



DISEÑO Y EJECUCIÓN DE UN SENSOR PARA MEDIR LA CALIDAD DEL AIRE EN AMBIENTES LABORALES

Design and execution of a sensor to measure air quality in work environments

ANGÉLICA NOHEMY RANGEL PICO, ERIKA PATRICIA RAMÍREZ OLIVEROS, ÓSCAR JAVIER ZAMBRANO
VALDIVIESO
Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

KEYWORDS

Sensor
Air quality
Security
Health at work
Prototype
Industry 4.0
Solid waste

ABSTRACT

For solid waste collection companies, it is essential to control the risk factors associated with the air quality of the work environment of their employees in order to minimize the health conditions of their workers. The purpose of the study is to develop a prototype of a wireless sensor for measuring air quality. This measurement instrument will be implemented in work environments for solid waste collection workers. From the study it is concluded that for companies in this sector it is essential to control risk factors associated with exposure to gases and vapors.

PALABRAS CLAVE

Sensor
Calidad de aire
Seguridad
Salud en el trabajo
Prototipo
Industria 4.0
Residuos sólidos

RESUMEN

Para las empresas recolectoras de residuos sólidos es indispensable controlar los factores de riesgos asociados a la calidad del aire del entorno laboral de sus empleados con el objetivo de minimizar las afecciones de salud de sus trabajadores. El propósito del estudio es desarrollar un prototipo de un sensor inalámbrico de medición de calidad de aire. Este instrumento de medición será implementado en ambientes laborales para trabajadores de recolección de residuos sólidos. A partir del estudio se concluye que para empresas de este sector es indispensable el control de factores de riesgos asociados a la exposición a gases y vapores.

Recibido: 11/ 12 / 2022

Aceptado: 19/ 02 / 2023

1. Introducción

Actualmente y gracias a los desarrollos tecnológicos las personas a nivel mundial han tenido un acceso considerable a bienes y servicios. En ese sentido, Ayala y González (2001) manifiestan que el crecimiento acelerado de la población en los últimos años, así como el proceso de industrialización han aumentado la generación de residuos.

Hoy en Colombia, según Ramírez y Rangel (2015) el modelo de recolección de residuos se hace puerta a puerta. Para tal fin se utilizan vehículos compactadores, los trabajadores recogen manualmente las bolsas dispuestas en los contenedores y cuartos de residuos. En el proceso de recolección y disposición final de los residuos se generan gases que podrían generar efectos sobre la salud de los trabajadores. Estos gases deberían medirse en tiempo real, según Ramírez, Rangel y Flórez (2019) a partir de esta medición se podría establecer una línea base en referencia a los valores de concentración de sustancias químicas. A partir de lo anterior se implementarían estrategias de prevención y protección.

López (2021, como se citó en Thakur, 2018) afirma la recolección de basuras figura entre las diez ocupaciones más peligrosas a nivel mundial. Esto se debe principalmente a las condiciones precarias a las que están expuestos los trabajadores. Ya que durante su tiempo de trabajo se exponen a adquirir diversas enfermedades y contaminantes producto de la relación e intervención directa a con los residuos sólidos y los resultantes de estos como, mosquitos, moscas, roedores, cucarachas entre otros, transmisores de enfermedades y microorganismos infecciosos (López *et al.*, 2021, p. 2).

Se han realizado diferentes investigaciones con fin de reducir el índice de accidentabilidad y enfermedades laborales; como se puede evidenciar en la investigación realizada por Ana Sánchez (2016) en el cual se analizaron dos aspectos fundamentales para tener en cuenta a la hora de realizar el plan de prevención de riesgos laborales, se analizó los factores de riesgos a los que se encuentran expuestos los trabajadores y la prevención y acciones que la empresa desarrollaba para minimizar los accidentes y enfermedades por causa del trabajo (p. 801).

Se tomaron en cuenta diferentes empresas de Andalucía España relacionadas con la recolección de los residuos sólidos para realizar este estudio en las cuales se aplicaron los dos factores bases para medir estadísticamente como actuaban las empresas a la hora de prevenir o incurrir en un accidente de trabajo o enfermedad laboral. Sánchez (2016) como resultado de la investigación afirma que:

Se puede establecer relación directa entre los puestos de mando de la empresa y la preocupación por los riesgos laborales. A mayor distancia a puestos de dirección mayor es la preocupación de los empleados respecto a los riesgos laborales a los que están expuestos. En cuanto a los riesgos psicosociales se identifica que las mujeres se ven más afectadas que los hombres (p.798).

En 2017 Juan Ramos y Wilfredo Baldeón plantean el estudio de los riesgos a los que están expuestos los trabajadores en la industria de los residuos sólidos y el reciclaje del plástico, incluyendo también la higiene en salud pública que se maneja en los procesos que se realizan desde principio a fin en esta industria, con el fin de evaluar los diferentes riesgos que allí se presentan para tomar medidas de corrección y prevención en los diferentes puestos de trabajo, realizando modificaciones en diferentes sectores del entorno laboral. (p.65-70).

Por otro lado, Lucia Salazar y Oswaldo Pérez (2018) realizaron una investigación para plantear un programa de vigilancia para los trabajadores de una empresa de residuos sólidos con el fin de prevenir enfermedades y accidentes relacionados con el trabajo, teniendo en cuenta el entorno laboral y conocimiento de los trabajadores en cuanto al ámbito de riesgos laborales, se establecieron aspectos como la salud ocupacional y el entorno ambiental para establecer las condiciones laborales (p.226-232).

Los investigadores Salazar y Pérez (2018) concluyeron: los trabajadores de empresas gestoras de residuos sólidos están constantemente expuestos a factores de riesgos para su salud, debido a la posibilidad de contaminación y contagio por distintos agentes mediante el contacto directo que tienen con la basura o residuos que pueden quedar con agentes virales contaminantes, después de su uso o con la recolección de los residuos que desarrollan durante las jornadas laborales, que pueda incurrir para adquirir enfermedades (p.236).

Si bien es cierto una diversidad de contaminantes atmosféricos se encuentran bien documentados y monitoreados debido a las medidas de calidad del aire existentes en varias partes del mundo; Sin embargo, la información sobre la calidad del aire para un sector específico sigue siendo limitada. Es evidente entonces que no hay suficientes medidas de seguridad para trabajadores expuestos a entornos donde el material particulado y las concentraciones de gases son altas.

Considerando lo mencionado anteriormente la recolección de residuos sólidos comprende un alto riesgo biológico y físico para los trabajadores. Respecto a la calidad del aire en el ambiente laboral, representa una importante carga de salud para los trabajadores y es una preocupación que concierne a los empleadores, puesto que, la contaminación del aire está asociada con una variedad de síntomas y enfermedades que afectan la salud y la calidad de vida.

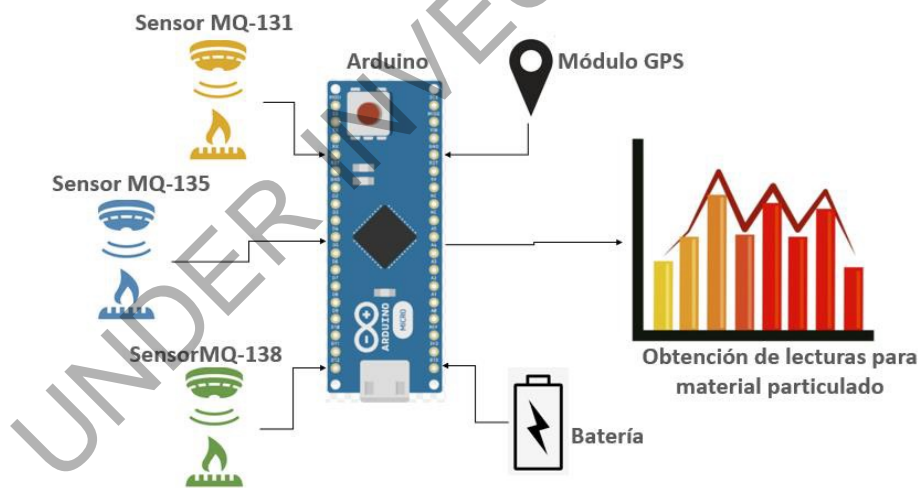
En tal sentido es evidente que muchos de los riesgos que pueden llegar a afectar la salud de los trabajadores están asociados a la calidad del aire y no pueden ser controlados solo con el uso de los protectores faciales y respiradores.

Resulta oportuno dar una mirada a los beneficios de la Industrialización 4.0, donde la tendencia a la automatización y el intercambio de los datos en las tecnologías de fabricación permiten la optimización de los procesos de producción y es allí donde sería de gran ayuda el diseño de un prototipo de sensor que pueda detectar los altos niveles de contaminación ambiental a los que están expuestos los trabajadores recolectores de residuos sólidos, y que en la fase de implementación aportaría en gran medida a que los empleadores dedicados a ésta actividad lleven más control de los factores ambientales que influyen en la salud de sus trabajadores.

Si bien es cierto una diversidad de contaminantes atmosféricos se encuentran bien documentados y monitoreados debido a las medidas de calidad del aire existentes en varias partes del mundo; Sin embargo, la información sobre la calidad del aire para un sector específico sigue siendo limitada. Es evidente entonces que no hay suficientes medidas de seguridad para trabajadores expuestos a entornos donde el material particulado y las concentraciones de gases son altas.

Por ello el desarrollo de la investigación desde el planteamiento del diseño y ejecución de un sensor para medir la calidad de aire en ambientes laborales, se basa en la tecnología Arduino es una tarjeta donde se pueden realizar prototipos o proyectos interactivos. Funciona con un microcontrolador Atmel. Arduino cuenta con su propio IDE (*software*) para llevar a cabo la respectiva programación de los sensores y puesta en marcha de estos (Monsalve, 2020, p. 16). En la siguiente imagen se presenta la arquitectura del diseño del prototipo.

Figura 1. Arquitectura general del desarrollo del prototipo



Fuente, Elaboración propia

Figura 2. Software de Programación (IDE)



Fuente, Elaboración propia

2. Materiales Y Métodos

Se llevo a cabo una revisión de referentes conceptuales y científicos, a través de un prototipo Se llevó a cabo una búsqueda de literatura científica, empleando bases de datos tales como SCOPUS, JSTOR, Web of Science, PubMed, EBSCO, Science Direct, Google académico, entre otros, esta realización de búsqueda avanzada se precisó con criterios bibliométricos y vigilancia considerando los siguientes parámetros:

1. Criterios de idiomas, español e inglés,
2. Tipos de estudios de investigación centrándose en artículos, capítulos cualitativos, mixtos y cuantitativos, con diseño transversal, longitudinal y de correlación,
3. Objetivo de la investigación donde se seleccionaron ítems tales como seguridad y salud en el trabajo, calidad de aire, condiciones laborales, recolección de residuos sólidos, sensor, prototipo, occupational health and safety, air quality, working conditions, solid waste collection, sensor, prototype, estudios e investigaciones publicadas durante los años 2015 y 2022.

En la búsqueda de los referentes, se puede determinar que estos estudios se relacionan con recolección de residuos, entendido los residuos de tipos doméstico que se generan por las casas, apartamentos, siendo esta labor desarrollada mayormente por individuos masculinos, por ser considerado un trabajo que requiere mayor empleo de la fuerza.

Así mismo el objetivo del diseño del prototipo consta integrar una serie de sensores que medirán la calidad del aire y emitirán alertas sonoras y lumínicas al trabajador mediante el análisis de diferentes parámetros preestablecidos, así mismo le servirá al empleador para realizar monitoreo y trazabilidad de las condiciones en las que los trabajadores desarrollan sus actividades permitiendo la toma de decisiones en pro de generar espacios seguros de trabajo.

Dentro de las funciones más destacadas, el dispositivo se encontraba realizar y recibir llamadas, ser utilizado de manera ergonómica, como mando para controlar las comunicaciones entre el dispositivo y la central de monitoreo de la organización.

Monitorizar las actividades de los trabajadores es muy importante como apoyo para obtener información valiosa del estado de salud de ellos. El dispositivo podrá utilizarse como herramienta de control para la detección de problemas en el trabajo y en el descanso ya que medirá la respiración pulsación y palpitación durante el horario laboral. Será un aliado fundamental para el cuidado del estado físico y de salud, pues puede ser utilizado como herramienta para controlar y monitorear la salud de los trabajadores.

3. Diseño del sensor

El prototipado inicia con la etapa de diseño, es decir, las características del sensor en cuanto a dimensiones, materiales y funcionamiento. Se continúa con el proceso de manufactura, que estará seguido de la validación del prototipo a través de una prueba de concepto a fin de evaluar su funcionalidad. El producto esperado es un prototipo de desarrollo tecnológico en etapa TRL 3. Es decir, contará con un desarrollo conceptual y vigilancia tecnológica que a nivel regional será un referente en la aplicación de los sistemas de ingeniería para el mejoramiento de la gestión de riesgos laborales.

El sensor diseñado es un dispositivo móvil multifunción al que, además se le pueden incluir diversos accesorios y sensores complementarios dependiendo las necesidades y el uso. Así mismo, contempla la inclusión de varios sensores digitales precalibrados, por ello para el desarrollo del diseño se analizaron parámetros de ergonomía y se determinaron los siguientes elementos básicos que componen el dispositivo entre los que se encuentran;

- Antena recibe las señales eléctricas de la red celular y las envía al módem para transformarlas en voz y datos:
- Auricular: Altavoz Transductor que recibe una señal electrónica originada desde una fuente electrónica que por su diseño permite la función de altavoz para generar intercomunicación a través de ondas sonoras audibles.
- Batería: almacena energía eléctrica que alimenta los circuitos del Dispositivo la cual es de iones de litio,
- Botones: Desarrollan las funciones de encendido, apagado, contestar y finalizar llamadas y alertas emitidas por el dispositivo y la intercomunicación desde la central de monitoreo de la empresa,
- Conexiones: Zona donde se conectan los buses de datos de elementos del dispositivo para ser controlados por la placa base y el procesador:
 - Giroscopio y acelerómetro: Estos sensores detectan el movimiento en los tres ejes, así como la magnitud de ese movimiento
 - Micrófono: funciona como un transductor o sensor electroacústico y convierte el sonido (ondas sonoras) en una señal eléctrica para aumentar su intensidad, transmitirla y registrarla,
 - Módem: Establece la comunicación con la red celular, es la parte que hace el trabajo como teléfono entre el dispositivo y la central de monitoreo de la empresa. También es responsable de la conexión de datos,

- Podómetro: Función básica para medir los pasos que el usuario da, bien a lo largo del día, bien en una franja determinada de tiempo. se utilizan mucho como ayuda y control para el cuidado de la salud y el estado de forma del trabajador;
- Procesador y RAM: Conocido como el cerebro del sistema, es un microchip similar al de los ordenadores. La memoria RAM almacena los datos e información valiosa para el desempeño del dispositivo,
- SIM: tarjeta inteligente desmontable usada como módem HSPA o LTE cuyo funcionamiento consiste en almacenar de forma segura la clave de servicio del suscriptor usada para identificarse e intercomunicarse en la red,
- Temporizador: función que permite asignación de tareas en un tiempo preestablecido.
- Los sensores: son los que obtienen datos del medio ambiente y transforman la información a medios de señales eléctricas, para el prototipo se establecieron las siguientes opciones de sensores a instalar: Sensor de Humedad y Temperatura DTH1, Sensor Dióxido de Carbono CO2 (MG-811), Sensor de Ozono MQ131, Sensor de Metano MQ-4.

Software, Interfaz gráfica: Para la interfaz gráfica se puede utilizar el software Visual Studio, con el que se consigue programar en lenguaje c#, Arduino La plataforma de Arduino se puede utilizar para programar ciertos controladores ayudando a la realización de proyectos de código abierto, está enfocada a un hardware y software que facilita su uso. El funcionamiento de la placa de Arduino permite leer las entradas adquiridas de elementos como luz, temperatura, humedad, gases del ambiente y convertirlo en una señal de salida.

Detector de ozono (o₃) sensor mq-131

El límite recomendado en las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire, de 2015, se redujo del nivel de 120 µg/m³ establecido en ediciones precedentes de esas Directrices¹ y 2, a raíz de pruebas concluyentes sobre la relación entre la mortalidad diaria y concentraciones de ozono inferiores.

Valores fijados en las Directrices: O₃ 100 µg/m³ de media en 8h

Sensor de gas MQ131: tiene alta sensibilidad al ozono (O₃), también es sensible a CL₂ (dióxido de cloro), NO₂ (dióxido de nitrógeno). El cual cuenta con algunas características tales como Sensibilidad del ozono, contiene detectores de sobrecarga doméstica de concentración de ozono, industrial y portátil (Electronics, 2022, pr. 2).

Figura 3. Sensor MQ-131



Fuente. Elaboración propia

Definición y fuentes principales:

El ozono a nivel del suelo que no debe confundirse con la capa de ozono en la atmósfera superior es uno de los principales componentes de la niebla tóxica. Éste se forma por la reacción con la luz solar (fotoquímica) de contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x) procedentes de las emisiones de vehículos o la industria y los compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por los vehículos, los disolventes y la industria. Los niveles de ozono más elevados se registran durante los períodos de tiempo soleado.

Según la Organización Mundial de la salud (2022) frente a los efectos sobre la salud por el exceso de ozono en el aire puede producir efectos adversos de consideración en la salud humana. Puede causar problemas respiratorios, provocar asma, reducir la función pulmonar y originar enfermedades pulmonares. (p1) estimando

Según estudios de la OMS en el año 2019, determinó que la contaminación del aire, de tipo exterior, en las ciudades han provocado 4,2 millones de muertes prematuras cada año, producto a exposición a materia particulada fina, que causa enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cánceres.

Por ello la normativa emitida por la OMS recomienda una concentración máxima de ozono en aire, para el público en general, de 0,05 ppm (0,1 mg/m³).

Los Valores Límite Ambientales (VLA) (año 2018), establecen para el ozono límites de exposición en función de la actividad realizada, siendo el valor más restrictivo 0,05 ppm (exposiciones de 8 horas) y 0,2 ppm para periodos inferiores a 2 horas. La EPA establece un estándar de 0,12 ppm para 1 hora de exposición y la OMS propone un valor de referencia de 100 µg/m³ ó 0,06 ppm para un periodo máximo de 8 horas

112°C Sólido -192°C Equivalencia 1 ppm = 2 mg/m³

Figura 4. Guía de calidad de aire de OMS

Guía de calidad del aire de la OMS y objetivo intermedio para el ozono: concentraciones de ocho horas

	Media máxima diaria de ocho horas (µg/m ³)	Fundamento del nivel elegido
Niveles altos	240	Efectos significativos en la salud; proporción sustancial de la población vulnerable afectada.
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	160	Efectos importantes en la salud; no proporciona una protección adecuada de la salud pública. La exposición a este nivel está asociada con: <ul style="list-style-type: none"> • efectos fisiológicos e inflamatorios en los pulmones de adultos jóvenes sanos que hacen ejercicio expuestos durante periodos de 6,6 horas; • efectos en la salud de los niños (basados en diversos estudios de campamentos de verano en los que los niños estuvieron expuestos a niveles ambientales de ozono); • aumento estimado de un 3-5% de la mortalidad diaria* (basado en los resultados de estudios de series cronológicas diarias).
Guía de calidad del aire (GCA)	100	Proporciona una protección adecuada de la salud pública, aunque pueden producirse algunos efectos en la salud por debajo de este nivel. La exposición a este nivel de ozono está asociada con: <ul style="list-style-type: none"> • un aumento estimado de un 1-2% de la mortalidad diaria* (basado en los resultados de estudios de series cronológicas diarias); • la extrapolación a partir de estudios de laboratorio y de campo, basada en la probabilidad de que la exposición en la vida real tienda a ser repetitiva y en que se excluyen de los estudios de laboratorio las personas muy sensibles o con problemas clínicos, así como los niños; • la probabilidad de que el ozono ambiental sea un marcador para los oxidantes relacionados con él.

Fuente. Elaboración propia

Etapa 1. Diseño del prototipo

Se da inicio en la puesta en marcha en cada uno de los sensores seleccionados teniendo en cuenta su caracterización y su calibración. El prototipado inicia con la etapa de diseño, es decir, las características del sensor en cuanto a dimensiones, materiales y funcionamiento.

Para ello en esta etapa Inicio y puesta en marcha de cada uno de los sensores seleccionados y su caracterización, estos fueron calibrado otorgando 12 horas por cada uno de los siguientes sensores seleccionados para el prototipo, MQ131 Ozono, MQ135 Semiconductor Sensor, MQ138 VOC Gas Sensor. En segunda instancia se avanzó con la fusión de sensores a un 90%, la programación de cada sensor, 90% programación de cada sensor 90%, los cálculos de requerimiento de energía 45% Caracterización de la red de sensores 45% Programación del módulo de comunicación GPS.

Etapa 2. Diseño del prototipo

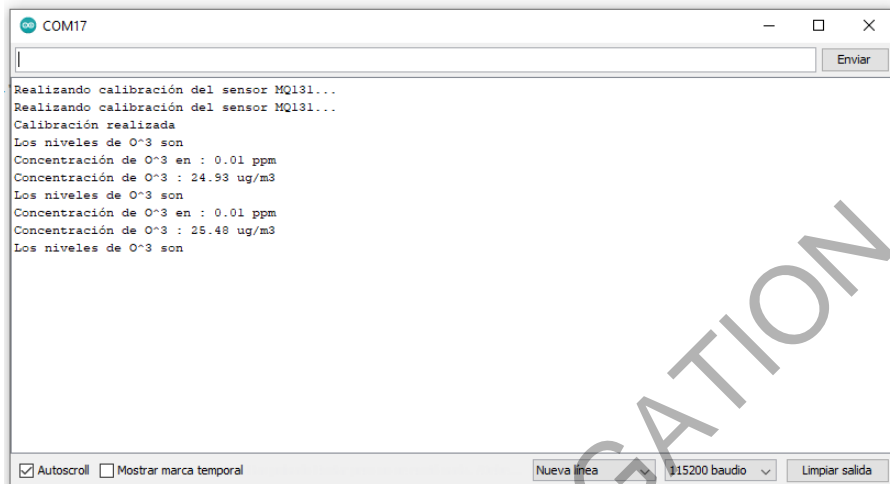
Se continúa con el proceso de manufactura

Etapa 3. Validación del prototipo

Validación del prototipo a través de una prueba de concepto a fin de evaluar su funcionalidad se realizaron pruebas de laboratorio que a continuación se describen:

Aire normal de ozono valor análogo: 100-150 lectura (0.01ppm y 20ug/m³ - 29ug/m³)

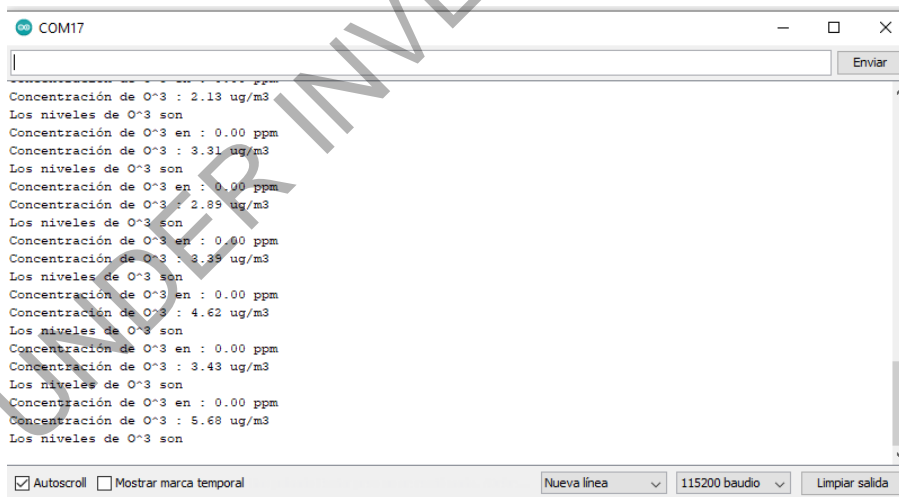
Figura 5. Niveles de ozono



Fuente. Elaboración propia

Presencia de alcohol hasta valores análogos de 700 lectura (0.00ppm y 1ug/m³-10ug/m³)

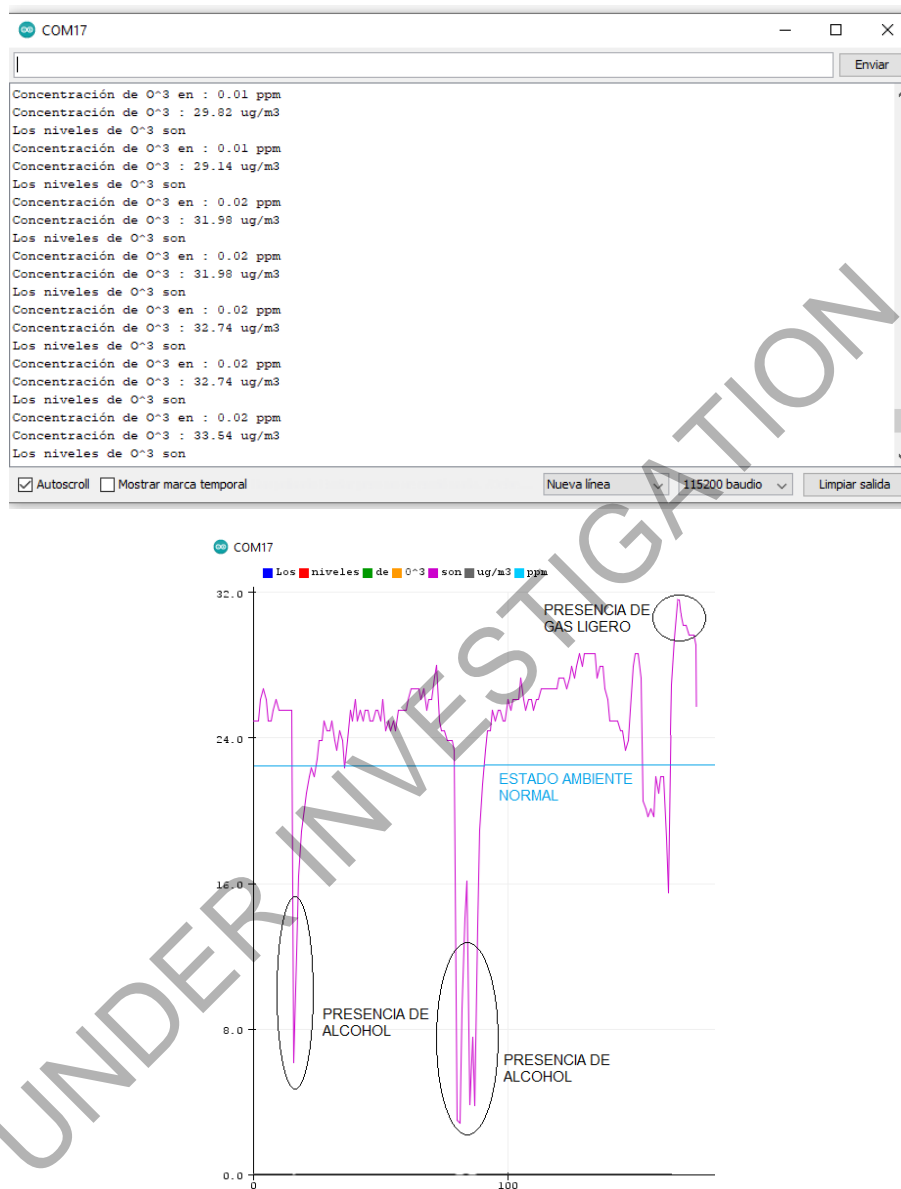
Figura 6. Alcohol industrial⁹



Fuente. Elaboración propia

Gas ligero (metano por putrefacción de materia orgánica) valores análogos superiores de 750 (0.02ppm y 30ug/m³ - 40ug/m³).

Figura 7. Presencia de gas metano por material orgánico



Fuente. Elaboración propia

Figura 8. Gas ligero vs alcohol Gráfica Medición Material Particulado Gas Ligero (Metano Por Putrefacción De Materia Orgánica) Y Presencia De Alcohol

Fuente. Elaboración propia

Medición De Material Particulado Por El Sensor Mq-135

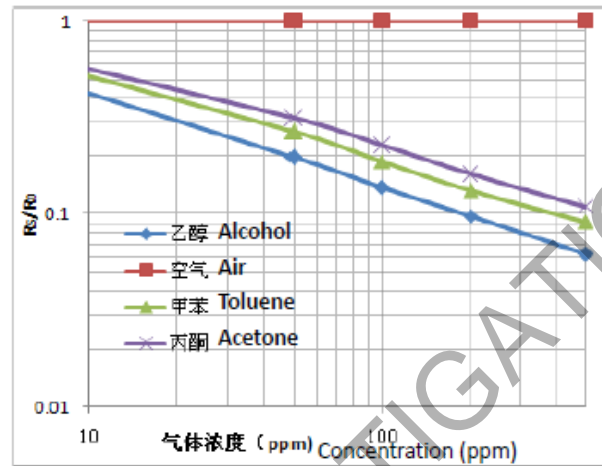
El producto esperado es un prototipo de desarrollo tecnológico en etapa TRL

El Datasheet de cada sensor proporciona unas gráficas que permiten obtener la concentración del gas a partir de la relación entre la resistencia del sensor R_0 y la resistencia medida R_s . También es necesario conocer la resistencia R_l empleada en el módulo para realizar la lectura del sensor MQ.

Con base a la lectura correspondiente del fabricante se debe tener en cuenta la respuesta en ppm con respecto a la variable a medir, para el caso del sensor MQ138 es la siguiente:

Figura 9. Curva de caracterización sensor MQ-138

Description of Sensor Characters



Fuente. Elaboración propia

Las gráficas se disponen en escala logarítmica para ambos ejes y, en general, son aproximadamente rectas bajo estas escalas. Por lo que la concentración resultará,

$$\text{Concentración} = 10^{\{A \cdot \log(Rs/R) + B\}}$$

Para determinar la concentración se necesita conocer la recta que la aproxima, para lo cual se deben elegir dos puntos cuales quiera de las gráficas $P0 = \{X0, Y0\}$ y $P1 = \{X1, Y1\}$, resultando la ecuación de la recta, allí se analiza cual es el gas con el cual se quiere tener mejor aproximación en su lectura

$$Y = A \cdot x + B$$

Caracterización de los sensores 100%

Siendo

$$[one_half] A = \{Y1 - Y0\} / \{X1 - X0\}, [one_half_last] B = Y0 - A \cdot X0$$

Para el sensor MQ138 la calibración de es $X0 = 10$ $Y0 = 0.4$ $X1 = 500$ $Y1 = 0.06$

Código Arduino

Programación de cada sensor 100%

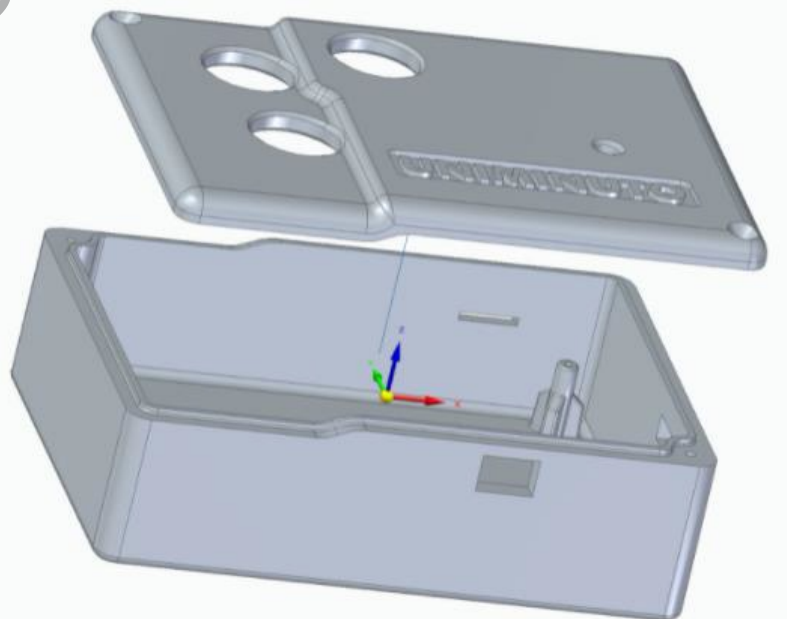
```
const int MQ_PIN = A5; // Pin del sensor
const int RL_VALUE = 5; // Resistencia RL del módulo en Kilo ohms
const int R0 = 10; // Resistencia R0 del sensor en Kilo ohms
// Datos para lectura multiple
const int READ_SAMPLE_INTERVAL = 100; // Tiempo entre muestras
const int READ_SAMPLE_TIMES = 5; // Numero muestras
Calibración de los sensores 100%
// Ajustar estos valores para el sensor según el Datasheet
const float X0 = 10;
const float Y0 = 0.4;
const float X1 = 500;
const float Y1 = 0.06;
// Puntos de la curva de concentración {X, Y}
const float punto0[] = { log10(X0), log10(Y0) };
const float punto1[] = { log10(X1), log10(Y1) };
// Calcular pendiente y coordenada abscisas
const float scope = (punto1[1] - punto0[1]) / (punto1[0] - punto0[0]);
const float coord = punto0[1] - punto0[0] * scope;
int positivo;
int decimal;
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
}
void loop()
```

```
{
float rs_med = readMQ(MQ_PIN); // Obtener la Rs promedio
float concentration = getConcentration(rs_med/R0); // Obtener la concentración
positivo = int(concentration);
decimal = int((positivo - concentration) * 100);
// Mostrar el valor de la concentración por serial
Serial.println("Concentración: ");
Serial.println(positivo);
delay(2000);
}
// Obtener la resistencia promedio en N muestras
float readMQ(int mq_pin)
{
float rs = 0;
for (int i = 0; i < READ_SAMPLE_TIMES; i++) {
rs += getMQResistance(analogRead(mq_pin));
delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
}
return rs / READ_SAMPLE_TIMES;
}
// Obtener resistencia a partir de la lectura analogica
float getMQResistance(int raw_adc)
{
return (((float)RL_VALUE / 50.0 * (1023 - raw_adc) / raw_adc));
}
// Obtener concentracion 10^(coord + scope * log (rs/r0))
float getConcentration(float rs_ro_ratio)
{
return pow(10, coord + scope * log(rs_ro_ratio));
}
```

Etapa 4. Diseño del contenedor y modelado para el dispositivo

Se realiza el diseño y modelado del contenedor del prototipo a través del software solid Edge siemens, en las siguientes figuras se observa el diseño inicial.

Figura 10. Vista frontal



Fuente. Elaboración propia

Figura 11. Tapa del contenedor



Fuente. Elaboración propia

Figura 12. Contenedor del prototipo



Fuente. Elaboración propia

Figura 13. Diseño final con todas las vistas

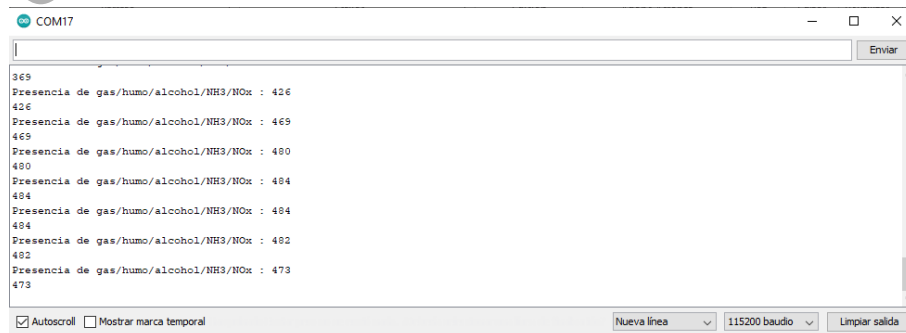


Fuente. Elaboración propia

Etapa 5. Prueba de concepto

Ambiente con concentración entre 0-100ppm

Figura 14. Ambiente con baja concentración

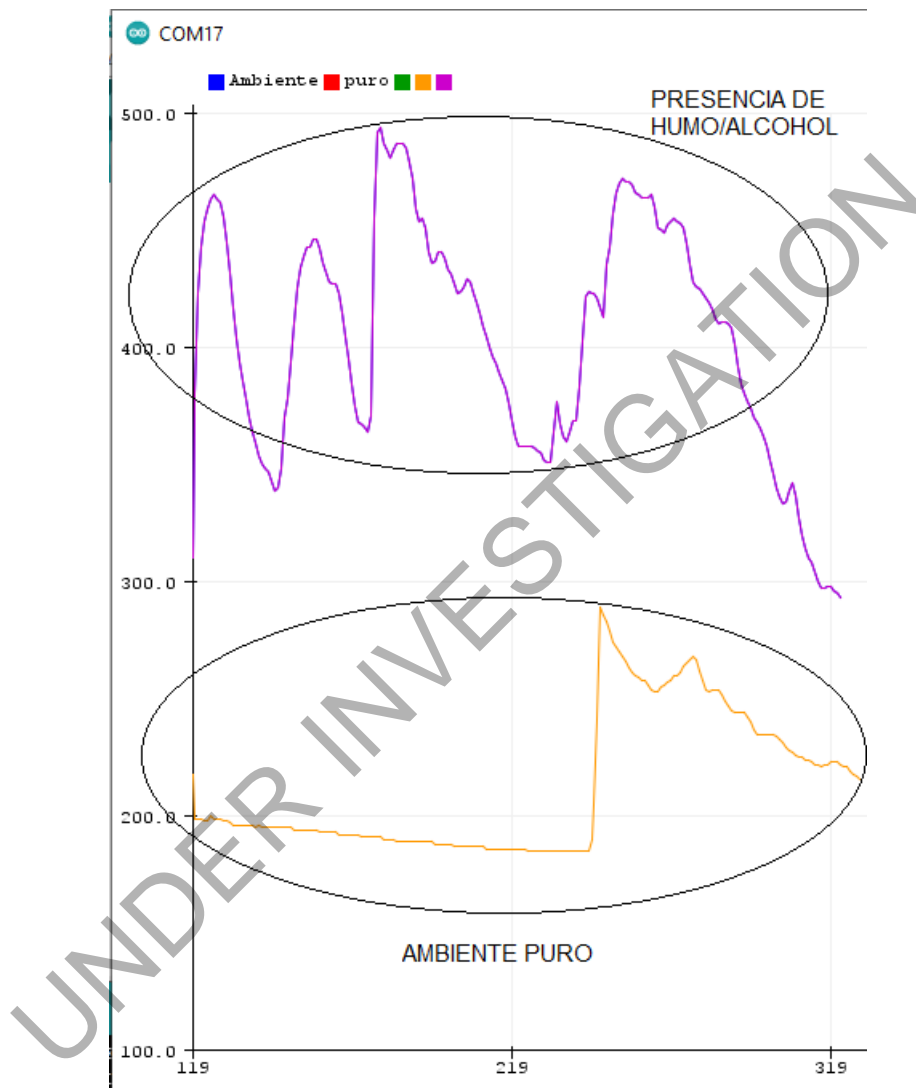


Fuente. Elaboración propia

Ambiente con concentración de gas ligero entre 400-500ppm

Figura 15. Ambiente con presencia de gas ligero metano

Fuente. Elaboración propia



Fuente. Elaboración propia

4. RESULTADOS

Mediante la planeación de actividades y delegación de responsabilidades se dio inicio al desarrollo del prototipo del sensor en diferentes etapas que contemplaron formas, dimensiones, colores, materiales, equipos, elementos y complementos, así como la selección del lugar más adecuado para su utilización, teniendo en cuenta parámetros de ergonomía.

Posteriormente se procedió a realizar a un boceto del diseño al cual se le realizaron ajustes para mejorar aspectos visuales. Finalmente se obtuvo el diseño del prototipo que permitirá medir la calidad del aire en los ambientes laborales de trabajadores recolectores de residuos sólidos.

Se realizaron las pruebas del sistema autónomo para la detección de gas metano producido por material orgánico, de allí se genera un archivo de texto plano en la micro SD donde quedará registrado el valor de ppm y las coordenadas GPS.

PRUEBA 1.

Tiempo(ms)=308825MQ138 de CH4 ppm=350

, Latitud=4.73, Longitud=-74.12

Tiempo(ms)=322480MQ138 de CH4 ppm=347

, Latitud=4.73, Longitud=-74.12

Tiempo(ms)=336077MQ138 de CH4 ppm=346

, Latitud=4.73, Longitud=-74.12

Tiempo(ms)=349792MQ138 de CH4 ppm=331

, Latitud=4.73, Longitud=-74.12
Tiempo(ms)=363447MQ138 de CH4 ppm=332
, Latitud=4.73, Longitud=-74.12
Tiempo(ms)=377044MQ138 de CH4 ppm=329
, Latitud=4.73, Longitud=-74.12
Tiempo(ms)=390694MQ138 de CH4 ppm=324
, Latitud=4.73, Longitud=-74.12
Tiempo(ms)=404232MQ138 de CH4 ppm=334
, Latitud=4.73, Longitud=-74.12
Tiempo(ms)=417867MQ138 de CH4 ppm=369
, Latitud=4.73, Longitud=-74.12
Tiempo(ms)=431521MQ138 de CH4 ppm=364
, Latitud=4.73, Longitud=-74.12
Tiempo(ms)=445151MQ138 de CH4 ppm=358
, Latitud=4.73, Longitud=-74.12

Figura 17. Coordenadas obtenidas por el prototipo (visualización de coordenadas Google).

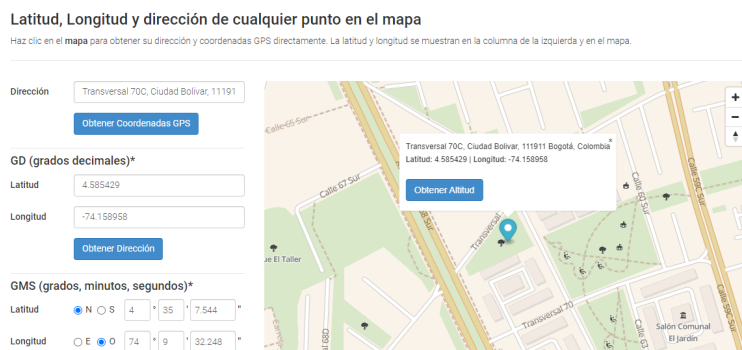


Fuente. Elaboración propia

PRUEBA 2.

Tiempo(ms)=120448MQ138 de CH4 ppm=159
, Latitud=4.585810, Longitud=-74.159042
Tiempo(ms)=168416MQ138 de CH4 ppm=175
, Latitud=4.585639, Longitud=-74.159088
Tiempo(ms)=199170MQ138 de CH4 ppm=147
, Latitud=4.585429, Longitud=-74.158958

Figura 17. Coordenadas obtenidas por el prototipo (visualización de coordenadas Google).



Fuente. Elaboración propia

4.1. Sin presencia de gas metano:

Cuando el sistema no detecta presencia de ningún GAS (en este caso gas metano producido por gas natural) informa que se encuentra en un “ambiente neutro” y da el resultado del valor obtenido por cada uno de los sensores en ppm.

Figura 18. Lectura en ambiente neutro con cada uno de los sensores (MQ131-MQ135-MQ138)

```

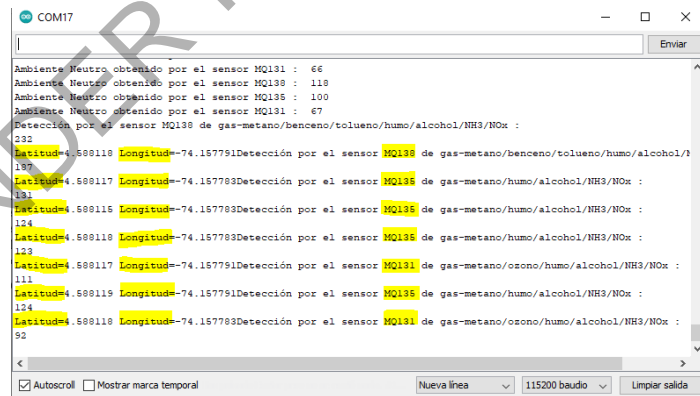
por el sensor MQ135 : 97
por el sensor MQ131 : 64
ambiente neutro obtenido por el sensor MQ138 : 114
por el sensor MQ135 : 97
por el sensor MQ131 : 63
por el sensor MQ138 : 119
por el sensor MQ135 : 98
por el sensor MQ131 : 65
por el sensor MQ138 : 117
por el sensor MQ135 : 100
por el sensor MQ131 : 67
por el sensor MQ138 : 116
por el sensor MQ135 : 100
por el sensor MQ131 : 64
    
```

Fuente. Elaboración propia

En el caso de detectar gas metano por alguno de los sensores arrojará la coordenada y el valor del sensor que lo detecto, para este caso el sensor más sensible al gas metano es el sensor MQ138 el cual se pone como última condición, en caso tal de que ninguno de los otros sensores (MQ131-MQ138) haya detectado gas metano, es por eso que el sistema contara con tres filtros de medición para el GAS, en caso de que alguno presente alguna anomalía:

Con presencia de gas metano

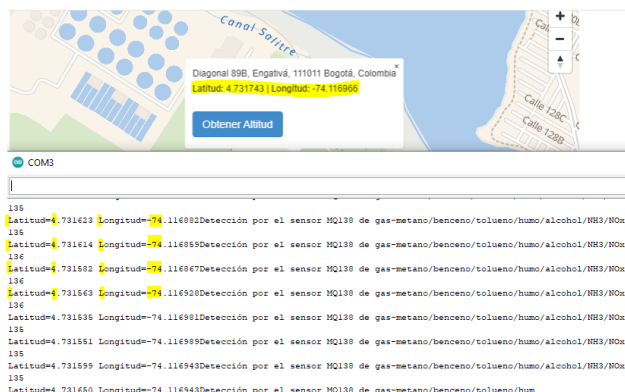
Figura 19. Obtención de coordenadas GPS con respuesta de los 3 sensores (MQ131-MQ135-MQ138)



Fuente. Elaboración propia

Para las pruebas se sometieron directamente cada uno de los sensores para que tuvieran una respuesta directa con respecto a la presencia de gas metano producido por gas natural, como se puede observar en la imagen cada uno de los sensores detecto la presencia del gas metano. (Se adjunta video para comprobación de las lecturas)

Figura 20. Cambio de lugar geográfico para corroboración de coordenadas GPS



Fuente. Elaboración propia

Módulo SD

Se incorporará un nuevo módulo SD CARD para guardar toda la información respectiva, ya que se considera valioso evaluar de igual forma como es el comportamiento del sistema sin presencia de gas metano, se implementa el módulo el cual se comunica con el Arduino a través del protocolo SPI, desde este el sistema actuara como un datalogger generando un archivo de texto plano txt el cual podrá ser visualizado a través de archivos separados por coma CSV en EXCEL, de esta forma se genera un mayor valor para guardar toda la información respectiva. Se utiliza una micro SD de 2GB.

Figura 21. Módulo cargador de baterías de litio



Fuente. Elaboración propia

El prototipo consume 230mah cuando no detecta presencia de gas metano, cuando hay detección del gas por alguno de los sensores su consumo de corriente puede incrementar hasta los 350mah debido a que el módulo GPS se inicia y se empieza a generar la información dentro de la SD, de esta forma el sistema actuará como un datalogger.

Parámetros de consumo de energía: Batería de litio gel con consumo mínimo de carga +/-20%, consumo máximo de carga 4000mah a 4VDC.

Para un estado sin detección son 230mah, teniendo en cuenta el consumo mínimo al cual puede llegar la batería es de 400mah por lo cual podría estar energizado máximo hasta 6 horas ($1400\text{mah} / 230\text{mah} = 6.08\text{h}$). Se recomienda no superar las 4 horas de uso debido a que puede generar pérdida de vida útil de la batería

Para un estado con detección de gas metano son 350mah, teniendo en cuenta el consumo mínimo al cual puede llegar la batería es de 400mah por lo cual podría estar energizado máximo hasta 4 horas ($1400\text{mah} / 350\text{mah} = 4\text{h}$). Se recomienda no superar las **2 horas** de uso debido a que puede generar pérdida de vida útil de la batería.

Figura 22. Batería de litio GD357090P

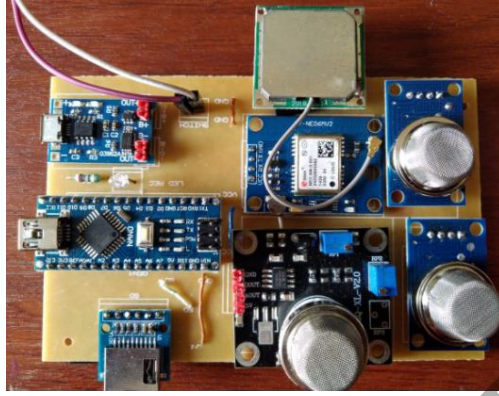


Fuente. Elaboración propia

Tarjeta impresa del prototipo

Se lleva a cabo la instalación de los componentes sobre la tarjeta PCB que previamente fue diseñada para el proyecto, con medidas de largo de 11.2cm y ancho de 7.25cm teniendo un tamaño considerable de acuerdo con los instrumentos de medición de material particulado que se encuentra actualmente en el mercado.

Figura 23. Tarjeta PCB y elementos del prototipo vista superior

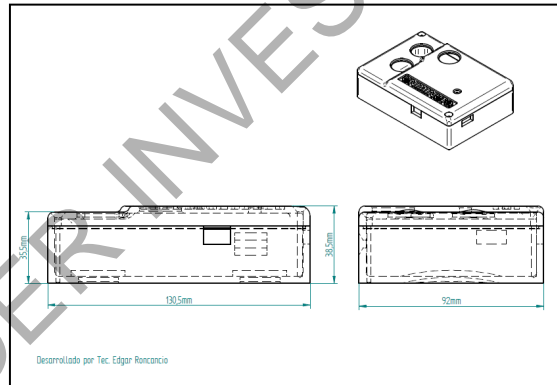


Fuente. Elaboración propia

4.5, Dimensiones y peso

A continuación, se relaciona el tamaño y los pesos de cada uno de los elementos del prototipo:

Figura 24. Plano general de medición de la carcasa



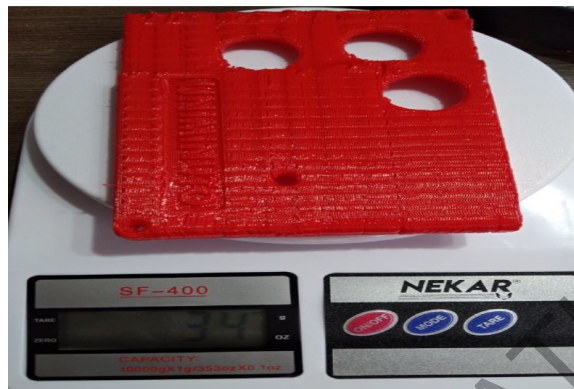
Fuente. Elaboración propia

Figura 25. 52g peso base de la carcasa



Fuente. Elaboración propia

Figura 26. 34g peso tapa de la carcasa



Fuente. Elaboración propia

Figura 27. 86g peso de la carcasa



Fuente. Elaboración propia

Figura 28. 210g peso de todo el prototipo



Fuente. Elaboración propia

Se realiza la comparación de peso con las bombas de gases ALTAIR 4X de la marca MSA y la bomba RKI GX-2009.

Figura 29. 292g peso BOMBA RKI GX-2009 – 193g peso ALTAIR 4X



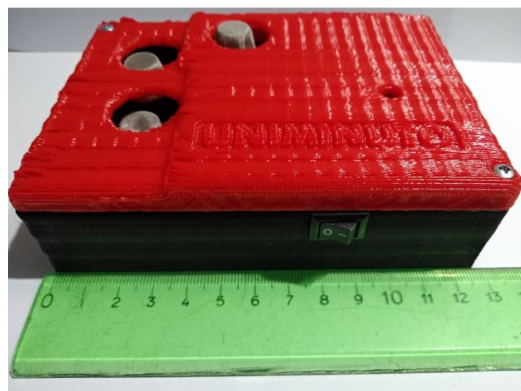
Fuente. Elaboración propia

Figura 30. medida 9.2cm alto



Fuente. Elaboración propia

Figura 31. medida 13cm largo



Fuente. Elaboración propia

Código final del prototipo arduino nano

```
//PROYECTO PARA MEDICIÓN DE GAS METANO UNIMINUTO BUCARAMANGA 2022///  
#include <SoftwareSerial.h>  
#include <TinyGPS.h>  
#include <SD.h>  
File myFile;  
TinyGPS gps;  
SoftwareSerial ss(4, 3);  
const int MQ_138 = A0; // Pin del sensor ANALOGO MQ138
```

```
const int MQ_135 = A1; // Pin del sensor ANALOGO MQ135
const int MQ_131 = A2; // Pin del sensor ANALOGO MQ131
const int RL_VALUE = 5; // Resistencia RL del módulo en Kilo ohms
const int R0 = 10; // Resistencia R0 del sensor en Kilo ohms
// Datos para lectura multiple
const int READ_SAMPLE_INTERVAL = 100; // Tiempo entre muestras
const int READ_SAMPLE_TIMES = 5; // Numero muestras
// Ajustar estos valores para el sensor según el Datasheet....
```

4. Agradecimientos

Queremos agradecer a la Corporación Universitaria Minuto de Dios, Institución que ha hecho posible la realización del proyecto de la IX convocatoria para el desarrollo y fortalecimiento de la investigación en UNIMINUTO denominado Prototipo de un sensor inalámbrico de medición de calidad de aire en ambientes laborales para trabajadores de recolección de residuos sólidos, la realización y ejecución del proyecto y los resultados ser presentados en este artículo

UNDER INVESTIGATION

Referencias

- Anónimo (2014). Articles/techzone/2014/may/sniffing-the-air-sensors-for-monitoring-air-quality-and-safety
- Anónimo (16 de abril de 2022). *Sensor gas MQ-131*. AV Electronics. <https://avelectronics.cc/producto/sensor-gas-mq-131/>
- Arl sura (2018). *Glosario*. www.arlsura.com/index.php/glosario-arl
- Arroyo, P., Suárez, J. I., Lozano, J., Herrero, J. L., & Carmona, P. (2018). Nariz electrónica personal para la detección de contaminantes en el aire. *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática*. http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/8756/978-84-09-04460-3_894.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Ayabaca, C. & Vila, C. (2018). *Diseño de un Sistema de Indicadores para Operaciones de Fresado orientado a la evaluación de parámetros de sostenibilidad en entornos de industria 4.0*. <http://cort.as/-SqCk>
- Ashanti, D. M. C., Humberto, B. Á., & Rodolfo, S. E. (2014). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 15(4), 549-560.
- Barron Adame, J. M. (2010). Modelado de un sistema de supervisión de la calidad del aire usando técnicas de fusión de sensores y redes neuronales (Doctoral dissertation, Telecomunicación). http://oa.upm.es/4839/1/JOSE_MIGUEL_BARRON_ADAME.pdf
- Biotasa (2019). *Página oficial*. <https://biotasa.com/>
- Blog de Word Press (2018). *Calidad del Aire*. <https://dicalblog.wordpress.com/marco-teorico-3/>
- Bothi, K. L. (2007). Characterization of biogas from anaerobically digested dairy waste for energy use.
- Cárdenas Moreno, P. R., Robles Martínez, F., Colomer Mendoza, F. J., & Piña Guzmán, A. B. (2016). *Herramientas para la evaluación de riesgos sobre el ambiente y salud, por la disposición final de residuos sólidos urbanos*.
- Corporacion, O. D. (2018). *Sistema de monitoreo de la calidad del aire Barrancabermeja*. <http://observatoriodyt.org/sistema-de-monitoreo-calidad-del-aire/>
- Cortolima (2009). Normas referentes a la calidad de aire y emisiones atmosféricas. www.cortolima.gov.co/normas-referentes-calidad-aire-emisiones-atmosfericasDispositivoElectronicoPortableParaLaMedicionDeLaCo-6881751.pdf
- Europeans editors (2014). *Olfateando el aire: Sensores para monitoreo de calidad del aire y seguridad*. www.digikey.com/es/
- Feldman B., M. E. (2012). *Big data in healthcare. Hype and hope*. www.forbes.com/sites/singularity/2012/10/01/the-next-revolution-in-healthcare/
- Geinfor (2019). ¿Qué es la Industria 4.0? <https://geinfor.com/blog/industria-40/>
- Gómez, R. M., Filigrana, P. A., & Méndez, F. (2008). Description of the air quality in the Navarro Dumpsite area of influence, in Cali, Colombia. *Colombia Médica*, 39(3), 245-252.
- IDEAM (s/f). *Contaminación atmosférica. Calidad del aire*. www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica
- Isa (2018). *Sensores*. www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf
- Simon, I., Bârsan, N., Bauer, M. & Weimar, U. (2001). Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 73(1), 1-26. www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-f3fd761c-4866-301d-9e25-d802e1189247
- 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. <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1386>
- Liu, Y., Sharma, K. R., Murthy, S., Johnson, I., Evans, T., & Yuan, Z. (2014). On-line monitoring of methane in sewer air. *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep06637>
- Mintrabajo (11 de noviembre de 2019). *Sistema gestión, seguridad y salud en el trabajo*. www.mintrabajo.gov.co/relaciones-laborales/riesgoslaborales/sistema-de-gestion-de-seguridad-y-salud-en-el-trabajo
- Mandujano, L. D. E., España, J. A. A., Morales, P. G., & de Santiago, J. S. S. (2019). Prototipo de sistema para la recolección y almacenamiento de datos con enfoque en la industria 4.0. *Pistas Educativas*, 40(132). www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/viewFile/1911/1542
- Puelles, U. I., & Prieto, R. L. (2017). *Ambiente de Trabajo*. http://diccionarioempresarial.wolterskluwer.es/Content/Documento.aspx?params=H4sIAAAIAAAEAMtMSbF1jTAAASNDsYnJtbLUouLM_DxbIwMDS0MDIwUQQGZapUt-ckhlQaptWmJOcSoAEgsIqTUAAAA=WKE
- Naya, S. (2018). Nuevo Paradigma de BIG DATA en la era de la industria 4.0. *Revista TOG*. 15(27), 4-9. www.revistatog.com/num27/pdfs/editorial2.pdf
- Ravindra, K., Kaur, K., Mor, S., (2016). Occupational exposure to the municipal solid waste workers in Chandigarh, India. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 34(11), 1192-1195. <https://doi.org/10.1177/0734242X16665913>
- Parajuli, P. (2011). Biogas measurement techniques and the associated errors. [Trabajo fin de máster]. Universidad de Jyväskylä. chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://jyx.jyu.fi/

bitstream/handle/123456789/36767/URN:NBN:fi:jyu-2011100611506.pdf

Wang, Ch., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R., (2010). Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors. *Sensors*, 10(3), 2088-2106. <https://doi.org/10.3390/s100302088>

Thakur, P., Ganguly, R., & Dhulia, A. (2018). Occupational health hazard exposure among municipal solid waste workers in Himachal Pradesh, India. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 78, 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.020>

VV.AA. (s/f). *Unidad 1: Algoritmos y Programacion*. Google Sites: Sign-in. <https://sites.google.com/site/mentalmecanica/unidad-1>.

World Health Organization. (s/f). *Calidad del Aire Ambiente (exterior) y salud*. [www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

UNDER INVESTIGATION