed spaces in order to control their ventilation and thus avoid or reduce the transmission of Covid-19.

This works consist of two experimental processes in which different tests are carried out to measure the validity of the designed sensor: one of the processes is with the sensor in the open air and the other with the encapsulated sensor. This way, the works ends with the 3D design of a box whose function is to encapsulate the design

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	MOTIVACIÓN	1
2.	OBJETIVOS.....	1
3.	INTRODUCCIÓN.....	2
3.1	SENSORES DE CO ₂	2
3.1.1	EI MQ-135.....	2
3.1.2	SENSOR DE CALIDAD DE AIRE CCS811	3
3.1.3	SENSOR MG811	4
3.1.4	SENSOR MH-Z19.....	4
3.2	ARDUINO	5
4.	MATERIALES.....	6
4.1	SENSOR DE CO ₂	6
4.2	MICROCONTROLADOR ARDUINO.....	8
4.3	PANTALLA LCD	9
4.4	LEDS	10
4.5	POTENCIOMETRO.....	11
4.6	SENSOR DE COMPARACIÓN	11
5.	MONTAJE	12
5.1	LCD CON ARDUINO.....	12
5.2	SENSOR MH-Z19 CON ARDUINO	13
5.3	LEDS CON ARDUINO.....	13
5.4	MONTAJE POTENCIOMETRO	13
5.5	MONTAJE COMPLETO	14
6.	GRAFO DE ESTADOS DEL CÓDIGO.....	14
7.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	15
7.1	PRIMERA PRUEBA	16
7.1.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	17
7.1.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	18
7.1.3	GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN	18
7.1.4	ERRORES	19
7.2	SEGUNDA PRUEBA.....	19
7.2.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	19
7.2.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	21
7.2.3	GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN	21
7.2.4	ERRORES	22
7.3	TERCERA PRUEBA	22
7.3.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	22
7.3.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	24
7.3.3	GRAFICO DE BLAND-ALTMAN	24
7.3.4	ERRORES	25
7.4	CUARTA PRUEBA	25
7.4.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	25
7.4.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	26
7.4.3	GRAFICO DE BLAND ALTMAN	27
7.4.4	ERRORES	28
8.	CONCLUSIONES EXPERIMENTALES	28
9.	ENCAPSULADO	29
9.1	PRUEBA ENCAPSULADO 1	30

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

9.1.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	30
9.1.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	32
9.1.3	GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN	32
9.1.4	ERRORES	33
9.2	PRUEBA ENCAPSULADO 2	33
9.2.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	33
9.2.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	34
9.2.3	GRAFICO DE BLAND-ALTMAN	35
9.2.4	ERRORES	36
9.3	PRUEBA ENCAPSULADO 3	36
9.3.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	36
9.3.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	37
9.3.3	GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN	38
9.3.4	ERRORES	38
9.4	PRUEBA ENCAPSULADO 4	39
9.4.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	39
9.4.2	GRÁFICAS OBTENIDAS.....	40
9.4.3	GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN	40
9.4.4	ERRORES	41
9.5	CONCLUSIONES DEL ENCAPSULADO	41
10.	DISEÑO 3D.....	42
10.1	DISEÑO DE LA CAJA.....	42
10.2	MONTAJE DEL DISPOSITIVO.....	44
11.	CONCLUSIONES FINALES	45
12.	POSIBLES MEJORAS	45
13.	REFERENCIAS	46

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

ÍNDICE DE IMÁGENES, TABLAS Y GRÁFICOS

Imagen 1: Sensor de CO ₂ MQ-135 [5]	3
Imagen 2: Sensor de CO ₂ CCS811 [6]	4
Imagen 3: Sensor de CO ₂ MG811	4
Imagen 4: Sensor de CO ₂ MH-Z19	5
Imagen 5: Funcionamiento del sistema NDIR [12].....	6
Imagen 6: Patillaje del sensor MH-Z19b [12].....	8
Imagen 7: Arduino UNO [14]	8
Imagen 8: Estructura de Arduino UNO [15]	9
Imagen 9: LCD 16X2 [16].....	10
Imagen 10: Pines LCD 16X2 [17].....	10
Imagen 11: Leds	11
Imagen 12: Potenciómetro 10kΩ.....	11
Imagen 13: Temtop M2000	12
Imagen 14: Esquema de montaje.....	14
Imagen 15: Sensores durante las pruebas	16
Imagen 16: Sensor de referencia Temtop prueba 1	18
Imagen 17: Sensor de referencia Temtop prueba 2	21
Imagen 18: Sensor de referencia Temtop prueba 3	24
Imagen 19: Sensor de referencia Temtop prueba 4	27
Imagen 20: Caja de simulación de encapsulado	30
Imagen 21: Modelo de medición encapsulado	30
Imagen 22: Sensor de referencia Temtop prueba 1 encapsulado	32
Imagen 23: Sensor de referencia Temtop prueba 2 encapsulado	35
Imagen 24: Sensor de referencia Temtop prueba 3 encapsulado	38
Imagen 25: Sensor de referencia Temtop prueba 4 encapsulado	40
Imagen 26: Cara delantera de la caja.....	42
Imagen 27: Cara trasera de la caja.....	42
Imagen 28: Cara inferior de la caja	43
Imagen 29: Resto de caras de la caja	43
Imagen 30: Tapa de la caja	43
Imagen 31: Conexión patillas inferiores de la LCD	44
Imagen 32: Conexión leds	44
Imagen 33: Conexión del potenciómetro	44
Imagen 34: Ficha de tierra y alimentación	45
 Tabla 1: Resultados prueba 1.....	17
Tabla 2: Errores prueba 1	19
Tabla 3: Resultados prueba 2.....	20
Tabla 4: Errores prueba 2	22
Tabla 5: Resultados prueba 3.....	23
Tabla 6: Errores prueba 3	25
Tabla 7: Resultados prueba 4.....	26
Tabla 8: Errores prueba 4	28
Tabla 9: Resultados prueba 1 encapsulado.....	31
Tabla 10: Errores prueba 1 encapsulado.....	33

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

Tabla 11: Resultados prueba 2 encapsulado.....	33
Tabla 12: Errores prueba 2 encapsulado.....	36
Tabla 13: Resultados prueba 3 encapsulado.....	36
Tabla 14: Errores prueba 3 encapsulado.....	38
Tabla 15: Resultados prueba 4 encapsulado.....	39
Tabla 16: Errores prueba 4 encapsulado.....	41
 Gráfico 1: Sensor implementado prueba 1	18
Gráfico 2: Bland-Altman prueba 1	19
Gráfico 3: Sensor implementado prueba 2	21
Gráfico 4: Bland-Altman prueba 2	22
Gráfico 5: Sensor implementado prueba 3	24
Gráfico 6: Bland-Altman prueba 3	25
Gráfico 7: Sensor implementado prueba 4	27
Gráfico 8: Bland-Altman prueba 4	28
Gráfico 9: Sensor implementado prueba 1 encapsulado	32
Gráfico 10: Bland-Altman prueba 1 encapsulado	33
Gráfico 11: Sensor implementado prueba 2 encapsulado	35
Gráfico 12: Bland-Altman prueba 2 encapsulado	35
Gráfico 13: Sensor implementado prueba 3 encapsulado	37
Gráfico 14: Bland-Altman prueba 3 encapsulado	38
Gráfico 15: Sensor implementado prueba 4 encapsulado	40
Gráfico 16: Bland-Altman prueba 4 encapsulado	41

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

ÍNDICE DE ANEXOS

CÓDIGO ARDUINO(Anexo I)
CÓDIGO REFERENCIA(Anexo II)

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

1. MOTIVACIÓN

El principal motivo por el que he decidido realizar este trabajo es debido al actual estado en el que vivimos mundialmente debido al Covid-19, el cual nos ha hecho cambiar nuestro estilo de vida totalmente.

Según el Ministerio de Sanidad y la OMS (Organización Mundial de la Salud) las partículas que se exhalan al hablar, toser o respirar son uno de los principales focos de transmisión y contagio del Covid-19. En espacios cerrados el resultado de estas acciones es el incremento del nivel del CO₂. Midiendo estos niveles se puede programar la ventilación del espacio interior y así contribuir al control de la transmisión de patógenos mediante aerosoles.

Controlar los niveles de CO₂ no solo es bueno en cuanto al control del Covid-19, la comunidad científica antes de la pandemia dedujo que una alta cantidad de CO₂ en espacios cerrados puede perjudicar a la salud provocando síntomas como dolor de cabeza y agotamiento.

El monitoreo de CO₂ en ambientes cerrados no evitan los contagios o los síntomas que este provoca, pero si permite controlar el ambiente del espacio ocupado informando de cuando se debe ventilar y mejorando la calidad del ambiente, de esta manera también se informa a los integrantes del espacio sobre la calidad del aire [1].

Otro de los motivos por los que se ha querido hacer este proyecto es que gracias a este dispositivo podemos saber el nivel de CO₂ exacto y en los meses de invierno no sería necesario tener las ventanas abiertas durante todo el tiempo, sino que solo sería necesario cuando los niveles superaran los valores impuestos [2].

2. OBJETIVOS

Los objetivos principales son:

- Diseñar un sistema de adquisición de datos de un sensor de CO₂ y que estos datos se adquieran de manera automática con un microcontrolador de Arduino.
- Tomar medidas automáticas de CO₂.
- Comparar los valores proporcionados por este sensor con aquellos proporcionados por sensores comerciales tomados como referencia.
- Analizar y discutir los resultados.
- Realizar el diseño 3D de una caja para el encapsulado del dispositivo.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

3. INTRODUCCIÓN

Las partes principales de este trabajo son la utilización de un sensor de CO₂, la programación para Arduino de este mismo y el encapsulado del dispositivo.

Para la realización de este trabajo, tanto para las pruebas como para la programación del código se ha considerado que el nivel de CO₂ óptimo es de 800ppm y que a partir de ahí hasta los 1000ppm es recomendable ventilar el ambiente, con niveles más altos de 1000ppm se considera un estado de ambiente malo y perjudicial [3].

3.1 SENSORES DE CO₂

Un sensor de CO₂ es un instrumento que se utiliza para la medición del gas dióxido de carbono en un ambiente determinado. Normalmente registran los niveles de dióxido de carbono en partes por millón (ppm) en los espacios ocupados y nos ofrecen una muestra de la concentración de este gas en el aire que respiramos.

Debido a su utilidad para la prevención del coronavirus, estos sensores han adquirido una gran importancia en el mercado, donde se pueden encontrar numerosos sensores y diferentes modelos.

Dentro de los sensores que pueden trabajar con Arduino, los más demandados se detallan a continuación.

3.1.1 El MQ-135

Existe una gran variedad de sensores MQ los cuales están diseñados para detectar diferentes gases. Estos sensores vienen equipados con una placa de medición estándar con el comparador LMC662 o similar, que permite obtener la lectura tanto en valores analógicos, como en valores digitales cuando se supera un cierto umbral regulado a través de un potenciómetro ubicado en dicha placa [4]. Este sensor de control de calidad del aire se usa para la detección de contaminación en el medio ambiente. Por lo general, se implementa en circuitos de control como alarmas en las casas o sitios donde se desea prevenir altos niveles de contaminación, como industrias que manejan compuestos químicos que pueden ser nocivos también para la salud. Son especialmente útiles en equipos controladores de calidad del aire en edificios/oficinas.

La señal de salida que proporciona el MQ-135 (Imagen 1) es dual: de carácter analógico y digital. Respecto a la señal analógica proporcionada, esta viene a ser directamente proporcional al incremento de voltaje. La señal digital presenta niveles TTL (*Time To Live*) por lo que esta señal puede ser procesada por un microcontrolador.

Algunas de sus características son:

- Voltaje de operación: 5V DC

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

- Corriente de operación: 150 mA
- Potencia de consumo: 800 mW.
- Tiempo de precalentamiento: 20 segundos.
- Resistencia de carga: Potenciómetro (Ajustable).
- Detección de partículas por millón: 10 ppm~1000 ppm.
- Concentración detectable: Amoniaco, sulfuro, benceno, CO₂.
- Concentración de oxígeno: 2%~21%.
- Humedad de operación: <95% RH.
- Temperatura de operación: -20 °C~70 °C.



Imagen 1: Sensor de CO₂ MQ-135 [5]

3.1.2 SENSOR DE CALIDAD DE AIRE CCS811

El CCS811 (Imagen 2) es un sensor del fabricante AMS. Con este sensor se puede detectar dióxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles (TVOC, *total volatile organic compounds*) en el aire de un interior mediante una placa Arduino [6].

El CCS811 mide el CO₂ mediante un sensor MOX (Metal-Oxido) de placa caliente "estándar", así como un pequeño microcontrolador que controla la alimentación a la placa, lee el voltaje analógico y proporciona un interfaz I2C para leer [7].

Se trata de un sensor químico que necesita un precalentado. El fabricante recomienda 20 minutos para que las medidas se estabilicen y en el caso en el que el sensor se cambie de ubicación este tiempo será de 48 h.

Algunas de sus características son:

- Voltaje de entrada: recomendado 3.3 V (recomendado).
- IIC frecuencia de comunicación: 400 kHz.
- TVOC rango de detección: 0 ~ 32768 ppb.
- CO₂ rango de detección: 400 ~ 32768 ppm.



Imagen 2: Sensor de CO₂ CCS811 [6]

3.1.3 SENSOR MG811

El sensor MG811 (Imagen 3) es un sensor de la familia de los MQ nombrados anteriormente. Este es un sensor “puro” de CO₂, con muy poca sensibilidad hacia otros compuestos como pueden ser los alcoholes. Este sensor es utilizado en zonas donde la concentración de CO₂ varía muy rápidamente y puede alcanzar niveles muy altos. Este sensor tiene la particularidad de que cuando la concentración sube, la salida en voltios disminuye [8]. Necesita una calibración antes de su puesta en funcionamiento.

Algunas de sus características son:

- Rango de detección (CO₂): 350 ppm-10000 ppm.
- Voltaje de funcionamiento: 6 V.
- Consumo: 140±20 mA
- Temperatura de funcionamiento: 20-50 °C.



Imagen 3: Sensor de CO₂ MG811

3.1.4 SENSOR MH-Z19

El sensor MH-Z19 (Imagen 4) mide la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en el aire. Posee un rango de 0 a 5000 ppm, compensación por temperatura y la medición es independiente del nivel de oxígeno. Posee dos tipos de salida: UART y PWM.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

A diferencia de los sensores de gas MQ, que utilizan la variación de una resistencia dependiendo del gas (electroquímicos), el sensor MH-Z19 utiliza un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR). Dentro del sensor se encuentra una pequeña cámara donde el gas es sometido a luz infrarroja; el CO₂ absorbe determinada longitud de onda en el haz de luz IR de acuerdo a la concentración de gas y el sensor mide la diferencia dentro de esta longitud de onda, entregando la concentración de CO₂ en partes por millón (ppm) [9][10].

Algunas de sus características son:

- Voltaje de operación: 3.6 - 5.5V DC.
- Voltaje de interfaz: 3.3 V.
- Consumo de corriente: <18 mA
- Rango de medición: 0-5000 ppm.
- Precisión: 5% (50 ppm).
- Tiempo de precalentamiento: 3 min.
- Temperatura de trabajo: 0-50 °C.
- Vida útil: 5 años.



Imagen 4: Sensor de CO₂ MH-Z19

3.2 ARDUINO

Arduino es una plataforma basada en software y hardware libre utilizada para realizar códigos y poder crear microordenadores de una sola placa.

Esta plataforma fue creada en Italia en 2003 por varios estudiantes con el fin de facilitar la programación y el uso electrónico.

Básicamente, Arduino es una placa con todos los dispositivos necesarios para poder conectar dispositivos a las entradas y las salidas de este. Además, esta puede ser programada por Windows (macOS) y GNU/Linux.

Arduino está basado en el microcontrolador ATMEL, el cual se ocupara de procesar los datos que lleguen a través del interfaz de entrada y de llevar datos a los periféricos a través del interfaz de salida. Arduino trabaja con

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

instrucciones que se escriben en lenguaje de programación C, que se puede utilizar en el entorno de Arduino IDE.

Según Yúbal Fernández “Arduino es un proyecto y no un modelo concreto de placa”, esto quiere decir que no tiene un modelo fijo de placa si no que hay varios modelos, los cuales están diseñados para diferentes tipos de proyectos, dependiendo de qué periféricos se utilicen, del tamaño del proyecto o de su finalidad [11].

4. MATERIALES

4.1 SENSOR DE CO₂

El sensor elegido para la realización del proyecto ha sido el MH-Z19. Como se ha comentado anteriormente (apartado 3.1.4.), es un sensor que mide la cantidad de CO₂ en ppm, mediante un sistema de luz infrarroja. Este sensor también es capaz de medir la temperatura.

Los motivos de la elección son que es un sensor muy preciso y fácil de utilizar. Otros de los motivos son que tiene un precio razonable y que es sin duda un sensor muy utilizado para la programación con Arduino.

En la comparativa con los sensores explicados anteriormente, el MQ-135 es un sensor fiable cuyas características son acordes a lo buscado, pero su umbral de detección de partes por millón es muy pequeño. Con respecto al CCS811, no se ha elegido debido al tiempo que se tiene que esperar para que se calibren las medidas y el tiempo que necesita cuando se cambia de ubicación. Por otro lado, el MG811 es un sensor que cumple con todas las características que buscamos, lo único que parece excesivo es el rango de medición que tiene. Nuestro sensor se enfocaría a la medida de CO₂ en interior, donde la concentración de este no se elevaría a grandes niveles, ni tendría variaciones muy rápidas.

El sensor seleccionado (MH-Z19) utiliza como principio de medida la capacidad de absorción del CO₂ en el infrarrojo (NDIR) (Imagen 5). En este caso, el sensor está diseñado para que la cantidad de luz que recibe el detector sea inversamente proporcional a la concentración de CO₂. El sensor emite un haz de luz cada vez que este toma una medida y el detector realiza la medida de la luz perdida, obteniendo así la cantidad de CO₂.

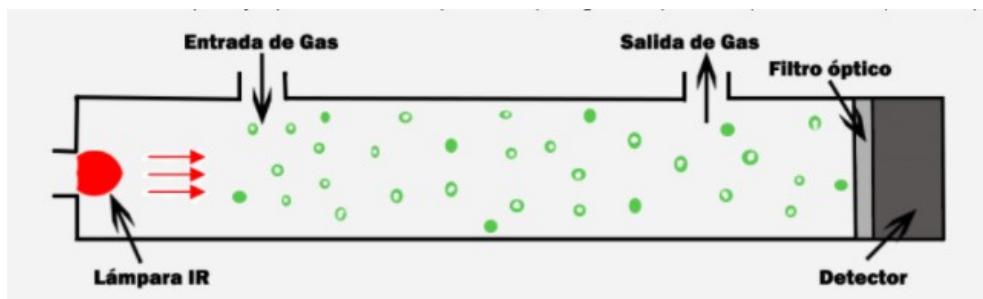


Imagen 5: Funcionamiento del sistema NDIR [12]

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

Como bien se ha indicado anteriormente, es un sensor que también mide la temperatura, pero su uso es solamente interno, es decir, mide la temperatura del interior del sensor, que no tiene por qué ser la misma que hay en el espacio en el que se encuentra el sensor. . Hay que tener en cuenta que el uso de éste como sensor de temperatura está indocumentado por el fabricante.

Una de las grandes ventajas de este sensor es que es muy fácil de usar y dispone de 3 métodos para mostrar la información. El primer método es una salida serie que manda las medidas sin más a 9600 baudios que es lo más fácil para usar con Arduino. El segundo método es una señal modulada en pulsos (PWM) y que también es muy fácil de leer en Arduino. Como tercer método es una salida analógica que tendríamos que calibrar según vaya dando las medidas de concentración. Este último es un método que no consideramos útil utilizarlo para esta aplicación, ya que tenemos la salida serie que nos da las medidas de forma adecuada.

Existen varias versiones del sensor MH-Z19: dos versiones llamadas MH-Z19, tres modelos de MH-Z19b y dos versiones de MH-Z19c. La principal diferencia en estas versiones es el rango de medida y la precisión de estas medidas[13].

La versión con la que se ha realizado este proyecto es la MH-Z19b, cuyo rango de medida es de 400-5000 ppm con una precisión de medida de 50 ppm + un 3% de la medida.

Los parámetros de este sensor ya se han explicado anteriormente (apartado 3.1.4.).

Otras características son:

- Cámara de gas con chapado de oro, resistente al agua y a la corrosión.
- Alta sensibilidad con un bajo consumo de energía.
- Excelente estabilidad.
- Compensación de temperatura.
- Larga vida útil.

Las aplicaciones principales de este sensor son:

- HVAC (*Heating – Ventilation - Air conditioning*) de equipos de refrigeración.
- Equipos de vigilancia y calidad del aire.
- Sistemas de aire fresco.
- Equipos de purificación de aire.
- Hogar inteligente.
- Escuelas y centros educativos.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

En cuanto a la programación y al montaje de este sensor, la Imagen 6 muestra su patillaje:

PIN	Description
Pin 6	Vin (voltage input)
Pin 7	GND
Pin 1	Vout (output voltage 3.3V, output current lower than 10mA)
Pin 9	PWM
Pin 5	HD (zero calibration, low level above 7 seconds) (Factory Reserved)
Pin 2	UART (RXD) 0~3.3V digital input
Pin 3	UART (TXD) 0~3.3V digital output
Pin 4	SR (Factory Reserved)
Pin 8	AOT (Factory Reserved)



Imagen 6: Patillaje del sensor MH-Z19b [12]

4.2 MICROCONTROLADOR ARDUINO

Como ya se ha comentado, Arduino posee diferentes versiones de placa en función de las características o del uso que se les vaya a dar.

La utilizada para este proyecto es Arduino UNO (Imagen 7), una placa (“*board*”) basada en un microcontrolador Atmega328. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 4 pueden ser utilizados para salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, un conector para USB tipo hembra, un Jack para fuente de tensión, un conector ICSP y un botón *reset*.



Imagen 7: Arduino UNO [14]

Arduino UNO tiene todo lo necesario para manejar el controlador. Simplemente lo conectamos al computador por medio del cable USB o una fuente de alimentación externa, que puede ser un adaptador AC-DC o una batería. Si se alimenta a través del cable USB en el ordenador no es necesaria una fuente externa.

Para programar la *board* se necesita el IDE Arduino.

Las características principales de Arduino UNO son:

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

- Microcontrolador: ATmega328.
- Voltaje Operativo: 5 V.
- Voltaje de Entrada (Recomendado): 7 – 12 V.
- Pines de Entradas/Salidas Digital: 14 (de las cuales 6 son salidas PWM).
- Pines de Entradas Análogas: 6.
- Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0.5 kB es usado por Bootloader.
- SRAM: 2 kB (ATmega328).
- EEPROM: 1 kB (ATmega328).
- Velocidad del Reloj: 16 MHz.

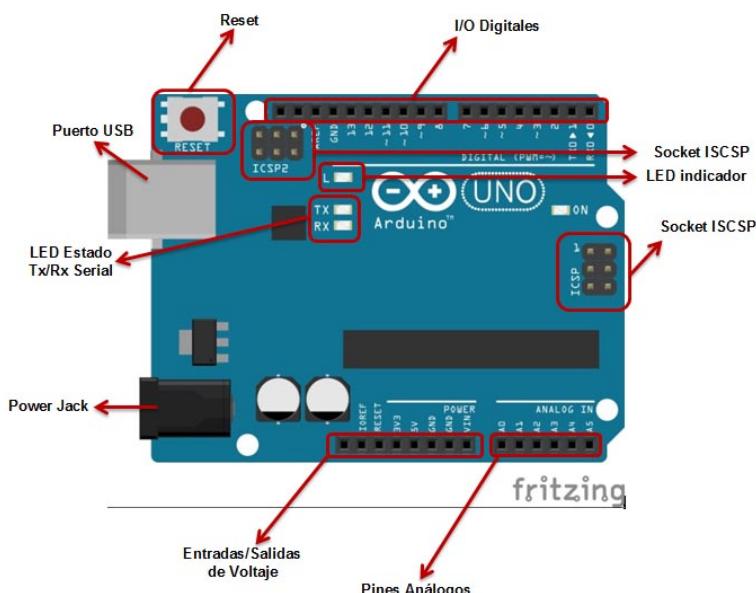


Imagen 8: Estructura de Arduino UNO [15]

4.3 PANTALLA LCD

La pantalla LCD (*Liquid Cristal Display*), utilizada para este proyecto es una pequeña pantalla de cristal líquido que tiene unas dimensiones de 16x2 (se refiere a una pantalla que posea 2 filas y cada fila tiene la capacidad para mostrar 16 caracteres), Imagen 9. Las capacidades de estos dispositivos son altas, pues se puede mostrar todo tipo de información sin importar qué tipo de caracteres sean, idioma o lenguaje. El dispositivo está controlado por un microcontrolador que está programado para dirigir el funcionamiento y la imagen mostrada en la pantalla.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO



Imagen 9: LCD 16X2 [16]

Para su programación, estos dispositivos sólo necesitan 6 pines de la placa para su conexión. Los caracteres con los que se programe el display tienen que estar en código ASCII.

Dependiendo del microcontrolador que se utilice, los dispositivos LCD 16x2 pueden conectarse a través de un bus de datos de 4 u 8 pines, dependiendo del número de pines disponibles y según la plataforma con la que se trabaje. La Imagen 10 muestra el símbolo y función de los pines LCD 16x2.

Pin	Símbolo	Función
1	V _{ss}	Pin conectado a GND (masa)
2	V _{DD}	Alimentación +5v
3	V ₀	Pin para fijar el contraste de la pantalla
4	RS	Selector de registro
5	R/W	Selector de modo (lectura o escritura)
6	E	Habilitación de la pantalla para recibir información
7~10	DB0~DB3	Bus de comunicación No usado (excepto en operaciones de 8 bit's)
11~14	DB4~DB7	Bus de comunicación para transferir los datos (4 bit's)
15	LED+	Retroiluminación (+5v)
16	LED-	Retroiluminación (GND)

Imagen 10: Pines LCD 16X2 [17]

4.4 LEDS

Un diodo LED (Imagen 11) es un dispositivo que permite el paso de corriente en un solo sentido y que, al ser polarizado, emite un haz de luz. Trabaja como un diodo normal pero al recibir corriente eléctrica emite luz. Los LED trabajan aproximadamente con una tensión de 2V. Para conectarlos a un voltaje distinto, se debe usar una resistencia.

Su funcionamiento es bastante simple, se conecta la corriente al semiconductor superior del diodo LED lo cual permitirá el paso de corriente eléctrica y hará que el semiconductor emita luz. Según el material del que

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

esté elaborado el semiconductor, los diodos LED proyectarán luces de distintos colores.

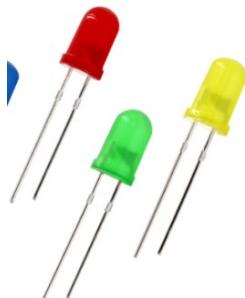


Imagen 11: Leds

4.5 POTENCIOMETRO

Un potenciómetro (Imagen 12) es una resistencia eléctrica con un valor de resistencia variable y generalmente ajustable manualmente. Los potenciómetros utilizan tres terminales y se suelen utilizar en circuitos de poca corriente. El valor de un potenciómetro viene expresado en óhmios (Ω) como las resistencias. El valor máximo del potenciómetro siempre es la resistencia entre los dos extremos. El mínimo lógicamente es cero.



Imagen 12: Potenciómetro 10k Ω

4.6 SENSOR DE COMPARACIÓN

El dispositivo utilizado para comparar los resultados obtenidos con nuestro sensor MH-Z19 es un monitor de medición de la calidad del aire. Dicho dispositivo es el Temtop M2000 (Imagen 13).

Con este aparato no solo se puede medir la cantidad de CO₂, sino que también detecta las partículas (PM2.5 y PM10), que las podemos encontrar en procesos de combustión; y formaldehido (HCHO), gas incoloro y venenoso, altamente soluble en agua. Además, también mide la temperatura y la humedad ambiental en tiempo real.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

Para la detección del CO₂ utiliza el mismo sistema de detección de infrarrojos que utiliza nuestro sensor, el NDIR (Imagen 5), explicado anteriormente en el apartado 4.1.

El sensor dispone de una pantalla en la cual muestra todos los menús y configuraciones, así como un histórico de las mediciones realizadas. Uno de los inconvenientes que tiene este dispositivo es que los datos que registra no se guardan y tampoco se pueden extraer, solo se muestran en la pantalla en formato de grafica



Imagen 13: Temtop M2000

5. MONTAJE

Para el montaje se ha utilizado una protoboard para realizar las diversas conexiones de los diferentes componentes. Para ello, con los pines de señal analógica de nuestro Arduino (parte inferior del Arduino, Imagen 14), conectaremos la salida de 5V y la salida de tierra (GND) a la placa protoboard. Una vez puesta la alimentación y la tierra podremos conectar los componentes, según se indica en los siguientes apartados (5.1 a 5.4). La Imagen 14, incluida en el apartado 5.5, muestra el esquema del montaje completo.

5.1 LCD CON ARDUINO

La pantalla LCD utilizada para el montaje es la que se ha visto en el apartado 4.3. Consta de 16 pines cuya función está definida en la Imagen 10. La LCD se conectará a los pines de señal digital del Arduino (parte superior).

El pin 1 y el pin 2 de la LCD son las conexiones a tierra y la alimentación de la pantalla. El pin 3 va a la patilla del potenciómetro (Imagen 12), el cual

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

controla el contraste de la pantalla. El pin 4 de la pantalla lo conectamos al pin 7 de Arduino, con estos a través del código podemos controlar la memoria del LCD, si muestra caracteres, posición del cursor, etc. El pin 5 de la pantalla, conectado al pin 6 de Arduino, permite seleccionar el modo de lectura o escritura mediante código. Los pines del 7 al 10 de la pantalla no es necesario utilizarlos ya que trabajamos con 4 pines (Imagen 10), por eso utilizamos los pines del 11 al 14, cuya función es bus de comunicación de datos. Estos pines van conectados en los pines del 6 al 2 de Arduino (11-6, 12-5, etc.). Los últimos pines de la pantalla, el 15 y el 16, están conectados a la alimentación y a tierra con el fin de controlar la iluminación de la pantalla (Imagen 14).

5.2 SENSOR MH-Z19 CON ARDUINO

Para la conexión del sensor sólo utilizaremos 4 pines: dos de ellos para la alimentación (VIN) y la puesta a tierra (GND) y otros dos para la comunicación de datos con Arduino. Para la comunicación utilizaremos el pin Tx (entrada digital) conectada al pin 13 de Arduino y el pin Rx (salida digital) conectada al pin 12 de Arduino (Imágenes 6 y 14).

5.3 LEDS CON ARDUINO

Las conexiones de los leds son las más simples: irán conectados a tierra por una de sus patillas y la otra patilla irá conectada a un pin de Arduino por el cual se le dará la alimentación según nuestro código y se iluminará el led.

Los leds utilizados son 3 de diferentes colores, rojo, amarillo y verde, que irán conectados a los pines 11,10 y 9, respectivamente, de Arduino (Imagen 14).

Estos leds trabajan con un voltaje de 2 V (aproximadamente). Para poder instalarlos y que su funcionamiento sea correcto es necesario instalar una resistencia en serie ya que el voltaje de salida del Arduino, que es de 5 V. En la resistencia tienen que caer 3 V. Como la corriente típica de los leds es de 20 mA, la resistencia a colocar en serie será de $R=V/I=3=0.02=150\ \Omega$. Se podría haber realizado un cálculo personalizado para cada color de led. No obstante, la solución propuesta funciona correctamente y logramos un diseño electrónico más compacto.

5.4 MONTAJE POTENCIOMETRO

El potenciómetro consta de 3 patillas, una central y dos a los lados (Imagen 12). Las patillas de los lados, una irá conectada a tierra y la otra a la alimentación. La patilla central se conectaría con el pin 3 de la pantalla LCD como se ha explicado en el apartado 5.1.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

5.5 MONTAJE COMPLETO

En la Imagen 14 se muestra el esquema de montaje.

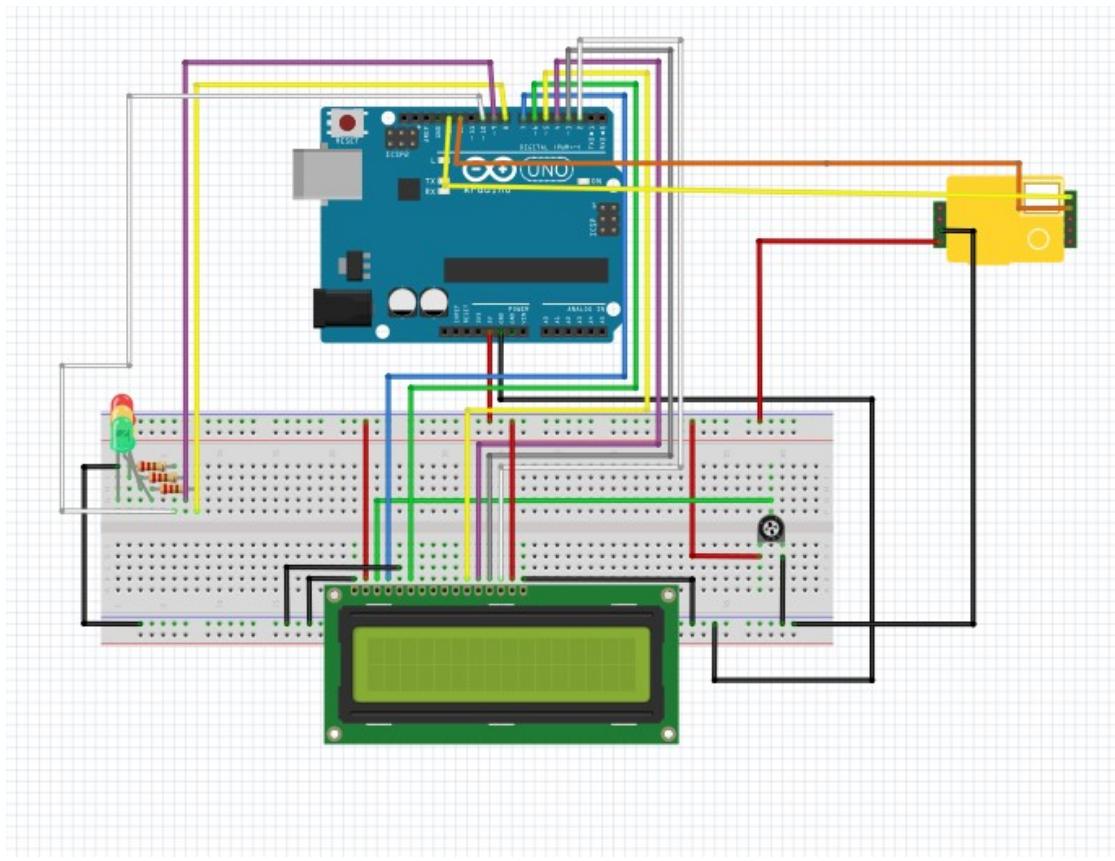


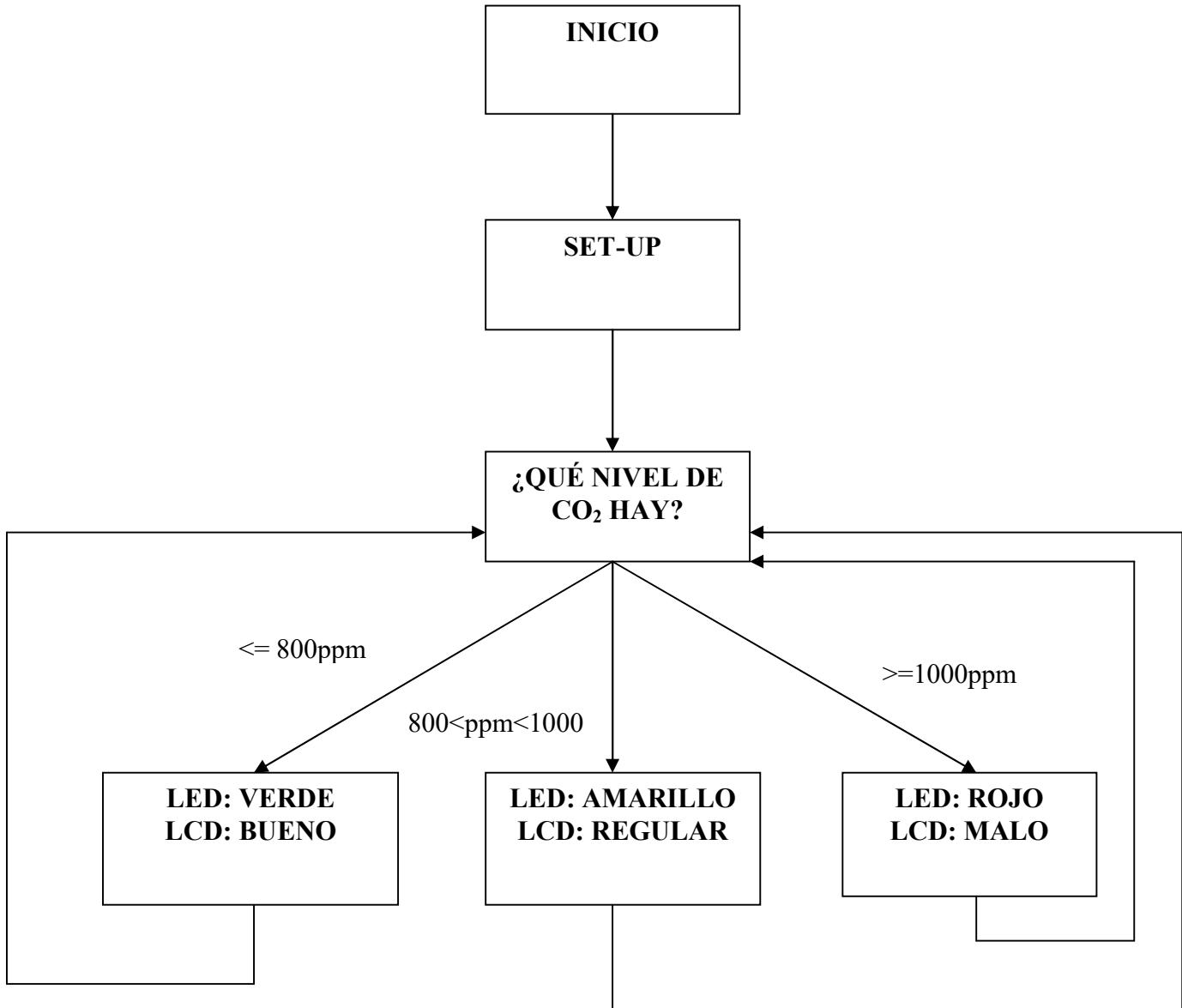
Imagen 14: Esquema de montaje

6. GRAFO DE ESTADOS DEL CÓDIGO

El código utilizado para la programación del sensor, la LCD, los leds y la obtención de datos consta de un bucle infinito en que se realiza la lectura de medidas del sensor, la visualización en pantalla de dichas medias y la comparación de éstas para determinar si el estado es bueno ($\text{nivel} \leq 800\text{ppm}$), malo ($\text{nivel} \geq 1000\text{ppm}$) o regular ($800\text{ppm} < \text{nivel} < 1000\text{ppm}$), mostrando estos estados en la LCD y mediante la iluminación de los leds.

El código se ha realizado tomando como referencia otro código [18]. En el Anexo I se puede consultar el código completo utilizado para la programación del sensor y en el Anexo II se puede consultar el código tomado como referencia.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO



7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la validación y corroboración del buen y correcto funcionamiento del sensor diseñado se han analizado diversos escenarios reales producidos en las aulas de la EUPT.

Esta validación se ha realizado mediante la comparación de los datos obtenidos a través de nuestro sensor y el sensor comercial Temtop2000 (Apartado 4.6). Los datos obtenidos en cada uno de los escenarios de nuestro sensor se han reflejado

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

en una tabla Excel, adecuándolos a la forma de trabajo del sensor comercial para poder facilitar la comparación.

El Temtop2000 trabaja con una frecuencia de muestreo de 2 segundos (igual que el sensor diseñado), este dispositivo sólo tiene una manera de mostrar los datos y es mediante una gráfica en la que refleja el nivel de CO₂ medio de cada minuto. Esta grafica refleja la medición de 50 min como máximo; una vez pasado este tiempo la escala de la gráfica cambia haciendo que refleje la media de 10-20 min, perdiendo muchos datos e imposibilitando la comparativa del sensor.

Para poder realizar la comparativa de sendos sensores, hemos tenido que adaptar los datos de ambos de maneras diferentes. El Temtop2000 sólo muestra los datos en una gráfica de la manera explicada anteriormente, por lo que esos datos se han pasado a una tabla Excel de manera manual. En el caso de los datos obtenidos por el sensor diseñado se han guardado automáticamente todos los datos obtenidos durante las diferentes pruebas. Como se ha explicado anteriormente, la frecuencia de muestreo del sensor de referencia es de 2 segundos (mostrando la media de las mediciones en cada minuto), por lo que para poder realizar la comparativa se ha sacado la media de cada minuto de nuestro sensor de manera automática mediante Excel. De esta manera tendremos el mismo número de datos en ambos sensores y así podremos realizar la comparativa correctamente.

La comparativa de ambos sensores se ha realizado a través del cálculo del error absoluto y del gráfico de Bland-Altman. El grafico de Bland-Altman es un método grafico de comparativa en el cual se pueden comparar dos métodos de medición y así poder validar un método nuevo a través de la comparación con uno ya existente.

En todas las pruebas realizadas se han colocado sendos sensores contiguos (Imagen 15) y situados en el aula entre los alumnos.



Imagen 15: Sensores durante las pruebas

7.1 PRIMERA PRUEBA

El primer experimento se ha realizado en una clase previamente ventilada y que durante la duración de ésta se ha mantenido la puerta y las ventanas abiertas para poder tener la clase ventilada totalmente.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

En la clase se encontraban 15 alumnos y 1 profesor.

7.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran las medidas obtenidas durante la prueba de ambos sensores:

Tabla 1: Resultados prueba 1

MEDIDA	Concentración CO ₂ (ppm)	
	SENSOR	TEMTOP
1	938	350
2	668	700
3	636	720
4	627	730
5	636	750
6	560	750
7	530	745
8	504	730
9	516	710
10	412	700
11	427	690
12	474	680
13	546	650
14	534	630
15	507	630
16	494	630
17	481	630
18	514	630
19	541	630
20	469	640
21	566	640
22	555	640
23	501	645
24	480	645
25	454	645
26	448	630
27	453	630
28	456	620
29	434	620
30	451	615
31	442	610
32	435	600
33	431	590
34	453	580
35	434	570
36	421	550
37	427	550
38	465	540
39	460	545
40	543	540

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

7.1.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de las medidas de ambos sensores. En el Gráfico 1 se observan las medias realizadas con el sensor diseñado y en la Imagen 16 aparece el gráfico que muestra el sensor Temtop por pantalla.

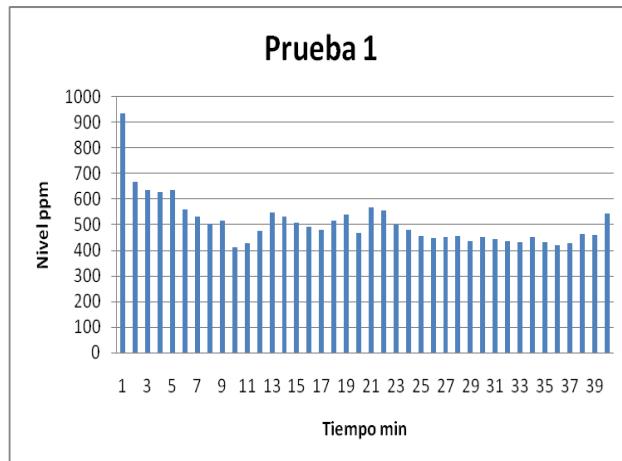


Gráfico 1: Sensor implementado prueba 1

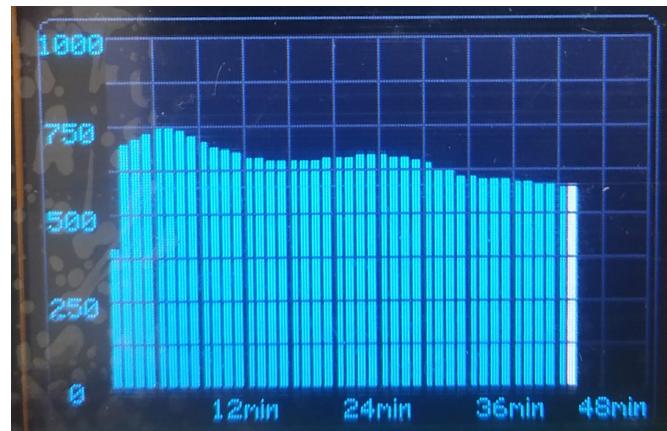


Imagen 16: Sensor de referencia Temtop prueba 1

7.1.3 GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN

En este apartado se muestra el gráfico de Bland-Altman obtenido a partir de los resultados de la primera prueba (Gráfico 2), el cual nos mostrará las diferencias entre ambos sensores para diferentes niveles de ppm. Observamos en azul las medidas tomadas, en morado se muestra la media de las diferencias de las medidas de ambos sensores y en rojo y verde los límites establecidos (más/menos dos veces desviación típica de la diferencia) para poder determinar la validez.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

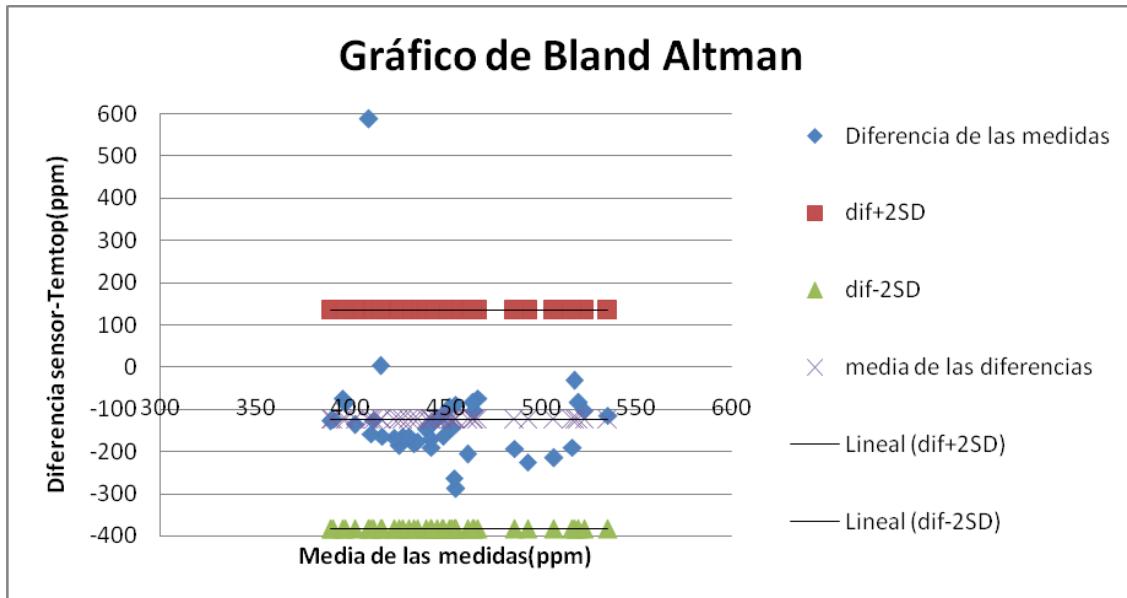


Gráfico 2: Bland-Altman prueba 1

7.1.4 ERRORES

Para poder determinar si las medidas del sensor diseñado se pueden considerar iguales o próximas a las del sensor comercial, se ha realizado el cálculo del error absoluto medio y del error relativo medio, mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Errores prueba 1

Error absoluto	125 ppm
Error relativo	20%

7.2 SEGUNDA PRUEBA

El segundo test se ha realizado en una clase sin haberla ventilado anteriormente y que, durante la duración de ésta, se ha mantenido la puerta y las ventanas abiertas para poder tener la clase ventilada totalmente.

En la clase se encontraban 7 alumnos y 1 profesor.

7.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran las medidas obtenidas durante la prueba de ambos sensores:

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

Tabla 3: Resultados prueba 2

	Concentración de CO ₂ (ppm)	
MEDIDA	SENSOR	TEMTOP
1	616	400
2	739	800
3	572	670
4	564	660
5	553	660
6	564	660
7	596	670
8	536	650
9	522	630
10	529	630
11	551	640
12	533	630
13	515	630
14	549	650
15	559	680
16	587	630
17	529	630
18	475	600
19	518	620
20	522	620
21	430	630
22	521	620
23	442	630
24	434	620
25	567	610
26	622	630
27	496	600
28	418	610
29	444	590
30	540	630
31	500	600
32	443	650
33	615	540
34	645	650
35	407	600
36	589	660
37	524	630
38	479	630
39	536	630
40	585	630

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

41	613	630
42	579	630

7.2.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de las medidas de ambos sensores. En el Gráfico 3 se observan las medias realizadas con el sensor diseñado y en la Imagen 17 aparece el gráfico que muestra el sensor Temtop por pantalla.

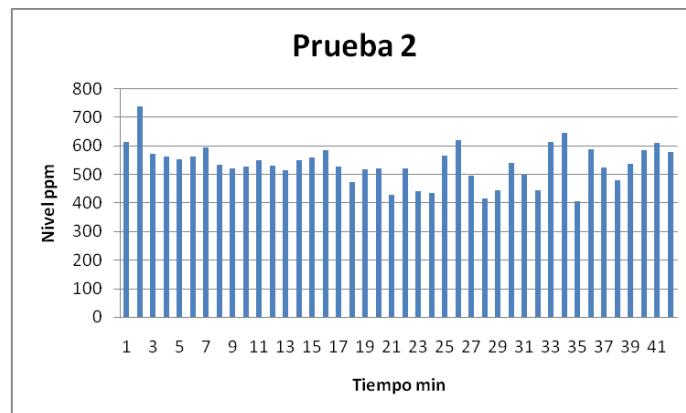


Gráfico 3: Sensor implementado prueba 2

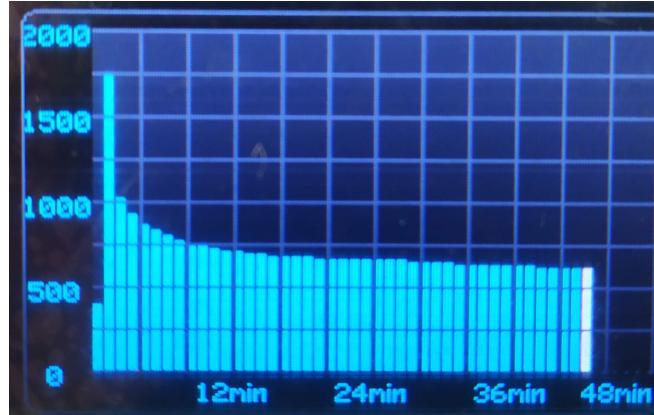


Imagen 17: Sensor de referencia Temtop prueba 2

7.2.3 GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN

En este apartado se muestra el gráfico de Bland-Altman obtenido a partir de los resultados de la segunda prueba (Gráfico 4), el cual nos mostrará las diferencias entre ambos sensores para diferentes niveles de ppm. Observamos en azul las medidas tomadas; en morado se muestra la media de

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

las diferencias de las medidas de ambos sensores; y en rojo y verde los límites establecidos (más/menos dos veces la desviación típica de la diferencia) para poder determinar la validez.

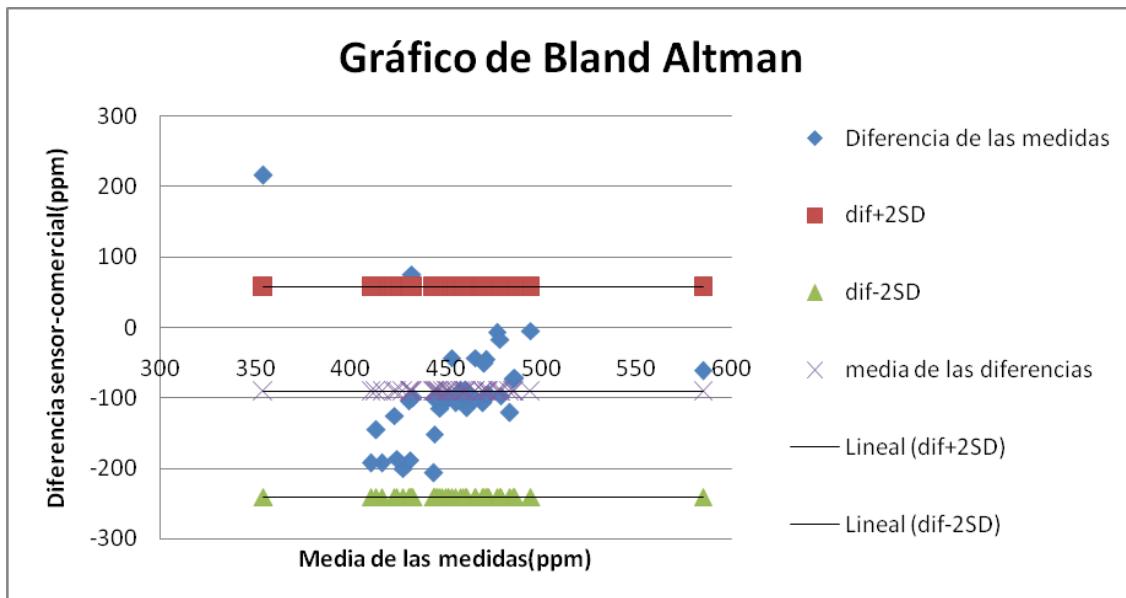


Gráfico 4: Bland-Altman prueba 2

7.2.4 ERRORES

Para poder determinar si las medidas del sensor diseñado son iguales que la del sensor comercial, se ha realizado el cálculo del error absoluto medio y el error relativo medio (Tabla 4).

Tabla 4: Errores prueba 2

Error absoluto	91,73
Error relativo	15%

7.3 TERCERA PRUEBA

El tercer experimento se ha realizado en una clase previamente ventilada y que, durante la duración de esta, se ha mantenido la puerta y las ventanas abiertas para poder tener la clase ventilada totalmente.

En la clase se encontraban 5 alumnos y 1 profesor.

7.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran las medidas obtenidas durante la prueba de ambos sensores:

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

Tabla 5: Resultados prueba 3

	Concentración de CO ₂ (ppm)	
MEDIDA	SENSOR	TEMTOP
1	470	420
2	481	600
3	469	610
4	476	615
5	447	620
6	469	625
7	444	625
8	471	625
9	480	634
10	440	635
11	433	625
12	449	625
13	455	620
14	451	610
15	499	610
16	461	600
17	448	595
18	452	590
19	436	590
20	456	585
21	466	585
22	477	585
23	454	580
24	486	580
25	464	580
26	478	580
27	449	580
28	420	570
29	435	570
30	448	560
31	467	560
32	478	560
33	449	560
34	428	560
35	434	560
36	480	560
37	462	560
38	455	560

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

7.3.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de las medidas de ambos sensores durante la prueba 3. En el Gráfico 5 se observan las medias realizadas con el sensor diseñado y en la Imagen 18 aparece el gráfico que muestra el sensor Temtop por pantalla.

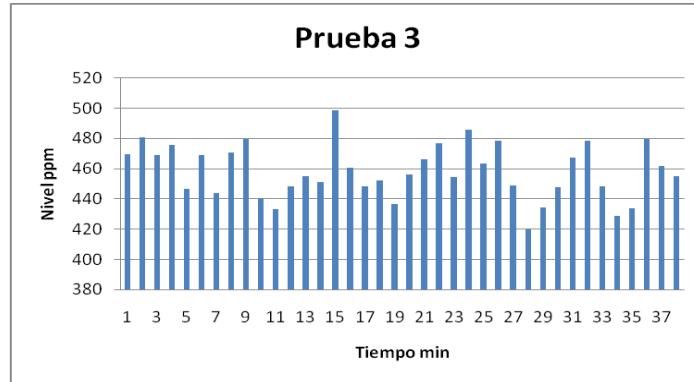


Gráfico 5: Sensor implementado prueba 3

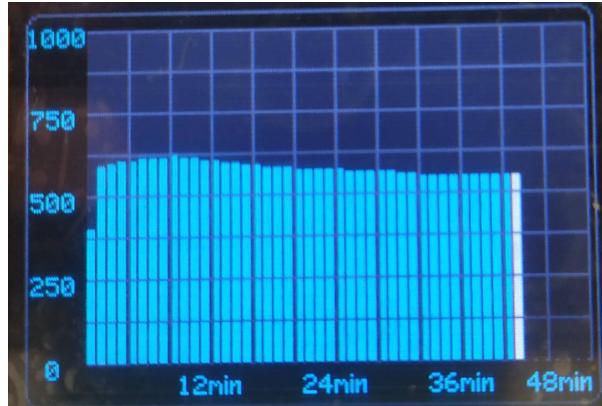


Imagen 18: Sensor de referencia Temtop prueba 3

7.3.3 GRAFICO DE BLAND-ALTMAN

En este apartado se muestra el gráfico de Bland-Altman obtenido a partir de los resultados de la tercera prueba (Gráfico 6), el cual nos mostrará las diferencias entre ambos sensores para diferentes niveles de ppm. Observamos en azul las medidas tomadas; en morado se muestra la media de las diferencias de las medidas de ambos sensores; y en rojo y verde los límites establecidos (más/menos dos veces la desviación típica de la diferencia) para poder determinar la validez.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

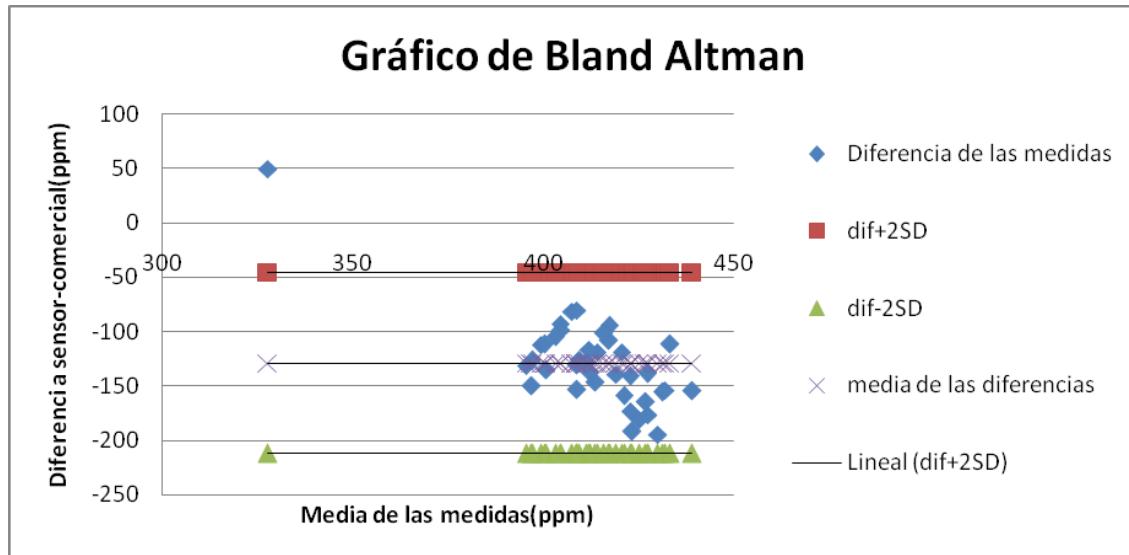


Gráfico 6: Bland-Altman prueba 3

7.3.4 ERRORES

Para poder determinar si las medidas del sensor diseñado son iguales que la del sensor comercial, se ha realizado el cálculo del error absoluto medio y el error relativo medio (Tabla 6).

Tabla 6: Errores prueba 3

Error absoluto	128,79
Error relativo	22%

7.4 CUARTA PRUEBA

En el cuarto experimento se ha iniciado la clase con las puertas cerradas y las ventanas cerradas, estando la clase ventilada previamente. A mitad de clase, más o menos, se han abierto las ventanas y la puerta para ventilar la clase y evitar niveles altos de CO₂.

En la clase se encontraban 5 alumnos y 1 profesor.

7.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran las medidas obtenidas durante la prueba de ambos sensores:

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

Tabla 7: Resultados prueba 4

	Concentración de CO ₂ (ppm)	
MEDIDA	SENSOR	TEMTOP
1	413	360
2	466	520
3	493	520
4	503	520
5	512	530
6	515	540
7	502	550
8	505	560
9	504	570
10	538	580
11	575	590
12	576	600
13	579	610
14	590	620
15	582	625
16	589	630
17	627	630
18	633	635
19	644	640
20	537	650
21	626	650
22	605	650
23	608	660
24	573	670
25	560	680
26	455	690
27	501	690
28	514	680
29	527	660
30	525	650
31	458	640
32	474	620
33	457	600

7.4.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de las medidas de ambos sensores. En el Gráfico 7 se observan las medias realizadas con el sensor diseñado y en la Imagen 19 aparece el gráfico que muestra el sensor Temtop por pantalla.

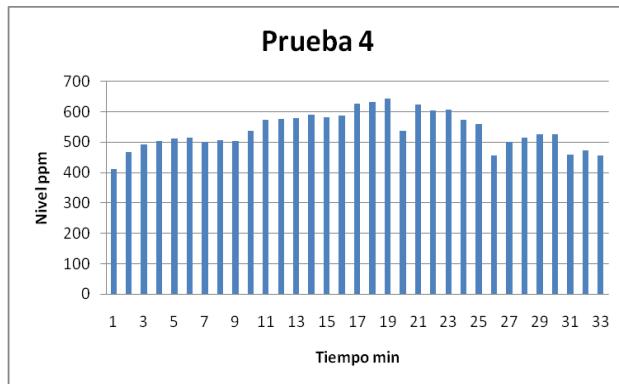


Gráfico 7: Sensor implementado prueba 4

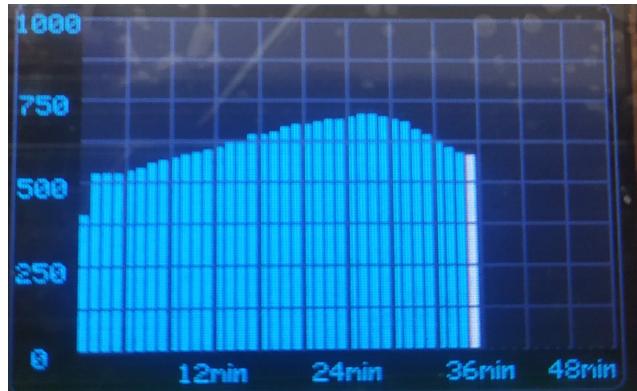


Imagen 19: Sensor de referencia Temtop prueba 4

7.4.3 GRAFICO DE BLAND ALTMAN

En este apartado se muestra el gráfico de Bland-Altman obtenido a partir de los resultados de la cuarta prueba (Gráfico 8), el cual nos mostrará las diferencias entre ambos sensores para diferentes niveles de ppm. Observamos en azul las medidas tomadas; en morado se muestra la media de las diferencias de las medidas de ambos sensores; y en rojo y verde los límites establecidos (más/menos dos veces la desviación típica de la diferencia) para poder determinar la validez.

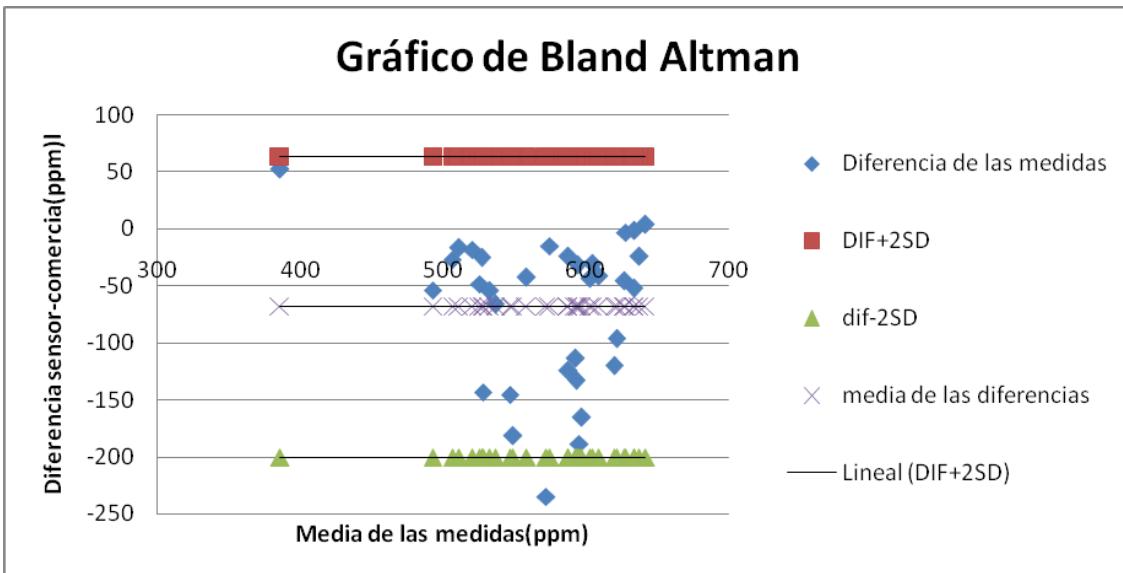


Gráfico 8: Bland-Altman prueba 4

7.4.4 ERRORES

Para poder determinar si las medidas del sensor diseñado son iguales que la del sensor comercial, se ha realizado el cálculo del error absoluto medio y el error relativo medio (Tabla 8).

Tabla 8: Errores prueba 4

Error absoluto	68,34
Error relativo	11%

8. CONCLUSIONES EXPERIMENTALES

En cuanto a los resultados obtenidos, se ha obtenido un resultado más o menos esperado, debido a que cuando se realizaban las pruebas se observaba que los datos de ambos sensores no coincidían con exactitud. Esto se observa en las tablas de datos o en la gráfica, viendo que el valor de ppm es diferente de una medida a otra, y se confirma en el resultado de los valores de error relativo, los cuales se encuentran en torno al 10-20 %.

Con respecto a los gráficos de Bland-Altman, podemos observar que en ninguno de los gráficos de las diferentes pruebas la media de las diferencias de las medidas de los dos sensores coincide con el 0. Esta medida se aleja entre unos 50 y 150 ppm del 0 y quiere decir que los dos métodos producen resultados diferentes. Cuanto más alejada este la media de las diferencias del cero menos se parecerán los resultados. Esta desviación puede ser adecuada para aplicaciones como la que nos incumbe (educativa). En aplicaciones industriales tal vez sea una diferencia excesiva.

En cuanto a la representación de los límites de concordancia (dif-2SD y dif+2SD) del 95 %, estos permiten juzgar visualmente la concordancia de los métodos de

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

medición evaluados. Cuanto menor sea el rango entre los límites, mejor será la concordancia entre ambos métodos de medición, en este caso, entre ambos sensores.

En cuanto a los resultados obtenidos, la diferencia entre una medida y otra, 50-150 ppm, vemos que es un valor adecuado para muchas aplicaciones. Esta diferencia se podría atribuir, en cierta medida, al encapsulado del sensor. El sensor utilizado en el Temtop viene encapsulado, en cambio el nuestro no. En el caso de la encapsulación, al estar más tapado, es previsible que resulte más difícil su ventilación.

En cuanto a los resultados de los errores relativos, podemos decir que tienen un valor medio/alto y esto podría deberse a dos factores (entre otros): el encapsulado del sensor y el montaje en protoboard.

Para poder observar la reacción de ambos sensores, a continuación se muestra un análisis más en detalle de los resultados de concentración de CO₂ de la prueba 4 (Gráfico 7 e Imagen 19). Esta prueba se empezó con las ventanas de clase y la puerta cerrada y cuando subieron los ppm, llegando al nivel máximo que impuso el profesor de la clase, abrimos las ventanas y la puerta para ventilar la clase. Si nos fijamos en ambas gráficas podemos observar como las dos gráficas suben alcanzando un máximo de 700ppm el Temtop y 650ppm el sensor diseñado. Observando esta prueba y viendo que ambas gráficas eran similares pero los datos del sensor diseñado eran unos 50-150ppm inferiores, se llegó a la conclusión de que el sensor proporcionaba medidas similares al de referencia pero que media niveles un tanto inferiores generalmente lo que posiblemente fuera por el encapsulado.

A raíz de estas observaciones y resultados **se ha decidido encapsular el sensor diseñado en una caja de pruebas y realizar medidas y comparar de nuevo con el Temtop** (Apartado 9). Se procederá de la misma manera que en los experimentos anteriores pero en este caso sólo observaremos los errores relativos: si estos son inferiores a los obtenidos en las pruebas anteriores se podría asumir que uno de los problemas en la no coincidencia de los datos es el encapsulado del dispositivo.

9. ENCAPSULADO

Para la realización de las pruebas de encapsulado se ha utilizado una caja de cartón con diferentes orificios (Imagen 20), simulando así un encapsulado como el que posee el sensor Temtop 2000.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO



Imagen 20: Caja de simulación de encapsulado

Para esta parte del proyecto se han realizado 4 pruebas y se han evaluado de la misma manera y con el mismo criterio que las pruebas del apartado 7.

En la imagen 21 podemos observar la manera en la que se han realizado estas pruebas; nuestro sensor diseñado instalado dentro de la caja de encapsulado y el sensor Temtop al lado.



Imagen 21: Modelo de medición encapsulado

9.1 PRUEBA ENCAPSULADO 1

La primera prueba de encapsulado se ha realizado en un aula con 5 personas más el profesor; el aula estaba ventilada con anterioridad y durante la duración de la prueba se mantuvieron las ventanas y la puerta abierta.

9.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de ambos sensores durante la realización de la prueba.

Tabla 9: Resultados prueba 1 encapsulado

	Concentración de CO ₂ (ppm)	
Medida	Sensor	Temtop
1	820	400
2	783	750
3	759	750
4	747	750
5	746	760
6	745	770
7	751	790
8	766	800
9	773	800
10	748	800
11	772	800
12	759	800
13	757	800
14	757	770
15	756	770
16	700	770
17	773	770
18	775	770
19	775	770
20	769	770
21	762	770
22	758	770
23	759	765
24	747	765
25	751	762
26	748	760
27	739	759
28	733	759
29	726	757
30	720	756
31	717	757
32	734	755
33	741	753
34	761	750
35	760	750
36	761	750
37	746	750
38	734	750

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

39	731	730
40	724	720
41	716	715

9.1.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las dos gráficas obtenidas durante la prueba; en el Gráfico 9 observamos los resultados del sensor diseñado y en la Imagen 22 se muestra el gráfico generado por el Temtop a partir de los datos obtenidos por este.

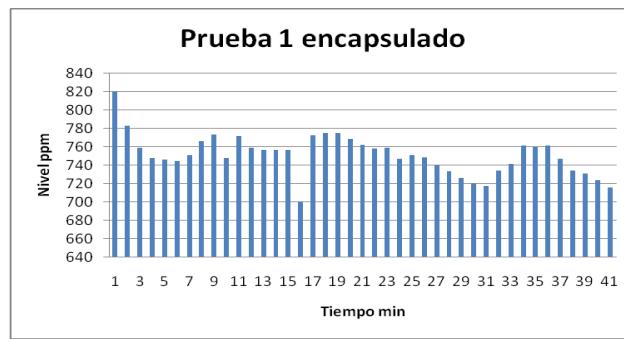


Gráfico 9: Sensor implementado prueba 1 encapsulado

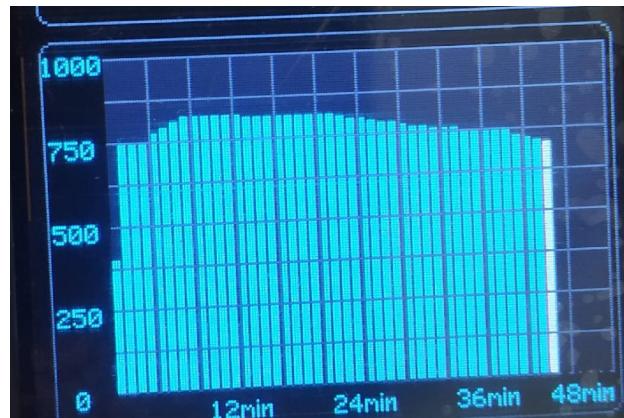


Imagen 22: Sensor de referencia Temtop prueba 1 encapsulado

9.1.3 GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN

En este apartado observamos el gráfico de Bland-Altman generado al comparar las medidas de ambos sensores (Gráfico 10).

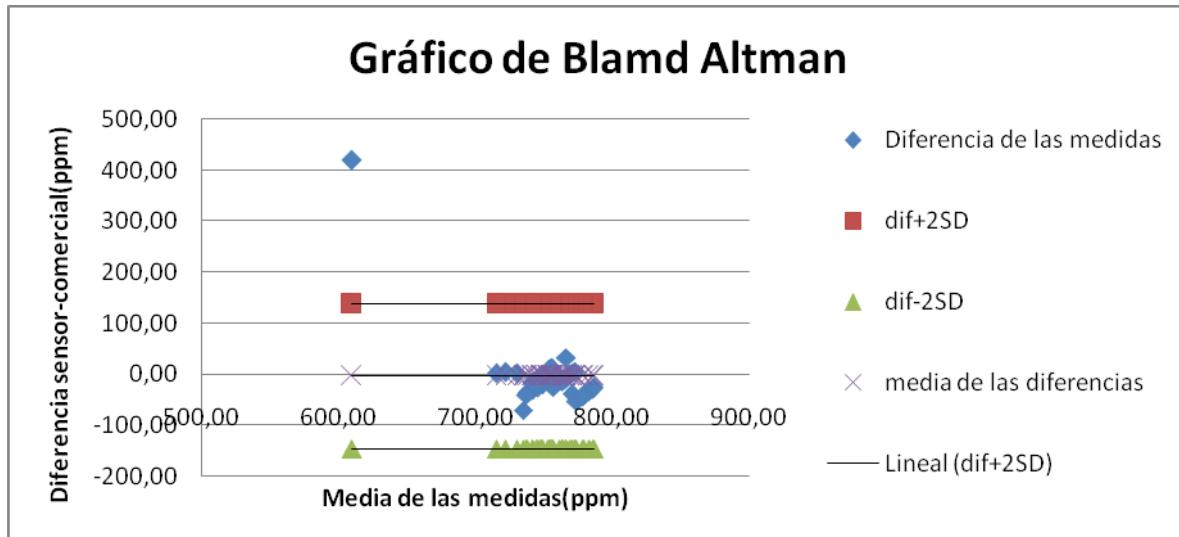


Gráfico 10: Bland-Altman prueba 1 encapsulado

9.1.4 ERRORES

En la Tabla 10 podemos observar el error relativo medio y el absoluto medio de la comparación de las medidas tomadas por un sensor y por el otro durante la prueba 1 con ambos sensores encapsulados.

Tabla 10: Errores prueba 1 encapsulado

Error absoluto	4,06
Error relativo	1%

9.2 PRUEBA ENCAPSULADO 2

La segunda prueba de encapsulado se ha realizado en un aula con 5 personas y el profesor; el aula estaba ventilada con anterioridad y durante la duración de la prueba se mantuvieron las ventanas y la puerta abierta.

9.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos por ambos sensores durante la realización de la prueba.

Tabla 11: Resultados prueba 2 encapsulado

Media	Concentración de CO ₂ (ppm)	
	Sensor	Temtop
1	642	400
2	639	680
3	642	680
4	649	690
5	644	690

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

6	656	690
7	621	690
8	671	700
9	644	700
10	664	700
11	860	700
12	659	710
13	659	710
14	661	710
15	658	710
16	659	700
17	661	710
18	669	700
19	675	700
20	679	700
21	675	700
22	676	700
23	679	715
24	673	715
25	672	713
26	664	713
27	659	715
28	662	715
29	660	715
30	648	715
31	839	715
32	644	715
33	641	715
34	628	715
35	613	700
36	612	790
37	626	780
38	626	785
39	632	770
40	645	668

9.2.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las dos gráficas obtenidas durante la prueba, en el Gráfico 11 observamos los resultados del sensor diseñado y en la Imagen 23 se muestra el gráfico generado por el Temtop a partir de los datos obtenidos por este.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

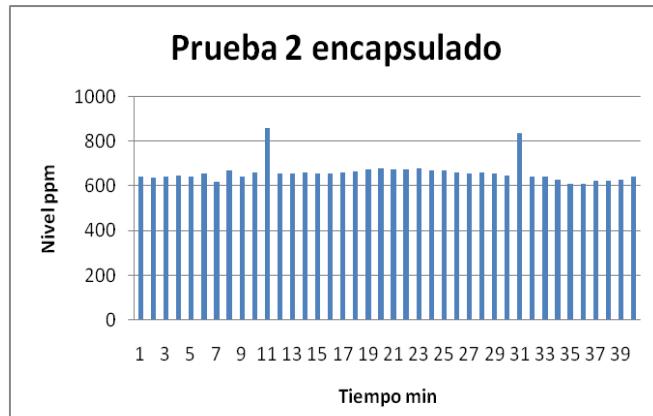


Gráfico 11: Sensor implementado prueba 2 encapsulado

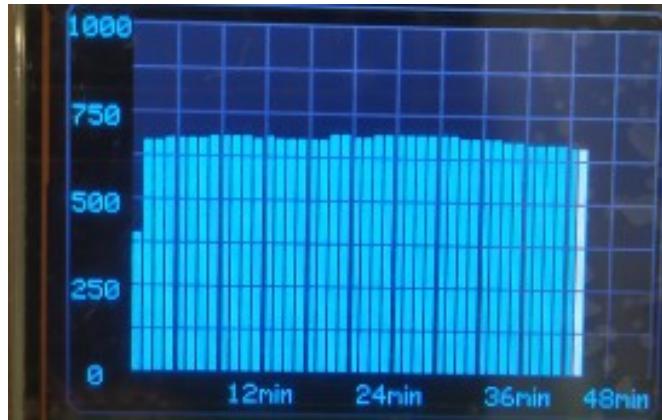


Imagen 23: Sensor de referencia Temtop prueba 2 encapsulado

9.2.3 GRAFICO DE BLAND-ALTMAN

En este apartado observamos el gráfico de Bland-Altman generado al comparar las medidas de ambos sensores.

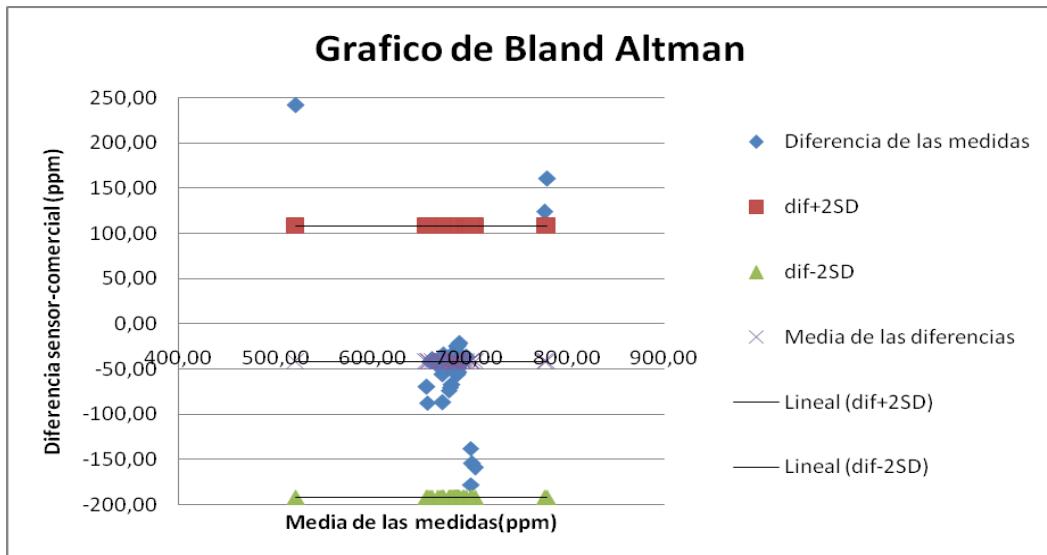


Gráfico 12: Bland-Altman prueba 2 encapsulado

9.2.4 ERRORES

En la Tabla 12 podemos observar el error relativo medio y el absoluto medio de la comparación de las medidas tomadas por un sensor y por el otro.

Tabla 12: Errores prueba 2 encapsulado

Error absoluto	41,46
Error relativo	6%

9.3 PRUEBA ENCAPSULADO 3

La tercera prueba de encapsulado se ha realizado en un aula con 5 personas y el profesor; el aula estaba ventilada con anterioridad y durante la duración de la prueba se mantuvieron las ventanas y la puerta abierta.

9.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos de ambos sensores durante la realización de la prueba.

Tabla 13: Resultados prueba 3 encapsulado

Media	Concentración de CO ₂ (ppm)	
	Sensor	Temtop
1	761	400
2	695	820
3	665	825
4	612	825
5	601	830
6	610	830
7	619	800
8	642	750
9	634	745
10	617	740
11	559	735
12	707	730
13	545	725
14	552	720
15	565	710
16	608	705
17	683	700
18	688	700
19	694	700
20	687	715

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

21	672	725
22	641	725
23	612	725
24	597	720
25	597	720
26	610	715
27	609	710
28	611	700
29	613	795
30	598	780
31	551	750
32	604	630
33	648	630
34	659	625
35	642	625
36	580	620

9.3.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las dos gráficas obtenidas durante la prueba; en el Gráfico 13 observamos los resultados del sensor diseñado y en la Imagen 24 se muestra el gráfico generado por el Temtop a partir de los datos obtenidos por este.

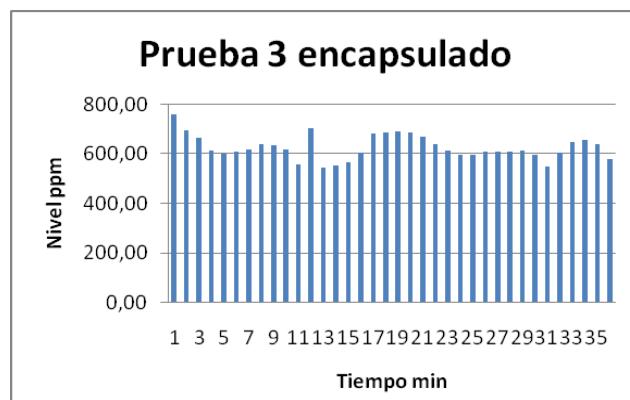


Gráfico 13: Sensor implementado prueba 3 encapsulado

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO



Imagen 24: Sensor de referencia Temtop prueba 3 encapsulado

9.3.3 GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN

En este apartado observamos el gráfico de Bland-Altman generado al comparar las medidas de ambos sensores (Gráfico 14).

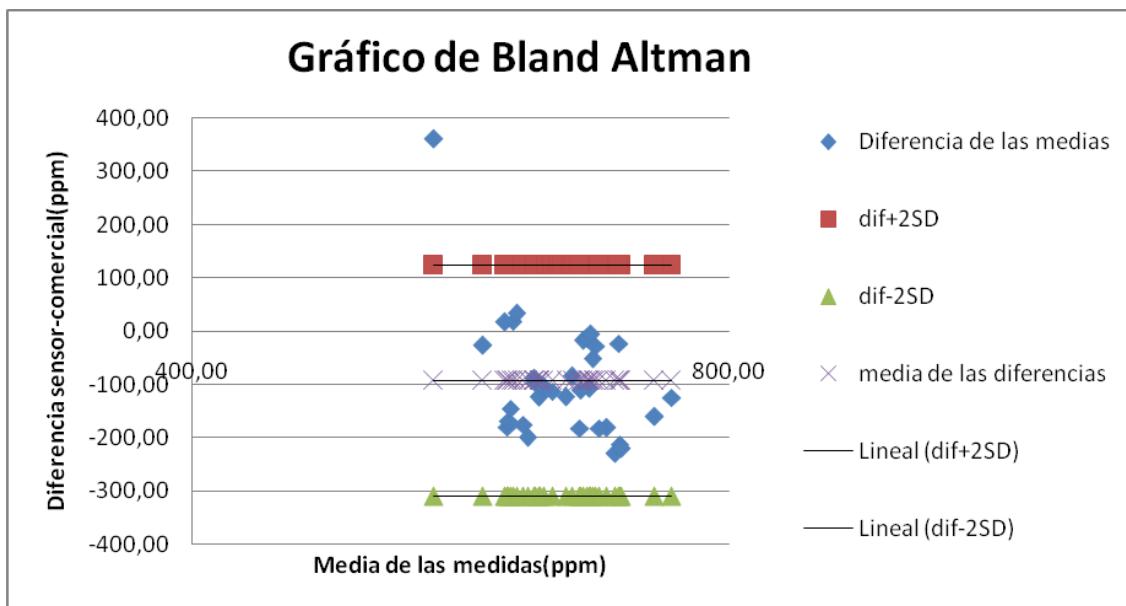


Gráfico 14: Bland-Altman prueba 3 encapsulado

9.3.4 ERRORES

En la Tabla 14 podemos observar el error relativo medio y el absoluto medio de la comparación de las medidas tomadas por un sensor y por el otro.

Tabla 14: Errores prueba 3 encapsulado

Error absoluto	92,15
Error relativo	13%

9.4 PRUEBA ENCAPSULADO 4

La cuarta prueba de encapsulado se ha realizado en un aula con 5 personas y el profesor; el aula estaba ventilada con anterioridad y durante la duración de la prueba se mantuvieron las ventanas y la puerta abierta.

9.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos de ambos sensores durante la realización de la prueba.

Tabla 15: Resultados prueba 4 encapsulado

Media	Concentración deCO ₂ (ppm)	
	Sensor	Temtop
1	570	400
2	653	625
3	635	625
4	745	625
5	530	625
6	510	625
7	503	625
8	489	625
9	493	620
10	498	610
11	557	605
12	582	600
13	587	595
14	589	590
15	564	590
16	544	590
17	544	590
18	575	590
19	591	595
20	587	595
21	584	595
22	538	600
23	525	600
24	729	600
25	850	570
26	628	570
27	560	575
28	525	575
29	525	575
30	556	575

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

31	565	575
32	570	580
33	563	580
34	539	580
35	528	590
36	549	590
37	595	590
38	611	600

9.4.2 GRÁFICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las dos gráficas obtenidas durante la prueba; en el Gráfico 15 observamos los resultados del sensor diseñado y en la Imagen 25 se muestra el gráfico generado por el Temtop a partir de los datos obtenidos por este.

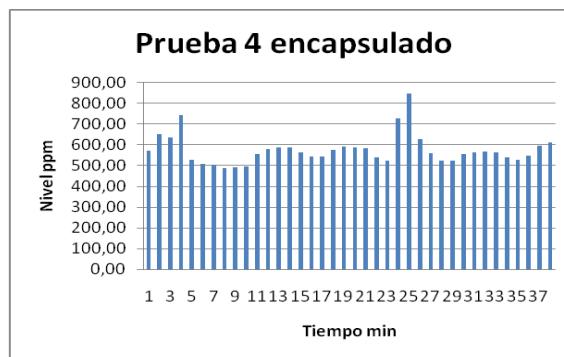


Gráfico 15: Sensor implementado prueba 4 encapsulado

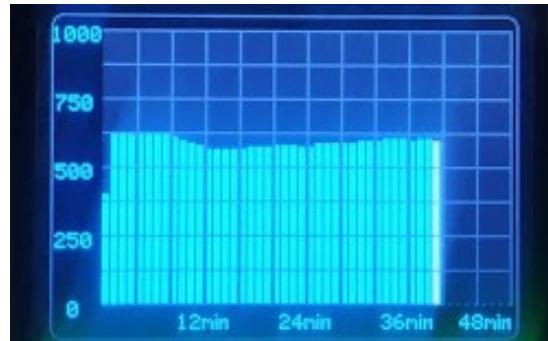


Imagen 25: Sensor de referencia Temtop prueba 4 encapsulado

9.4.3 GRÁFICO DE BLAND-ALTMAN

En este apartado observamos el gráfico de Bland-Altman generado al comparar las medidas de ambos sensores (Gráfico 16).

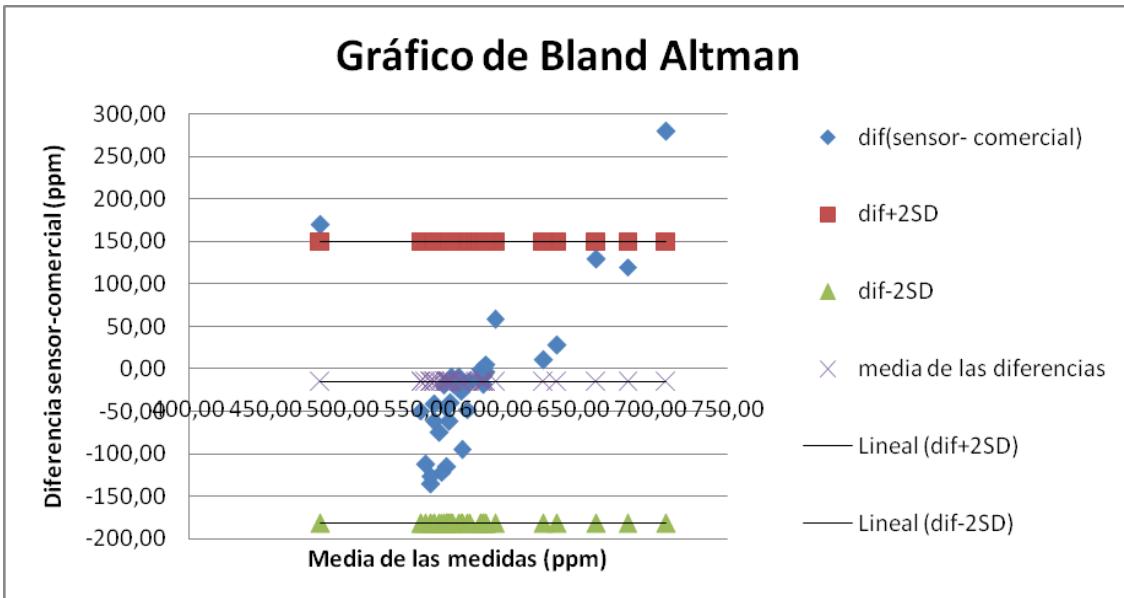


Gráfico 16: Bland-Altman prueba 4 encapsulado

9.4.4 ERRORES

En la Tabla 16 podemos observar el error relativo medio y el absoluto medio de la comparación de las medidas tomadas por un sensor y por el otro.

Tabla 16: Errores prueba 4 encapsulado

Error absoluto	15,26
Error relativo	3%

9.5 CONCLUSIONES DEL ENCAPSULADO

En cuanto a los resultados obtenidos, se podría decir que son los esperados, considerando todo lo que se dedujo en el Apartado 8.

Debido al encapsulado se ha podido demostrar que las mediciones son más parecidas. Así, los errores absolutos de estas pruebas han sido mucho menores que los de las pruebas del Apartado 7, confirmando que una de las causas por las que las medidas del sensor diseñado eran diferentes a las del Temtop es el encapsulado.

En los gráficos Bland-Altman podemos ver que, gracias a este encapsulado, la media de las diferencias de las medidas también ha disminuido su valor, siendo en el Apartado 7 con un rango de 50 ppm a 150 ppm y en el Apartado 9 de 0 ppm a 100 ppm. Como bien se ha explicado en el Apartado 8 cuanto más cerca esté la media de las diferencias del cero, más se parecerán los resultados obtenidos. Por lo que se podría decir que al encapsular el sensor diseñado hemos obtenido unos resultados más parecidos al sensor comercial Temtop 2000.

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

De esta manera confirmamos que nuestra suposición del Apartado 8 podría ser acertada: las mediciones eran muy diferentes debido a que nuestro sensor no se encontraba encapsulado.

10. DISEÑO 3D

Para el encapsulado final del dispositivo se ha decidido realizar una caja mediante impresión 3D. El fin de esta caja es poder guardar los diferentes dispositivos del diseño y protegerlos de una manera mucho más profesional.

Para el diseño se ha utilizado el programa FreeCAD; para la configuración de la impresión el programa CURA y la impresora utilizada es la Witbox.

10.1 DISEÑO DE LA CAJA

Para el diseño de la caja se ha cogido un cubo de 10 cm x 10 cm. En una de sus caras se ha realizado el hueco para la LCD y para los tres leds (Imagen 26).



Imagen 26: Cara delantera de la caja

En la cara de enfrente a la descrita anteriormente se ha diseñado un hueco para poder conectar el Arduino (Imagen 27).



Imagen 27: Cara trasera de la caja

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

La cara inferior se ha dejado abierta para poder instalar una tapa (Imagen 28).



Imagen 28: Cara inferior de la caja

El resto de caras se han diseñado con rejillas para poder favorecer la ventilación de los dispositivos y, principalmente, para que el sensor pueda captar el CO₂ (Imagen 29).



Imagen 29: Resto de caras de la caja

También se ha diseñado una tapa para poder cerrar la caja (Imagen 30).



Imagen 30: Tapa de la caja

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

10.2 MONTAJE DEL DISPOSITIVO

Para poder introducir el diseño de nuestro sensor con todos los complementos, se ha tenido que rediseñar el montaje de estos, el cual básicamente se basa en eliminar la protoboard. Las conexiones se han realizado de la misma manera que se describe en el Apartado 5. Para poder eliminar la protoboard de nuestro diseño, se han utilizado las patillas inferiores de la LCD (Imagen 31).

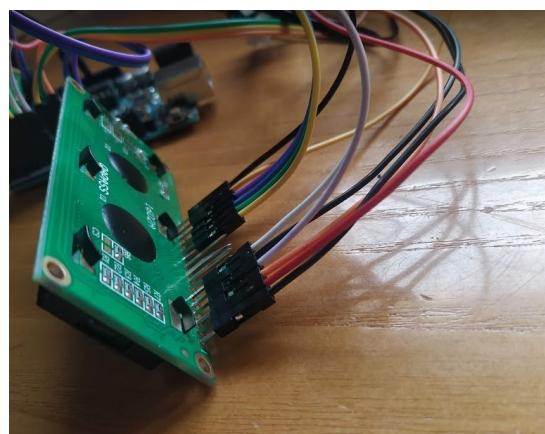


Imagen 31: Conexión patillas inferiores de la LCD

Los leds en vez de conectarlos a la protoboard, se les han conectado los cables de tierra y alimentación directamente (Imagen 32).



Imagen 32: Conexión leds

Lo mismo ha ocurrido con el potenciómetro (Imagen 33).



Imagen 33: Conexión del potenciómetro

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

Y para la conexión de todos los dispositivos a tierra y a alimentación se han utilizado unas fichas (Imagen 34).



Imagen 34: Ficha de tierra y alimentación

De esta manera se ha eliminado la protoboard y se ha reducido el espacio que ocupaba nuestro diseño anterior.

11. CONCLUSIONES FINALES

Como conclusión final se puede decir que el sensor diseñado funciona correctamente, aunque en un principio los resultados no eran exactos al compararlo con el sensor comercial, hemos podido demostrar que esto era probablemente debido al encapsulado.

Estos resultados no significan que antes de encapsular el sensor diseñado estuviera tomando mal las medias, sino que las tomaba diferentes a las del otro sensor.

Un sensor que se encuentra encapsulado, medirá el nivel de CO₂ principalmente de donde se encuentre encapsulado, cuanto más cerrado sea el sitio donde está encapsulado y menos “rejillas” de ventilación tenga, mayor será el nivel de ppm que mida debido a que mayor será la dificultad para ventilar.

El sensor diseñado antes de encapsularlo, media significativamente menores niveles de CO₂ que el comercial y esto era debido a que el aula estaba más ventilada o que le costaba menos ventilarse que al interior del Temtop que es donde se situaba el sensor del mismo.

El encapsulamiento no se ha realizado para corregir el error del sensor, ya que no era un error *per se*, sino que se ha hecho para poder guardarlo en un sitio, protegerlo y darle un aspecto más profesional.

12. POSIBLES MEJORAS

Como posibles mejoras tenemos varios aspectos a considerar.

En cuanto al sensor diseñado, se le podría añadir un modulo 4G, con el cual nos podríamos conectar a la red y poder subir todos los datos recogidos, quedándose

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

almacenados ahí. Esto nos podría ayudar a poder detectar en que momento los niveles han excedido del límite aconsejado o, por ejemplo, también a poder detectar cual sería el aforo máximo de un aula con el cual se cumplen las medias permitidas. Por ejemplo, si salieran casos de COVID-19 en un aula, con este sistema podríamos detectar en que clase se han cumplido las normas de ventilación manteniendo los niveles de CO₂ bajos y en cuáles no y así poder tomar las medidas oportunas.

Una mejora en nuestro dispositivo sería por ejemplo la utilización de baterías para poder alimentar al Arduino y este a nuestro sensor y así poder crear un diseño portátil, utilizable en cualquier parte. También, y con el mismo fin, sería útil incorporar un cable con el cual nos podamos conectar al móvil y, con éste, alimentar al dispositivo.

En cuanto al diseño 3D, se podría optimizar el diseño y reducir el tamaño para facilitar el transporte o la colocación. Con dispositivos más pequeños se podría instalar un anclaje en la pared. También se podría crear un diseño en el que el potenciómetro, el sensor y la ficha de tierra y alimentación no estén sueltos, es decir, que cada complemento tenga un compartimento para que dentro de la caja se queden quietos y no estén sueltos como es en este caso.

Para lo que es el montaje en el interior de la caja, una posible mejora es la utilización de una PCB (*Placa de Circuito Impreso*), en la que los dispositivos como son el potenciómetro, los leds e incluso la alimentación y tierra estén conectados de una manera más óptima.

13. REFERENCIAS

- [1] N. C. C. for E. Healthtle, “Vancouver, BC: National Collaborating Centre for Environmental Healthtle,” 15 enero, 2021. <https://ncceh.ca/content/blog/can-co2-sensors-be-used-assess-covid-19-transmission-risk> (accessed Jun. 14, 2021).
- [2] F. Villanueva, A. Notario, B. Cabañas, P. Martín, S. Salgado, and M. F. Gabriel, “Assessment of CO₂ and aerosol (PM_{2.5}, PM₁₀, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: The case of a metropolitan area in Central-Southern Spain,” *Environ. Res.*, vol. 197, p. 111092, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092>.
- [3] I. para la S. Geoambiental, “Dióxido de carbono CO₂,” 2013. <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2> (accessed Jun. 23, 2021).
- [4] L. Llamas, “DETECTOR DE GASES CON ARDUINO Y LA FAMILIA DE SENORES MQ,” 2016. <https://www.luisllamas.es/arduino-detector-gas-mq/> (accessed May 08, 2021).
- [5] J. C. Macho, “MQ-135 Sensor calidad de aire,” 2021. <https://store.prometec.net/producto/mq-135-sensor-calidad-de-aire/> (accessed May 08, 2021).
- [6] L. Llamas, “MEDIR CALIDAD DEL AIRE Y CO₂ CON CCS811 Y ARDUINO,” 2020. <https://www.luisllamas.es/medir-calidad-del-aire-y-co2-con-ccs811-y-arduino/> (accessed May 08, 2021).
- [7] melopero, “Rotura del sensor de calidad del aire Adafruit CCS811 - VOC y

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO

- eCO2,” 2021. <https://www.melopero.com/es/shop/sensori/gas/adafruit-ccs811-air-quality-sensor-breakout-voc-and-eco2/> (accessed May 08, 2021).
- [8] Prometec, “SENSOR CO2 MG811,” 2021. <https://www.prometec.net/sensor-co2-mg811/> (accessed May 08, 2021).
- [9] J. C. Macho, “Sensor CO2 MH-Z19,” 2021. <https://store.prometec.net/producto/sensor-co2-mh-z19/> (accessed May 08, 2021).
- [10] R. PI, “Testing the MH-Z19 Infrared CO2 Sensor Module,” 2017. <https://www.circuits.dk/testing-mh-z19-ndir-co2-sensor-module/> (accessed May 08, 2021).
- [11] Y. Fernandez, “Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno,” 2020. <https://www.xataka.com/basicos/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno> (accessed May 08, 2021).
- [12] Prometec, “SENSORES DE CO2: MH-Z19,” 2021. <https://www.prometec.net/sensores-de-co2-mh-z19/> (accessed May 08, 2021).
- [13] MARIO, “La biblia del sensor de CO2 MH-Z19B,” 2021. <https://emariete.com/sensor-co2-mh-z19b/> (accessed May 08, 2021).
- [14] N. N. componentes Electronicos, “ARDUINO UNO Eval ARMEGA328P 8BIT UNO RV3.” <https://www.natronic.es/producto/placas-de-desarrollo-y-accesorios/placas-de-desarrollo-arduino/arduino-uno-eval-armega328p-8bit-uno-rv3/> (accessed Jun. 14, 2021).
- [15] J. Guerrero, “Arduino Uno: Especificaciones y características,” *21 septiembre*, 2014. <https://pluselectric.wordpress.com/2014/09/21/arduino-uno-especificaciones-y-caracteristicas/> (accessed Jun. 14, 2021).
- [16] MakerElectronico, “Lcd 16×2 luz amarillo alfanumerico.” <https://www.makerelectronico.com/producto/lcd-16x2-luz-amarillo-alfanumerico/> (accessed Jun. 14, 2021).
- [17] Z. Market, “Tipos de LCD para arduino.” <https://www.zonamaker.com/arduino/modulos-sensores-y-shields/tipos-de-lcd-para-arduino> (accessed Jun. 14, 2021).
- [18] J. G. Escobedo, “Sensor de CO2(MH-Z19) CON ARDUINO,” *10 enero*, 2021. <https://javiergarciaescobedo.es/arduino/526-sensor-de-co2-mhz19-con-arduino> (accessed Jun. 07, 2021).

DISEÑO DE SENSOR DE CO₂ CON ARDUINO
