

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Título : Diseño de sistema portable de análisis de gases.

Autor : Guillermo Ambar Pérez

Tutores : DrC. Alain Sebastián Martínez Laguardia,
Ing. Luis Enrique Hernández Morales.

Santa Clara, Junio y 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

El futuro comienza hoy, no mañana.

Papa Juan Pablo II.

DEDICATORIA

Dedicado a todos los que han formado parte de mi vida, especialmente a los más cercanos; a mi familia y en especial a mis padres. Dedicado a aquellos que me han acompañado en esta etapa que ha sido larga y difícil.

Dedicado a Ardían que espera su momento para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A todos los colaboraron y tuvieron la voluntad de ayudar, especialmente a aquellos que me llevaron a seguir en el camino hasta el final. Especialmente a Alejandro y Javier que siempre estuvieron cerca, en las buenas y en las malas.

A la familia, que siempre está presente en las buenas y las malas, especialmente a mis padres.

A los tutores que me ayudaron hasta el final.

A los profesores, que me guiaron en la carrera.

RESUMEN

La contaminación de la atmósfera afecta directamente varios aspectos de la sociedad y el ambiente. Esto hace necesario medir varios componentes de interés para cuantificar sus cantidades, esto a su vez trae la posibilidad de realizar acciones correctivas y preventivas en relación a la afectación presentada o prevista respectivamente. En el presente trabajo se realiza un análisis de los analizadores de gases presentes en el mercado, de las sustancias de interés y de plataformas libres relacionadas al tema. Luego se realiza un diseño de analizador de gases portable. Al final se muestran los resultados de pruebas realizadas. Los resultados se consideran satisfactorios y muestran que es posible realizar un analizador de gases de bajo costo, dimensiones y consumo energético.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO ASOCIADO AL DESARROLLO DE UN ANALIZADOR DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE	4
1.1 Necesidad de monitorear la composición de la atmósfera	4
1.1.1 Efectos de la contaminación del aire sobre la salud	5
1.1.2 Incidencia de la composición del aire en los materiales	6
1.1.3 Efectos de la contaminación del aire sobre los ecosistemas y cultivos	7
1.1.4 Niveles recomendados de los elementos que se consideran con un fuerte impacto	8
1.2 Analizadores de gases en el mercado y consideraciones sobre su uso.	8
1.2.1 Valoración sobre los analizadores de gases profesionales existentes	9
1.2.2 Factibilidad del empleo de los analizadores de gases profesionales	12
1.3 Alternativas a los analizadores de gases profesionales.....	13
1.3.1 Elementos de medición que pueden formar parte del sistema.....	13
1.3.2 Antecedentes al empleo de sistemas de reducido consumo energético y dimensiones	14
1.4 Plataformas de cómputo que se pueden emplear para integrar los sensores.....	15
1.4.1 Plataforma Arduino.....	15
1.4.2 Plataforma Raspberry-pi.....	16

1.4.3	Plataforma Waspote de la firma Libelium.....	16
1.5	Consideraciones del capítulo	17
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....		18
2.1	Arquitectura de <i>hardware</i> propuesta.....	18
2.2	Características de los sensores	20
2.2.1	Sensor de humedad y temperatura AM2302 (DHT22).....	20
2.2.2	Sensor de calidad del aire mediante la detección de compuestos orgánicos volátiles y dióxido de carbono “iAQ-Core”	21
2.2.3	Sensor de CO ₂ y compuestos orgánicos volátiles “WSP2110”	22
2.2.4	Sensor de ozono MQ-131 (versión china).....	23
2.2.5	Sensor óptico para partículas en suspensión “GP2Y1010AU0F”	24
2.3	Almacenamiento de datos	25
2.4	Plataforma de cómputo	26
2.4.1	Capacidades de entrada/salida de interés.....	26
2.5	Arquitectura de <i>software</i>	26
2.5.1	Librerías y herramientas de <i>software</i>	26
2.5.2	Arquitectura general de <i>software</i>	27
2.5.3	Arquitectura general de una tarea	28
2.6	Consideraciones del capítulo.....	29
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS		31
3.1	Comprobación del <i>hardware</i>	31
3.2	Pruebas de <i>software</i>	32
3.2.1	Prueba de inicialización y adquisición de los datos.....	32
3.3	Prueba general de adquisición y respuesta ante la estimulación controlada del prototipo.....	33

3.3.1	<i>Software</i> para la adquisición de datos del analizador de gases.....	33
3.3.2	Resultados de las puebas realizadas.....	35
3.4	Análisis económico y medio ambiental	40
3.4.1	Análisis económico.....	40
3.4.2	Análisis ambiental.....	40
3.5	Consideraciones del capítulo.....	41
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		42
Conclusiones		42
Recomendaciones		42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		44
ANEXOS		47
Anexo I	Diagrama donde se muestran las diferentes entradas y salidas de la placa Arduino Mega2560.....	47
Anexo II	Relación de la razón de cambio de resistencia, con respecto a la concentración de las sustancias que detecta el sensor MQ-131.....	48
Anexo III	Relación de la razón de cambio de resistencia, con respecto a la concentración de las sustancias que detecta el sensor WSP2110.	49
Anexo IV	Relación de la salida de voltaje del sensor de partículas en suspensión en relación a la cantidad de partículas detectadas	49
Anexo V	Error en la lectura de temperatura del sensor AM2302 (DHT22) en dependencia de la temperatura en que se encuentra	50
Anexo VI	Error en la lectura de humedad relativa del sensor AM2302 (DHT22) en dependencia de la humedad en que se encuentre.....	50

INTRODUCCIÓN

En la actualidad diversos compuestos del aire traen efectos negativos. El nivel de contaminación que presenta la atmósfera de nuestro planeta afecta aspectos como son: la salud, los materiales que se emplean en varias actividades, y a la naturaleza en general. El índice de afectación varía de acuerdo al grado de polución, por lo que se hace necesario medir la concentración de varios compuestos para mitigar los efectos adversos que provocan.

Varios estudios han logrado relacionar el incremento de la concentración de diversos componentes presentes en el aire, con incidencia de diversas enfermedades respiratorias y alérgicas como es el caso del asma (Jung et al., 2015). También se ha relacionado el incremento de la incidencia de cáncer con la presencia de compuestos específicos en el ambiente en que se respira (Guo et al., 2016). Los materiales que se emplean en la construcción de estructuras metálicas sufren de acelerados niveles de corrosión, por el incremento de los niveles de varios elementos gaseosos y compuestos derivados de estos (Candelaria et al., 2015). De igual forma se ven afectados monumentos y construcciones antiguas realizadas en piedra (Ramírez and Olmos, 2016). Los ecosistemas naturales también sufren los efectos negativos del incremento de los niveles de contaminantes en el aire, siendo muy susceptibles los acuáticos (Ramírez and Olmos, 2016).

Para la medición de los diferentes compuestos atmosféricos de interés se emplean varias técnicas que pueden ir desde estaciones fijas con varios tipos de sensores, pasando por redes de sensores inalámbricos y llegando hasta pequeñas estaciones móviles y portátiles. Montar una red de monitoreo tanto de estaciones fijas como de sensores inalámbricos puede resultar caro de mantener y de costear. Realizar una estación portable puede reducir gastos y facilitar la reutilización de un solo sistema en varios lugares.

El Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV), realiza grandes esfuerzos por obtener aplicaciones útiles a la sociedad. Siguiendo esta línea se plantea el diseño de un sistema para medición de gases, siguiendo la premisa de que el sistema deberá estar basado en sensores pequeños, de bajo costo y consumo energético.

Se analizan las plataformas de cómputo Arduino, Raspberry-pi y Waspote de la firma Libelium para cumplir los requisitos que se expusieron anteriormente de peso, volumen y consumo energético. Tras realizar el análisis se decide emplear la plataforma Arduino para integrar varios sensores que se pueden incorporar de forma modular. La plataforma mencionada cuenta con características de comunicación que permiten incorporar diversidad de sensores y sistemas adicionales, o formar parte de un sistema más complejo.

La implementación de un sistema con las características anteriormente mencionadas se ajusta a las condiciones del país. Aunque en estos momentos no se cuenta con precedentes a nivel local de sistemas del tipo que se desea realizar, a nivel internacional y regional si se observan estudios empleando sistemas con características similares a las deseadas, en campos como son la detección de fugas de gas en áreas extensas (Rossi et al., 2014), detección de niveles de contaminación que aportan fuentes contaminantes (Rozo, 2016), monitoreo de parámetros ambientales de recintos con requerimientos estrictos en la composición (Roldán Gómez, 2014) y cuantificar los niveles de contaminantes en altura (Vargas V. and Lange V., 2015).

Dadas las anteriores condiciones el **problema científico** radica en cómo diseñar un analizador de gases de reducidas dimensiones, peso y consumo energético, basado en *hardware* y *software* libre. Por tanto se parte de la **hipótesis** de que: dada la existencia de sistemas de cómputo pequeños y potentes a los que pueden ser acoplados sensores de bajo costo, peso, dimensiones y consumo energético es posible integrarlo todo en un sistema analizador de gases.

Entonces se plantea como **objetivo general** diseñar un sistema de análisis de gases atmosféricos de bajo costo y pequeñas dimensiones, basado en *hardware* y *software* libre. Atendiendo a esto se trazan los siguientes **objetivos específicos**:

1. Analizar la bibliografía sobre sistemas de medición de gases atmosféricos.
2. Caracterizar los sensores que pueden ser empleados en un sistema de medición de gases atmosféricos.

3. Desarrollar la arquitectura de *hardware* del sistema.
4. Desarrollar la arquitectura de *software* del sistema.
5. Implementar prototipo para pruebas del sistema.
6. Desarrollar pruebas reales con el prototipo.

Impacto:

Con la implementación del proyecto se contribuye a ampliar la gama de aplicaciones que trabaja el GARP, logrando incursionar en un área de impacto medio ambiental.

Aplicabilidad:

Este proyecto es aplicable a múltiples campos de la ingeniería en los que un sistema de medición de gases atmosféricos pequeño, compacto y de bajo costo pueda ser de utilidad. Disponer de este tipo de dispositivo permitirá realizar el monitoreo en áreas en las que un equipo fijo no sea viable. De igual forma su reducido costo lo hace adecuado para su despliegue en múltiples entornos.

Estructura del Trabajo:Introducción

Capítulo 1: Se hace una descripción sobre los sistemas de análisis de gases, las tecnologías existentes más relacionadas con la solución que se quiere dar al problema científico y se analizan las investigaciones que existen en torno a este tema.

Capítulo 2: Se describen detalladamente los dispositivos de *hardware* y el *software* seleccionado para implementar un prototipo de sistema, que dé solución al problema planteado. Se presentan las posibilidades de interconexión de componentes.

Capítulo 3: Se presenta el dispositivo en *hardware* y *software*. Se realiza una evaluación y análisis de los resultados del empleo en la práctica del dispositivo. Se analizan los impactos medio ambiental y económico de la aplicación del sistema.

ConclusionesRecomendacionesReferencias BibliográficasAnexos

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO ASOCIADO AL DESARROLLO DE UN ANALIZADOR DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE.

Analizar la composición del aire resulta en una herramienta útil para varios aspectos de la vida diaria con efecto directo en la sanidad, la seguridad, el cuidado del ambiente y en la planificación de estrategias para mitigar la contaminación.

En este capítulo se mencionarán varios efectos de la variación de la composición del aire, de igual forma se presentan las características de algunos analizadores de gases profesionales, así como la existencia de opciones alternativas a su empleo.

1.1 Necesidad de monitorear la composición de la atmósfera

Los sistemas de monitoreo de la composición del aire y de su calidad facilitan la toma de decisiones acorde a las mediciones tomadas para mitigar efectos negativos. Esto teniendo en cuenta los efectos de la contaminación del aire y la atmósfera sobre la salud humana (Amable Álvarez et al., 2017) (Guo et al., 2016) (Abdel-Shafy and Mansour, 2016), los materiales empleados en la sociedad actual (Candelaria et al., 2015), y sobre los ecosistemas terrestres (Ramírez and Olmos, 2016).

Se debe tener en cuenta que en Cuba se protege por ley y constitucionalmente el medio ambiente. Esto se postula en el Artículo 27 de la Constitución de la República de Cuba donde se reconoce el deber de cada ciudadano de proteger el agua y la atmósfera; así como conservar el suelo, la flora y la fauna. La ley 81 en sus artículos 117 y 118 establece que organismos del estado norman el cuidado de la atmósfera.

Son diversos los compuestos de origen no natural que modifican de forma negativa la composición de la atmósfera. El origen de la mayoría de ellos es la quema de combustibles

fósiles, y sustancias químicas volátiles derivados directamente de estos recursos energéticos que se emplean en diversidad de productos de la cotidianidad (disolventes de pinturas y esmaltes, lubricantes, aromatizantes sintéticos, plásticos etc.)(Amable Álvarez et al., 2017) (Ramírez and Olmos, 2016) (Colvile et al., 2001). La implementación de sistemas de detección de gases en hogares, industrias y centros de trabajo así como en minas y otros lugares donde puedan crearse atmósferas venenosas o explosivas incrementa la seguridad de las personas.

La composición de la atmósfera terrestre, aunque compartida por todos, no es homogénea. Conocer las particularidades de algunas áreas se considera de utilidad a la hora de, por ejemplo, seleccionar los materiales de construcción. Ejemplo de estas áreas pueden ser zonas costeras, regiones con particularidades en el clima y países completos. La Figura 1.1 muestra los niveles de partículas en suspensión (con un mínimo de 2.5 μm de diámetro) en la Región de las Américas, según la Organización Mundial de la Salud. En la imagen los niveles altos se representan por los colores amarillo y naranja.

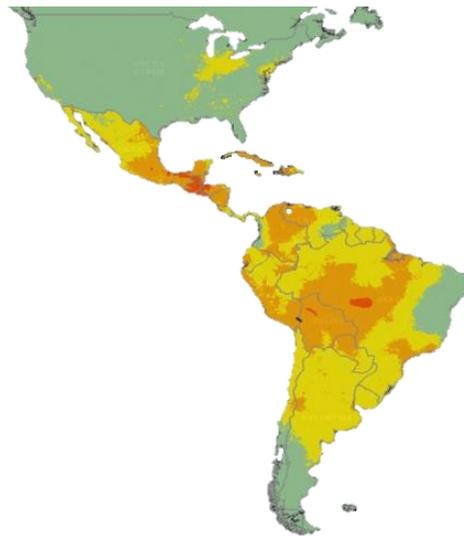


Figura 1.1. Niveles modelados de partículas en suspensión para el área de América Latina.

1.1.1 Efectos de la contaminación del aire sobre la salud

La contaminación del aire afecta de diversas formas la salud. Los compuestos que se derivan del tráfico de los vehículos con motores de combustión interna como son: dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), dióxido de

nitrógeno (NO₂), partículas en suspensión y compuestos orgánicos volátiles; así como los materiales derivados de estos por reacciones químicas, incrementan el riesgo de una variedad de padecimientos (Amable Álvarez et al., 2017).

Se ha logrado demostrar que existe una relación directa en el incremento de la incidencia de enfermedades alérgicas y cáncer de pulmón con la exposición directa a la contaminación proveniente de los escapes de los motores de combustión interna. Esto se detecta fundamentalmente en lugares urbanos con elevado tráfico vehicular. Los contaminantes que, según se ha estudiado, inciden con mayor fuerza son el partículas en suspensión (2.5um) y el ozono (Guo et al., 2016).

La exposición tanto a corto como a largo plazo a compuestos orgánicos volátiles, provenientes principalmente de la combustión incompleta presente, por ejemplo en vehículos y algunas industrias, trae efectos negativos sobre la salud. La exposición a corto plazo a estos componentes tiende a causar irritación, inflamación y en algunos casos reacciones alérgicas. Una exposición prolongada incrementa el riesgo de padecer asma y cataratas así como de inflamación de las vías respiratorias y también tiende a inducir un debilitamiento del sistema inmune e incrementar el riesgo de padecer cáncer (Abdel-Shafy and Mansour, 2016). En la Tabla 1.1 se muestran distintos contaminantes y su efecto en la salud (Yi et al., 2015).

Tabla 1.1. Efectos sobre la salud de contaminantes de mayor interés

Contaminante	Efecto sobre la salud
Monóxido de carbono	Reducción de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre y, en dosis elevadas, la muerte.
Dióxido de nitrógeno	Afecta gravemente las vías respiratorias. Agrava padecimientos del corazón.
Ozono	Afecta gravemente las vías respiratorias.
Dióxido de azufre	Incrementa los síntomas del asma y causa bronco constricción.
Partículas en suspensión	Reduce la esperanza de vida en personas con enfermedades del corazón y agrava enfermedades y alergias del sistema respiratorio.

1.1.2 Incidencia de la composición del aire en los materiales

Los materiales que se emplean a diario en la actividad humana también se ven afectados por los efectos de la composición de la atmósfera y la contaminación que esta presenta. Entre los

compuestos que inciden en el deterioro de los materiales se encuentran la sal común muy presente en las cercanías del mar y los compuestos de azufre como es el dióxido de este elemento resultado de la combustión producida por el tráfico vehicular por ejemplo.

Se han realizado investigaciones cuyos resultados demuestran que el aumento de la concentración de dióxido de azufre y de iones cloruro aumenta la velocidad de corrosión de materiales como son el cobre y el acero (Candelaria et al., 2015).

Partiendo de compuestos como son los óxidos de azufre, nitrógeno, carbono y diversos compuestos orgánicos volátiles, se forman por medio de diversas reacciones químicas otros elementos contaminantes o con características que los hacen indeseables. Destacan entre estos los ácidos que se forman al combinarse los compuestos mencionados con el agua presente en la atmósfera y que en un evento más extremo forman las lluvias ácidas, al entrar estos elementos en contacto con las nubes. Se ha demostrado que al hacerse más ácida la lluvia se incrementa la velocidad de degradación de aceros en estructuras metálicas (Padilla et al., 2015). Este tipo de precipitaciones tiende a afectar las construcciones hechas con piedra caliza y otros materiales sensibles al ácido y por esta situación se han visto afectados varios monumentos de interés mundial. Dentro de estos se encuentran reliquias arqueológicas con más de un milenio como son los monumentos Mayas en nuestra región y la Acrópolis de Atenas en Europa (Ramírez and Olmos, 2016).

1.1.3 Efectos de la contaminación del aire sobre los ecosistemas y cultivos

Se debe notar que por la similitud biológica entre el hombre y los animales estos también sufren de los efectos de los contaminantes.

Como efecto de la variación de la acidez de los suelos se ven afectados ecosistemas completos. Esto se debe a que al afectarse los árboles se afectan cadenas tróficas completas. Los animales además de ver afectado el lugar de supervivencia por la pérdida de árboles se ven afectados por otros elementos contaminantes que incrementan su efecto en ambientes ácidos. También existe un fuerte impacto sobre los ecosistemas acuáticos donde la variación del pH hace que comiencen a perder especies al aumentar la acidez (Ramírez and Olmos, 2016).

Los mantos freáticos se ven afectados dado que el incremento de la acidez facilita la disolución de metales y su asimilación; dentro de estos se encuentran los metales pesados con un efecto acumulativo en los organismos, que luego se trasladan a las personas.

1.1.4 Niveles recomendados de los elementos que se consideran con un fuerte impacto

Son varios los compuestos que son monitoreados a nivel mundial por su relación con la salud humana. De igual forma varias organizaciones realizan recomendaciones sobre niveles máximos o regulan legalmente los valores a partir de los cuales se considera deficiente la calidad del aire. En la Tabla 1.2 (Yi et al., 2015) se muestran los datos propuestos por la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos (*EPA*¹) (por sus siglas en inglés), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comisión Europea (CE) para los elementos que se consideran de interés.

Tabla 1.2. Valores de exposición recomendados por varias agencias (en base a tiempo)

Contaminante	OMS	CE	<i>EPA</i>
Monóxido de carbono	100mg/m ³ (15 min), 15 mg/m ³ (1 h), 10 mg/m ³ (8 h), 7 mg/m ³ (24 h)	10 mg/m ³ (8 h)	9 ppm (8h), 35 ppm (1h)
Dióxido de nitrógeno	200 µg/m ³ (1 h), 40 µg/m ³ (1 año)	200 µg/m ³ (1h), 40 µg/m ³ (1 año)	100 ppb (1h), 53 ppb (1 año)
Ozono	100 µg/m ³ (8 h)	120 µg/m ³ (8 h)	75 ppb (8h)
Dióxido de azufre	500 µg/m ³ (10 min), 20 µg/m ³ (24 h)	350 µg/m ³ (1h), 125 µg/m ³ (24 h)	75 ppb (1h) 0.5 ppm (3h)
Partículas en suspensión (2.5 µm)	25 µg/m ³ (24 h) , 10 µg/m ³ (1 año)	25 µg/m ³ (1 año)	35 µg/m ³ (24 h), 12 µ g/m ³ (1 año)

1.2 Analizadores de gases en el mercado y consideraciones sobre su uso.

En la actualidad existen disímiles tipos de analizadores de gases adaptados a las necesidades específicas de cada usuario, tanto en estaciones fijas como portátiles. Se encuentra además diversos fabricantes que ofertan una variedad de productos de buena calidad y que brindan

¹ EPA: Del inglés Environmental Protection Agency

buen soporte al usuario. Se cubren campos de aplicación como son los equipos portátiles para protección personal, a trabajadores que laboran en espacios confinados (minas y alcantarillas por ejemplo) con posible presencia de gases venenosos o explosivos. También existen equipos que se emplean para valorar las características de los escapes de vehículos, seguridad de entornos industriales, detección de fugas y otros como el control de los niveles de contaminación en ambientes urbanos.

1.2.1 Valoración sobre los analizadores de gases profesionales existentes

Tras consultar varios sitios y observar ofertas de analizadores se puede constatar que existe variedad de productos que cubren gran cantidad de necesidades. Se pueden observar desde productos para uso personal, domótica, determinación de las características de las emisiones de motores de combustión interna, protección de personas que trabajan en ambientes hostiles o peligrosos, hasta estaciones fijas de monitoreo de la calidad del aire y redes de sensores inalámbricos. Estos equipos presentan la capacidad de medir gran variedad de variables. A continuación se presentan algunos de ellos.

La estación compacta Aeroqual AQM65 (“Estaciones Portátiles : Aeroqual AQM65,” 2017) es un equipo profesional compacto, de larga vida útil y capaz de medir muchas variables al emplear varios sensores y adicionalmente puede realizar históricos. Presenta sensores de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico, Ozono, Hidrocarburos no-metánicos y compuestos orgánicos volátiles. También mide partículas en suspensión y presenta opciones variadas dentro de las que destaca la capacidad de conectarse a internet. Los datos específicos de la estación se muestran en la Tabla 1.3 y en la Tabla 1.4 que contienen datos ofrecidos en el sitio oficial.

La estación SVT-EMA que se presenta en (“Estación de monitorización ambiental,” 2017) cuenta con varias características útiles y la capacidad de agregar elementos adicionales. Se muestran los detalles en la Tabla 1.5.

Tabla 1.3. Características del sistema de partículas en suspensión

Partículas en suspensión	Tamaños de partícula (μm)	Rango ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Error	Flujo de aire
Monitor	1, 2.5, 10	0 a 2000	$< 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $< 5\%$ lectura (valores altos)	2 litros por minuto
Identificador	1	0 hasta 200	$< 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $< 5\%$ lectura (valores altos)	1 litro por minuto
	2.5	0 hasta 2000		
	10	0 hasta 5000		

Tabla 1.4. Características de los sensores de Gas

Módulo de Gas	Rango (ppm)	Ruido (ppm)	Sensibilidad (ppm)	Precisión (ppm)
Ozono	0 a 0.5	<0.001	0.001	<0.002 (0 a 0.1) < 2% (valor > 0.)
Dióxido de nitrógeno	0 a 0.2	<0.001	0.001	<0.003 (0 a 0.1) <3% (valor > 0.1)
Monóxido de carbono	0 a 25	0.020	0.040	<0.05 (0 a 2) <3% (valor > 2)
Dióxido de Azufre	0 a 10	0.004	0.009	<0.009 (0 a 0.3) <3% (valor > 0.)
Óxidos de nitrógeno	0 a 1	<0.001	0.001	<0.003 (0 a 0.1) <3% (valor > 0.1)
Ácido sulfhídrico	0 a 10	0.006	0.012	<0.012 (0 a 0.4) <3% (valor > 0.4)
Dióxido de carbono	0 a 2000	<5	10	<10 ppm (0 a 400) <3% (valor > 400)
Compuestos orgánicos volátiles	0 a 20	0.005	0.010	<0.010 (0 a 0.5) <2% (valor > 0.5)
Hidrocarburos (no metano)	0 a 25	0.020	0.040	<0.05 (0 a 1) <5% (valor > 1)
Amoniaco	0 a 10	0.05	0.100	<0.1 (0 a 2) <5% (valor > 2)

Tabla 1.5. Características de los sensores

Sensor Electroquímico (Elemento)	*Rango recomendado	*Sensibilidad	*Resolución	*Valor Máximo
Monóxido de carbono	0-1000	0,001	0,03	2000
Monóxido de Nitrógeno	0-20	0,001	0,001	50
Dióxido de Nitrógeno	0-20	0,001	0,001	50
Dióxido de azufre	0-100	0,001	0,002	200
Ozono	0-20	0,001	0,5	50
Ácido Sulfhídrico	0-100	0,0005	0,004	200
Compuestos orgánicos volátiles	0-100	0,2	5%	200

*valores ofrecidos en ppm.

Este equipo ofrece capacidades opcionales de humedad temperatura partículas en suspensión y otros.

En el sitio (“XGA301 Industrial Gas Analyzer - Michell Instruments | UK,” 2016) se ofrece el medidor industrial XGA301 con capacidades de medición de oxígeno, monóxido de carbono dióxido de carbono, dióxido de carbono y metano.

En (“Medidor de gases T4 10er Set | PCE Instruments,” 2017) se ofrece un detector de gases portátil para protección de personal en ambientes potencialmente peligrosos (alcantarillado por ejemplo) donde el personal se puede encontrar expuesto a concentraciones peligrosas de varios elementos como son el oxígeno, el metano que es muy inflamable, el sulfuro de hidrógeno y el monóxido de carbono este equipo incorpora varias formas de avisar al usuario.

Existen precedentes del empleo de un analizador de gases TESTO 335 para verificar la calidad de la combustión de una caldera. En este caso se miden dióxido de carbono, oxígeno y monóxido de carbono principalmente (Jiménez Borges et al., 2016).

La placa Wasmote de la firma Libelium, se ha empleado para montar con éxito una red de sensores inalámbricos con el objetivo de medir varios parámetros de la calidad del aire en Ciudad del Cabo (Bagula et al., 2012). Al consultar en la web se pueden observar varias alternativas del sistemas que ofrece el mismo fabricante que se menciona anteriormente (“Wasmote Technical Guide (v12) | Libelium,” 2018). El sistema propuesto, según se observa, presenta varias modalidades según las necesidades del usuario y se encuentra en su versión 3.0. Tiene varias características de interés como son: reducido volumen, un peso de alrededor de 800 gramos, permite conectar hasta 6 sensores en paralelo, diseño modular que permite adaptar el sistema a necesidades como pueden ser monitoreo de ciudades, ambientes naturales, agricultura y otros; reducido consumo energético que le permite ser alimentado con un pequeño panel solar en caso de necesitarse su empleo de forma remota y posibilidades de comunicación inalámbrica y de incorporación a redes de sensores.

Al revisar las características de algunas de sus variantes se observa que las propuestas de producto “*Gases Sensor Board*” y “*Gases PRO Sensor Board*” se pueden emplear como punto de referencia atendiendo a los elementos que se miden y el nivel de precisión que se emplea, dichos niveles se muestran a continuación en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Características de los sensores que pueden ser empleados en “*Gases PRO Sensor Board*”

Parámetro	Rango	Precisión
Temperatura	-40 a 85 °C	±1 °C
Humedad	0 a 100% HR	±3% HR (rango 20 a 80% RH)
Presión	30 a 110 kPa	±0.1 kPa (0 a 65 °C)
Monóxido de Carbono	0 a 500 ppm	±1 ppm
Monóxido de Carbono	0 a 25 ppm	±0.1 ppm
Dióxido de Carbono	0 a 25 ppm	±50 ppm (0 a 2500 ppm) ±200 ppm (2500 a 5000 ppm)
Oxígeno	0 a 30%	±0.1%
Ozono	0 a 18 ppm	±0.2 ppm
Monóxido de Nitrógeno	0 a 250 ppm	±0.5 ppm
Dióxido de Nitrógeno	0 a 20 ppm	±0.2 ppm
Dióxido de Azufre	0 a 20 ppm	±0.2 ppm
Amoníaco	0 a 100 ppm	±0.5 ppm
Metano	0 a 100 %	±0.15 %
Hidrógeno	0 a 1000 ppm	±10 ppm
Ácido Sulhídrico	0 a 100 ppm	±0.1 ppm
Cloruro de Hidrógeno	0 a 50 ppm	±1 ppm
Cianuro de Hidrógeno	0 a 50 ppm	±0.2 ppm
Fosfano	0 a 20 ppm	±0.1 ppm
Óxido de etileno	0 a 100 ppm	±1 ppm
Cloro	0a 50 ppm	±0.1 ppm

Los ejemplos anteriores muestran las características de varios analizadores de gases profesionales que normalmente presentan un respaldo por las compañías que los comercializan y pueden representar un punto de comparación al analizar los resultados del trabajo.

1.2.2 Factibilidad del empleo de los analizadores de gases profesionales

Las características de los analizadores de gases profesionales hacen que su empleo parezca lo más acertado, pero se debe tener en cuenta también el impacto económico que ello implica.

Los costos varían según la aplicación del diseño, como por ejemplo el analizador de gases TESTO 335 para verificar la calidad de la combustión tiene un precio elevado, alrededor de 9300 USD. Equipos de menores requerimientos y para usos menos exigentes como detección de fugas, protección personal y para el uso en el hogar presentan precios no tan exigentes

entre 150 y 460 USD. La placa de desarrollo Waspote se puede encontrar a precios menos exigentes (por encima de 230 USD), pero siguen siendo precios altos para nuestras condiciones.

El valor de estos equipos puede resultar excesivo para algunas aplicaciones como pueden ser la detección de fugas de gas y de atmósferas dañinas, o el monitoreo ambiental en momentos puntuales. Se debe tener en cuenta que sus características pueden ser utilizadas como referencia de la calidad de medición.

1.3 Alternativas a los analizadores de gases profesionales

Paralelamente a los analizadores de gases profesionales existen ofertas de variedad de sensores y módulos de desarrollo que permiten realizar un equipo con funcionalidades similares en algunos casos y que cuentan con la ventaja de un costo mucho menor, que es recomendable en el caso que se estudia. El empleo de este tipo de componentes tiene el inconveniente de requerir un esfuerzo adicional por parte del usuario final que debe desarrollar un dispositivo funcional y calibrarlo. Se debe tener en cuenta que existe también la posibilidad de que para aplicaciones especializadas se deba desarrollar un dispositivo a la medida que en el caso de no ser un desarrollo propio incrementa los costos del equipo.

1.3.1 Elementos de medición que pueden formar parte del sistema

En varias tiendas en línea se ofertan tanto sensores como módulos con el acondicionamiento preparado para incorporar los mismos a plataformas de desarrollo como pueden ser Arduino y Raspberry-pi que actualmente son muy populares (“Adafruit Industries” 2018.), (“AliExpress.com,” 2018), (“Seeed Studio Official Forum and Community,” 2018), (“SparkFun Electronics,” 2018). Paralelamente también existen comunidades y foros que brindan soporte al desarrollo con este tipo de entornos. Se presentan casos donde los vendedores de módulos y sensores con acondicionamiento proveen librerías y ejemplos de *software* libre para las plataformas más populares y extendidas.

Los sensores disponibles a bajo costo cubren buena parte del espectro requerido para desarrollar un analizador de gases y pueden medir elementos como: dióxido de carbono, monóxido de carbono, ozono, metano, calidad general del aire, óxidos de azufre y de nitrógeno, partículas en suspensión y compuestos orgánicos volátiles. Este tipo de sensores

presentan de forma general un bajo consumo energético y dimensiones reducidas. Normalmente incorporan una interfaz de comunicación compatible con la mayoría de las plataformas de desarrollo, o brindan una salida analógica de la lectura obtenida. Se debe tener en cuenta que no todos presentan la misma interfaz de comunicación.

Dichos sensores se pueden adquirir a precios muy inferiores a los sistemas profesionales, normalmente decenas de USD y en algunos casos, cuando el acondicionamiento que se les agrega es complejo, los precios pueden superar los 50 USD. En un caso extremo se puede comprar el elemento sensor en bruto y realizar el acondicionamiento para reducir costos.

1.3.2 Antecedentes al empleo de sistemas de reducido consumo energético y dimensiones

Se han realizado ya aplicaciones basadas en elementos de reducido peso, costo y consumo energético donde se ha probado su efectividad. Adicionalmente se han realizado pruebas de evaluación a sensores de bajo costo y se ha probado su efectividad (Delgado-Castro et al., 2015), factores que apoyan la hipótesis de esta investigación.

Se puede observar que un grupo de sensores, integrado sobre la plataforma Arduino, sirve para caracterizar las emisiones vehiculares (M et al., 2016). Este tipo de sistemas permite ser integrado a sistemas más complejos, agregando conectividad inalámbrica u otro tipo de comunicación.

En otro ejemplo se emplea un sistema que mide metano, humedad y temperatura (Rozo, 2016). El proyecto se realiza basado en la plataforma Arduino y con el objetivo de cuantificar los niveles de emisión contaminante sobre un relleno sanitario. Este sistema de igual forma ha sido incorporado a un vehículo aéreo no tripulado (VANT) y emplea sensores de bajo costo. Adicionalmente almacena los datos empleando un medio de almacenamiento masivo (Micro SD).

En otro caso se emplea un sistema con características similares a las deseadas para medir distintos gases en altura mediante el empleo de un VANT (Vargas V. and Lange V., 2015). Se mide ozono, partículas en suspensión y monóxido de carbono, el sistema se basa en la tarjeta de desarrollo Freescale KL25Z para incorporar todos los elementos sensores.

En otro caso se ejemplifica la aplicabilidad de sistemas de bajo consumo, dimensiones y peso (Rojas et al., 2015). Se emplea el sistema con el objetivo de ampliar el área de cobertura de la red de sensores al dotarla de la capacidad de medir en altura.

Otra utilidad de sistemas de este tipo radica en la detección de fugas (Rossi et al., 2014). Se han empleado sistemas basados en microcontrolador y en sensores de bajo consumo, dimensiones y peso con éxito.

1.4 Plataformas de cómputo que se pueden emplear para integrar los sensores

Actualmente existen varias plataformas de cómputo libres que son capaces de integrar con éxito múltiples sensores. Las más populares son Arduino, Raspberry-pi y Waspote. Todas ellas se pueden considerar como entornos libres en cuanto al *hardware* y *software* que se emplea en el desarrollo.

1.4.1 Plataforma Arduino

La plataforma Arduino actualmente presenta una gran popularidad entre un grupo de desarrolladores cada vez más creciente. Esta posee la característica de ser *hardware* libre y tener un entorno de desarrollo basado en *software* libre. Adicionalmente posee un precio asequible, por ejemplo un Arduino MEGA 2560 puede costar alrededor de 35 USD y un modelo de menores prestaciones puede costar alrededor de 20 USD. Esta plataforma se puede adaptar a varias necesidades y presenta características que la hacen muy adaptable.

La placa Arduino MEGA 2560 en su revisión 3 presenta 54 pines digitales con capacidad de entrada y salida, así como 16 entradas analógicas con una resolución de hasta 10 bits en los conversores analógicos-digitales. Adicionalmente los pines digitales pueden ofrecer salidas con modulación de ancho de pulso e incorpora varias interfaces digitales como son I2C, serie y GPIO. El sistema cuenta con librerías que permiten agregarle *hardware* para dotarlo de capacidades como pueden ser comunicación inalámbrica, conexión a redes de computadoras y almacenamiento externo. La placa Arduino Uno presenta características similares aunque con una menor cantidad de interfaces de entrada/salida

Por estas características se considera su empleo el cual permite dotar a los sistemas de modularidad y facilita la implementación de *software* necesario por la asistencia que prestan sus promotores y varios foros de desarrolladores. También se tiene en cuenta que el consumo

energético es reducido y que las interfaces de comunicación presentan las características adecuadas para incorporar variedad de sensores y para futuras expansiones.

1.4.2 Plataforma Raspberry-pi

Otra plataforma ampliamente aceptada es Raspberry-pi que se puede obtener a precios de alrededor de 35 USD por unidad. Esta placa computadora es muy potente respecto a la anterior y, por ejemplo, puede contar con un procesador de 1.4 GHz, de 4 núcleos de procesamiento, de arquitectura ARM, 1 GB de memoria RAM y una unidad dedicada al procesamiento de video y multimedia. Adicionalmente es capaz de soportar varios sistemas operativos ampliamente difundidos tanto basados en GNU/Linux como sistemas operativos de Microsoft, aunque se puede emplear una distribución realizada a su medida basada en Debian GNU/Linux. La plataforma presenta un conector de propósito general GPIO con capacidad de usar protocolos de comunicación como son I2C, SPI y otros. Además presenta capacidades de comunicación inalámbrica que le permiten tener conexiones de datos de alta velocidad. Cuenta con la capacidad de comunicarse con redes mediante el protocolo Ethernet.

Esta plataforma presenta un buen soporte tanto por parte de su comunidad de usuarios como por sus desarrolladores, aunque el desarrollo sobre esta es más complejo que el de la plataforma mencionada en la sección anterior debido a que es necesario interactuar con su sistema operativo.

El consumo energético hace que se vea limitado su empleo en aplicaciones donde este es crítico, pues puede llegar a superar los 6 W de potencia por lo que no se considera viable en el caso actual.

1.4.3 Plataforma Waspote de la firma Libelium

Esta plataforma cuenta con características similares a la plataforma Arduino tanto en poder de cálculo como en consumo energético, aunque se ha optimizado para su empleo en redes de sensores inalámbricos; por lo tanto presenta muy buenas características de comunicación y consumo energético. El sistema es modular y se le pueden agregar varios tipos de sensores, para los cuales se ha optimizado, por lo que su sistema de conexiones es menos orientado a propósito general. Su plataforma de programación es muy similar a la de Arduino y también es de *software* libre. Además facilita la adaptabilidad del sistema a las necesidades de cada usuario. La compañía oficial que defiende el producto ofrece variantes de sistemas y sensores

que en la mayoría necesitan ser calibrados para obtener un rendimiento óptimo. La principal desventaja es el costo elevado del sistema con respecto a las 2 plataformas anteriores que pude superar los 200 USD solo en su versión de desarrollo, versiones más profesionales pueden superar este valor.

1.5 Consideraciones del capítulo

En el análisis de bibliografía realizado se muestran los efectos de la contaminación de la atmósfera. Posteriormente se observa en la Tabla 1.2 valores recomendados por varias agencias con prestigio internacional para regular la calidad del aire basado en compuestos de interés. Lo anterior muestra la necesidad de realizar una medición de la composición de la atmósfera.

Se realiza un análisis de varios medios que se pueden emplear para medir los compuestos de interés en la atmósfera y se considera como más adecuado a las condiciones actuales el empleo de *hardware* y *software* libres. Por el análisis realizado se determina como más adecuada la plataforma Arduino en conjunto con sensores de bajo costo.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Basado en el análisis realizado en el capítulo anterior y en los recursos de *hardware* con que se cuenta se describen las características del sistema propuesto tanto en *hardware* como en *software*.

2.1 Arquitectura de *hardware* propuesta

Empleando varios de los sensores con que se cuenta se propone una arquitectura de *hardware*. Se propone como elemento central el empleo de la plataforma Arduino y empleando sus capacidades de entrada/salida aunar varios sensores para medir parámetros de interés. En la Figura 2.1 se observa un diagrama de la arquitectura de *hardware* propuesta y los elementos que la integran.

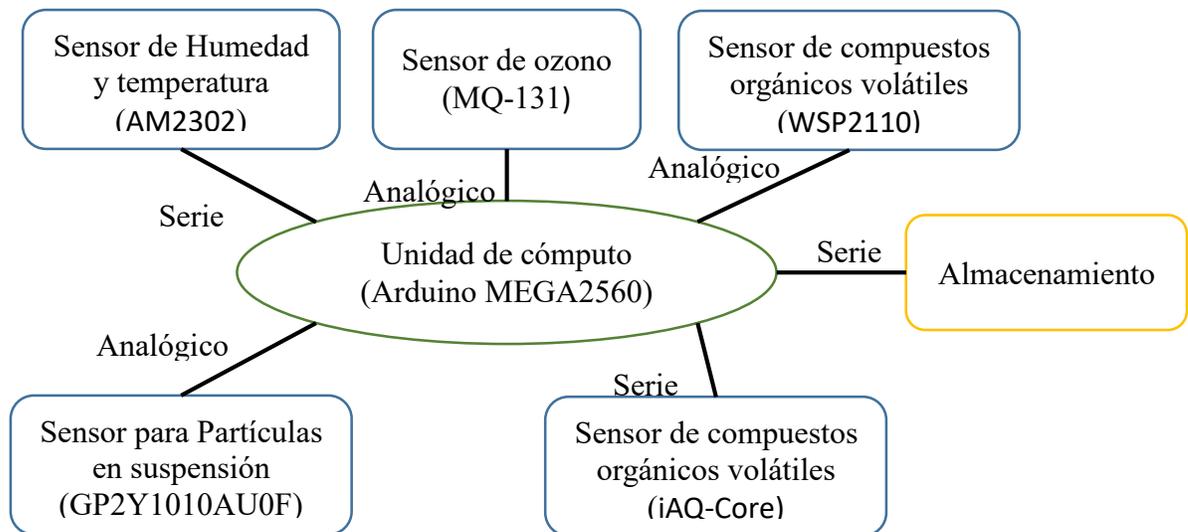


Figura 2.1. Diagrama de conexión del sistema.

En la Tabla 2.1 se muestran los requerimientos de pines de entrada/salida requeridos de la plataforma de cómputo y el consumo de cada elemento sensor.

Tabla 2.1 Requerimientos de entrada/salida y alimentación por módulo sensor.

Sensor o elemento a conectar	Pines analógicos	Pines digitales	Comunicación	Alimentación	Potencia requerida
AM2302 (humedad y temperatura)	0	1	-	5 V o 3.3 V	Mínima
“iAQ-Core” con acondicionamiento. (Compuestos orgánicos volátiles)	0	2	I2C	5 V y 3.3 V	> 100 mW
“WSP2110” con acondicionamiento (Compuestos orgánicos volátiles)	1	1	-	5 V	> 400 mW
MQ-131 con acondicionamiento (ozono)	1	1	-	5 V	> 900 mW
“GP2Y1010AU0F” para partículas en suspensión	1	1	-	5 V	Mínima
TOTAL	3	8	-	-	-

Teniendo en cuenta lo mostrado en la Tabla 2.1 para la conexión de los sensores a la placa Arduino se concluye que:

- En el bus I2C se debe conectar el sensor “iAQ-Core”.
- Las entradas analógicas se pueden cambiar según sean las necesidades de espacio si se necesita reacomodar el sistema de sensores.
- Las entradas y salidas digitales se deben escoger sin emplear los pines de los buses SPI e I2C y las entradas y salidas de los puertos serie, según sea necesario reacomodar el sistema de sensores.

- Lo anterior se hace teniendo en cuenta que la arquitectura de *software* puede adaptarse a los requerimientos anteriores con mucha facilidad, como se demostrará posteriormente.
- La alimentación se puede tomar tanto de la placa Arduino como de fuentes exteriores, aunque se recomienda el empleo de la alimentación que proporciona la propia placa.

2.2 Características de los sensores

Se describen las características de los sensores; teniendo en cuenta consumo energético, precio, características y calidad de la medición, e interfaz de comunicación. Se describe además la interconexión de los sensores con la unidad de cómputo.

2.2.1 Sensor de humedad y temperatura AM2302 (DHT22)

El sensor AM2302 cuenta con buenas características tanto en calidad de la medición como en su sensibilidad.

Tabla 2.2 Características de medición del sensor AM2302

Parámetro	Rango de medición	Resolución	Error Típico	Error máximo
Humedad	0% -100%	0.1%	2%	5%
Temperatura	-40 °C a 80 °C	0.1 °C	0.5 °C	-

El dispositivo se emplea con un rango de voltajes de alimentación que puede estar entre 3.3 V y 5 V y consume un máximo de 500 μ A. Lo anterior representa un mínimo consumo de potencia. Se recomienda un tiempo entre lecturas de 2 segundos como mínimo. Estas características se consideran adecuadas.

El sensor se comunica mediante un protocolo serie digital. El protocolo es específico para el grupo al que pertenece y es descrito por el fabricante. Además cuenta con varias implementaciones en librerías de *software* libre compatibles con la plataforma de cómputo que se desea emplear y se ha probado por varios usuarios con seguridad.

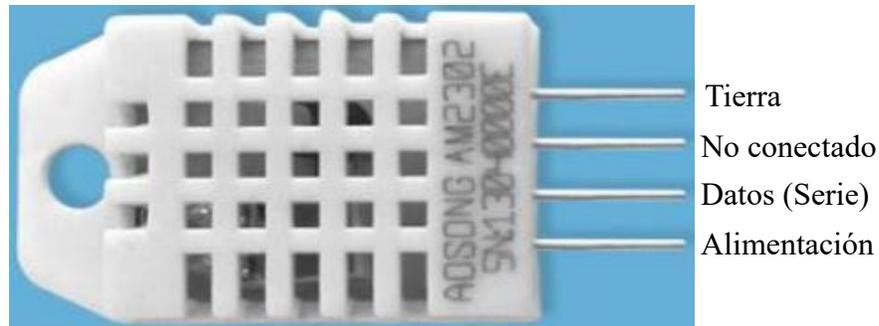


Figura 2.2 Sensor AM2302 y bus de conexión.

2.2.2 Sensor de calidad del aire mediante la detección de compuestos orgánicos volátiles y dióxido de carbono “iAQ-Core”

Este sensor viene acondicionado electrónicamente con una interfaz compatible eléctricamente con la plataforma de cómputo seleccionada. Dicha interfaz requiere de 2 tensiones de alimentación 3.3 V y 5 V. El sensor es capaz de medir tanto dióxido de carbono como compuestos orgánicos volátiles, aunque tiene el inconveniente de no distinguir entre sustancias. Según la hoja de datos del módulo sensor, es capaz de medir un rango de entre 400 y 2000 ppm de dióxido de carbono (o el equivalente en los demás compuestos), y entre 125 y 600 ppb (en inglés) de concentración de compuestos orgánicos volátiles (o el equivalente en dióxido de carbono).

La comunicación se realiza mediante el protocolo I2C que debe sincronizarse por reloj a 100 kHz y la dirección por defecto del sensor es 0x5A en hexadecimal (90 en decimal). El sistema es compatible con las librerías de la plataforma de cómputo.

Este sensor tiene como inconveniente requerir un tiempo de arranque de 5 minutos y, según el fabricante es recomendable para el uso en interiores. Sus dimensiones son relativamente pequeñas y pesa algunos gramos. El consumo energético es muy pequeño (<100 mW).

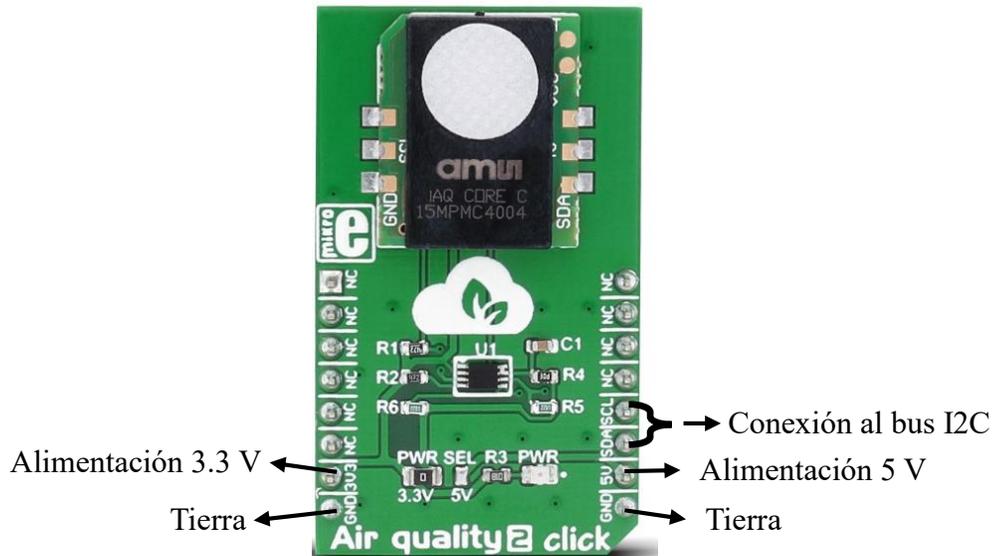


Figura 2.3. Conexión del sensor iAQ-Core.

2.2.3 Sensor de CO₂ y compuestos orgánicos volátiles “WSP2110”

Este sensor cumple funciones similares al anterior. Detecta diversos compuestos orgánicos volátiles para emitir una salida proporcional a la concentración detectada. El rango de medición, según el fabricante, se encuentra entre 1 y 50 ppm, equivalentes a alguno de los compuestos que detecta. Detecta indistintamente acetona, tolueno, metano, metanal y alcohol.

Este sensor tiene como inconveniente requerir de un precalentamiento previo a su empleo superior a 24 horas, por lo que no es recomendado para su empleo de forma intermitente o, al menos con alimentación al calentador intermitente. Su tiempo de respuesta, por otra parte es de alrededor de 30 segundos.

Su salida de comunicación es analógica mediante una resistencia de carga en serie al elemento sensor y es compatible con las entradas de la plataforma de cómputo con que se cuenta, aunque la misma cuenta con el inconveniente de ser no lineal. Se alimenta con 5 V tanto para el calentador como para el sistema del elemento sensor. Su consumo energético no supera los 400 mW.

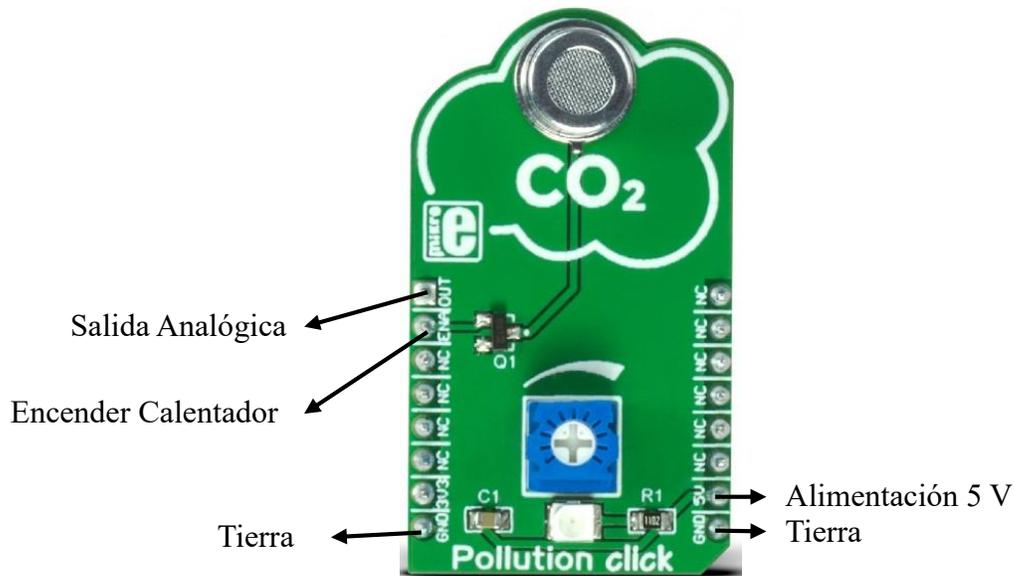


Figura 2.4 Conexión del sensor WSP2110.

2.2.4 Sensor de ozono MQ-131 (versión china)

El sensor de ozono es capaz de detectar cantidades entre 50 ppb (en inglés) y hasta 2 ppm de dicha sustancia, según los datos que proporciona el vendedor. Se recomienda su empleo para el hogar, industria y en elementos portátiles, aunque para detectar concentraciones peligrosas y no para registrar datos con extrema precisión; esto después de ser calibrado. Se debe destacar que el fabricante que vende el módulo con acondicionamiento no proporciona datos coherentes en las hojas de datos que provee.

En caso del sensor con que se cuenta está acondicionado para ser alimentado con 5 V de tensión tanto para el calentador como para el circuito de medición. Su salida es analógica y el consumo de potencia, que es alrededor de 900 mW, se emplea casi completamente en el calentador. El consumo se considera elevado.

Tiene como desventaja necesitar de un precalentamiento de 48 horas y tener una salida no lineal. Para lograr un funcionamiento correcto requiere de ser calibrado y es sensible además al cloro (gas dicloro considerado tóxico) y a los óxidos de nitrógeno.

La salida es compatible con la interfaz de entrada de la plataforma de cómputo que se pretende emplear.

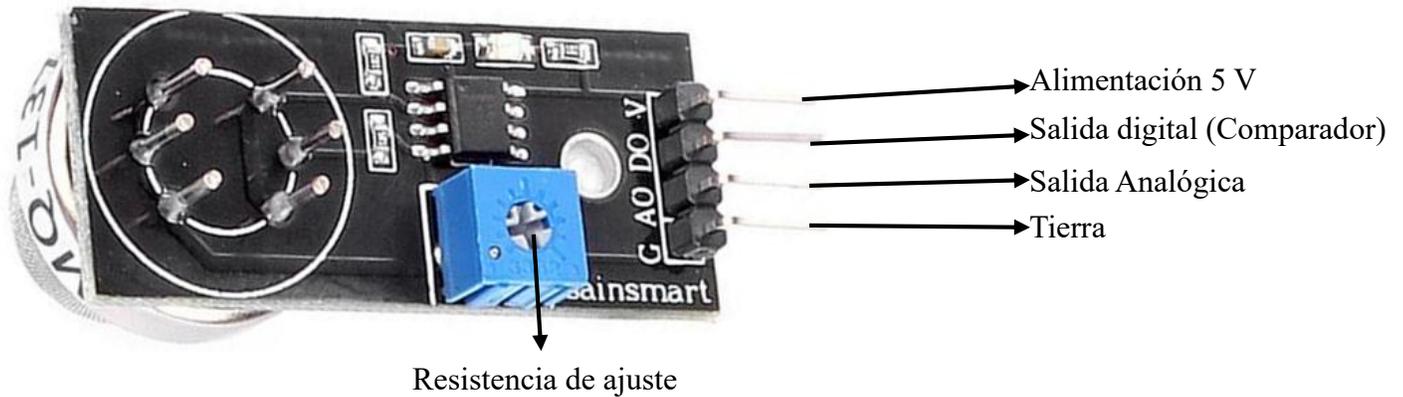


Figura 2.5. Conexión del módulo sensor MQ-131.

2.2.5 Sensor óptico para partículas en suspensión “GP2Y1010AU0F”

EL sensor “GP2Y1010AU0F” se recomienda para la detección de partículas en suspensión (polvo) en el aire y se recomienda para el monitoreo del aire. Se recomienda su aplicación en acondicionadores de aire y purificadores. Se considera capaz de detectar el humo del cigarrillo. Su principio de funcionamiento es por la detección de la luz infrarroja reflejada por las partículas de polvo. Su sensibilidad máxima se considera de $0.65 \text{ V}/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ y la salida es analógica en forma de voltaje, en un rango de entre 0.5 V y 3.5 V. La alimentación que requiere es de 5 V en corriente directa, con un consumo de corriente no mayor a 2 mA.

Para realizar una medición correcta requiere de tiempos muy estrictos en el pulso de excitación al diodo emisor de luz infrarroja, del orden de centenas de microsegundos. Adicionalmente requiere un capacitor de $220 \mu\text{F}$ y 150Ω de resistencia para una correcta excitación del sistema. Necesita adicionalmente generar un flujo de aire al cual medir, lo cual puede ser inconveniente.

El sistema se considera compatible con la plataforma de cómputo que se pretende emplear.

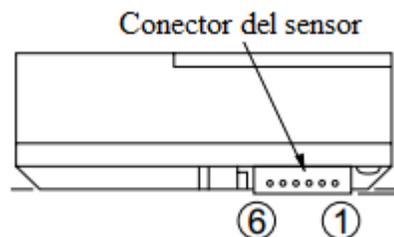


Figura 2.6. Ubicación del bus de salida del sensor GP2Y1010AU0F.

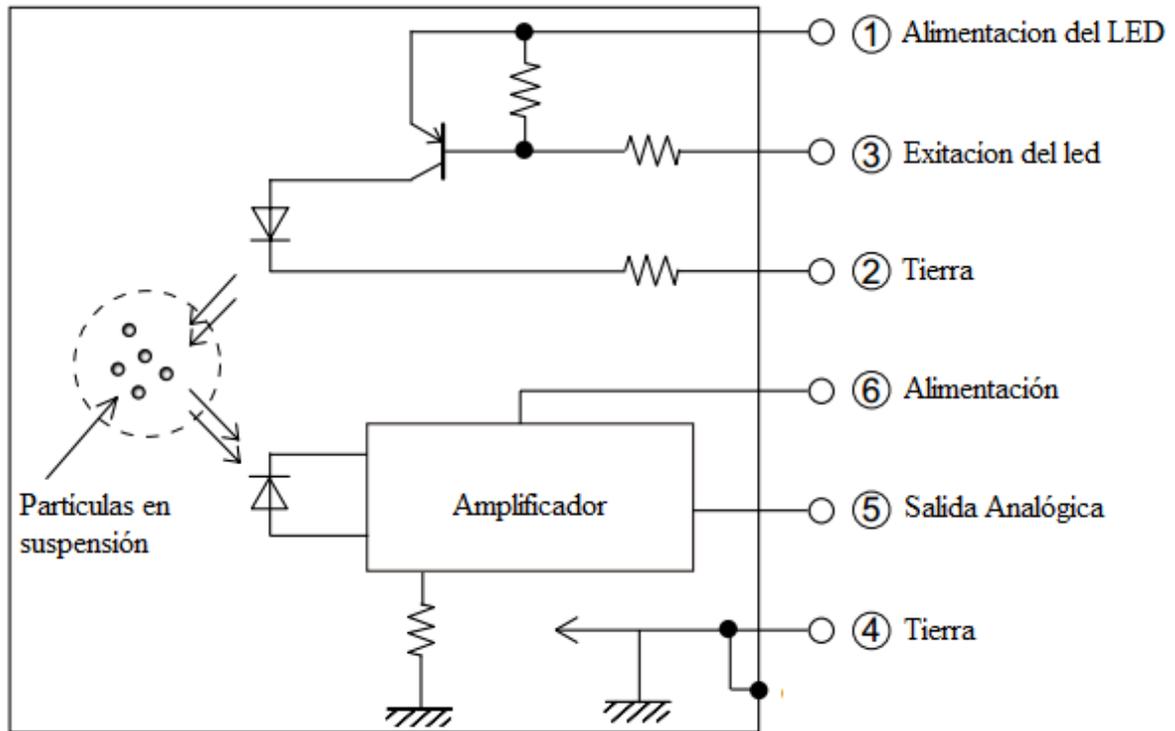


Figura 2.7. Diagrama de conexión del sensor GP2Y1010AU0F.

2.3 Almacenamiento de datos

La plataforma de cómputo Arduino es compatible eléctricamente con unidades de almacenamiento masivo SD empleando el bus SPI y librerías de *software* propias. Para un correcto funcionamiento el medio de almacenamiento debe estar en formato FAT32. En ausencia de un medio de almacenamiento se puede comunicar el sistema por el bus serie o sobre USB con un computador. Esta última alternativa sirve además para depurar el sistema u obtener datos en tiempo real sobre el funcionamiento del mismo.

Se pretende, mediante *software*, almacenar los datos obtenidos por cada sensor en una base de datos con formato de texto plano. El dato almacenado se identificará por una marca de tiempo relativa a la inicialización de la lectura. Se pretende almacenar tanto los datos en bruto como procesados, esto permite realizar correcciones posteriores a la medición en caso de ser requerido.

2.4 Plataforma de cómputo

Se pretende emplear como medio de cómputo la placa Arduino MEGA 2560, que se considera cuenta con adecuada interfaz de entrada salida y poder de cálculo suficiente, se tuvo en cuenta para su selección la facilidad de programación, su consumo energético y dimensiones, y su costo.

2.4.1 Capacidades de entrada/salida de interés

Dicha plataforma cuenta, como se mencionó con anterioridad, con 54 pines digitales con capacidad de entrada y salida. La interfaz digital cuenta con capacidades adicionales empleando algunos de estos pines para tareas específicas. Cuenta con 4 interfaces de comunicación serie UART, la primera de ellas se puede reflejar por el puerto USB de la placa con motivos de depuración. Adicionalmente emplea un BUS I2C donde el dispositivo puede trabajar en modo tanto de maestro como de esclavo. Se debe destacar que por esta interfaz de comunicación (I2C) se pueden conectar 112 dispositivos eléctricamente en paralelo, siendo al menos 1 de estos el maestro. Una parte de los pines cuenta con la capacidad de generar salidas con modulación del ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) con una resolución de 8 bits. Presenta también un bus SPI. Cuenta con 16 entradas analógicas con una resolución de 10 bits y un tiempo de lectura de 100 microsegundos.

2.5 Arquitectura de *software*

La arquitectura de *software* que se propone es segmentada en tareas. Esto dota a la aplicación de modularidad y facilita el trabajo de programación. Para la realización del *software* se emplean varias librerías de código abierto.

2.5.1 Librerías y herramientas de *software*

La plataforma cuenta con librerías propias y de *software* libre y puede emplearse el lenguaje de programación C++. Son varias las librerías que son útiles, dentro de estas destacan “WIRE” para el manejo de la interfaz I2C, “SPI” y “SD” para el manejo de unidades de almacenamiento masivo (en formatos FAT y FAT32), y “SERIAL” para el manejo de los puertos serie. También se emplea una implementación de las librerías estándar de C y C++, dentro de las que puede ser útil la librería matemática (“Arduino - Home,” 2018). Adicionalmente se pretende emplear las librerías y el sistema operativo en tiempo real

FreeRTOS, en su versión para la plataforma, con el objetivo de segmentar el código y las diferentes tareas a del sistema. Dicho sistema operativo permite implementar las diferentes tareas de adquisición de forma independiente, y ajustar los tiempos de ejecución mediante su planificador de tareas.

Esta plataforma cuenta con su propio entorno de desarrollo, compiladores y herramientas. Se destaca un monitor del puerto serie sobre USB y una herramienta para graficar variables sobre el mismo protocolo de comunicación (“Arduino - Home,” 2018). Se pueden emplear editores de texto externos para agregar capacidades adicionales como son el autocompletar y sugerir palabras. Notepad++ es un ejemplo de editor externo; adicionalmente tiene la ventaja de ser *software* libre y de podersele agregar una extensión para el lenguaje de la plataforma a emplear.

2.5.2 Arquitectura general de *software*

Empleando varias librerías de las que se mencionan con anterioridad, el propio entorno de desarrollo de la plataforma, se propone una arquitectura de *software* que responda a las demandas del *hardware* que se formula.

De forma general el *software* cuenta con 2 partes:

- Inicio del sistema
- Las diferentes tareas del sistema.

El *software* se propone de la forma más modularmente posible, empleando directivas del preprocesador de C++ para facilitar esto. De esta forma se definen los pines analógicos y digitales que serán empleados a lo largo del programa. Esto permite reorganizar de forma eficiente las entradas y salidas de la aplicación de acuerdo a cambios en la arquitectura de *hardware*. El empleo de dichas directivas permite compilar segmentos de *software* de forma selectiva para, por ejemplo, habilitar secciones de depuración y prueba según sea necesario.

En el comienzo se realiza la inicialización de varias partes del sistema como son los buses de comunicación y las variables globales. En esta parte se registran las tareas en el manejador del sistema para su posterior ejecución. Además se le asignan los recursos de memoria a cada tarea y la prioridad con que se van a ejecutar.

De forma lógica se divide el *software* en partes separadas para cada elemento como pueden ser las variables, librerías, y tareas y funciones de cada sensor, de la manera más independiente posible. También se administran, de forma independiente, la inclusión de recursos adicionales como son la comunicación mediante los buses del sistema.

En la Figura 2.8 se muestra el diagrama general de flujo del *software* propuesto.

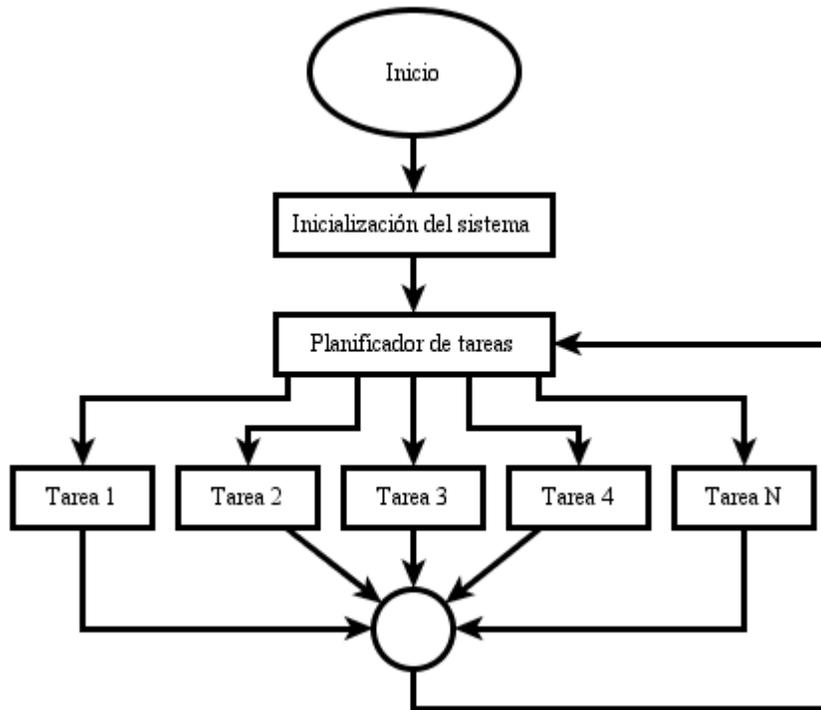


Figura 2.8. Diagrama de flujo de ejecución general del *software* del sistema.

En la sección de cada sensor se declaran sus variables globales, se declaran e implementan sus tareas y se registran en el planificador. Las secciones se delimitan de forma lógica mediante directivas del preprocesador de C++, esto permite deshabilitar en el código el empleo de un sensor deseado sin afectar a los demás, antes de la compilación del *software*. Esto se realiza con el objetivo de configurar el código fuente de una forma eficiente, de acuerdo al prototipo de *hardware* a emplear.

2.5.3 Arquitectura general de una tarea

Las diferentes tareas del sistema se ejecutan de forma independiente y se sincronizan mediante el manejador de tareas del sistema operativo, que se incluye en la librería

“ARDUINO_FREERTOS”. Cada tarea se encarga de un sensor en específico y realiza la adquisición (y en algunos casos filtrado y acondicionamiento de los datos adquiridos) para luego guardarlos en la base de datos.

Cuando una tarea se inicia realiza primero una inicialización (en el caso de ser necesario), para luego ejecutarse de forma cíclica. Cada vez que se ejecuta un ciclo de tarea esta devuelve el control al planificador de tareas, que le asigna recursos del sistema nuevamente cuando lo calcule conveniente. En la Figura 2.9 se muestra el diagrama general de flujo de una tarea.

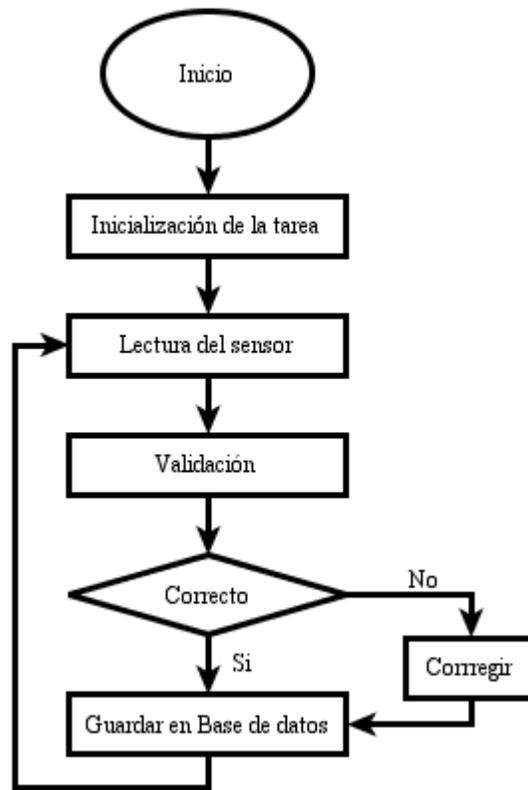


Figura 2.9. Diagrama de flujo de ejecución de una tarea.

2.6 Consideraciones del capítulo

La propuesta de *hardware* muestra un ejemplo de un analizador de gases portable, de bajo costo, dimensiones y reducido consumo energético.

Adicionalmente se muestra las potencialidades de la plataforma Arduino para interconectar varios dispositivos.

Mediante la propuesta de *software* se muestra que la plataforma de cómputo y el *software* libre son lo suficiente maduros como para emplearse en proyectos relativamente complejos.

El *software* presentado cuenta con características suficientes para aprovechar las capacidades del *hardware* formulado.

La modularidad del *software* brinda facilidades de adaptación a diversas situaciones donde no se necesite emplear todos los sensores.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al implementar el sistema tanto en *software* como en *hardware*. Se hace una comprobación del correcto funcionamiento del *software* implementado y se realizan pruebas para corroborar que los sensores son sensibles a los compuestos a los que se exponen.

Para realizar pruebas al sistema se tuvo en cuenta que las herramientas de la plataforma no son suficientes para mostrar el flujo de datos que se presenta con varios sensores. Teniendo en cuenta esto se emplea un *software* hecho a la medida de la aplicación para realizar gráficas en tiempo real y guardar los datos obtenidos en un log. Dicho log puede emplearse como base de datos para analizar los resultados con posterioridad. El *software* cuenta con características que permiten emplear el sistema diseñado como una estación de análisis de gases portable, mediante la conexión USB de la plataforma o mediante la conexión por el puerto serie.

3.1 Comprobación del *hardware*

La comprobación de *hardware* se realiza mediante la interconexión del sistema en general, tras chequear la asignación de pines a cada elemento que forma parte del sistema. Una vez conectado se comprueba que se energicen correctamente todos los elementos y que el sistema arranque. Esto es evidencia de que el consumo se corresponde con los cálculos y no supera las capacidades del sistema.

Para comprobar que las conexiones son correctas se necesita del *software* implementado, al recibir, del mismo, resultados coherentes.

3.2 Pruebas de *software*

Para comprobar el funcionamiento correcto del *software* se debe tener en cuenta que este está ligado fuertemente al *hardware*. Utilizando como ventaja la estructura modular del *software* primeramente se comprueba de forma individual que cada tarea se inicie correctamente y realice algunos ciclos de adquisición de datos, y posteriormente, se comprueba de manera integral.

3.2.1 Prueba de inicialización y adquisición de los datos

Para cada tarea, de forma individual y en modo de depuración, se comprueba por la salida del puerto serie el inicio de la misma. En la Tabla 3.1 se muestran las salidas que corroboran el inicio de cada tarea (se realiza en modo de depuración). En la Tabla 3.2 se muestran las salidas que corroboran la correcta ejecución de cada tarea, esta parte se ejecuta de forma cíclica. La estructura de la salida sigue un formato donde el primer valor es una marca de tiempo en milisegundos relativa al inicio del sistema, posteriormente se agrega un identificador del sensor, le sigue la unidad de medida y termina con el valor de la lectura.

Tabla 3.1 Salida emitida por cada tarea al inicio de su ejecución en modo de depuración.

Tarea por sensor	Indicación de inicio
AM2302	tarea_lecturaSensor_AM2302_DHT22
iAQ-Core	tarea_lecturaSensor_i2c_CalidadAire_mikroe
WSP2110	tarea_lecturaSensor_An_CO2_mikroe
GP2Y1010AU0F	tarea_lecturaSensor_An_pm25
MQ-131	tarea_lecturaSensor_An_O3

Tabla 3.2 Salida que indica la ejecución de forma cíclica de cada tarea.*

Tarea por sensor	Indicación de lectura
AM2302	537940 : temperatura : °C : 28.5 537940 : humedad_relativa : % : 77
iAQ-Core	541190 : CO2_equivalente_i2c : ppm : 6453 541190 : VOC_equivalente_i2c : ppb : 1778

WSP2110	540731 : sensor_An_CO2_mikroe_ppm_co2 : ppm : 0.02 540732 : sensor_An_CO2_mikroe_voltaje : V : 0.26
GP2Y1010AU0F	115046 : sensor_An_pm25_voltajesensor : V : 3.68 115154 : sensor_An_pm25_densidad_polvo : mg/m3 : 0.75
MQ-131	5519 : sensor_An_O3_voltaje_RL : V : 4.46 5587 : sensor_An_O3_ppb : ppb : 8.81

3.3 Prueba general de adquisición y respuesta ante la estimulación controlada del prototipo

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al comprobar el funcionamiento general del sistema, mediante la exposición del mismo a ambientes controlados. Las respuestas coherentes del sistema ante cada prueba demuestran que el sistema realiza una correcta adquisición de datos. Para esto es necesario realizar pruebas reales con el prototipo realizado.

3.3.1 *Software* para la adquisición de datos del analizador de gases

Para observar los resultados de la adquisición en tiempo real, y como medio para acceder a los datos, se realizó una herramienta de *software* que emplea el puerto serie de la plataforma Arduino. Los datos adquiridos se grafican en tiempo real tras su validación, y se guardan en un archivo a forma de base de datos.

Para la realización de esta aplicación se emplea el “*framework*” Qt. En la Figura 3.1 se muestra una captura de la aplicación y las partes que la componen. En la Figura 3.2 se muestra una imagen de una de las gráficas que se generan al conectar el prototipo con la computadora que utiliza la aplicación.

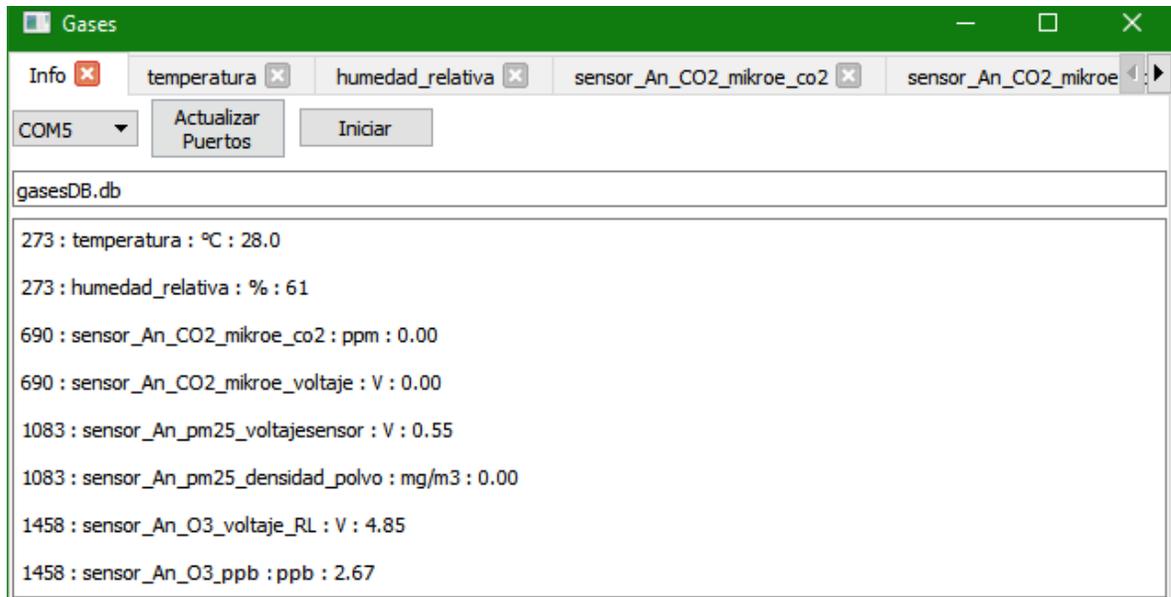


Figura 3.1. Vista de la aplicación desarrollada para la adquisición de datos del analizador de gases propuesto, en su pantalla principal.

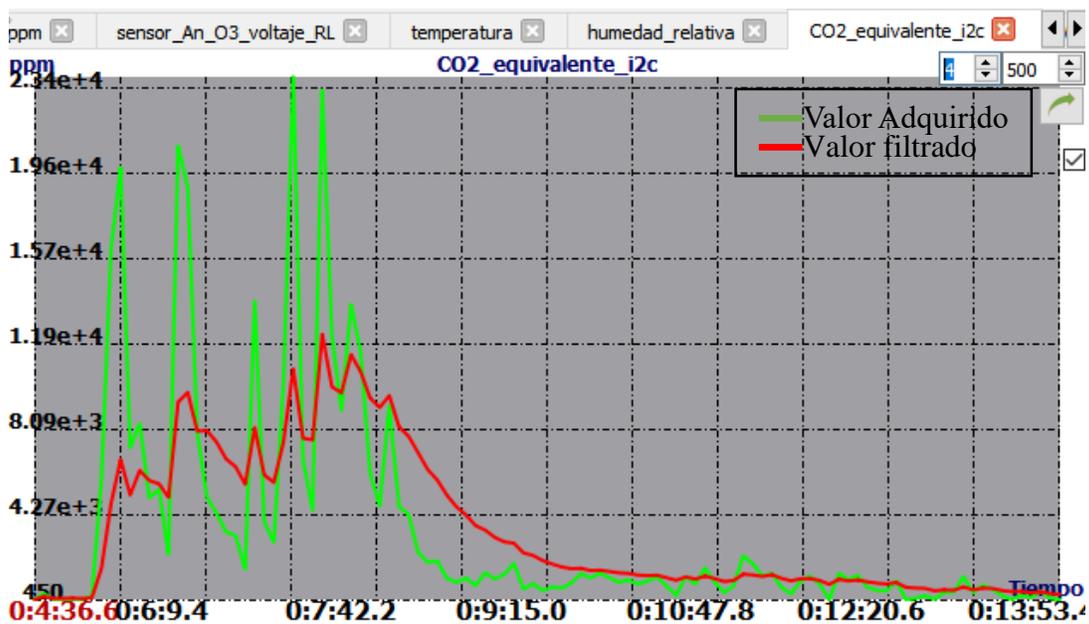


Figura 3.2. Vista de la aplicación realizando una gráfica en tiempo real utilizando los datos adquiridos.

3.3.2 Resultados de las pruebas realizadas

Al exponer un prototipo realizado para pruebas a diversas condiciones se puede observar su respuesta. La respuesta se ve mediante el *software* de adquisición diseñado, tanto para su uso en ambientes reales como para realizar pruebas. En la Figura 3.3 se muestra una imagen del prototipo implementado para las pruebas del sistema.

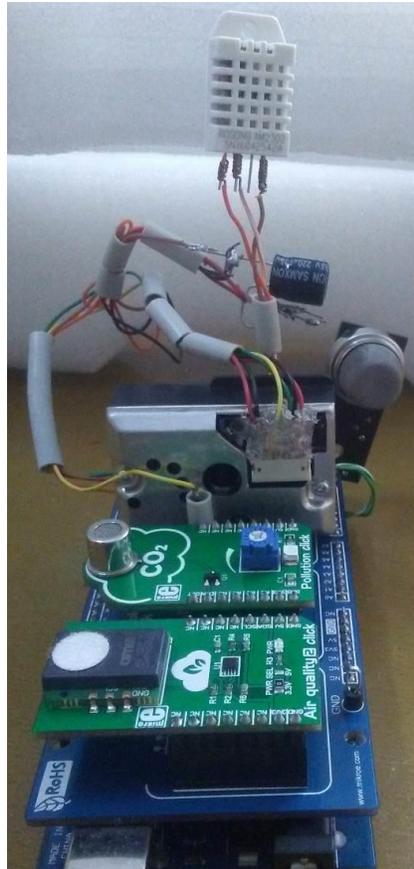


Figura 3.3. Imagen del prototipo del sistema propuesto.

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en varias figuras. En la Figura 3.4 se observa la respuesta obtenida ante un cambio de temperatura durante un intervalo tiempo. Primeramente se expone el sistema a una fuente de aire caliente y se ve el aumento de la temperatura detectado, para luego observar como vuelve a los parámetros normales cuando se retira de la fuente de calor.

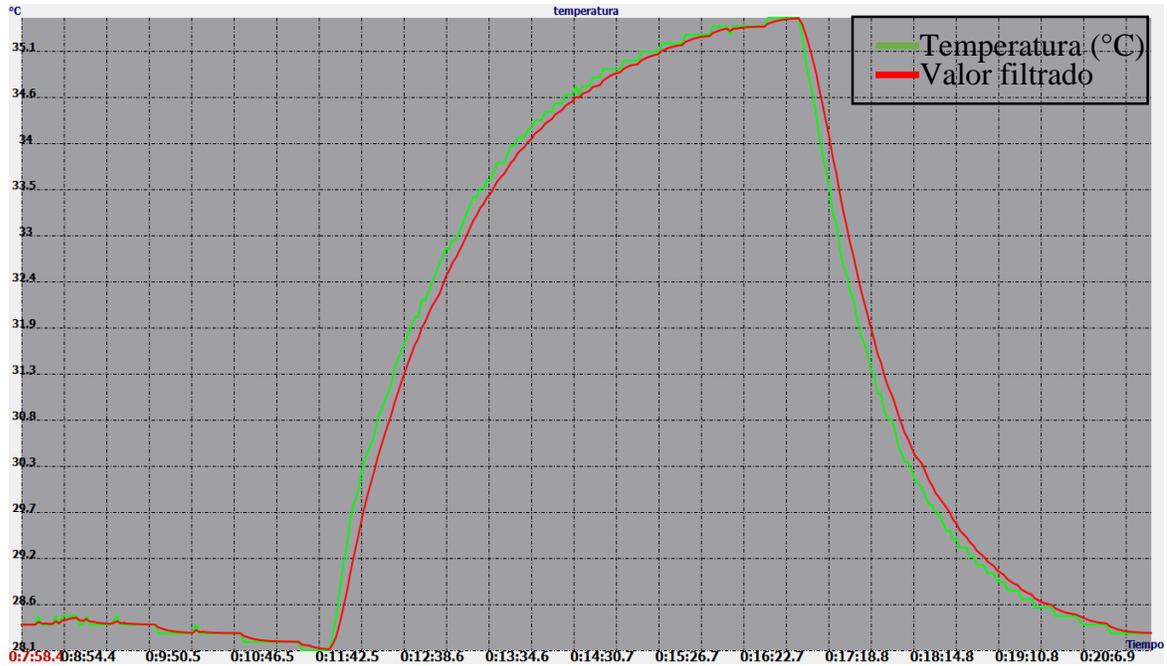


Figura 3.4. Detección de un cambio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en el tiempo (segundos).

A consecuencia del cambio de temperatura se observa en la Figura 3.5 el cambio en la humedad relativa del aire. Se registra una disminución de humedad relativa por el aumento de la temperatura, para luego volver a sus valores iniciales en conjunto con la temperatura



Figura 3.5. Detección de un cambio en la humedad relativa del aire.

Ante la exposición a un compuesto orgánico volátil se observa la respuesta en la Figura 3.6. En la Figura 3.7 se observa la variación del voltaje del elemento sensor ante dicho estímulo.

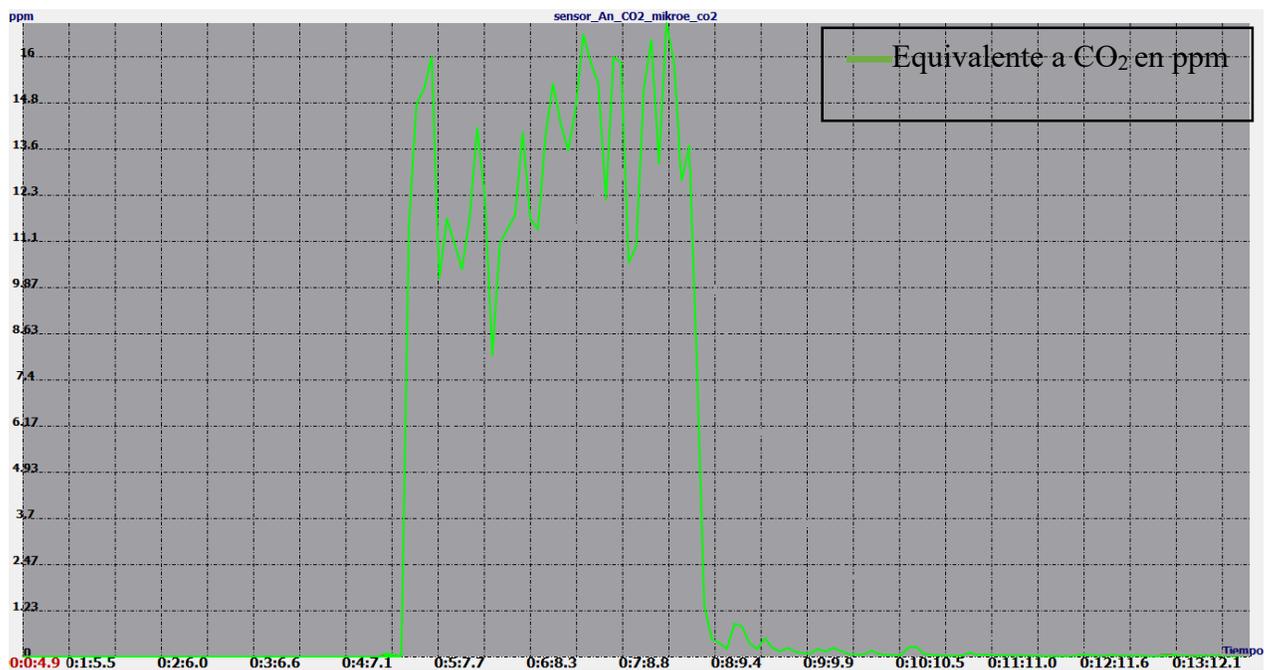


Figura 3.6 Respuesta en el tiempo (segundos) ante la exposición a un compuesto orgánico volátil (ppm).

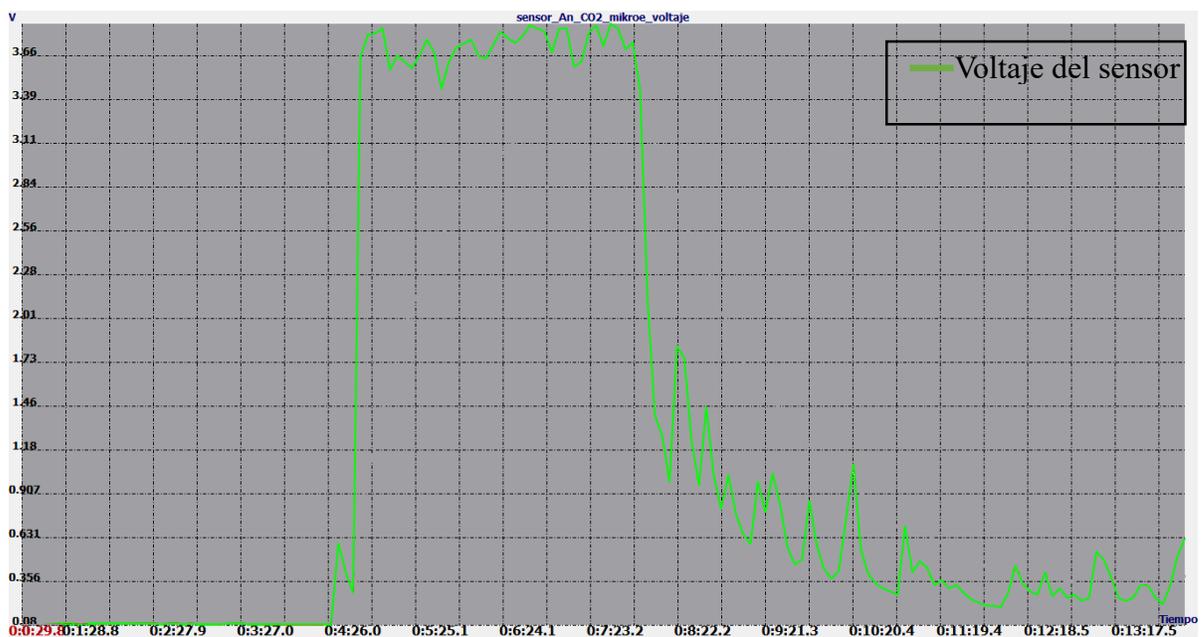


Figura 3.7 Variación de voltaje en el elemento sensor ante la presencia de un compuesto orgánico volátil.

Ante una fuente de dióxido de carbono se registra el aumento de los niveles del elemento. En la Figura 3.8 se observa cómo se registra el cambio.



Figura 3.8 Detección del incremento de la concentración de dióxido de carbono en el tiempo.

Otra prueba realizada al sistema para comprobar la detección de partículas en suspensión, muestra en la Figura 3.9 como va desde la saturación del sensor hasta un valor mínimo. Se observa además una respuesta rápida del mismo dado por su principio de detección fotoeléctrico.

Para comprobar la detección de ozono en el aire se realiza una prueba en descenso de la concentración de la sustancia. En la Figura 3.10 se observa como desciende la concentración en el tiempo ante una disminución del elemento en el ambiente creado.

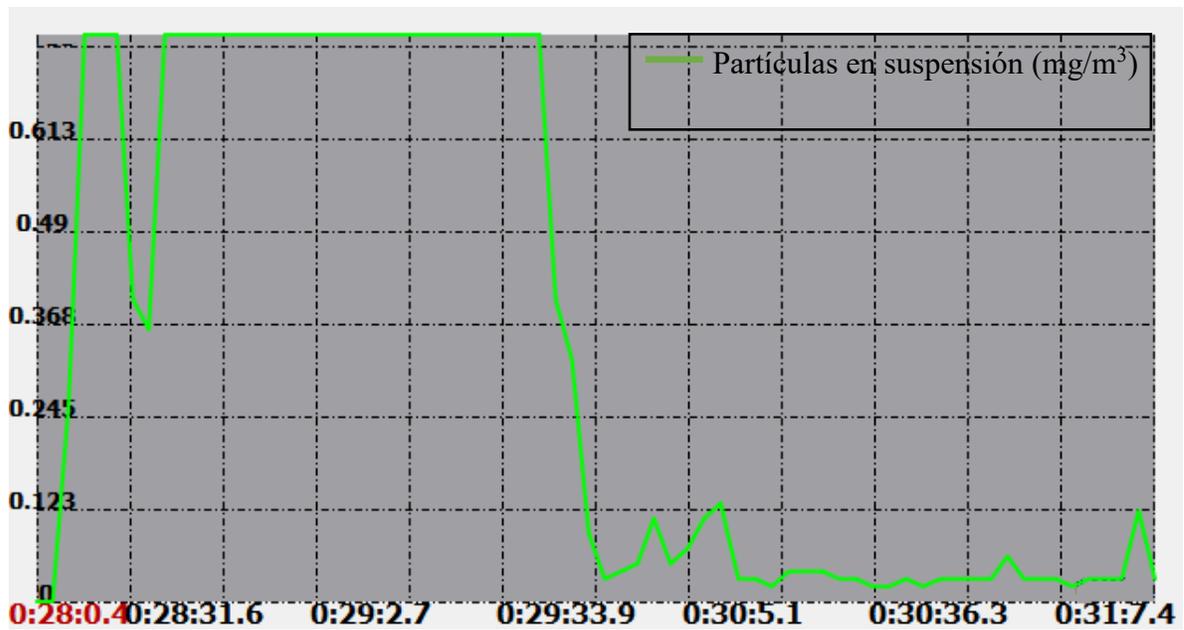


Figura 3.9 Detección de la concentración de partículas en suspensión con respecto al tiempo.

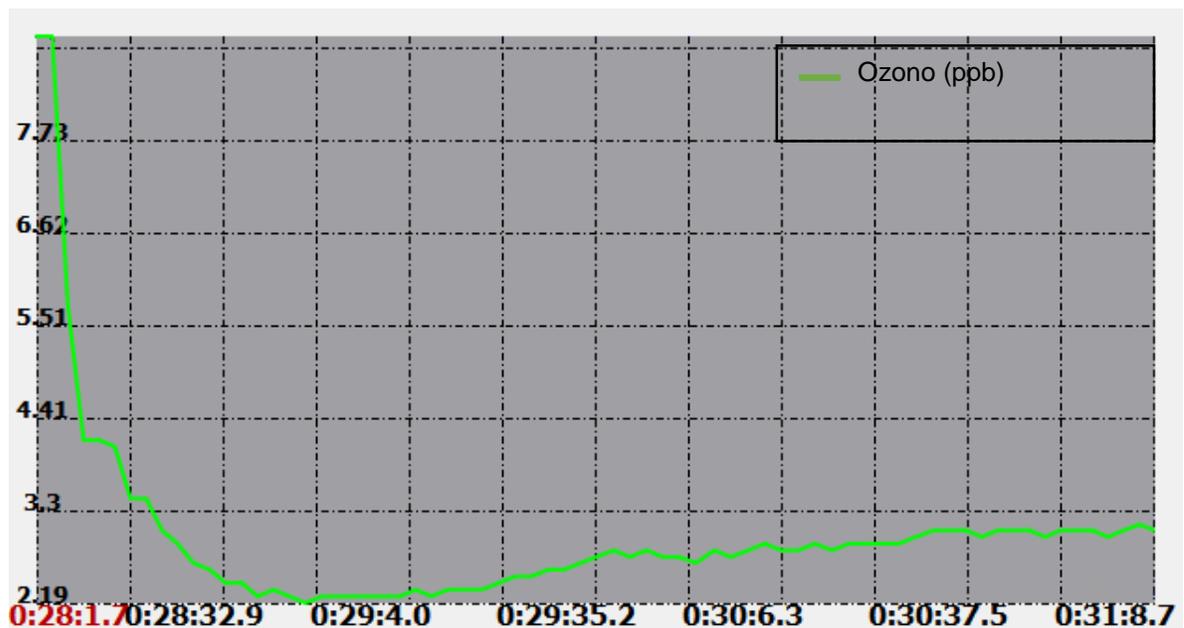


Figura 3.10 Disminución de la concentración de ozono (en ppb) en el tiempo (en segundos).

3.4 Análisis económico y medio ambiental

Se muestra el impacto económico y medio ambiental del proyecto. Para esto se tienen en cuenta el costo del equipamiento y el impacto ambiental del proyecto que se considera positivo.

3.4.1 Análisis económico

El proyecto tiene buen impacto económico debido a que al basarse en *software* y *hardware* libres no se pagan costos adicionales por efecto de las licencias. Los costos se centran en los recursos de *hardware* que son de bajo costo. Debe tenerse en cuenta que realizar un desarrollo requiere recursos humanos y materiales adicionales.

La Tabla 3.1 muestra los costos por componente empleado de los elementos más significativos.

Tabla 3.1 Precios para cada componente que se emplea en el proyecto

Elemento	Precio (USD)
Sensor de compuestos orgánicos volátiles (iAQ-Core)	79.00
Sensor para Partículas en suspensión (GP2Y1010AU0F)	11.25
Sensor de Humedad temperatura (AM2302)	12.99
Sensor de ozono (MQ-131)	26.99
Sensor de compuestos orgánicos volátiles (WSP2110)	49.00
Unidad de cómputo (Arduino MEGA2560)	35.00
<i>Arduino click shield</i> (Adaptador eléctrico)	9.50
Total	223

Estos costos se consideran mínimos en comparación a los equipos profesionales que se observan en el capítulo 1.

3.4.2 Análisis ambiental.

Se considera el proyecto con un impacto ambiental positivo dado que permite medir los parámetros ambientales sin producir contaminación u otro efecto adverso.

Medir los parámetros ambientales, en este caso la composición de la atmósfera, brinda varias posibles aplicaciones enfocadas en el manejo ambiental. Se debe tener en cuenta que para realizar cualquier acción ya sea preventiva o correctiva se necesita saber las condiciones en que se encuentra el ambiente.

Tener un dispositivo de bajo coste, dimensiones y consumo energético permite una mayor movilidad y facilidad de colocación del mismo en ambientes aislados donde normalmente no se pueden poner dispositivos convencionales. Basado en un dispositivo con estas características se pueden realizar desarrollos para adaptarlo a otras aplicaciones con carácter ambiental.

3.5 Consideraciones del capítulo

Los datos presentados confirman la hipótesis propuesta. Se considera válido el empleo de *hardware* libre y de bajo costo así como de *software* libre para el desarrollo de aplicaciones útiles a la sociedad. En la parte económica se considera que la diferencia de costos de la propuesta es relevante referido a los equipos profesionales presentados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El uso de sensores de bajo costo es viable para este tipo de aplicaciones, solo trae aparejado el inconveniente de un mayor esfuerzo de diseño.

La plataforma Arduino cuenta con características indispensables para la realización del sistema, de conjunto con los sensores seleccionados.

La arquitectura de hardware y software desarrollada, satisface las necesidades básicas de la aplicación.

Se diseñó un sistema de bajo costo, consumo energético y reducidas dimensiones, que es una alternativa viable, cuando las prestaciones requeridas no son muy elevadas.

Las pruebas reales con el sistema diseñado arrojaron resultados adecuados a las prestaciones del sistema.

Recomendaciones

Se recomienda, por su impacto negativo probado, y siguiendo las sugerencias de varios organismos reguladores (principalmente la OMS) medir los compuestos que se mostraron en la Tabla 1.1 y en la Tabla 1.2. Para los rangos de medición que se sugieren se tienen en cuenta además las características de los equipos profesionales tratados en el trabajo.

En la siguiente tabla se muestran los rangos de medición sugeridos para los compuestos que se consideran de interés.

Compuesto	Rango de medición sugerido (ppm).
Monóxido de carbono	0 a 50
Dióxido de nitrógeno	0 a 0.2
Ozono	0 a 0.5
Dióxido de azufre	0 a 20
Partículas en suspensión	0 a 2000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

A pesar de considerarse como adecuados los elementos que se miden en los sensores propuestos, se recomienda realizar un análisis profundo de sensores de bajo costo para obtener mejores prestaciones. Se deben tener en cuenta los rangos recomendados con anterioridad.

Se recomienda calibrar los sensores en los intervalos de tiempo recomendados por su fabricante. Se considera que puede mejorar la validez de los datos adquiridos, y garantiza la calidad de estos para aplicaciones científicas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

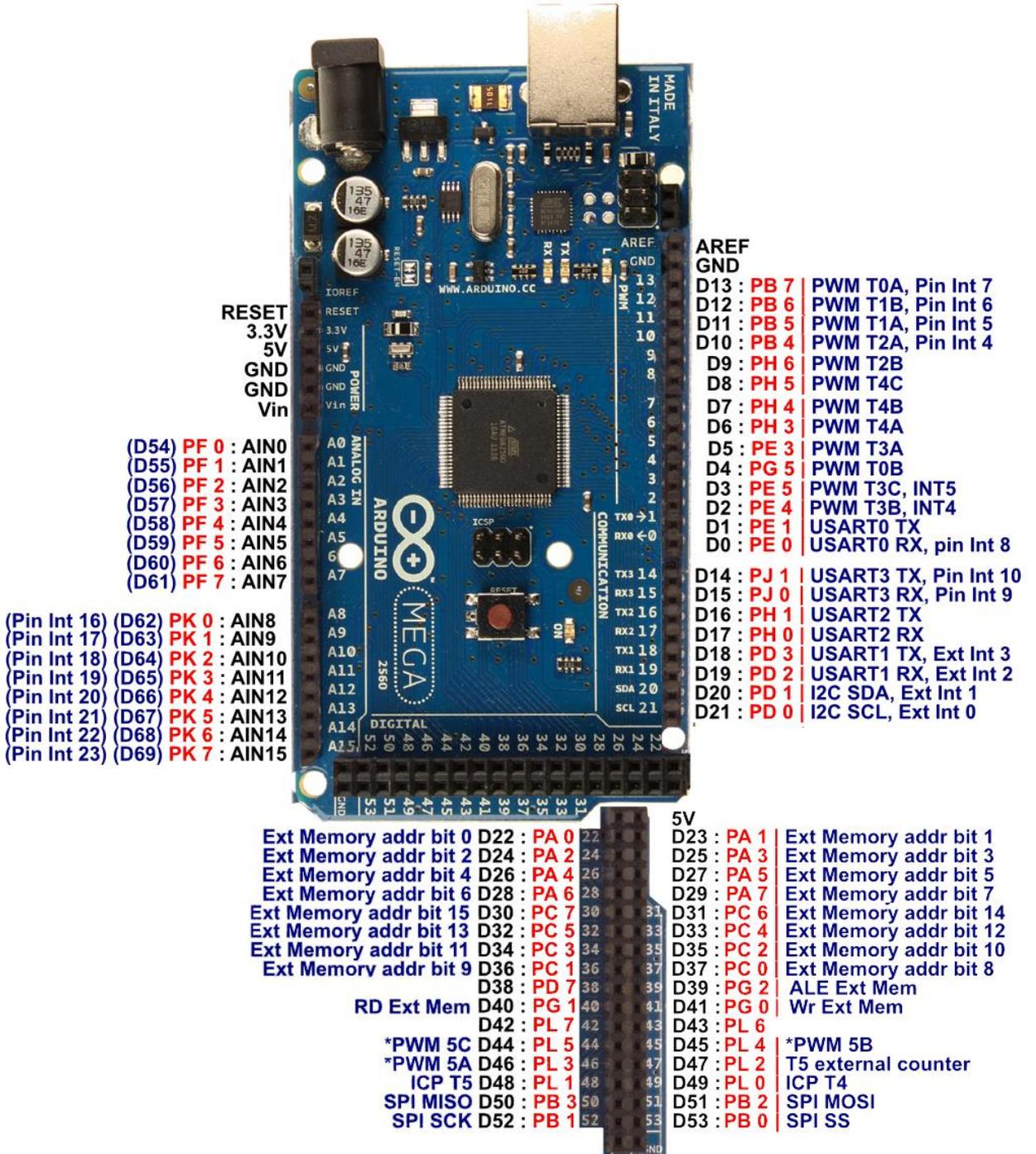
- Abdel-Shafy, H.I., Mansour, M.S.M., 2016. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt. J. Pet.* 25, 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
- Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits [WWW Document], 2018. URL <https://www.adafruit.com/> (accessed 3.28.18).
- Amable Álvarez, I., Méndez Martínez, J., Rodríguez, B., María, B., Benítez Fuentes, B., Blanco, E., Manuela, L., Zamora Monzón, R., 2017. Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Rev. Médica Electrónica* 39, 1160–1170.
- Arduino - Home [WWW Document], 2018. URL <https://www.arduino.cc/> (accessed 4.20.18).
- Bagula, A., Zennaro, M., Inggs, G., Scott, S., Gascon, D., 2012. Ubiquitous sensor networking for development (usn4d): An application to pollution monitoring. *Sensors* 12, 391–414.
- Candelaria, T.-R.M., Ebelia, D.Á.-M., Germán, B.-M.R., Elena, H.-M.N., 2015. Corrosividad atmosférica del cobre y del acero en dos localidades de Villahermosa, Tabasco. *Ing. Investig. Tecnol.* 16, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.004>
- Colville, R.N., Hutchinson, E.J., Mindell, J.S., Warren, R.F., 2001. The transport sector as a source of air pollution. *Atmos. Environ.* 35, 1537–1565. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00551-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00551-3)
- Compra arduino sensor gas y disfruta del envío gratuito en AliExpress.com [WWW Document], 2018. URL https://es.aliexpress.com/wholesale?catId=0&initiative_id=AS_20180328115641&SearchText=arduino+sensor+gas (accessed 3.28.18).
- Delgado-Castro, A., Rojas-Bolaños, O., Delgado-Castro, A., Rojas-Bolaños, O., 2015. Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases. *Educ. Quím.* 26, 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.07.001>
- Estación de monitorización ambiental [WWW Document], 2017. URL <http://sensovant.com/productos/meteorologia/estaciones-meteorologicas/gases->

- contaminantes/articulo/estacion-monitorizacion-ambiental-SVT-EMA.html (accessed 3.28.18).
- Estaciones Portátiles: Aeroqual AQM65 [WWW Document], 2017. URL <http://www.ayt.cl/es/productos/estaciones-de-medicion-de-calidad-de-aire/estaciones-portatiles/aeroqual-aqm65-detail> (accessed 3.28.18).
- Guo, Y., Zeng, H., Zheng, R., Li, S., Barnett, A.G., Zhang, S., Zou, X., Huxley, R., Chen, W., Williams, G., 2016. The association between lung cancer incidence and ambient air pollution in China: A spatiotemporal analysis. *Environ. Res.* 144, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.11.004>
- Jiménez Borges, R., Monzón, M., Alejandro, J., Rodríguez, L., Josefa, M., Moya, V., Armando, D., 2016. Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un generador de vapor. *Ing. Energética* 37, 135–143.
- Jung, D.-Y., Leem, J.-H., Kim, H.-C., Kim, J.-H., Hwang, S.-S., Lee, J.-Y., Kim, B.-J., Hong, Y.-C., Hong, S.-J., Kwon, H.-J., 2015. Effect of Traffic-Related Air Pollution on Allergic Disease: Results of the Children's Health and Environmental Research. *Allergy Asthma Immunol. Res.* 7, 359. <https://doi.org/10.4168/aaair.2015.7.4.359>
- M, J.J.M., M, A.G., Muñoz, P.A., 2016. Diseño e implementación de un analizador básico de gases para emisiones vehiculares (HC, CO y CO₂), desarrollado bajo la plataforma android. *Ing. Región* 15, 57–64. <https://doi.org/10.25054/22161325.1179>
- Medidor de gases T4 10er Set | PCE Instruments [WWW Document], 2017. URL https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-gases-crowcon-detection-instruments-ltd.-medidor-de-gases-t4-10er-set-det_5841469.htm?_list=qr.art&_listpos=1 (accessed 3.28.18).
- Padilla, E.H., Gil, L.L.P., Padilla, G.A.H., Gomez, L.B., 2015. Degradación de aceros estructurales por lluvia ácida.
- Ramírez, R.R., Olmos, H.I., 2016. Efectos al ambiente de la lluvia ácida Environmental effects of acid rain. *Nat. Tecnol.*
- Rojas, A.J., Gonzalez, L.F., Motta, N., Villa, T.F., 2015. Design and flight testing of an integrated solar powered UAV and WSN for remote gas sensing, in: 2015 IEEE Aerospace Conference. Presented at the 2015 IEEE Aerospace Conference, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119209>
- Roldán Gómez, J.J., 2014. Sistema sensorial embarcado en un mini-UAV para la medida de las variables ambientales de un invernadero (masters). E.T.S.I. Industriales (UPM), Madrid.
- Rossi, M., Brunelli, D., Adami, A., Lorenzelli, L., Menna, F., Remondino, F., 2014. Gas-Drone: Portable gas sensing system on UAVs for gas leakage localization. *IEEE*, pp. 1431–1434. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985282>
- Rozo, E.J.V., 2016. Medición de contaminación mediante UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado). *Mundo FESC* 1, 16–26.
- Seed Studio Official Forum and Community [WWW Document], 2018. URL <https://www.seeed.cc/> (accessed 3.28.18).

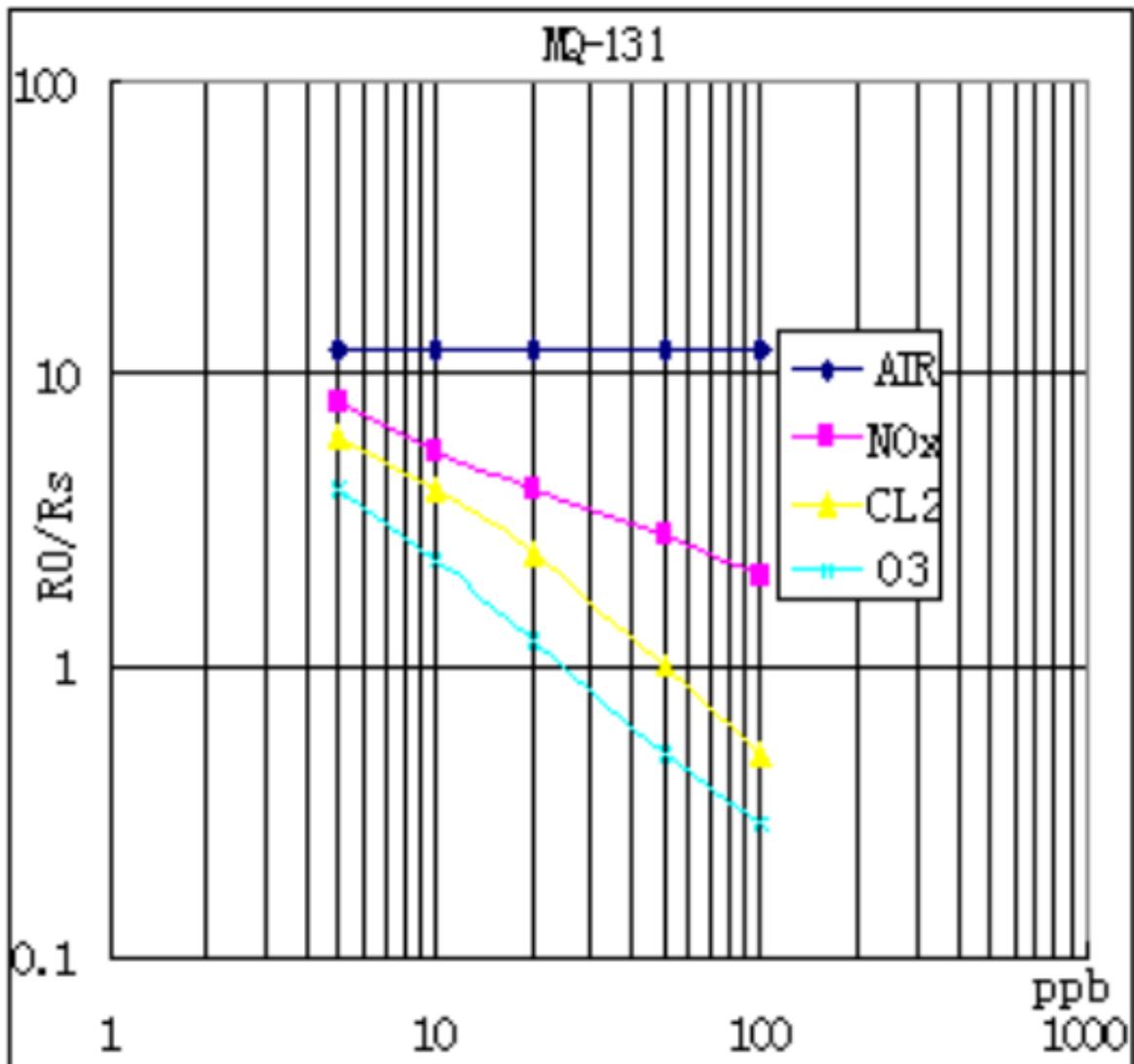
- SparkFun Electronics [WWW Document], 2018. URL <https://www.sparkfun.com/> (accessed 3.28.18).
- Vargas V., S., Lange V., D., 2015. Sistema aéreo de medición de gases contaminantes basado en un UAV, resultados preliminares. *Acta Nova* 7, 194–212.
- Waspote Technical Guide (v12) | Libelium [WWW Document], 2018. URL <http://www.libelium.com/development/waspote/documentation/waspote-technical-guide/> (accessed 5.9.18).
- XGA301 Industrial Gas Analyzer - Michell Instruments | UK [WWW Document], 2016. URL <http://www.michell.com/uk/products/xga301.htm> (accessed 3.28.18).
- Yi, W.Y., Lo, K.M., Mak, T., Leung, K.S., Leung, Y., Meng, M.L., 2015. A survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems. *Sensors* 15, 31392–31427.

ANEXOS

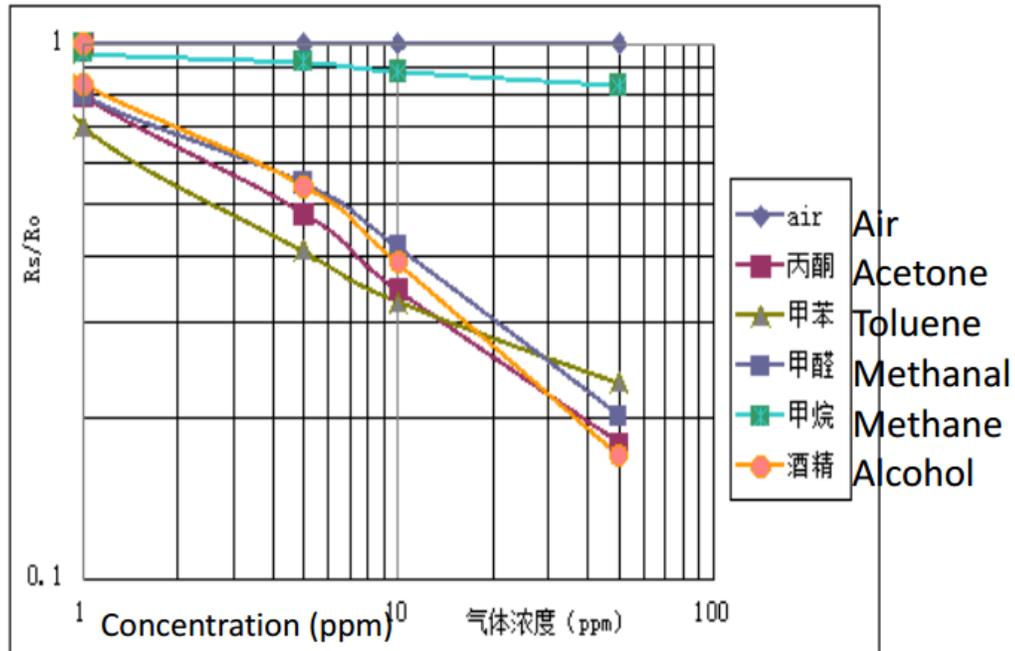
Anexo I Diagrama donde se muestran las diferentes entradas y salidas de la placa Arduino Mega2560



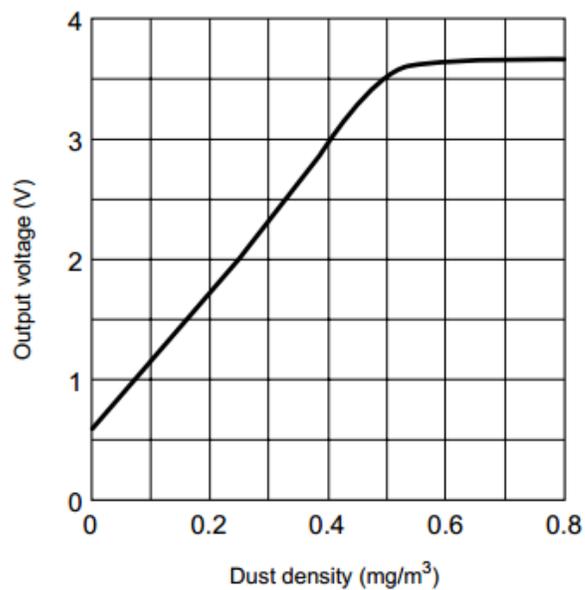
Anexo II Relación de la razón de cambio de resistencia, con respecto a la concentración de las sustancias que detecta el sensor MQ-131.



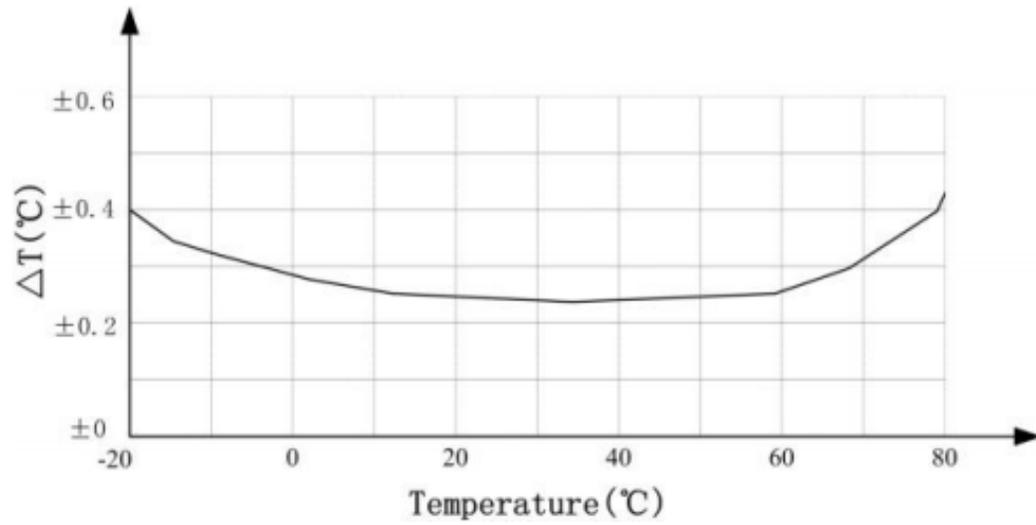
Anexo III Relación de la razón de cambio de resistencia, con respecto a la concentración de las sustancias que detecta el sensor WSP2110.



Anexo IV Relación de la salida de voltaje del sensor de partículas en suspensión en relación a la cantidad de partículas detectadas



Anexo V Error en la lectura de temperatura del sensor AM2302 (DHT22) en dependencia de la temperatura en que se encuentra



Anexo VI Error en la lectura de humedad relativa del sensor AM2302 (DHT22) en dependencia de la humedad en que se encuentre

