



Diseño y Manufactura de un Dispositivo para el Monitoreo de Condiciones Ambientales Urbanas

Castro-Zenil, M. S.¹ ✉; Alvarado-López, A.²; Peñaloza-Mendoza, G. R.¹.

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México / TecNM Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, Academia de Ingeniería Biomédica; Avenida Tecnológico No.1, C.P. 61615, Zurumutaro, Pátzcuaro Michoacán, México.

² Tecnológico Nacional de México / TecNM Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, Academia de Ingeniería en Desarrollo Comunitario; Avenida Tecnológico No.1, C.P. 61615, Zurumutaro, Pátzcuaro Michoacán, México.

✉ mcastro@itspa.edu.mx

Resumen - Las condiciones ambientales en las ciudades han decaído considerablemente, el crecimiento de la mancha urbana, la mala planificación y la tala inmoderada nos están llevando a situaciones muy complejas, la falta de agua y la mala calidad del aire que se respira son factores que están impactando en la población. En este trabajo se plantea una medición de la calidad del aire en ciudades, como caso de estudio Morelia, Michoacán. En el país en muchas ciudades por cuestiones políticas, no se tienen esquemas de medición de índices de contaminación, ni una obligatoriedad de la verificación vehicular. Este proyecto deriva de la necesidad de llevar una estadística que abone para una toma de acciones ambientales. Para esto se construyó un dispositivo que mide la contaminación del aire a través de sensores que miden parámetros PM2.5, PM10, NOx, SOx, O3, Temperatura ambiente y humedad relativa con la finalidad de tener datos reales y actualizados, este dispositivo contará con una tarjeta ESP32 y enviará los datos recabados a la nube, el dispositivo estará conectado a la red del dispositivo celular del usuario y la caja de sensores anclados al vehículo en el brazo del limpiabrisas. El prototipo es funcional, y esta siendo probado, los datos se han enviado a un servidor MQTT, en este caso es ThingSpeak, del cual los datos pueden ser descargados a través de archivos csv o a través de MatLab. Los datos recabados se parametrizan de acuerdo a la norma la NADF-009-AIRE-2006, debido a que no se cuenta con una regulación estatal, ni existe una NOM, por lo tanto, se hace referencia a la norma empleada en la CDMX.

Palabras Clave – Aire, Calidad, ESP32, IoT, Monitoreo, Sensores.

Abstract - *The environmental conditions in cities have declined considerably due to urban sprawl, poor planning and excessive logging, leading to complex issues such as water scarcity and poor air quality. This work proposes a measurement system for a quality in cities, using Morelia, Michoacán, as a case study. In Mexico, many cities lack pollution index measurement schemes and mandatory vehicle inspections due to political issues. This project addresses the need to gather statistics that can inform environmental actions. To achieve this, a device was developed to measure air pollution using sensors that monitor parameters such as PM2.5, PM10, NOx, SOx, O3,*

ambient temperature and relative humidity, providing real-time and updated data. The device incorporates an ESP32 microcontroller to send collected data to the cloud. It connects to the user's cellular network, with the sensor box mounted on the vehicle's windshield wiper arm. The prototype is functional and currently undergoing testing. Data has been transmitted to an MQTT server, specifically ThingSpeak, from which it can be downloaded as CSV files or accessed through MATLAB. The collected data are parameterized according to the NADF-009-AIRE-2006 standard, as there is no state regulation or official Mexican standards NOM available, therefore we reference the standard used in the CDMX.

Keywords - Air, Quality, ESP32, IoT, Monitoring, Sensors.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente las condiciones ambientales de nuestro planeta están en franca crisis, la huella urbana está deteriorando de forma acelerada y alarmante a nuestros ecosistemas. La huella de carbono del ser humano en el planeta cada vez es más grande y su recuperación natural es una tarea cada vez más compleja. Si bien la naturaleza trata de reponerse de nuestro impacto en ella, esta tarea se la estamos complicando cada día más.

El cambio climático es una de las evidencias más tangibles del daño que estamos provocando y la falta de empeño en realizar acciones que aporten a mitigar este cambio en las condiciones de nuestro entorno es algo que debería de ser nuestra mayor preocupación.

En cuanto a la contaminación del aire, en diversas ciudades se están tomando medidas, como sanciones a industrias que no optimizan sus chimeneas, verificaciones vehiculares, control de la cantidad de automóviles que deben circular en los días de mayor concentración de contaminantes.

Un ejemplo en nuestro país es la CDMX, en la cual se toman medidas derivadas de los altos índices de contaminación. En el año de 1982, se creó un indicador para informar a la población del estado de la calidad del aire y los efectos que esta provoca en su salud, dicho índice fue denominado IMECA (índice Metropolitano de la Calidad del Aire).

El índice IMECA toma su fundamento en el Pollutant Standard Index (PSI) de los Estados Unidos, y se toma como límite superior los 100 puntos, superando este nivel se deben activar los protocolos. Este índice tiene como regulación la NADF-009-AIRE-2006 (Norma Ambiental del Distrito Federal), la cual contempla 5 contaminantes: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas.

En el resto de la república, en pocas ciudades se tiene una obligatoriedad con la verificación vehicular, y se torna más como una situación de gobierno, tanto de presión como de acuerdos para evitar este proceso, sobre todo en el parque vehicular del transporte público.



Por esto la necesidad de generar bancos de información sobre las condiciones del aire en las ciudades. Particularmente la ciudad de Morelia en Michoacán, es un ejemplo de contaminación del aire, al acercarte a ella desde la carretera hacia la ciudad de Pátzcuaro, se nota una nube de contaminantes, lo que provoca entre otras cosas, las altas temperaturas que hoy en día se presentan en la ciudad.

Este cúmulo de información puede ser recabada a través de sensores, esto genera la posibilidad de tomar decisiones fundamentadas, que permitan al gobierno implementar políticas para la disminución de contaminantes al medio ambiente, tal como se realiza en la capital del país. Este es un reto de gobierno, pues el tomar medidas como el control del número de vehículos que puedan circular al día, o la verificación vehicular obligatoria, generará divergencia de los diversos actores sociales, tanto a favor como en contra, pero la información de las condiciones reales no solo ayudará a la reducción de contaminantes en el aire, sino apoyará a mejorar la calidad de vida de los habitantes de las grandes urbes.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En el trabajo realizado por Duran (2021), se hace referencia a la medición de la calidad del aire en ciudades como Medellín y Bogotá, para esto hacen uso del sensor Temtop M2000C, y correlacionan los resultados de esta medición con los arrojados por estaciones de calidad del aire ubicadas en la ciudad. Según lo reportado este sensor además de reportar datos de temperatura y humedad, mide dos distribuciones de tamaño aerodinámico, las menores a 2.5 micrómetros que conoceremos como PM 2.5 y las menores a 10 micrómetros o PM10.

En su experimentación Duran (2021) indica que su sensor fue ubicado a las cercanías de la estación de calidad del aire, reportando valores directamente proporcionales entre ambos dispositivos, con los datos mostrados en su estudio, se dota de valides al uso de estos dispositivos de bajo costo contra las estaciones de calidad del aire proporcionadas por empresas y con altos costos.

Por su parte Hoffman(2020), hace referencia del trabajo con sensores basándose en IoT, y la rectificación de datos a través de aprendizaje automático, él en su estudio utiliza el manejo de los datos en la nube para inferir las mediciones puntuales espacio temporales, este trabajo busca mejoras en la calidad de los datos del algoritmo de calibración en la nube, en la búsqueda de la construcción de mapas de calidad del aire altamente granulares que permitan tener una mejor evaluación de la calidad del aire.

En el artículo que publicó Salas (2023), hace referencia del trabajo de evaluación de la calidad del aire, para esto evaluó a 5 ciudades del estado de Guanajuato, México. En esta entidad federativa se instauró el programa PROAIRE, que esta operado por la URCA (Unidad Responsable de la Calidad del Aire). Este estudio es interesante dado que marca una intencionalidad de parte del gobierno y de la academia sobre la importancia de medir las diversas aristas del problema y que los datos pueden transformarse en información que apoye a tomar decisiones.

En el trabajo de Lancheros(2017), propone debido a los altos costos de los dispositivos de medición de la calidad del aire, la creación de un arreglo de sensores, aunque no declara que clase de sensor utiliza, si argumenta las variables a medir: humedad, temperatura, partículas suspendidas, monóxido de carbono.

Al análisis del código que Lancheros(2017) comparte en su artículo se deduce que utiliza un sensor DHT11 para la medición de la temperatura y la humedad, y un sensor mq3 para la medición de los otros dos parámetros.

A través de una conexión bluetooth, recaba los datos de su dispositivo en una aplicación móvil de código abierto llamada AirCasting.

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se hizo uso de una metodología ágil, en este caso SCRUM, este marco de trabajo es utilizado mayormente para el desarrollo de software, pero debido a sus características de flexibilidad y adaptabilidad, es aplicable a otros contextos, como en este caso donde se requiere el desarrollo a la par de software y hardware.

Como este proceso requiere productos de calidad en iteraciones cortas el concepto que maneja SCRUM denominado sprints, se adapta de manera ideal al proceso que se plantea.

De acuerdo a esta metodología como primer paso realizamos la identificación de requisitos, los cuales los categorizamos en tres apartados: identificación de necesidades donde se plantea la medición de los parámetros PM2.5, PM10, NOx, SOx, O3, Temperatura ambiente y humedad relativa.

Como segundo punto definimos las especificaciones técnicas, para determinar la clase de sensores a utilizar de acuerdo a la precisión requerida, el rango de medición y las condiciones operativas como la latencia, la forma de comunicación (I2C, SPI, etc.), el consumo de batería, etc.

Como tercer factor analizamos los requisitos de software que permitan codificar de acuerdo a las necesidades como la recolección de datos, la visualización en tiempo real, el almacenamiento y el análisis de datos históricos.

Los siguientes pasos de la metodología SCRUM nos llevan a la investigación y selección de componentes, al diseño del sistema subdividido en: diseño electrónico, donde se crea el diagrama de circuito, el diseño del software para el control del dispositivo y el prototipo de hardware, donde se realiza la conexión y se diseña la carcasa para el dispositivo.

Como última etapa realizamos la iteración y mejora, donde se trabaja la revisión de resultados que nos lleven a generar mejoras necesarias en el diseño de hardware y software.

IV. DESARROLLO

Una vez analizado el problema y documentado sobre las diversas opciones, considerando la pertinencia, la economía y la factibilidad de uso, optamos por los componentes que a continuación listamos.

MQ-135, el cual es un detector de calidad del aire, este componente es un sensor electroquímico, el cual como principio de funcionamiento presenta una variación en su resistencia al entrar en contacto con gases como el amoníaco, alcohol, benceno, humo y dióxido de carbono en el aire.

El MQ-135 está conformado por un circuito electrónico que funge como interfaz para la conexión con una tarjeta de desarrollo a través de un pin digital o de un pin analógico. En el caso de acceder a través del pin digital solo estaremos leyendo una bandera para determinar la presencia o ausencia de gas.

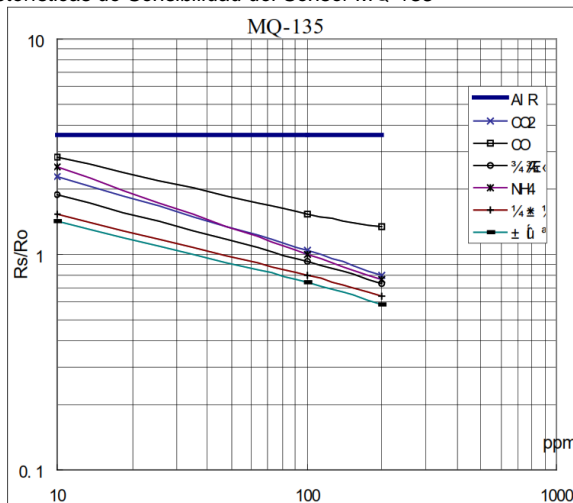
En nuestro caso hacemos uso de la lectura analógica del sensor, este se encuentra encerrado entre dos mallas de acero inoxidable, lo cual según el fabricante nos indica es para la prevención de explosión del elemento calentador interno por presencia de gases inflamables en el ambiente además de que filtrará las partículas suspendidas para que solo los gases entren a dicha cámara. Su principio de funcionamiento es una bobina de níquel-cromo para formar el sistema de calefacción y dióxido de estaño como revestimiento, el cual funge como sistema de detección. La figura 1, nos muestra las características de sensibilidad de los gases detectados por el MQ-135

Cuando se calienta el dióxido de estaño, este absorbe el oxígeno en su superficie y atrae electrones del dióxido de estaño generando resistencia al flujo de corriente a través del mismo, a la presencia de gases, la densidad de oxígeno absorbido disminuye permitiendo un mayor flujo de corriente.

Debido a esta delta de flujo de corriente el voltaje de la salida analógica del circuito variará por la concentración de gas, a mayor concentración mayor voltaje de salida. El módulo incorpora un comparador de alta precisión para poder medir la señal y un potenciómetro para calibrar el nivel de concentración umbral para el caso en que se utilice el pin digital para determinar el paso de estado bajo a alto.

Ya que este sensor es sensible a más de un gas debemos de obtener los valores en unidades correspondientes a la concentración del gas medido, gracias a la hoja de datos podemos hacer un escalado por software.

Figura 1
Características de Sensibilidad del Sensor MQ-135



Nota: Fuente Technical Data MQ-135 Gas Sensor tomada de <https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2018/01/SNS-MQ135.pdf>

Al no tener una ecuación hay que encontrarla, esto se realiza a través de una estimación de la curva, el método que optamos es una regresión lineal. Para esto realizamos una ecuación lineal de la forma:

$$y = mx + b \quad (1)$$

La ecuación resultante para nuestro proceso es:

$$CO_2(ppm) = 0.04 \times lectura_{a_{sensor}} - 10 \quad (2)$$

El código para poder realizar la lectura es el siguiente

```

1. const int MQ135_PIN = A0;
2. int sensorValue = 0;
3. const float slope = 0.04; // Pendiente (m)
4. const float intercept = -10.0; // Ordenada al origen (b)

5. void setup() {
6.   Serial.begin(9600);
7.   pinMode(MQ135_PIN, INPUT);
8. }

9. void loop() {
10.  sensorValue = analogRead(MQ135_PIN);
11.  float co2_ppm = slope * sensorValue + intercept;
12.  Serial.print("Valor del sensor: ");
13.  Serial.print(sensorValue);
14.  Serial.print(" - CO2: ");
15.  Serial.print(co2_ppm);
16.  Serial.println(" ppm");
17.  delay(2000);
18. }

```

El siguiente sensor a utilizar es el GP2Y1010AU0F es un sensor óptico de calidad del aire, diseñado para detectar partículas de polvo. Utiliza un diodo emisor de luz (LED) y un fototransistor para detectar la cantidad de luz dispersada por las partículas de polvo que pasan a través del sensor.

El sensor tiene un LED infrarrojo que emite luz hacia una cámara de detección, las partículas de polvo en el aire entran en la cámara de detección y dispersan la luz emitida por el LED, después un fototransistor colocado en un ángulo con respecto al LED detecta la luz dispersada por las partículas de polvo.

La cantidad de luz dispersada que alcanza el fototransistor es proporcional a la concentración de polvo en el aire. El sensor proporciona una señal de salida analógica que varía según la cantidad de luz dispersada detectada, es decir, según la concentración de polvo.

Para poder determinar la calidad del aire que detecta este sensor se implementó el siguiente código:

```

1. // Define los pines utilizados
2. const int sensorPin = A1;
3. const int ledPin = 2;

4. // Variables para almacenar los valores leídos del sensor
5. int sensorValue = 0;
6. float voltage = 0;
7. float dustDensity = 0;

```

Para el setup, agregamos la configuración de los pines digitales y conservamos la inicialización del puerto serial del código anterior

```

1. void setup() {
2.   pinMode(sensorPin, INPUT);
3.   pinMode(ledPin, OUTPUT);
4.   digitalWrite(ledPin, LOW); // Apaga el LED del sensor
5. }

```

De igual manera, se agrega el trabajo de este sensor adicional al código de lectura para el MQ135.

```

1. void loop() {
2. // Enciende el LED del sensor
3. digitalWrite(ledPin, HIGH);
4. delayMicroseconds(280);//Espera 280 microsegs para
   estabilizar

5. // Lee el valor del sensor
6. sensorValue = analogRead(sensorPin);

7. // Apaga el LED del sensor
8. digitalWrite(ledPin, LOW);
9. delayMicroseconds(40);//Espera 40 microseg después y
   apaga LED

10. // Convierte el valor leído a voltaje
11. voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);

12. // Convierte el voltaje a densidad de polvo (mg/m³)
13. // Fórmula basada en el datasheet del sensor
14. dustDensity = 0.17 * voltage - 0.1;

15. if (dustDensity < 0) {
16. dustDensity = 0;
17. }

18. Serial.print("Valor del sensor: ");
19. Serial.print(sensorValue);
20. Serial.print(" - Voltaje: ");
21. Serial.print(voltage);
22. Serial.print(" V - Densidad de polvo: ");
23. Serial.print(dustDensity);
24. Serial.println(" mg/m³");

25. // Espera 1 segundo antes de la próxima lectura
26. delay(1000);
27. }

```

Figura 2
Sensor SHARP GP2Y1010AU0F



Nota: Imagen obtenida de https://m.media-amazon.com/images/I/51NIHSfv5FL._AC_UF894,1000_QL80_.jpg

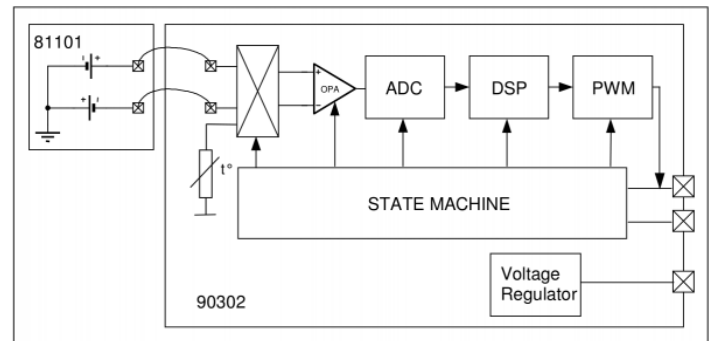
Otro de los componentes utilizados es el sensor de temperatura infrarroja GY-906 MLX90614, el cual nos permite medir la temperatura a distancia en un rango de -70°C a 380°C con una precisión de 0.5°C . Este sensor tiene dos opciones de medición, la temperatura ambiental y la de un objeto contundente, utiliza una comunicación por el protocolo I²C

El MLX90614 es la combinación de dos dispositivos, por lo cual nos facilita el trabajo en la lectura de la temperatura, un detector de temperatura de termopila de infrarrojos y un detector de aplicaciones de acondicionamiento de la señal.

Este sensor sigue la Ley de Stefan-Boltzmann, según la cual todo objeto que no esté por debajo del cero absoluto, emite radiación en el espectro infrarrojo, el cual es directamente proporcional a su temperatura, y la termopila infrarroja detecta cuanta energía infrarroja emiten los materiales en su campo de visión y produce una señal eléctrica proporcional a esta.

Después el voltaje que genera la termopila es captado por el ADC de 17 bits y acondicionado antes de pasar al microcontrolador que en nuestro caso será una placa esp32.

Figura 3
Diagrama de Bloque Interno MLX90614 muestra la termopila (MLX81101) y ASSP (MLX90302)



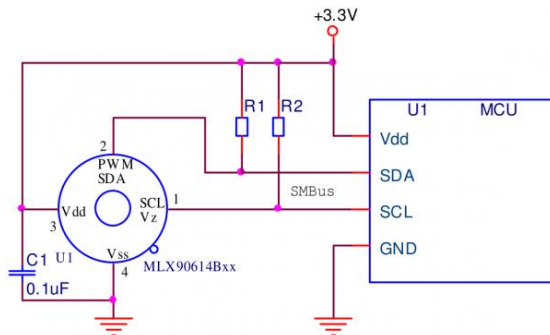
Nota: Imagen tomada de la Hoja de Datos del MXL90614 https://www.google.com/aclk?sa=l&ai=DChcSEwjX7fqZx7iGAXVNTEcBHcQNDOgYABAAGgJxdQ&ase=2&gclid=Cj0KCQjw6uWyBhD1ARIsAIMcAdof-P7JHWLxFw4HLALIUh34OC5qgSIYmclFLkT6Hwpxyup_TXedd5AaAih8EALw_wcB&sig=AOD64_1s4GNRcaGzbnrQa-QEfz_3wDTg4A&q&nis=4&adurl&ved=2ahUKEwik5PSZx7iGAXVaN2IAHRsYA7oQ0Qx6BAglEAE

Como se mencionó este sensor tiene la capacidad de otorgar dos mediciones, la de un objeto y la del medio ambiente, esta última que es la que para nuestra aplicación interesa se toma en la matriz del sensor, la cual tiene una resolución de 0.02°C .

Otra de las características de este sensor es que se configura y lee a través de una interfaz SMBus de 2 cables, muy similar y casi funcionalmente equivalente a I²C. Las dos señales, SDA y SCL, transportan los datos y las señales de reloj respectivamente. Un dispositivo maestro controla el reloj, mientras que la señal de datos se controla bidireccionalmente.

Figura 4

Diagrama de comunicación del MLX90614



Nota: Imagen tomada de la Hoja de Datos del MXL90614 https://www.google.com/aclk?sa=l&ai=DChcSEwjX7fqZx7iGAXV NTEcBhCQNDOgYABAAGgJxdQ&ase=2&gclid=Cj0KQCjw6uW yBhD1ARIsAImcADof-P7JHWLx4HLALIUh34OC5qgSIYmcLFLkT6Hwpxyup_TXedd 5AaAih8EALw_wcB&sig=AOD64_1s4GNRcaGzbnrQa-QEfz_3wDTg4A&q&nis=4&adurl&ved=2ahUKEwik5PSZx7iGAX VaN2IAHRsYA7oQ0Qx6BAgIEAE

En cuanto al cerebro a utilizar en este dispositivo es una esp32 s2 mini, la cual es una mini tarjeta de desarrollo basada en el chip de Expressif ESP32-S2FN4R2, la cual está diseñada con una interfaz USB tipo C y soporte Wi-Fi. A pesar de su compacto tamaño ESP32 S2 Mini incluye 27 pines de entradas/salidas e interfaces ADC, DAC, I2C, SPI, UART, USB OTG. También es compatible con mini shields LOLIN D1 y se puede programar a través de Micropython, Arduino, CircuitPython y ESP-IDF. Estas características la hacen idónea para nuestro desarrollo, sobre todo que su voltaje de operación a 3.3 Volts nos permite operarla con baterías pequeñas, lo cual es deseable para la manufactura de la carcasa donde se encontrará el dispositivo.

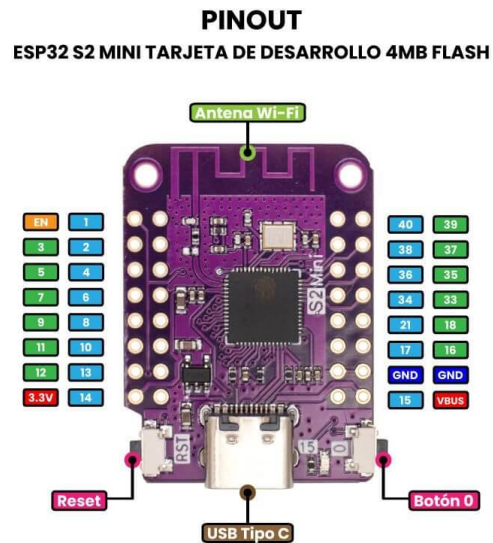
Otra de las características deseables de esta tarjeta es que cuenta con una antena WIFI lo que nos permitirá compartir en la nube los datos generados por el dispositivo, lo cual es uno de los objetivos de este proceso.

Todos estos componentes se integrarán para construir una solución que nos permita mantener un monitoreo de la calidad del aire, dicho dispositivo está pensado para que sea incorporado en los vehículos, la batería le dota de una autonomía de 8 a 12 horas de funcionamiento, en este tiempo se pretende que se estén enviando datos a una plataforma que se encargará de almacenarlos para su posterior procesamiento.

La configuración de esta tarjeta nos permitirá conectarnos a la Zona WiFi personal que pueden generar los celulares de los usuarios, teniendo con este enlace independencia de alguna aplicación instalada en el dispositivo celular, lo cual es una ventaja, también se trabaja en una aplicación que guarde los datos de manera local para después enviarlos cuando se tenga acceso a una red WIFI por parte del dispositivo móvil en la búsqueda de reducir el consumo de datos.

Figura 5

PinOUT de la tarjeta de desarrollo ESP32 S2 MINI



Nota: Imagen tomada de <https://uelectronics.com/producto/esp32-s2-mini-tarjeta-de-desarrollo-4mb-flash/>

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

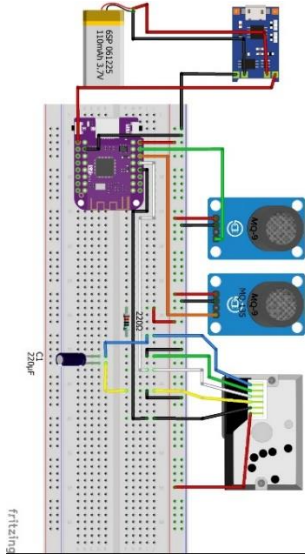
Para la integración del dispositivo, realizamos el diagrama esquemático del circuito, para tener una relación de como conectar los diversos componentes electrónicos para el posterior diseño del PCB. Para hacer este esquema utilizamos el software Fritzing, el cual nos permite tener un prototipado rápido para realizar las conexiones y las pruebas de funcionamiento antes de soldarlos en el PCB.

Se utilizó una batería diferente a la que se marca en la Figura 6, debido a que no se encontró en los repositorios del software el modelo con el que está operando el dispositivo, la imagen presenta una pila LiPo de 3.7 volts a 110mAh, que no nos daría la autonomía deseada, por lo tanto, estamos operando con el mismo tipo de batería, pero a 2500 mAh, este incremento sustancial nos permite llegar a oscilar entre 8 y 12 horas de autonomía que marca la bibliografía.

Las pruebas realizadas nos dan una media de 10.2 horas de funcionamiento continuo del dispositivo, para llegar a este valor se realizaron 20 ejercicios de carga completa y descarga en el dispositivo en funcionamiento, en dichas corridas se estuvieron tomando datos, en diversas posiciones geográficas por lo cual nos dio un parámetro de mediciones del dispositivo en entornos reales.

Figura 6

Diseño en Fritzing de los componentes electrónicos de la solución



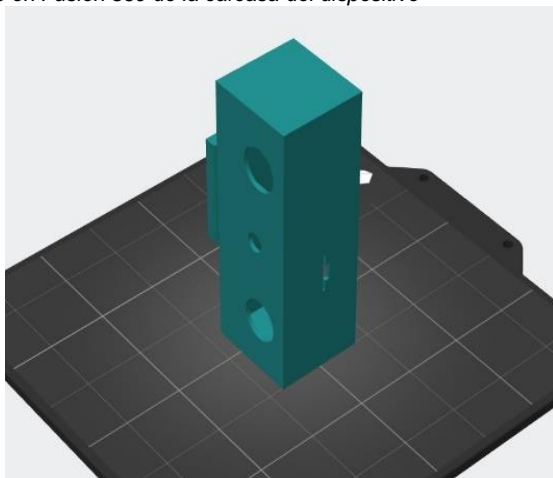
Nota: Fuente elaboración propia

Una vez que se tienen los componentes que integrarán al sistema procedimos al diseño de la carcasa, la cual está pensada para que pueda ser instalada en el limpiabrisas de los automóviles, el brazo de estos por lo regular tiene medidas estándar, por lo que el diseño parte de este supuesto.

Para el diseño utilizamos el software Fusión 360, el cual cuenta con una licencia para profesores y estudiantes que permite hacer uso de todas sus características de forma gratuita, este es un producto de Autodesk y nos permite trabajar CAD, CAM y CAE. Buscamos tener un diseño que permitiera que los sensores estuvieran ubicados de forma que trabajaran de la mejor manera, como puede verse en la Figura 7, se dejan espacios para la entrada de aire del sensor Sharp, y las dos rejillas de los sensores MQ-135 y MQ-9.

Figura 7

Diseño en Fusión 360 de la carcasa del dispositivo

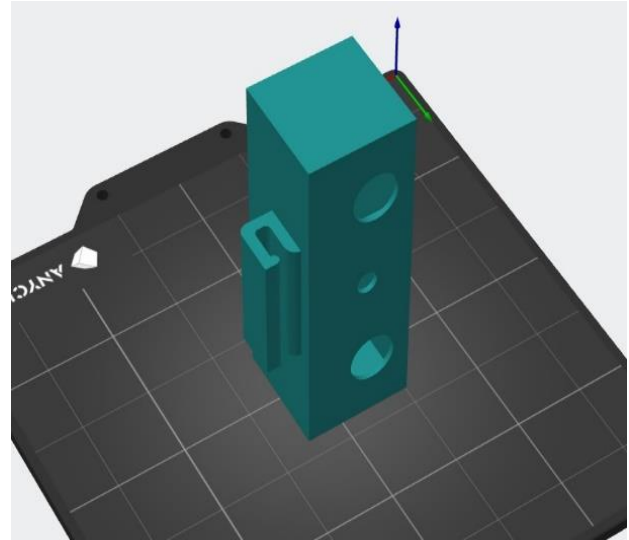


Nota: Fuente elaboración propia

En las Figuras 8 y 9 podrá observarse desde diferentes ángulos el diseño de la carcasa y en la Figura 10, la tapa de la misma.

Figura 8

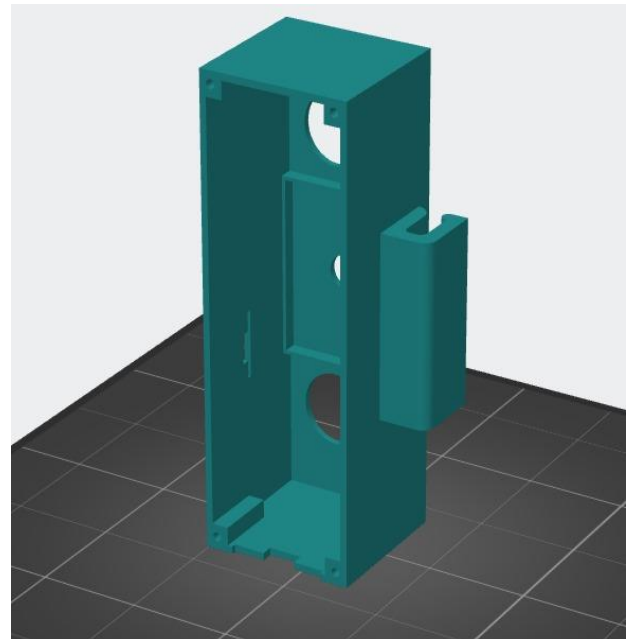
Vista Superior de la Carcasa



Nota: Elaboración Propia

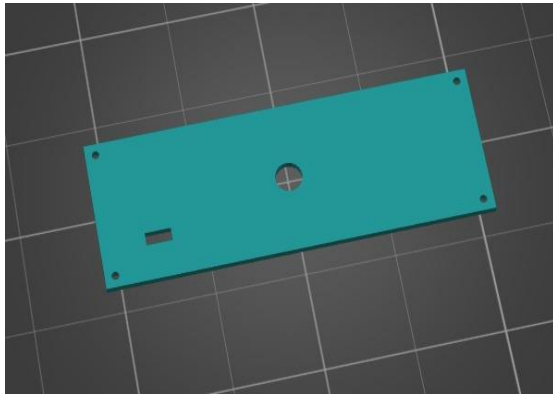
Figura 9

Vista Interior de la Carcasa



Nota: Elaboración Propia

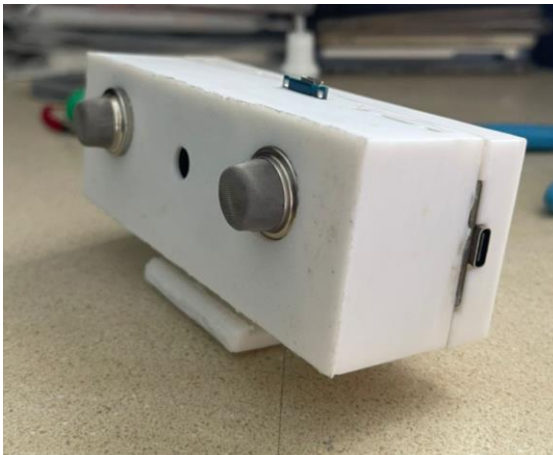
Figura 10
Diseño de la tapa de la carcasa



Nota: Elaboración propia

La impresión la realizamos con filamento PETG, que nos brinda mejores prestaciones mecánicas que el PLA, debido a la naturaleza de la aplicación del prototipo era necesario tener un material que soportara mayor esfuerzo y fuera más resistente a la intemperie, al agua y a los cambios de temperatura. En la Figura 11, podemos observar cómo quedó impreso y armado el dispositivo, el cual soporta la colocación en un vehículo bajo el movimiento propio del trabajo del limpiabrisas.

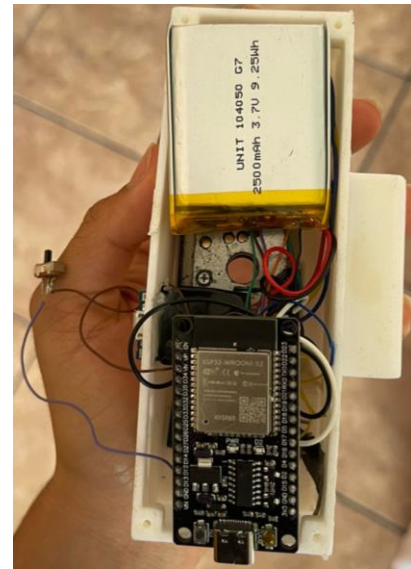
Figura 11
Prototipo terminado



Nota: Fuente elaboración propia

El dispositivo tiene acceso a la tarjeta de desarrollo ESP32 S2 Mini, para poder realizar algún ajuste al código, cambiar algún parámetro o para poder tener lectura de los datos por monitor serial, lo cual nos fue de gran ayuda para poder estar comparando las lecturas de nuestro dispositivo con las mediciones de una estación meteorológica que está ubicada en la Institución. Además, tiene otra entrada la cual es de tipo USB micro, para alimentar el modulo de carga de la batería, haciendo posible que esta pueda ser cargada con un cable y eliminador de celular con dicha entrada lo que facilitará el uso del dispositivo por cualquier usuario, además de un micro switch para el encendido y apagado del dispositivo, lo anterior podemos verlo en la Figura 12.

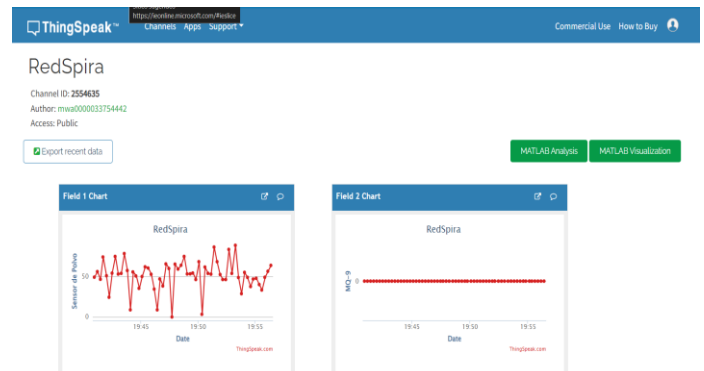
Figura 11
Interior del prototipo



Nota: Fuente elaboración propia

Los datos generados por el sensor son enviados a través de la conexión Wifi a una plataforma en la nube, ThingSpeak nos permite almacenar los datos enviados por nuestro dispositivo y nos da la posibilidad de graficar la información, exportarla como un archivo csv o de realizar visualización y análisis a través de MatLab.

Figura 13 *Interface de ThingSpeak para la visualización de datos del prototipo*



V. CONCLUSIONES

El poder recabar datos de la calidad del aire es una necesidad hoy en día, el gran incremento del parque vehicular, el cambio climático, los gases de efecto invernadero están afectando la calidad de vida de las personas y estamos dañando los ecosistemas hasta un punto de no retorno.

El uso de este dispositivo nos permitirá ir generando un banco de información que permita, en su posterior análisis, generar conocimiento que apoye a la toma de decisiones y al planteamiento de políticas públicas que incidan en mejorar la

calidad del aire, pues esto permitirá no solo contribuir con la mitigación del cambio climático sino tener una mejor calidad de vida al incidir en la disminución de enfermedades respiratorias.

El dispositivo está operando y sigue recabando información, como puede verse en las Figuras 14 y 15, se realizaron sellos de silicón para evitar que líquidos se filtren en la carcasa y se está trabajando en diseñar e imprimir tapones de TPU, para que se tenga una mejor presentación.

Como trabajo futuro se pretende incluir a través de una aplicación la ubicación GPS para poder correlacionar las rutas que siguen los vehículos que cuentan con el dispositivo y generar mapas de zonas con mayor contaminación y los horarios en los que esta se presenta.

El manejo de todos los datos recabados, pretendemos que sean analizados través de Deep Learning, es otra de las tareas que tenemos a futuro y en la cual ya se trabaja en el Cuerpo Académico al que pertenecemos, bajo la línea de Instrumentación y Control.

De las pruebas realizadas tenemos que los datos leídos con los sensores son correctos al compararlos con los de la estación de medición de la calidad del aire que tenemos en la institución, dado lo anterior, el dispositivo ha estado recabando datos en la ciudad de morelia, mostrando que ciertas zonas de la ciudad se encuentran altamente contaminadas, las regiones cercanas a la industria papelera, a la ciudad industrial y al centro de la entidad son las que manejan altos niveles de partículas, tomando la fórmula para el cálculo de los valores IMECA:

$$IMECA = \left(\frac{C_i - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \right) \times (IMECA_{max} - IMECA_{min}) + IMECA_{min} \quad (1)$$

la concentración de PM10 medida es de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los límites para PM10 son los siguientes:

- 0-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Buena calidad, IMECA 0-50)
- 51-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Regular, IMECA 51-100)
- 101-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mala, IMECA 101-150)
- 151-200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Muy mala, IMECA 151-200)
- 201-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Extremadamente mala, IMECA 201-300)

Para una concentración promedio medida de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aplicando la formula obtuvimos un valor de 101, entrando en la categoría de la mala calidad del aire, en otras zonas de la ciudad donde se estuvo midiendo obtuvimos valores de 76 a 90, teniendo una regular calidad del aire.

Dados los datos anteriores, podemos concluir que el dispositivo funciona de acuerdo a lo previsto y nos da la pauta para manufacturar otros dispositivos que nos permitan alcanzar el propósito futuro de análisis de la información para tener un banco de datos que nos arroje conocimiento y con este tener la posibilidad de tomar decisiones informadas sobre acciones para mejorar la calidad del aire en las ciudades contaminadas.

Figura 14
Prototipo instalado y en operación



Nota: Fuente elaboración propia

Figura 15
Prototipo fijo en limpiabrisas



Nota: Fuente elaboración propia



VI. AGRADECIMIENTOS

Del presente trabajo se agradece a los estudiantes del Club de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico CIIDTE del TecNM Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, por su colaboración y aporte al presente trabajo, así como al Cuerpo Académico ITSPA-CA3, al que pertenecemos los autores del mismo.

VI. REFERENCIAS

- Durán Caro, S., Aldana Montero, E. Y., Altamar Consuegra, A. del S., & Santos Montero, A. (2021). EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SENSOR DE BAJO COSTO PARA MEDIR LA CALIDAD DEL AIRE. *Encuentro Internacional De Educación En Ingeniería*.
<https://doi.org/10.26507/ponencia.1999>
- Hofman, J., Nikolaou, M. E., Do, T. H., Qin, X., Rodrigo, E., Philips, W., ... & La Manna, V. P. (2020, October). Mapping air quality in IoT cities: Cloud calibration and air quality inference of sensor data. In *2020 IEEE SENSORS* (pp. 1-4). IEEE.
- Salas-Rodríguez, D. (2023). Modelo complejo para la evaluación de la gestión de la calidad del aire en cinco ciudades del estado de Guanajuato, México. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 39, 267–284.
- Lancheros-Cuesta, D., Galvis, B., & Pachón, J. (2017). Dispositivo electrónico portable para la medición de la contaminación del aire. *Ingenio Magno*, 8(1), 8-18. Recuperado a partir de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1386>
- Bernard, S. M., & Samet, J. M. (2011). Air pollution and public health: a guidance document for risk managers. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1694-1699.
<https://doi.org/10.1289/ehp.11858>
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.
<https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Kumar, P., & Morawska, L. (2019). The effects of indoor air pollution on human health and productivity. *Atmospheric Environment*, 201, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.015>
- Dutta, T., & Pal, S. (2017). Real-time air quality monitoring through the Internet of Things using Big Data analytic techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6), 284.
<https://doi.org/10.1007/s10661-017-5994-2>
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., & Pope, C. A. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378.
<https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8bece1>
- Landrigan, P. J., & Fuller, R. (2019). The impact of pollution on global burden of disease. *Lancet Planetary Health*, 3(12), e452-e462.
[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30185-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30185-9)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012. Que establece los métodos de medición de la calidad del aire y los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente. <https://www.dof.gob.mx>

International Organization for Standardization (ISO). (2016). ISO 4225:2016. Air quality — General aspects — Vocabulary.
<https://www.iso.org/standard/68498.html>

International Organization for Standardization (ISO). (2019). ISO 16000-1:2019. Indoor air — Part 1: General aspects of sampling strategy.
<https://www.iso.org/standard/73284.html>

VII. AUTORES

Mario Salvador Castro Zenil

 <https://orcid.org/0000-0001-6880-1072>

Alma Alvarado López

 <https://orcid.org/0000-0002-2995-6749>

Guillermo Rey Peñalosa Mendoza

 <https://orcid.org/0000-0003-2795-670X>