

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales



*Monitorización de la presencia y calidad de aire indoor de bajo coste
mediante Raspberry Pi*

Luis Menéndez Domínguez

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Director del trabajo

Joaquín Ordieres Meré

Diciembre 2018

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por estar siempre conmigo, preguntar todos los días cómo llevaba el trabajo y no permitirme dejar las cosas para otro momento.

A mi padre por el contrario, por no presionarme nunca pero sabiendo que él iba a estar apoyándome siempre.

A los de siempre, *A Todo Gauss* (en especial a Bea, Elena, Espa y Pablo) y a los de ahora (Chechu, José, Lucía y Montse), gracias por aguantarme.

RESUMEN

Sería necio negar que, a los niveles a los que está llegando el consumo de energía, junto con el crecimiento constante de la población, el futuro de la humanidad en el planeta Tierra se torna desalentador. El desarrollo sostenible es un término que debería conocerse y aplicarse, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia y eficacia en el uso de los recursos y con ello lograr una estancia de mejor calidad y más duradera en nuestro planeta.

La llegada del nuevo milenio trajo consigo una mayor identificación con este concepto socioeconómico, llevando a los países más influyentes y poderosos a reunirse en varias ocasiones y alcanzar acuerdos. En septiembre del año 2000, representantes de los 189 países miembros de la ONU acordaron una serie de objetivos a cumplir para el año 2015, los Objetivos del Milenio (Figura 1). Esta iniciativa tuvo un éxito moderado, debido a que los objetivos no eran demasiado ambiciosos y la mayoría de ellos se centraban en su cumplimiento en los países en vías de desarrollo. Es por ello que a pesar de que en el año 2015 eran muchos los países que se regocijaban en el cumplimiento de estos objetivos, la mayoría de ellos ya los cumplían en el año en el que se firmó el acuerdo. Es representativo indicar que Sudáfrica fue el único país africano en lograrlo, Emiratos Árabes Unidos y Catar los únicos países de Oriente Medio en conseguirlo, Nueva Zelanda y Australia los únicos oceánicos, e incluso de los países del este de Europa solo Turquía, Ucrania y Rusia fueron capaces de ello.

Al terminar el plazo de los Objetivos del Milenio, fueron 193 los países que decidieron participar en el nuevo acuerdo propuesto por la ONU. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (Figura 2) buscan una mayor implicación tanto de los países desarrollados como los que están en vías de desarrollo y es por ello que abarcan un espectro más amplio, abordando las causas de los problemas y no solo los síntomas. De los 17 objetivos propuestos se extrae que la causa última es "Erradicar la pobreza extrema. Combatir la desigualdad y la injusticia. Solucionar el cambio climático"[1].



Figura 1: Objetivos del Milenio

Este proyecto se enmarca en objetivo número 11: “Ciudades y comunidades sostenibles”, con el objetivo de desarrollar un sistema de configuración flexible que obtenga información relativa a la calidad del aire y a otros aspectos relacionados en ambientes de interior, con el objetivo de suministrarla a un repositorio centralizado que permita un análisis a posteriori de los mismos. Permite al usuario, así como a cualquiera con acceso a los resultados, tener una primera idea de los parámetros de calidad del aire en interiores y de otras magnitudes físicas, pudiendo con ello tomar medidas relacionadas con el bienestar, la salud y la calidad del aire interiores, así como del rendimiento energético del espacio en el que el sistema está siendo utilizado.

El montaje a partir de sensores comerciales de bajo coste permite una mayor flexibilidad, además de ser económicamente factible para aquellos con un presupuesto más limitado y que quieren tener unas primeras nociones relativas a la calidad del aire en su empresa o incluso en su propia vivienda.

Antes de comenzar con el desarrollo del sistema, puede resultar de ayuda conocer mejor el contexto. Además de los ya mencionados Objetivos de Desarrollo Sostenible, debe entenderse la situación en la que se encuentra España en materia de sostenibilidad y de medio ambiente. Con ello se puede llegar a la conclusión de si este proyecto puede resultar realmente relevante para un grupo de interés de la sociedad del país o si por el contrario, la concienciación con el medio ambiente aún no se ha desarrollado hasta el punto en el que sistemas como estos despierten interés alguno.



Figura 2: Objetivos de Desarrollo Sostenible

Consultando los últimas encuestas del CIS (Centro de Investigaciones Sociológicas) en materia de ecología y medio ambiente [2]–[4] y a los barómetros (encuestas de carácter general) más recientes [5] se llega a las siguientes conclusiones.

En primer lugar es evidente que si se ve desde un espectro más general, el medio ambiente no se encuentra entre los temas por los que más se preocupan los ciudadanos. La mayoría de ellos se decanta por temas sociales, económicos, políticos y de violencia; problemas mucho más presentes en la actualidad, debidos en parte a la crisis reciente y a la inestabilidad política. Esto causa que solo un 0,4% de los encuestados tiene a los problemas referidos al medio ambiente como una de sus preocupaciones. Aun así, si se le pregunta directamente por estos temas se puede extraer que existe un interés creciente en asuntos medioambientales, una necesidad de acabar con la desinformación presente por lo general en estos aspectos. Como curiosidad, en el barómetro de enero de 2014 [6] un 3,8% de los encuestados se definen políticamente como *ecologistas* (Figura 3), un valor nada desdeñable teniendo en cuenta que el porcentaje correspondiente a la opción más elegida es un 12,7%.

El sistema ideado podría resultar de interés no solo a empresas que lo necesiten para cumplir con las normativas y los valores límites de contaminantes, sino también para aquellas que busquen satisfacer el interés de sus empleados proporcionando información sobre la contaminación ambiental en interiores, o a personas que busquen monitorizar sus propios hogares.

También se observa que varias de las preocupaciones sobre salud a escala local, como el aumento de problemas respiratorios y las alergias, y sobre el planeta (la contaminación atmosférica, la contaminación acústica y la falta de equipamiento para la protección del medio ambiente) tienen relación directa con la idea del proyecto y por tanto su ejecución podría ayudar a combatir estas preocupaciones. Aun así es importante tener en cuenta que no es en sí mismo una solución, sino una medida preventiva útil para recopilar información y poder utilizarla después para tomar medidas correctoras.

Pregunta 10

¿Cómo se definiría Ud. en política según la siguiente clasificación?

Conservador/a	11,8
Demócrata cristiano/a	4,7
Liberal	12,7
Progresista	9,3
Socialdemócrata	4,6
Socialista	12,6
Comunista	2,2
Nacionalista	3,1
Feminista	1,4
Ecologista	3,8
Otra respuesta	3,2
Apolítico/a	4,9
N.S.	16,2
N.C.	9,6
(N)	(2.480)

Figura 3: Espectro político de la población de España en 2014. Fuente CIS estudio 3011 el 01/01/2014 http://www.cis.es/cis/export/sites/default/-Archivos/Marginales/3000_3019/3011/es3011mar.pdf

Por otra parte es interesante conocer los órdenes de magnitud y los valores límite de los parámetros a medir. Para ello se consultan las guías de calidad de aire europeas [7]–[9] proporcionadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO en inglés). Los valores límite permitidos quedan reflejados en la Tabla 1.

Parámetro	Valor límite según la OMS
PM₁₀	100 µg/m ³ (media diaria)
Ozono	100 µg/m ³ / 51 ppb
Dióxido de carbono	5000 ppm (media de 8 horas)
Monóxido de carbono	10 mg/m ³ / 10 ppm (media de 8 horas)
Benceno	17 µg/m ³ (un caso de cáncer cada 10000)
Formaldehído	0,1 mg/m ³ (exposición durante 30 minutos)
Temperatura	Rango 17-27°C (trabajos sedentarios) Rango 14-25°C (trabajos no sedentarios)
Humedad	Rango 30-70%
Luz	300 lux para oficinas
Ruido	80-87 dB (picos de hasta 135-140 dB)
Radón	Riesgo de cáncer: $3-6 \times 10^{-5}$ por Bq/m ³

Tabla 1: Valores límite de los parámetros a medir

Una vez visto el rango de medidas se eligen los sensores comerciales más adecuados. En un proyecto como este no es tan importante la resolución del sensor, basta con que sea suficientemente preciso y que sea económico para mantener el prototipo como sistema integrado de bajo coste. Debe comprobarse el funcionamiento adecuado de cada uno de los sensores por separado antes de integrarlos en el prototipo.

A continuación comienza el grueso del trabajo. Utilizando las librerías proporcionadas por los fabricantes del sensor o creando unas propias se debe llegar a funciones que consulten el valor digital de los sensores y transformen la señal en el valor real medido en las unidades requeridas. El lenguaje en el que se desarrolla el proyecto es Python, debido a su compatibilidad con la Raspberry que ejerce la labor de procesador y a que es el lenguaje más utilizado en este tipo de aplicaciones de IoT y la mayoría de las librerías existentes están escritas en este lenguaje.

La parte de programación se desarrolla en detalle en la metodología, además de poder encontrarse el código completo en los anexos, pero en resumidas cuentas se trata de crear un programa capaz de leer uno por uno los sensores y mostrar los valores obtenidos por pantalla. Debido a que este objetivo quedaba algo corto y se disponía de tiempo suficiente, el programa desarrollado finalmente utiliza la Raspberry como estación remota, capaz de leer el estado de los sensores y de transmitir los valores a otros dispositivos mediante el uso de un protocolo de transmisión de datos llamado MQTT, típico de proyectos en el marco de Internet of Things. Además, almacena los datos obtenidos en una base de datos para su posterior consulta y tratamiento, haciendo que los datos no solo queden recogidos en los dispositivos que así lo deseen sino que también quedan almacenados en la nube, accesible mediante una cuenta en phpMyAdmin.

El desarrollo actual del proyecto acaba de manera satisfactoria, habiendo cumplido los objetivos propuestos en un primer momento, pudiendo incluso ampliarlos y llegar a un sistema más depurado y más útil. El único punto negativo ha sido el funcionamiento durante las pruebas de comportamiento en servicio de alguno de los sensores, llegando a desecharse el uso del sensor de COVs debido a la inexactitud de las medidas con el paso del tiempo, además de problemas menores como el calentamiento excesivo de los sensores de CO y ozono y las medidas no del todo fiables del sensor de sonido.

De este modo, queda pendiente para desarrollo futuro del proyecto la adición de nuevos sensores, el tratamiento y gestión de los datos, como elaboración de gráficas, selección o cribado; y el montaje de un prototipo final, que resulte atractivo al usuario y que consiga una correcta disipación del calor generado sin entorpecer la medida de los sensores.

Códigos UNESCO [10]

2509.02	Contaminación Atmosférica (Ver 3308.01)
330801	CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA (ver 2509.02)
330804	INGENIERIA DE LA CONTAMINACION
220307	CIRCUITOS INTEGRADOS (ver 3307.03)
330703	DISEÑO DE CIRCUITOS (ver 2203.01 y 02 y 2203.07)

Fuente: Resolución del 23 de septiembre de 1983 (BOE 14 de octubre). Ministerio de Ciencia y Tecnología

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
METODOLOGÍA	17
Estudio ambiental previo	19
Análisis de la conciencia ambiental en España	19
Valores límite de los parámetros a medir	23
Componentes del medidor	31
Raspberry Pi 3 modelo B	31
Teclado	33
Sensor de humedad y temperatura	33
Sensor de CO2	34
Sensor de compuestos orgánicos volátiles	35
Sensor de luz	35
Sensor de presión.....	37
Sensor de sonido	38
Sensor de presencia	39
Sensor de ozono	40
Sensor de CO	41
Aspecto final del sistema	43
Programación	49
Comprobación del sistema y pruebas	59
RESULTADOS	61
• Temperatura.....	61
• Humedad	62
• Presión atmosférica.....	62
• Concentración de CO2.....	63
• Concentración de CO.....	64
• Concentración de ozono.....	64
• Intensidad del sonido	65
CONCLUSIONES	67
LÍNEAS FUTURAS	69
BIBLIOGRAFÍA	71

PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO	75
Planificación	75
Presupuesto	77
ABREVIATURAS, UNIDADES Y ACRÓNIMOS	79
GLOSARIO.....	81
ANEXOS	85
Anexo I: Código emisor.....	85
Anexo II: Código cliente.....	89

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de estrategias tendentes a potenciar elementos estructurales de sostenibilidad como reducción del consumo energético, cuidando además los aspectos de bienestar y calidad del aire interior es preciso desarrollar una adecuada captura y almacenamiento de información que permita una toma de decisiones fundamentada en indicadores. Es por ello que este proyecto pretende desarrollar un sistema de configuración flexible que obtenga información relativa a la calidad del aire y a otros aspectos relacionados en ambientes de interior, con el objetivo de suministrarla a un repositorio centralizado que permita un análisis a posteriori de los mismos para ayudar a tomar medidas relacionadas con la salud y la comodidad de los presentes. Además, el montaje del sistema a partir de elementos de bajo coste y sensores comerciales hace que el producto final pueda ser mucho más asequible para usuarios menos especializados en la materia y que les permita un análisis, aunque sea menos preciso que en sistemas existentes, suficiente para detectar problemas en el entorno de trabajo y por un precio más adecuado a su presupuesto.

Durante mucho tiempo, los únicos contaminantes que han tenido relevancia suficiente para medirse han sido los presentes en el aire exterior, por lo que la mayoría de sistemas consistían en estaciones situadas al aire libre y que medían concentración de gases contaminantes, como los óxidos de azufre y nitrógeno, y gases causantes del efecto invernadero, principalmente CO₂. En las dos últimas décadas del siglo pasado se comienzan a estudiar los problemas derivados de una incorrecta ventilación [11], los efectos producidos por altas concentraciones de algunos compuestos como los COVs [12] y por otras variables físicas como la humedad o la temperatura [13]. No es hasta bien entrada la década de 2000 cuando empiezan a idearse los primeros sistemas en base a sensores integrados con el propósito de recoger datos de calidad de aire interior, pero los primeros sistemas son o bien complicados y costosos [14], o se centran en la medición de pocos parámetros o incluso cumplen ambos inconvenientes al mismo tiempo [15]. Hay que esperar hasta esta misma década para encontrar el desarrollo de sistemas en los que es de vital importancia la sencillez, incluso para darles portabilidad, y sobre todo el bajo coste, pudiendo encontrarse prototipos similares al que se va a plantear (del tamaño de la palma de una mano) utilizando Arduino y varios sensores comerciales [16]. Este proyecto queda a medio camino entre el indicado en [16] y otros más complejos y precisos, debido a que mantiene la filosofía del bajo coste, la sencillez y la flexibilidad; pero incluyendo un número de sensores mayor que el presente habitualmente para proporcionar una información más detallada y extensa sobre el ambiente. Sensores como los de ozono, presencia, sonido o luz no suelen estar presentes en sistemas de este tipo y hace que este sistema se diferencie de otros ya presentes en el mercado como los de Aeroqual (Figura 4), TSI o un proyecto similar en el coste y la aplicación, pero más refinado como Foobot® (Figura 5), un producto de la empresa Airboxlab.



Figura 4: Aeroqual series 930



Figura 5: Foobot, junto con su interfaz para smartphone

OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto y el porqué de su concepción es el de satisfacer una necesidad. La creciente sensibilización de la población por el medio ambiente y la importancia de la responsabilidad social corporativa en las empresas (RSC), en este caso en el área de la sostenibilidad (tanto hacia el exterior como el interior de la propia empresa) como en el área de salud y seguridad de los trabajadores, hace necesario un sistema que sirva tanto a usuarios particulares que busquen satisfacer su curiosidad como a empresas que busquen tomar medidas en el ámbito de la calidad de aire indoor. Dentro del objetivo principal se definen una serie de objetivos más concretos que definen la metodología del proyecto:

- Diseño y montaje, mediante sensores y demás elementos comerciales, de un sistema de configuración flexible y bajo coste que obtenga el valor de parámetros típicos como humedad, temperatura, luz, ruido y contaminantes (CO, CO₂, compuestos orgánicos volátiles y ozono). Estos parámetros permitirán un posterior análisis de la calidad del aire de un entorno indoor, así como una primera noción de su eficiencia energética.
- Mantenimiento del coste total del sistema limitado para permitir su aplicación en la industria, pero también en otros ámbitos como en la propia escuela o para un uso en la residencia personal. Igualmente debe intentarse que su tamaño sea reducido para una mayor comodidad durante su uso y para un fácil transporte entre distintos ambientes objetivo.
- Captura de los parámetros a medir con la finalidad de mostrarlos por pantalla para una posterior interpretación.

Si es posible, el trabajo puede ampliarse con el objetivo de facilitar el tratamiento de los datos recibidos por el usuario que maneja el sistema, ya que la opción de mostrarlos por pantalla no es nada eficiente y no admite un análisis más exhaustivo de los resultados. Si hubiera tiempo se definen los siguientes objetivos, ordenados de mayor a menor prioridad:

- Envío de los datos obtenidos a uno o más dispositivos al mismo tiempo, para no limitar el estudio a la pantalla a la que esté conectada la Raspberry.
- Guardado de los valores de los parámetros en algún tipo de base de datos, ya sea interna en la memoria de la Raspberry o en la nube a través de un servidor.
- Creación de un prototipo optimizado con aspecto de producto final que pueda salir al mercado si surgiera la oportunidad.

El tratamiento y análisis de los datos queda a la voluntad del usuario del dispositivo, aunque en un proyecto futuro podría utilizarse para analizar la calidad del aire ambiente y tener una primera noción de la eficiencia energética de distintos espacios de la escuela o de la UPM.

METODOLOGÍA

El enfoque metodológico que se va a dar al proyecto consta de los siguientes pasos:

En primer lugar para poner en situación la percepción de los ciudadanos en temas de medio ambiente se hará un estudio ambiental previo. Gracias al uso de encuestas de carácter público o encuestas propias es más fácil comprender la concienciación de los habitantes en temas ambientales y de sostenibilidad relacionados con el proyecto en sí. Una vez comprendida la importancia que se da a estos temas y la aceptación que tendría un sistema como el propuesto en el público objetivo se pasará a un estudio de la normativa medioambiental actual. De esta manera pueden establecerse unos valores límite de seguridad de los distintos parámetros a medir, así como conocer los órdenes de magnitud de los mismos en el entorno en el que va a trabajar el sistema.

El conocimiento de valores límite para un adecuado ambiente y de los valores típicos a medir permite una elección más adecuada de los sensores comerciales. Esta elección se basará en criterios de coste, ya que se debe mantener el coste del sistema por debajo de un valor aproximado de 300 euros, criterios basados en el propio rango de medida del sensor, en la facilidad de integración y montaje de los diversos sensores y también en la existencia de código libre desarrollado para tomar las medidas, evitando así el engorroso desarrollo de funciones para leer los sensores y pudiendo centrar el trabajo en los objetivos nombrados anteriormente.

Una vez elegidos y adquiridos los sensores, además del microprocesador que los va a controlar y el lenguaje de programación, tendrá lugar la integración de los mismos, la programación de la lectura de cada uno de los sensores utilizados y la elaboración del programa completo un el que se muestrean todos ellos. Entre los aspectos a tener en cuenta está la elección del periodo de muestreo de los datos, suficiente para no sobrecargar y provocar calentamiento en el microprocesador y también para no enviar datos redundantes.

Los últimos pasos en el desarrollo del proyecto serían comprobar el funcionamiento global del sistema, simulando la operación real del mismo, la corrección de los errores surgidos a lo largo del proyecto, la captura de resultados obtenidos durante la operación del sistema y la extracción de conclusiones de dichos resultados.

Como ya se indicó en el apartado de objetivos, si durante el desarrollo del proyecto o una vez terminado no se han completado las horas deseadas o se quiere ampliar más, se intentará avanzar en un desarrollo más profundo del proyecto. Para esta parte no se describe en un primer momento la posible metodología debido a que la concepción inicial del proyecto no la tiene en cuenta.

Estudio ambiental previo

Análisis de la conciencia ambiental en España

Para evaluar la necesidad real de un sistema de bajo coste medidor de contaminantes y de presencia se determinará si existe un interés general en los ciudadanos españoles por el medio ambiente y las preocupaciones en este ámbito. Así es posible dilucidar si el enfoque está siendo el adecuado o si hay otras funcionalidades que podrían añadirse al sistema para resultar más útil.

La fuente elegida para consultar estos datos es el Centro de Investigaciones Sociológicas (en adelante CIS), que además de los barómetros generales sobre temas sociales, también realiza encuestas monográficas, en las que se enfocan aspectos más concretos.

En los datos del barómetro de abril de 2018 [5], los más recientes en el momento de este estudio, se observa que solo un 0,4 % de los encuestados considera los problemas medioambientales como uno de los principales en la actualidad (Gráfico 1). Además, ese porcentaje es menor del 0,1% si tiene en cuenta únicamente a los que lo consideran como el de mayor importancia. Esto no sorprende si se tiene en cuenta que, al ser una pregunta tan abierta, la mayoría se decanta por temas sociales, económicos, políticos y de violencia; problemas mucho más presentes en la actualidad en los medios de comunicación, y debidos a la crisis y a la inestabilidad política. Esto hace que los ciudadanos se preocupen más por cuestiones que consideran de primera necesidad como el paro, la corrupción, la sanidad y la educación.

La encuesta monográfica más reciente sobre ecología y medio ambiente data de marzo de 2007 [4] y para un análisis más a fondo se comparará con las dos anteriores, de 2005 [3] y de 1996 [2]. Estas encuestas se realizan en torno a 2500 personas, con un error de $\pm 2\%$ para un nivel de confianza del 95,5% (sigma 2). En el estudio de 2007 se observa que observa el interés de la gente en temas ambientales (un 73,1% de los encuestados lo considera interesante). Esto sigue una tendencia en alza, ya que en las anteriores encuestas en 2005 y 1996 el porcentaje de interesados era del 63,3% y del 59,3% respectivamente. A pesar del creciente interés general, la información obtenida sigue siendo insuficiente (un 58,7% se consideran poco o nada informados, frente al 64,7% de 2005 y al 60% de 1996). Se puede obtener por tanto la conclusión de que la población española está aumentando su conciencia ambiental y cada vez son más los interesados en tomar una actitud sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Aun así, el interés no tiene por qué conllevar preocupación por el medio ambiente, solo un 1,77% de los encuestados se muestran realmente preocupados, en mayor parte debido a la falta de educación en estos temas y a la desinformación generalizada.

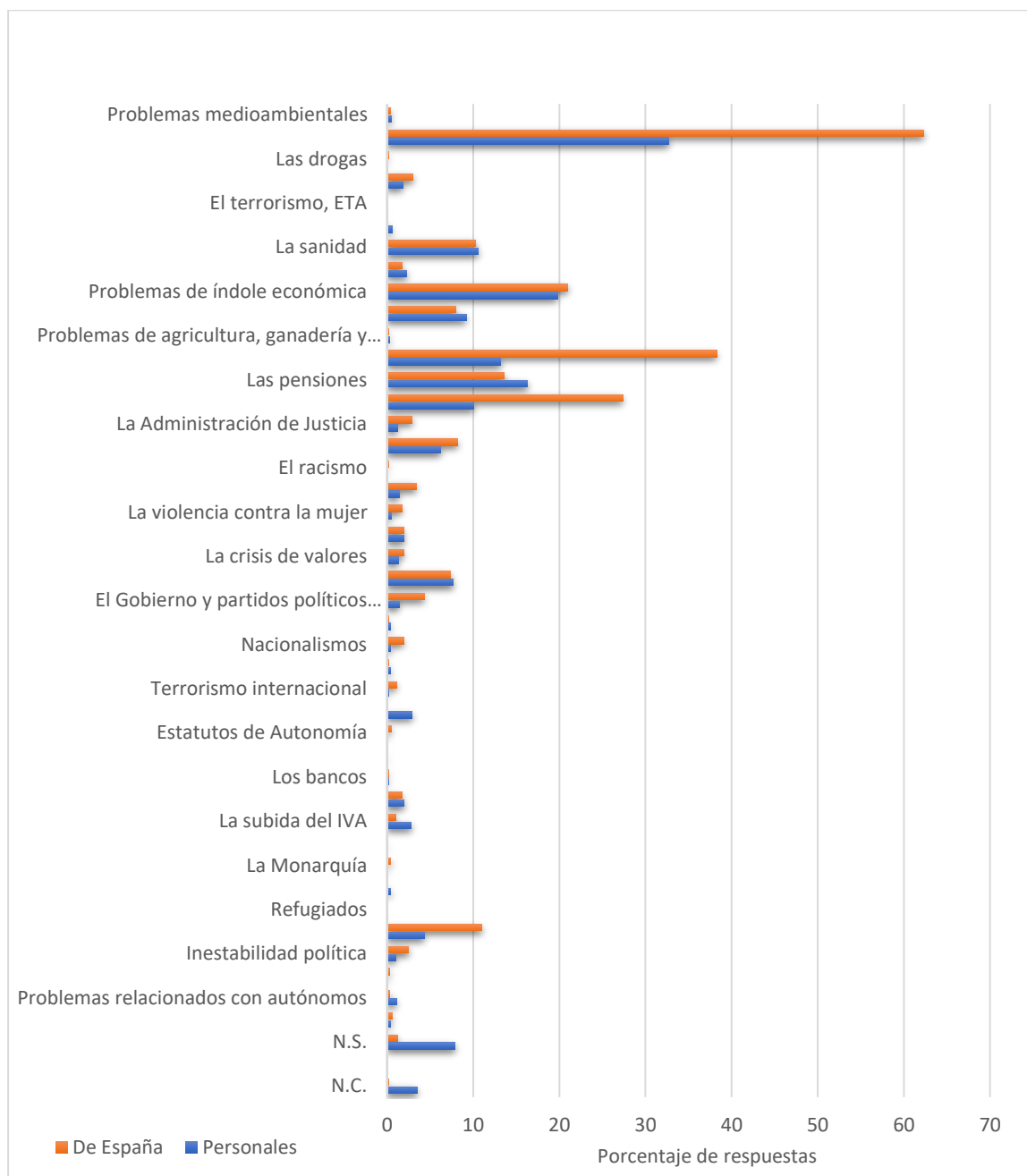


Gráfico 1: Principal problema a juicio de los ciudadanos. Fuente CIS estudio 3210 el 01/04/2018 (http://www.cis.es/cis/export/sites/default/-Archivos/Marginales/3200_3219/3210/es3210mar.pdf)

Entre los 10 problemas más importantes a escala local relacionados con el medio ambiente (Gráfico 2) se encuentran la contaminación (y en particular la contaminación atmosférica), la contaminación acústica y la falta de equipamiento para la protección del medio ambiente, todos ellos relacionados con el objetivo del trabajo en cuestión. A escala global es más preocupante el cambio climático, la escasez de agua o la destrucción de bosques y selvas.

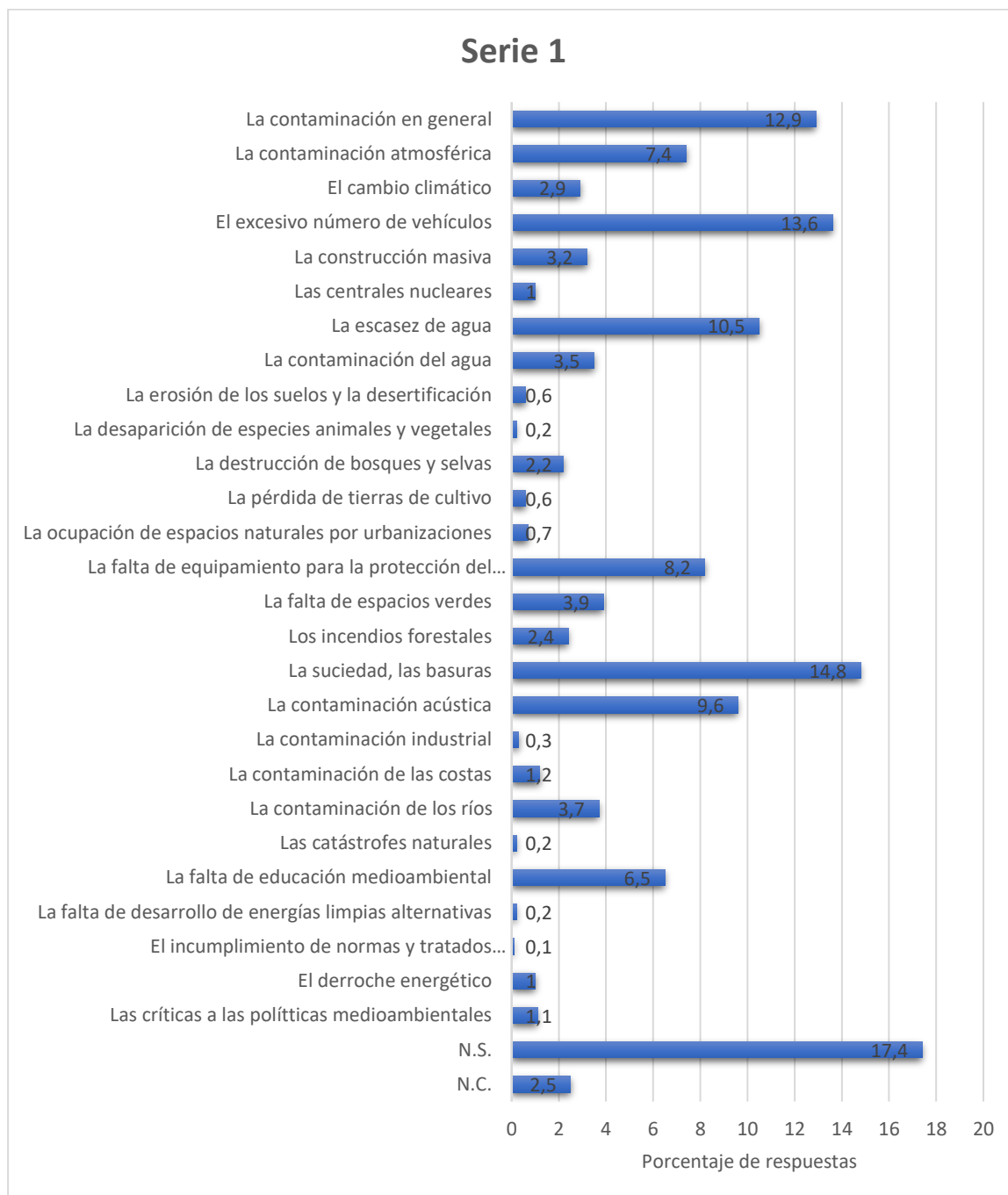


Gráfico 2: Problemas locales más importantes relacionados con el medio ambiente. Fuente CIS estudio 2682 el 28/03/2007 http://www.cis.es/cis/export/sites/default/-Archivos/Marginales/2680_2699/2682/e268200.html

Pero los problemas ambientales no solo se limitan a los mencionados, también los hay que afectan directamente a las personas, concretamente a su salud. Un 85,1% de los encuestados consideran que el estado del medio ambiente puede perjudicar a su salud. Esto se da en ambientes de trabajo cerrados, sin una buena ventilación y con exposición continua a agentes contaminantes. De entre los posibles riesgos, consideran como más comunes el aumento de problemas respiratorios y las alergias (Gráfico 3). Una adecuada monitorización de los espacios interiores permitiría tomar medidas correctoras y disminuir estos impactos sobre la salud.

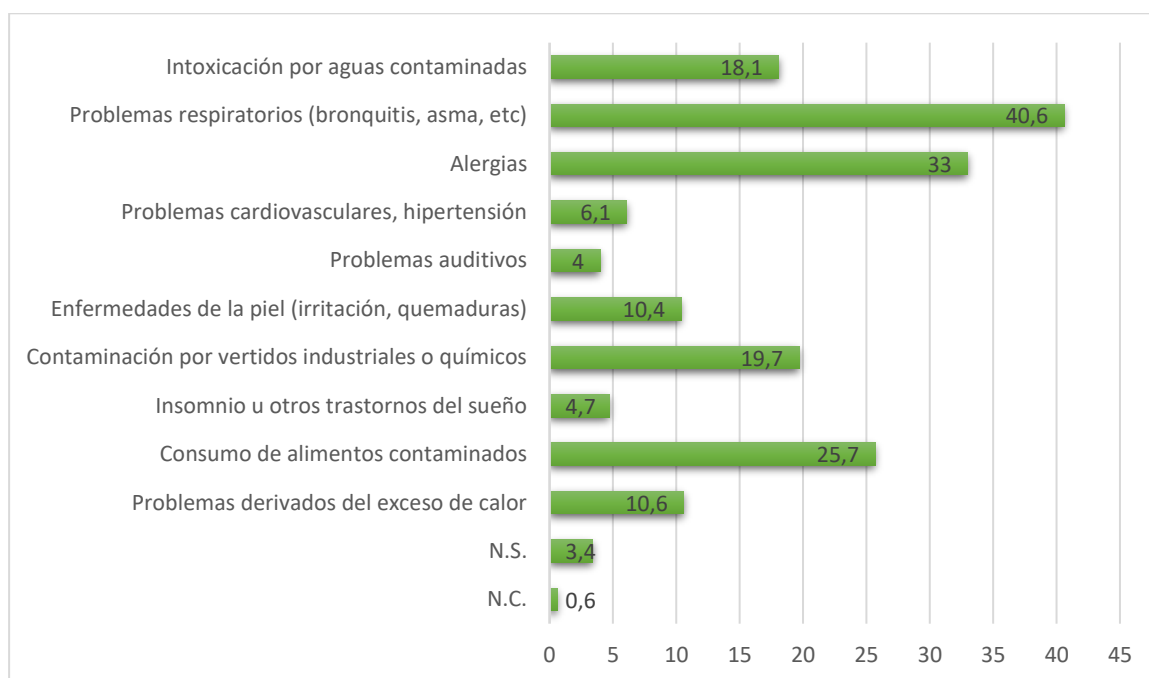


Gráfico 3: Mayores riesgos para la salud relativos al estado del medio ambiente. Fuente CIS estudio 2682 el 28/03/2007 http://www.cis.es/cis/export/sites/default/-Archivos/Marginales/2680_2699/2682/e268200.html

Con los datos expuestos y haciendo un análisis de los estudios indicados, de un modo parecido al que se hace en [17], capítulo 9, pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- Existe un interés creciente en temas medioambientales por parte de los ciudadanos españoles. Aun así prima la desinformación, debería aumentar la concienciación de problemas ambientales, tanto durante la educación como a la hora de aceptar un trabajo proporcionar información sobre las condiciones ambientales del puesto. Es por ello que el prototipo propuesto podría utilizarse no solo en empresas que lo necesiten para cumplir con las normativas y los valores límites de contaminantes, sino también para aquellas que busquen satisfacer el interés de sus empleados proporcionando información sobre la contaminación ambiental en interiores.
- El prototipo propuesto ayuda a combatir varias de las preocupaciones sobre la salud a pequeña escala. Aun así debería tenerse en cuenta que no es en sí mismo una solución, sino una medida preventiva útil para recopilar información y poder utilizarla después para tomar medidas correctoras.

Valores límite de los parámetros a medir

A la hora de diseñar un sistema capaz de medir una serie de parámetros, es necesario revisar la legislación actual para conocer los rangos de valores en los que se va a encontrar cada uno de ellos. Esto ayudará a elegir los sensores necesarios para medir dentro de esos rangos. Además, deben conocerse los valores máximos permitidos para que el sistema sea capaz de avisar cuando se llegue a estos valores y permitir al usuario tomar medidas correctoras.

Según el informe de la Comisión Europea sobre problemas de la salud relativos a la calidad del aire en interiores [18], los contaminantes más peligrosos en interiores son el CO, el CO₂, las partículas, el NO₂, los compuestos orgánicos volátiles (COVs), la humedad, el radón, el moho y los ácaros.

Los parámetros en los que se centrará el medidor, y que por tanto deben ver reflejados sus valores límite en este estudio son los siguientes: temperatura, humedad, dióxido de carbono, monóxido de carbono, COVs, luz y sonido. Además, para líneas futuras de desarrollo del proyecto, se estudiarán los valores límites de partículas PM₁₀, NO₂, SO₂ y radón, que como se ha comentado anteriormente, también están entre los contaminantes más perjudiciales.

Uno de los documentos en el que se pueden encontrar estos valores es la guía realizada por la World Health Organization (OMS en español), tanto en su primera edición [7], como en su segunda (Figura 6) [8]. En él se establecen valores de referencia para todo tipo de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos. Otra fuente para estos valores son las notas técnicas de prevención (Figura 7) (NTP) elaboradas en España por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo (en adelante INSHT).

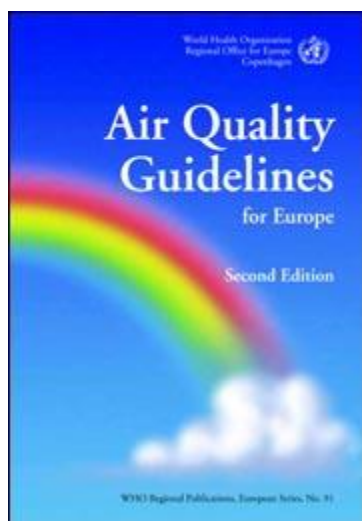


Figura 6: Guía de calidad del aire, año 2000

**MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ASUNTOS SOCIALES**
ESPAÑA

**INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO**

Año: 2000

NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior

Le dioxide de carbone pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur
Carbon dioxide in evaluating indoor air quality

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactores:

M^a José Berenguer Subils
Licenciada en Ciencias Químicas

Félix Bernal Domínguez
Ingeniero Químico

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Introducción

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que se forma en todos aquellos procesos en que tiene lugar la combustión de sustancias que contienen carbono. En ambientes interiores no industriales sus principales focos son la respiración humana y el fumar; aunque los niveles de dióxido de carbono también pueden incrementarse por la existencia de otras combustiones (cocinas y calefacción) o por la proximidad de vías de tráfico, garajes o determinadas industrias.

La concentración de dióxido de carbono en un ambiente interior puede aportar información sobre distintos aspectos y circunstancias de un edificio tales como posibilidad de efectos sobre la salud de sus ocupantes, correlación con problemas y quejas por olor o como dato para estudiar la ventilación de un local.

Para la determinación del dióxido de carbono pueden utilizarse tubos colorimétricos o monitores portátiles ya sean fotoacústicos o de infrarrojo, siendo estos últimos los más versátiles y de uso más extendido, ya que permiten tanto mediciones puntuales como mediciones promediadas en el tiempo mediante la utilización de acumuladores de datos que luego pueden estudiarse con un equipo informático.

Es muy importante que la persona que lleve a cabo las mediciones mantenga el sensor lejos de su área respiratoria, ya que en la respiración se expiran entre 30.000 y 40.000 ppm de dióxido de carbono, cantidades que pueden falsear las lecturas.

Figura 7: Ejemplo de formato en una NTP

La medición de contaminantes es un tema complejo y existen multitud de valores límites (promedios horarios, cada 8 horas, diarios o anuales), por lo que se reflejarán los valores más comunes (los presentes en la legislación) indicando sus unidades.

- **PM₁₀**: estas partículas son aquellas cuyo diámetro aerodinámico es menor de 10 micras, por lo que las más grandes pueden causar problemas respiratorios a una alta concentración. Suelen ser partículas de polvo, cenizas u hollín, generalmente asociadas al carbono. Sobre todo son peligrosas en una exposición continuada, causando bronquitis, disminución de la capacidad pulmonar e incluso la muerte. Es por ello que debe mantenerse su concentración lo más bajo posible. La WHO [8] no establece un valor límite recomendado pero indica que con una media anual de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se observan síntomas tanto en adultos como en niños debidos a las partículas. Para exposiciones más concentradas en el tiempo, se pueden extraer conclusiones de estudios sobre el tema [19], [20]. Por ejemplo, la Tabla 2 muestra una estimación de efectos adversos causados por una concentración de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ diaria durante tres días sobre una población de un millón de personas. Es por ello que, aunque la WHO [8] no establece un valor límite, debe tenerse en cuenta que con medias diarias menores de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ las partículas PM₁₀ tienen un pequeño riesgo sobre la salud humana.

Health effect indicator	No. of people affected by a three-day episode of PM ₁₀ at:	
	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
No. of deaths	4	8
No. of hospital admissions due to respiratory problems	3	6
Person-days of bronchodilator use	4 863	10 514
Person-days of symptom exacerbation	5 185	11 267

Tabla 2: Estimación del efecto de una exposición diaria de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀ durante tres días

- Ozono: El ozono se forma en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar y contaminantes precursores, como los óxidos de nitrógeno y algunos compuestos orgánicos volátiles (COV). En la última versión de la guía de calidad de aire proporcionada por la WHO [21] se actualiza la información relativa de varios contaminantes, entre los que se encuentra el ozono. En la guía previa [8] se da un valor límite de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un promedio diario de ocho horas, pero nuevos estudios de laboratorio han situado este valor en los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (51 ppb a una atmósfera y 25°C). A pesar de esta mayor restricción, es posible que en algunas personas sensibles puedan aparecer efectos en la salud para valores menores de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor a partir del cual los efectos para la salud pueden ser significativos se sitúa en $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, atribuyéndose a valores mayores un aumento de la mortalidad del 5-9% con respecto a la exposición de fondo habitual. La siguiente tabla (Tabla 3), obtenida en el resumen ejecutivo en español de la guía mencionada [9], muestra las características de los distintos niveles de concentración de ozono.

Guía de calidad del aire de la OMS y objetivo intermedio para el ozono: concentraciones de ocho horas		
	Media máxima diaria de ocho horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	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^a (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^a (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.

^a Muertes atribuibles al ozono. Los estudios de series cronológicas indican un aumento de la mortalidad diaria del orden del 0,3-0,5% por cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones de ozono durante ocho horas por encima de un nivel de referencia estimado de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 3: Aspectos relevantes de los niveles de concentración de ozono

- Dióxido de carbono: niveles excesivamente altos en interiores pueden provocar somnolencia, dolores de cabeza y malestar general. En su mayoría proviene de la actividad metabólica de los seres vivos, y por tanto para disminuir los niveles interiores será necesario una ventilación adecuada. Esta ventilación deberá estar entre los 30 y los 50 m³/h. Según el INSHT, el valor límite de exposición profesional (LEP-VLA) para exposiciones diarias de 8 horas es de 5.000 ppm con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15.000 ppm [22]. Estos valores son difíciles de encontrar en ambientes interiores no industriales como son oficinas, escuelas y servicios en general. En la práctica, en estos recintos se encuentran valores de 2.000 y hasta 3.000 ppm.

- Monóxido de carbono: es uno de los contaminantes atmosféricos más tóxicos, siendo subproducto de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Además, es uno de los componentes del humo del tabaco. Es especialmente peligroso porque es incoloro e inodoro y limita la cantidad de oxígeno que llega al cerebro (hipoxia), pudiendo causar mareos, náuseas, pérdida del conocimiento y hasta la muerte. En aparcamientos, túneles y espacios poco ventilados, su concentración puede estar por encima de los 115 mg/m³ (100 ppm) durante varias horas. Esta concentración es menor en oficinas u otros espacios, situándose cerca de los 23-46 mg/m³ (20-40 ppm). Los estudios consultados [23], [24] se centran en la medición de la carboxihemoglobina (COHb), una proteína resultante de la unión del CO con la hemoglobina de la sangre (Figura 8), y que hace que esta sea incapaz de transportar oxígeno. Para proteger a la población de riesgo (personas de mediana edad y ancianos con problemas coronarios) la WHO [8] recomienda valores de COHb menores del 2,5% en sangre, aunque personas concretas como conductores o bomberos puedan aguantar entre un 10 y un 20%. Este valor de COHb viene asociado a las siguientes concentraciones de CO:

- 100 mg/m³ (90 ppm) para exposiciones de 15 minutos.
- 60 mg/m³ (50 ppm) para exposiciones de 30 minutos.
- 30 mg/m³ (25 ppm) para exposiciones de una hora.
- 10 mg/m³ (10 ppm) para exposiciones de 8 horas.

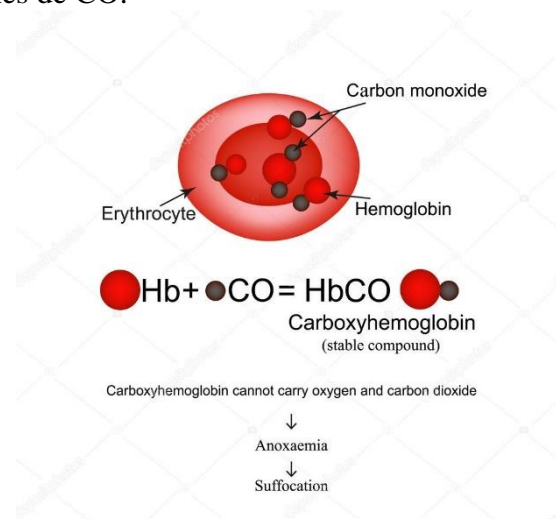


Figura 8: Esquema de la formación de COHb

- Compuestos orgánicos volátiles: están presentes en una gran cantidad de productos utilizados en la industria, como pinturas, decapantes, insecticidas, productos de limpieza, líquido corrector, pegamentos o adhesivos. Durante su uso se liberan estos compuestos, pudiendo causar dolor de cabeza, dificultad para respirar, mareos o fatiga. De entre los COVs que pueden presentarse en un ambiente de interiores se desarrollan dos de los más importantes: el benceno y el formaldehído.
 - Benceno: de fórmula C_6H_6 , es el más simple de los hidrocarburos aromáticos (Figura 9). En el aire ambiente puede encontrarse como resultado del humo del tabaco, de la combustión o de evaporación en algunos combustibles. En el aire ambiente se encuentra en una concentración de $5-20 \mu g/m^3$, pero en interiores puede ser mayor si hay una fuente de benceno cercana. Es un compuesto cancerígeno, y por tanto, según la WHO [8] no hay nivel recomendable. Aun así, para dar valores de referencia, hay estudios que han investigado la relación entre el benceno y el riesgo de leucemia [25], [26] Según concluye el primero de estos estudios, el riesgo unitario de contraer leucemia a lo largo de la vida está en torno a 6×10^{-6} por cada $\mu g/m^3$ de benceno. Por tanto una concentración de $17 \mu g/m^3$ resultaría en un caso de cáncer por cada 10000 habitantes.
 - Formaldehído: es el nombre común para el metanal, el más simple de los aldehídos, con fórmula CH_2O (Figura 10). También proviene en su mayoría del humo del tabaco, con lo que en entornos cerrados en los que se fume (por ejemplo viviendas), la concentración es varias veces mayor que en el aire exterior. Los síntomas más comunes derivados del formaldehído son irritación, estornudos, ojos llorosos, tos, náuseas e incluso la muerte. La concentración límite que propone la WHO [27] es de $0,1 mg/m^3$ durante un tiempo de exposición corto (30 minutos). Para ilustrar ese valor, la Tabla 4 incluye referencias de exposición a formaldehído para ambientes varios.

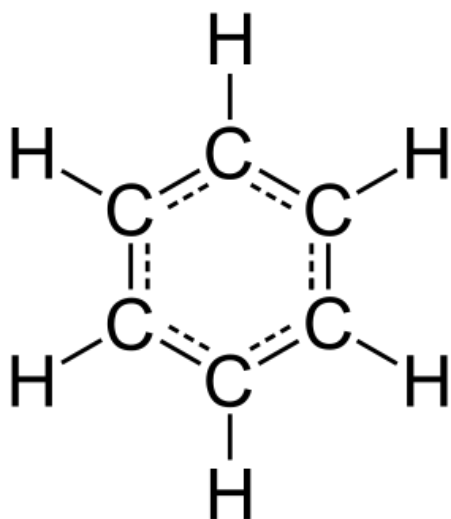


Figura 9: Estructura simplificada del benceno

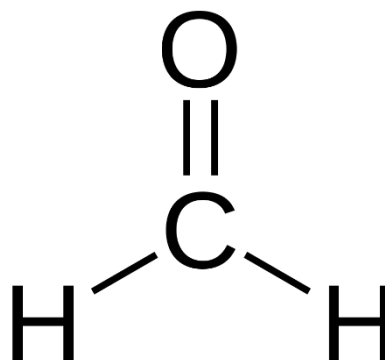


Figura 10: Estructura simplificada del formaldehído

Source	Concentration (mg/m ³)	Exposure (mg/day)
Ambient air (10% of time; 2 m ³ /day)	0.001–0.02	0.002–0.04
Indoor air		
Home (65% of time; 10 m ³ /day)		
– conventional	0.03–0.06	0.3–0.6
– mobile home	0.1	1.0
– environmental tobacco smoke	0.05–0.35	0.5–3.5
Workplace (25% of time; 8 m ³ /day)		
– without occupational exposure ^a	0.03–0.06	0.2–0.5
– with occupational exposure	1.0	8.0
– environmental tobacco smoke	0.05–0.35	0.4–2.8
Smoking (20 cigarettes/day)	60–130	0.9–2.0 ^b

Tabla 4: Concentración y exposición media de formaldehído en ambientes varios. Fuente: World Health Organization

- Temperatura: para las condiciones ideales de temperatura se ha consultado la ‘Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo’ [28]. En ella se recogen las pautas del Real Decreto 486/1997, que distinguen dos casos:
 1. La temperatura de los locales donde se realicen trabajos sedentarios propios de oficinas o similares estará comprendida entre 17 y 27 °C.
 2. La temperatura de los locales donde se realicen trabajos ligeros (con demanda de energía algo mayor) estará comprendida entre 14 y 25 °C.
- Humedad: del mismo modo, en el documento citado anteriormente se establece que la humedad relativa estará comprendida entre el 30 y el 70%, excepto en los locales donde existan riesgos por electricidad estática en los que el límite inferior será el 50%. Esto es debido a que por debajo de un 30% se produce sequedad en la piel y en las mucosas, entre el 30 y el 50% la acumulación de cargas electrostáticas puede provocar chispas y por encima del 70% se empieza a producir condensación.

- Luz: el nivel de iluminación óptimo para una tarea corresponde al que da como resultado un rendimiento adecuado con una mínima fatiga. El nivel de iluminación en un puesto de trabajo se adaptará a la tarea a realizar y tendrá en cuenta la edad del trabajador, así como las condiciones en que se debe realizar el trabajo. Los valores mínimos de iluminación artificial quedan regulados en la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo (OGSHT) de 9 de marzo de 1971, aprobada en el BOE de 16 de marzo de 1971 (BOE-A-1971-380).

Tipo de trabajo	Nivel de iluminación en lux
Joyería y relojería, imprenta	1000
Ebanistería	500 a 1000
Oficina, bancos de taller	300
Industrias conserveras, carpinterías metálicas	200
Salas de máquinas, calderas, depósitos y almacenes	100
Manipulación de mercancías	50
Patios, galerías y lugares de paso	20

Tabla 5: Valores mínimos de iluminación en España. Fuente artículo 28 de la OGSHT

- Ruido: en el Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo (BOE-A-2006-4414), se recogen los valores límite de exposición al ruido; tanto los niveles de exposición diaria, que se encuentran entre 80 y 87 dB (Figura 11), como los niveles de pico, que se sitúan entre 135 y 140 dB (Figura 12).



Figura 11: 80 dB es equivalente al ruido de tráfico o de un grito Figura 12: 140 dB es equivalente al ruido de un avión despegando

- Radón: es un elemento cancerígeno en los seres humanos, por ello es difícil establecer un valor seguro de exposición a este elemento. Según la World Health Organization [8] el riesgo de contraer cáncer de pulmón a lo largo de la vida es aproximadamente $3-6 \times 10^{-5}$ por Bq/m^3 de radón en el ambiente, estando los valores medios en una vivienda (Figura 13) en torno a los 50 Bq/m^3 .

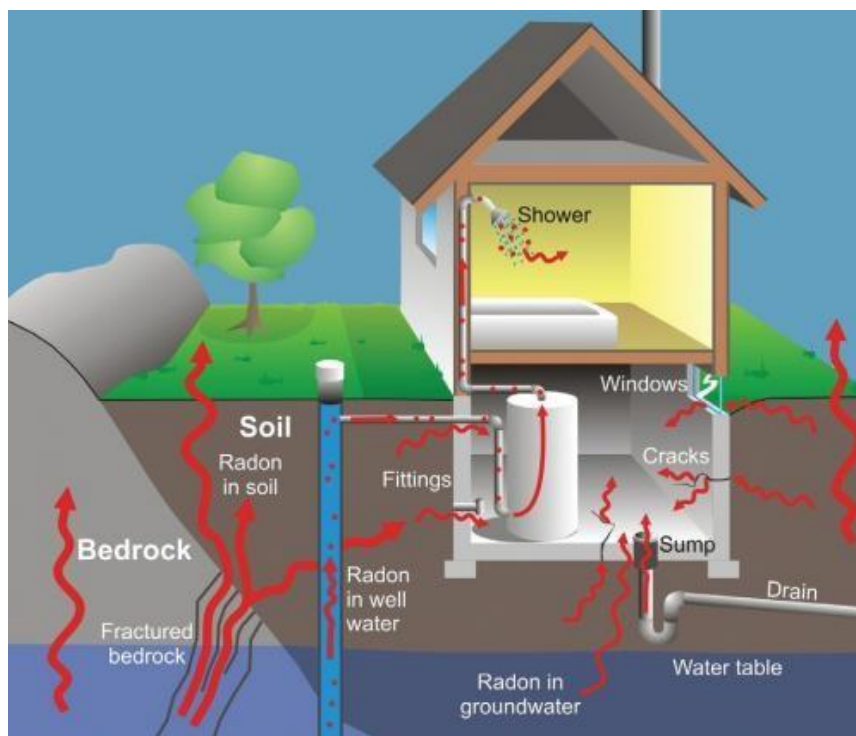


Figura 13: Puntos de acceso más comunes del radón a una vivienda

Se han omitido contaminantes generalmente tenidos en cuenta como los óxidos de nitrógeno y azufre debido a que, aunque están asociados a la contaminación atmosférica, tienen más relevancia en exteriores, siendo su presencia en interiores prácticamente residual.

Componentes del medidor

En este apéndice se procederá a la descripción y las especificaciones de los distintos elementos que conformarán el prototipo.

Raspberry Pi 3 modelo B

Para controlar la ejecución de un sistema en el que se consulta a varios sensores simultáneamente la mejor opción es un microcontrolador. El sistema elegido es el Raspberry Pi (Figura 14) debido a que tiene pines suficientes para conectar los sensores requeridos y añade algunas ventajas frente a otros sistemas como el Arduino. Estas ventajas son, por ejemplo, la posibilidad de establecer una conexión Wifi o Ethernet y la presencia de varios puertos de conexión de periféricos (USB, HDMI, CSI, DSI). Esto último permite la posibilidad de utilizar el medidor a su vez como una pequeña subestación, con una pantalla que refleje las medidas obtenidas en los sensores.

Además, el último modelo (el 3 B) tiene un precio ligeramente superior a los 35 euros, que le hace perfectamente válido para un medidor de bajo coste. Las especificaciones son las siguientes:

Especificaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Procesador: <ul style="list-style-type: none"> ○ Chipset Broadcom BCM2387. ○ 1,2 GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53. • Unidad de procesamiento gráfico (GPU): <ul style="list-style-type: none"> ○ Dual Core VideoCore IV ® Multimedia Co-procesador. Proporciona Open GL ES 2.0, OpenVG acelerado por hardware, y 1080p30 H.264 de alto perfil de decodificación. • RAM: 1GB LPDDR2. • Conectividad <ul style="list-style-type: none"> ○ Ethernet 10/100 BaseT. ○ 802.11 b / g / n LAN inalámbrica y Bluetooth 4.1. ○ Salida de vídeo: <ul style="list-style-type: none"> ▪ HDMI. ▪ RCA compuesto (PAL y NTSC). ○ Salida de audio: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Jack de 3,5 mm de salida de audio, HDMI. ▪ USB: 4 x Conector USB 2.0. ○ Conector GPIO: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 40-clavijas de 2,54 mm (100 milésimas de pulgada) de expansión: 2x20 tira, las cuales proporcionan 27 pines GPIO, así como 3,3 V, +5 V y GND líneas de suministro. ○ Conector de la cámara de 15 pines cámara MIPI interfaz en serie (CSI-2) ○ Pantalla de visualización Conector de la interfaz de serie (DSI). ○ Ranura de tarjeta de memoria Micro SD.

Tabla 6: Especificaciones de la Raspberry Pi 3 modelo B. Fuente PcComponentes.

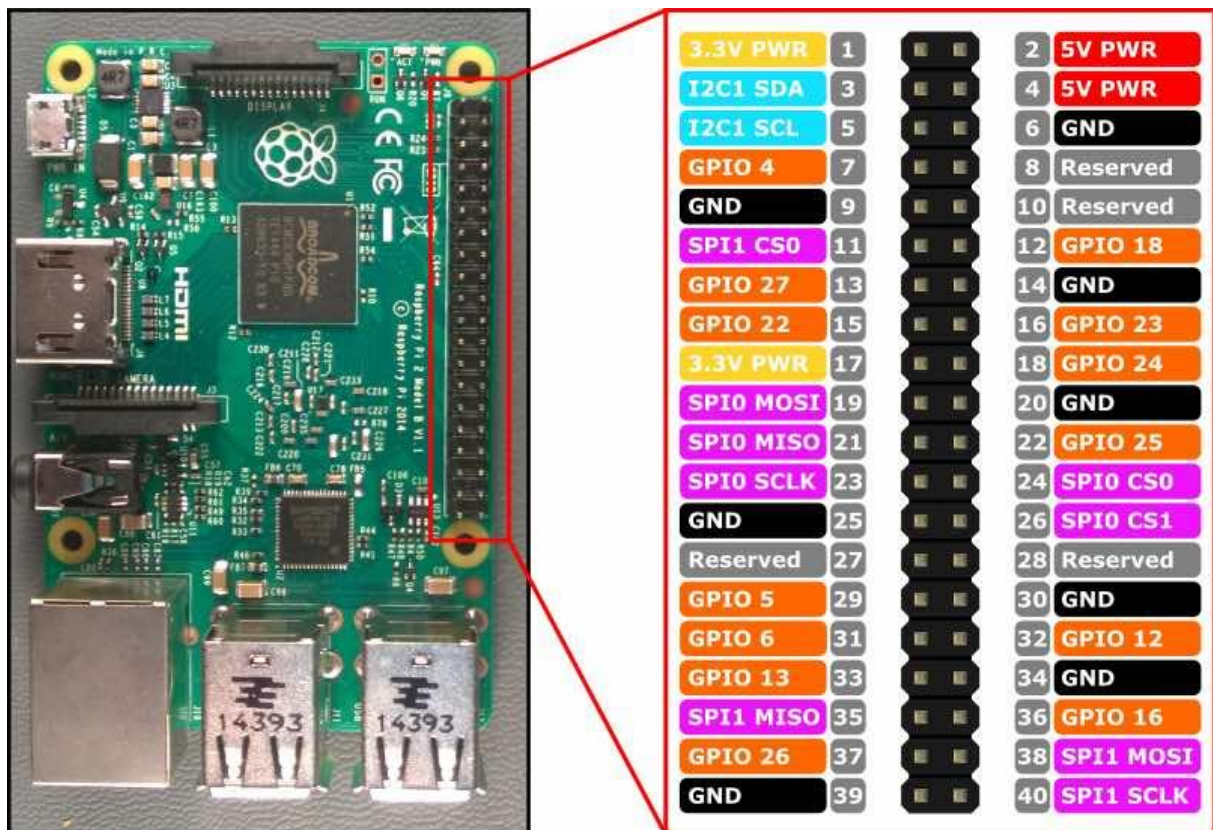


Figura 14: Raspberry Pi 3 y mapa de pines

Teclado

La Raspberry comprende únicamente el procesador, la memoria y los puertos de entrada y salida, por lo que para manejarse en su sistema operativo es necesario un teclado, un ratón y una pantalla. Como pantalla puede usarse la del propio ordenador, y si es portátil puede utilizarse el modo de conexión remota, para acceder a la imagen de la Raspberry mientras está conectada en otro punto.

El teclado elegido incluye un touchpad (por lo que puede servir como ratón). Es inalámbrico con un alcance máximo de unos 10 metros, más que suficiente para un sistema que va a ser utilizado en interiores.



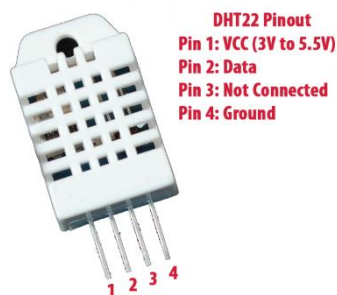
Figura 15: Teclado inalámbrico

Sensor de humedad y temperatura

El sensor comercial más utilizado para medir temperatura es el DHT22, el cual además mide la humedad relativa (RH). Según su datasheet [29] mide temperaturas entre -40 y 80°C con una precisión de $0,5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa entre un 0 y un 100% con una precisión de un 2% RH.

Es un sensor de precisión media y algo lento en el tiempo de respuesta, pero dado que se trata de conseguir un medidor de bajo coste y los cambios no van a ser bruscos es un sensor válido para el proyecto. Puede operar con voltajes tanto de 3.3V como de 5V, por lo que es adecuado para la conexión a Raspberry Pi y a otros microcontroladores.

La conexión del sensor es sencilla. De los cuatro pines presentes se utilizarán tres: el de alimentación, el de captura de datos y el de tierra, siendo necesaria una resistencia de $10\text{k}\Omega$ entre la alimentación y los datos para adecuar la corriente que circula por el sensor.



DHT22 Pinout
Pin 1: VCC (3V to 5.5V)
Pin 2: Data
Pin 3: Not Connected
Pin 4: Ground

Figura 16: Sensor DHT22

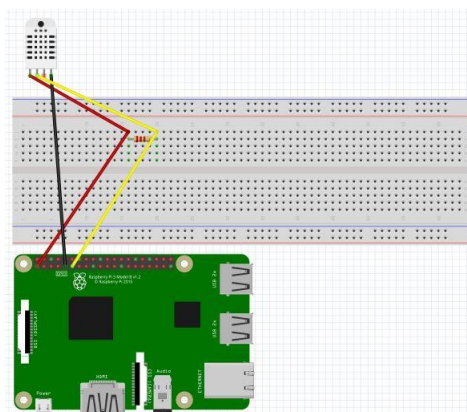


Figura 17: Esquema de conexión del DHT22

Sensor de CO2

Para medir el principal contaminante del aire en interiores (comprobar que es ese) se ha elegido el sensor MH-Z14A (Figura 18), el cual tiene la ventaja de contar con una salida analógica, una digital y una PWM. Según su manual [30] puede llegar a medir hasta 10000 ppm de CO2, pero es recomendable no pasar de las 5000 ppm para no perder precisión (Tabla 7). Puede trabajar entre 0 y 50°C con una compensación del valor medido según la temperatura.

Working voltage	4.5 V ~ 5.5V DC
Average current	< 60 mA (at 5V input)
Peak current	150 mA (at 5V input)
Interface level	3.3 V (5V compatible)
Measuring range	0~10000ppm optional
Output signal	Serial Port/PWM/Analog output (0,4-2V)
Preheat time	3min
Response time	T < 120s
Working temperature	0°C ~ 50°C
Working humidity	0~90%RH (no condensation)
Weight	15g
Lifespan	> 5 year

Tabla 8: Especificaciones MH-Z14A

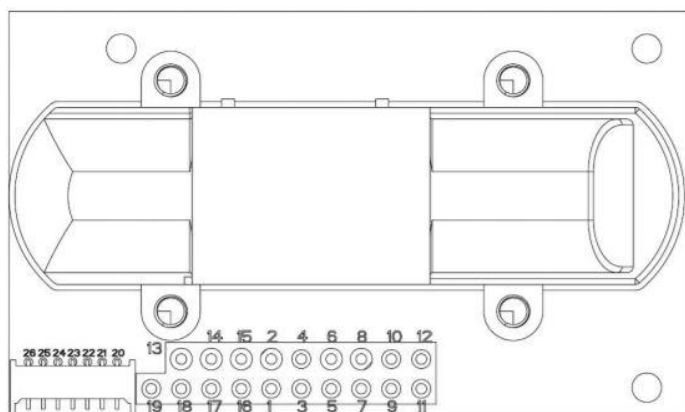


Figura 18: Esquema del sensor MH-Z14A

Range	Accuracy
0~2000ppm	± (50ppm)
0~5000ppm	+3%reading value)
0~10000ppm	±10% reading value

Tabla 7: Precisión del sensor

PIN	Description
1/15/17/23	Vin Voltage input
2/3/12/16/22	GND
4/21	Analog output (0,4-2)
6/26	PWM
8/20	HD (Zero calibration, low level for more than 7 seconds valid)
7/9	NC
11/14/18/24	UART (RXD) TTL Level input
10/13/19/25	UART (TXD) TTL Level output

Tabla 9: Descripción de los pines en el MH-Z14A

La alimentación del sensor debe mantenerse entre 4,5 y 5 V, y no bajar de los 150 mA para un correcto funcionamiento. La salida analógica da un nivel de tensión entre 0,4 y 2 V y la digital utiliza un protocolo de comunicación serie conocido como UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), que en su modo full-duplex permite tener dos dispositivos conectados recibiendo y transmitiendo datos al mismo tiempo por las líneas de recepción (RXD) y de transmisión (TXD) respectivamente. Debido a que la Raspberry es un sistema digital se utilizará este último método, imposibilitando de este modo la conexión de otros sensores que se comuniquen por medio del protocolo UART, necesitando por tanto para la conexión los pines de alimentación, GND, RXD y TXD.

Sensor de compuestos orgánicos volátiles

El sensor elegido para esta tarea es el CCS811 (Figura 19). Tiene las ventajas de que también es capaz de medir el valor del dióxido de carbono equivalente, e incluso la temperatura por medio de un termistor, aunque en esta aplicación al utilizar sensores dedicados más precisos no será necesario. En su hoja de características [31] puede verse que es capaz de leer concentraciones de COVs entre 0 y 1187 ppb. Además incluye un regulador de tensión que le permite trabajar tanto a 3,3 V como a 5V. En su interior comprende el propio sensor de contaminantes y un pequeño microcontrolador que almacena las lecturas tras pasar por un convertidor analógico-digital incorporado (Figura 20). Esto es así ya que la comunicación es digital y en serie por medio del protocolo I²C (Inter-Integrated Circuit). Las lecturas de los sensores se encuentran en el registro 0x02 del microcontrolador (Tabla 10), que contiene 8 bytes, de los cuales los que interesen se enviarán por el pin de SDA. Para esta aplicación será necesarios los pines de Vcc, GND, SCL, SDA y Wake, que irá conectado a tierra.



Figura 19: Sensor CCS811

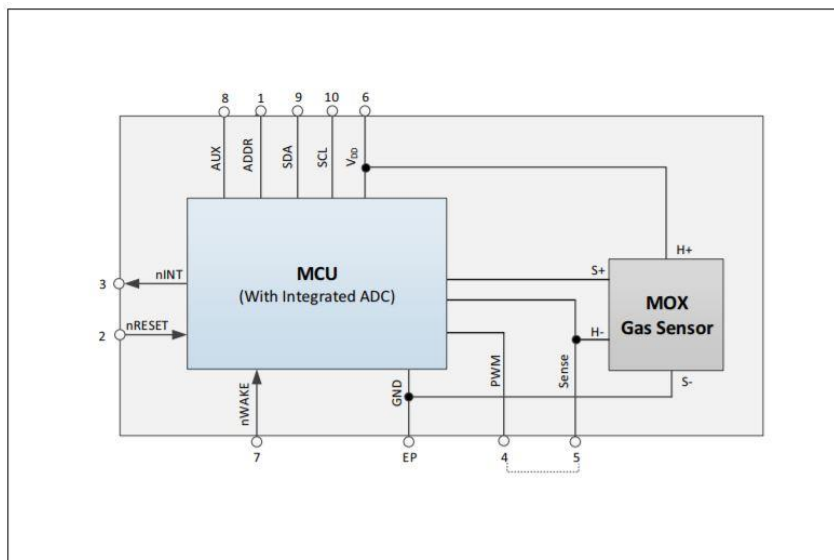


Figura 20: Diagrama de bloques del CCS811

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6 & 7
eCO ₂ High Byte	eCO ₂ Low Byte	TVOC High Byte	TVOC Low Byte	STATUS	ERROR_ID	See RAW_DATA

Tabla 10: Registro de datos del CCS811

Sensor de luz

El sensor elegido es el TSL2561 (Figura 21). Al igual que el de compuestos orgánicos volátiles puede tener alimentación tanto de 3,3V como de 5V y se comunica mediante un protocolo serial I²C, después de transformar las lecturas del sensor de analógico a digital. Según su hoja de características [32] tiene un rango de lectura que va de 1 a 40000 lux. Tiene dos canales distintos de toma de datos, uno de ellos mide luz infrarroja y el otro es capaz de leer la infrarroja y la visible. Cada uno de ellos tiene un convertidor analógico digital, como puede verse en la Figura 22, y una vez convertido se almacenan los valores en cuatro registros (LOW0, HIGH0, LOW1 y HIGH1) (Tabla 11). Al comunicarse mediante I²C necesita, además de los pines de alimentación y GND, los dos pines de comunicación, SDA y SCL.



Figura 21: Sensor TSL2561

REGISTER	ADDRESS	BITS	DESCRIPTION
DATA0LOW	Ch	7:0	ADC channel 0 lower byte
DATA0HIGH	Dh	7:0	ADC channel 0 upper byte
DATA1LOW	Eh	7:0	ADC channel 1 lower byte
DATA1HIGH	Fh	7:0	ADC channel 1 upper byte

Tabla 11: Registros de datos del TSL2561

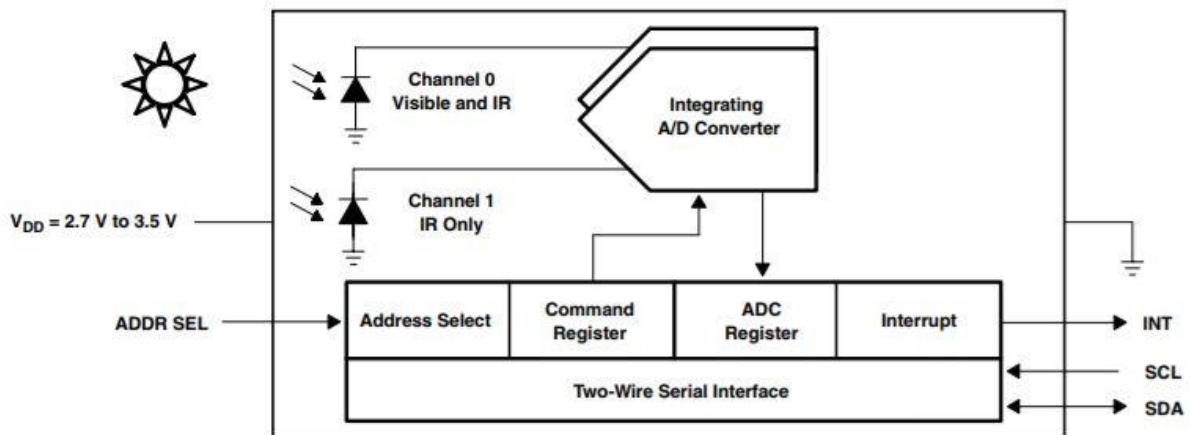


Figura 22: Diagrama de bloques del TSL2561

Sensor de presión

El sensor elegido para medir la presión atmosférica es el BMP180 (Figura 23). Es el más sencillo de la familia de sensores de presión fabricados por Bosch, pero aun así permite medir presiones de entre 30 y 110 kPa, o lo que es lo mismo, entre 0,3 y 1,1 atmósferas. Es por ello que es ideal para medir la presión del aire ambiente, ya que convirtiendo la presión a altitud con la Ecuación 1 es capaz de medir altitudes comprendidas entre -500 y 9000 m sobre el nivel del mar, todo ello con una precisión de 0,25 m (3 Pa). Al igual que muchos de los sensores vistos hasta ahora, viene integrado en un módulo (Figura 24) junto con un microcontrolador y un convertidor analógico-digital, lo que permite enviar los datos en formato digital mediante un protocolo I²C. Para ello, además de los pines de alimentación y GND, necesita de los pines SDA y SCL.

El BMP180 puede configurarse en 4 modos distintos de muestreo, según se desee una resolución mayor, o si por el contrario interesa más un consumo menor. En la hoja de especificaciones del sensor [33] puede encontrarse un mapa de la memoria del microcontrolador, además de un ejemplo de algoritmo para medir la presión y la altitud con él.



Figura 23: Sensor BMP180

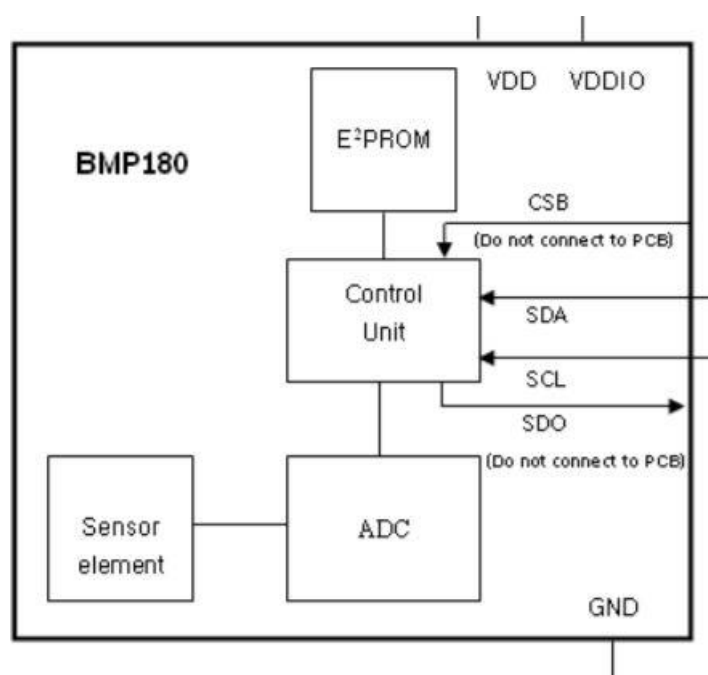


Figura 24: Diagrama de bloques del BMP180

$$h = 44330 \times \left(1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{5.225}}\right)$$

Ecuación 1: Altitud en función de la presión y de $p_0 = 101325$ Pa

Sensor de sonido

El sensor seleccionado es el KY-038 (Figura 25). Está diseñado para ser utilizado con Arduino, por lo que es un poco distinto a los descritos hasta ahora (es más similar al de temperatura). Tiene cuatro pines, distribuidos como puede verse en la Figura 26. Además de los de alimentación y tierra, el pin A0 devuelve con una tensión (valor analógico) equivalente a la señal medida en el micrófono y el pin D0 toma el valor 1 cuando el sonido pasa de un cierto umbral. Este valor umbral se puede ajustar con el potenciómetro incorporado. Para leer el valor analógico en la Raspberry y poder transformarlo a decibelios será necesario un convertidor analógico digital, en este caso el ADS1115 (Figura 27), que permite convertir hasta 4 señales y transmitir las a la Raspberry por medio de I²C.

Como el sonido es una magnitud muy variable a lo largo de un tiempo, las mediciones puntuales no son precisas, ya que no representan en absoluto el valor que toma el sonido en instantes previos o posteriores. Es por ello por lo que se tomarán las máximas mediciones posibles en un intervalo de un segundo y los datos transmitidos serán la intensidad máxima, la mínima y la media (en dB), siendo estos 3 valores representativos de un intervalo (la media como valor cualitativo de mucho o poco ruido y la máxima presente en los picos de ruido que puedan producirse)



Figura 25: Sensor KY-038

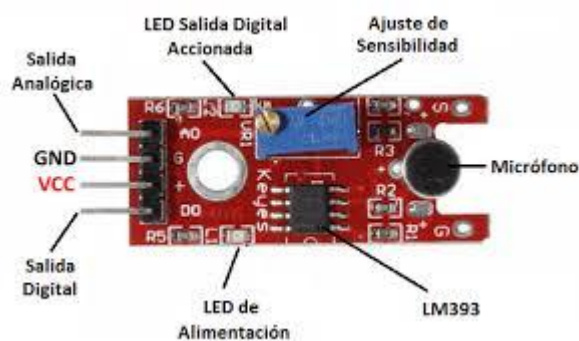


Figura 26: Componentes del KY-038

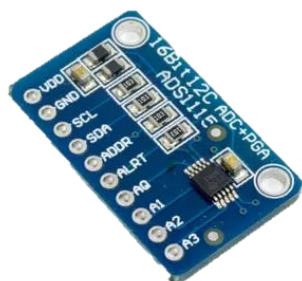


Figura 27: Convertidor ADS1115

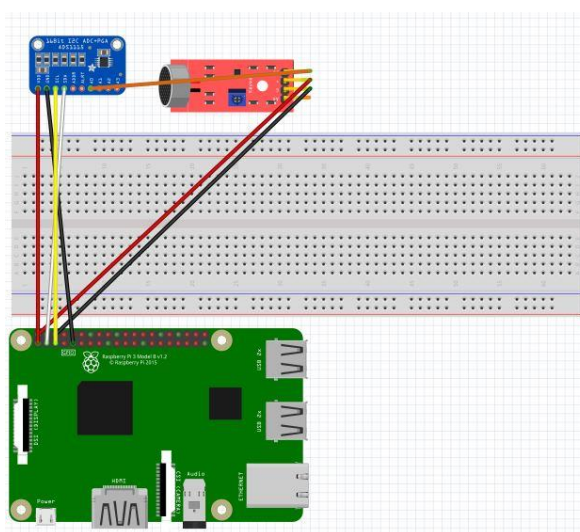


Figura 28: Esquema de conexión del KY-038

Sensor de presencia

El sensor elegido es el HC-SR501 (Figura 29). Es común encontrarlo en sistemas de la vida diaria como en el detector de obstáculos en la puerta de un ascensor o en zonas comunes de viviendas con luz automática. Se basa en un sensor piroeléctrico infrarrojo (PIR), lo que quiere decir que detecta cambios en las radiaciones infrarrojas que recibe y los transforma en una tensión eléctrica. El funcionamiento de este tipo de sensores puede verse esquematizado en la Figura 31. Según su hoja de características [34], el módulo contiene al propio sensor, además de una lente de plástico llamada lente de fresnel, que le permite medir con un ángulo de apertura de 100°, y un pequeño circuito de control para facilitar su uso.

Su funcionamiento es sencillo ya que tiene solo tres pines: el de alimentación a 5 V, el de tierra y el de salida, que dará una tensión de 3,3 V cuando el sensor detecte un obstáculo. Además, cuenta con dos potenciómetros, uno de ellos para variar la sensibilidad (puede ajustarse la distancia de detección desde los 3 hasta los 7 metros) y el otro para variar el tiempo que se mantiene la salida encendida una vez se haya detectado un obstáculo (el tiempo mínimo es de 3 s). Por último, un jumper permite configurar el modo de disparo entre el de ‘no reset’ y el de ‘auto reset’. El esquema puede verse en la Figura 30.



Figura 29: HC-SR501

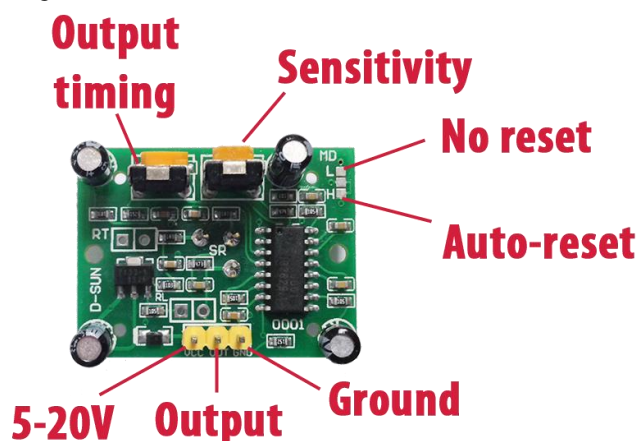


Figura 30: Esquema del HC-SR501

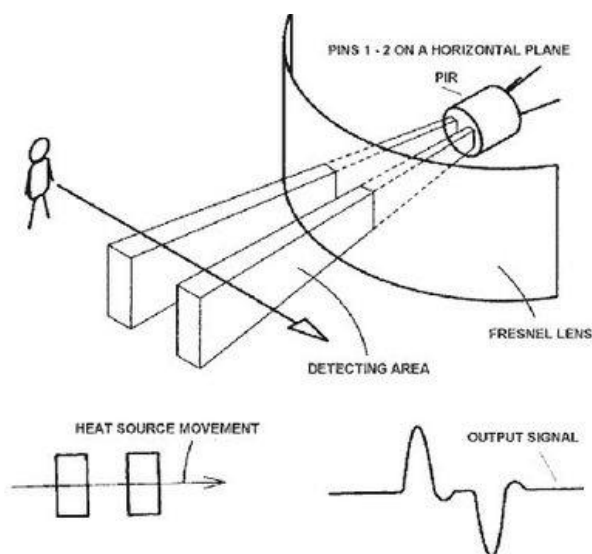


Figura 31: Funcionamiento de un sensor PIR

Sensor de ozono

La familia de sensores MQ es la más utilizada para aplicaciones de bajo coste, siendo el MQ131 el sensor de ozono perteneciente a esta (Figura 32). Para facilitar su comunicación con la Raspberry se ha utilizado un módulo que implementa directamente la comunicación I²C, algo que el sensor suelto no tiene integrado, así como una resistencia de carga (RL) variable por medio de un potenciómetro que ya viene de por sí calibrada, por lo que no debe moverse a no ser que se requiera de una calibración manual para ambientes particulares. En su hoja de características [35] puede observarse que requiere una alimentación de 5V y que es capaz de medir concentraciones de O₃ entre 10 ppb y 2 ppm, lo cual entra en el rango de medidas buscado. Además de ozono, este tipo de sensores se ve afectado por otros gases, por lo que será necesario estudiar su sensibilidad a este gas en concreto (Figura 33). Debe tenerse especial cuidado al leer este tipo de gráficas ya que la escala en ambos ejes es logarítmica.

Una particularidad presente en este tipo de módulos es que necesitan un tiempo de precalentamiento de 24-48 horas, por lo que antes de su primer uso se le debe dar alimentación durante ese tiempo.

Como la mayoría de los sensores descritos hasta ahora, la conexión con la Raspberry únicamente requiere de los pines de alimentación, GND, SDA y SCL.



Figura 32: Sensor MQ131

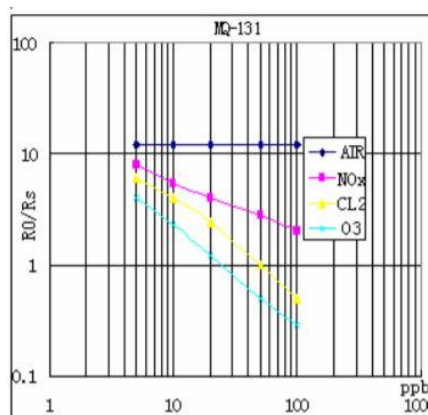


Figura 33: Sensibilidad del sensor MQ131

A. Standard work condition			
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Vc	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
VH	Heating voltage	6V±0.1	AC OR DC
RL	Load resistance	Variable	
RH	Heater resistance	31 Ω ± 5%	Room Tem
PH	Heating consumption	Less than 1100mw	
B. Environment condition			
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-10°C-50°C	
Tas	Storage Tem	-20°C-70°C	
RH	Related humidity	Less than 95%RH	
C. Sensitivity characteristic			
Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
Rs	Sensing Resistance	100K Ω -200K Ω (50ppb O ₃)	Detecting concentration scope : 10ppb-2ppm O ₃
α O ₃ (100ppb/50ppb)	Concentration Slope rate	≤ 0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20°C ± 2°C Humidity: 65%±5%	Vc:5V±0.1 Vh: 6V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

Tabla 12: Especificaciones del sensor MQ131

Sensor de CO

El sensor utilizado es de la misma familia que el de ozono, siendo en este caso el MQ7 (Figura 34). También está integrado en un módulo que permite la comunicación I²C por lo que el comportamiento es idéntico al del MQ131.

En este caso el rango de medida es de 20-2000 ppm de CO, siendo necesario estudiar la sensibilidad del sensor al CO en particular (Figura 35).



Figura 34: Sensor MQ7

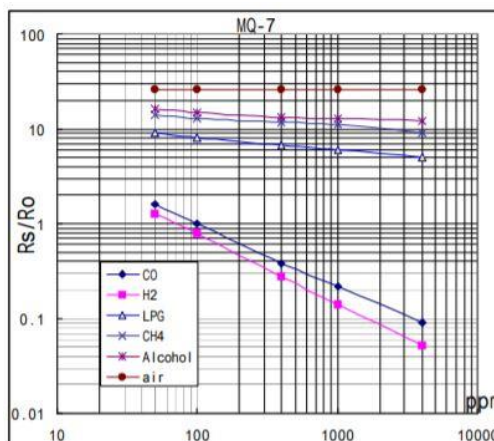


Figura 35: Sensibilidad del sensor MQ7

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remark
Vc	circuit voltage	5V ± 0.1	Ac or Dc
VH (H)	Heating voltage (high)	5V ± 0.1	Ac or Dc
VH (L)	Heating voltage (low)	1.4V ± 0.1	Ac or Dc
RL	Load resistance	Can adjust	
RH	Heating resistance	33 Ω ± 5%	Room temperature
TH (H)	Heating time (high)	60 ± 1 seconds	
TH (L)	Heating time (low)	90 ± 1 seconds	
PH	Heating consumption	About 350mW	

b. Environment conditions

Symbol	Parameters	Technical conditions	Remark
Tao	Using temperature	-20°C -50°C	
Tas	Storage temperature	-20°C -50°C	Advice using scope
RH	Relative humidity	Less than 95%RH	
O ₂	Oxygen concentration	21%(stand condition) the oxygen concentration can affect the sensitivity characteristic	Minimum value is over 2%

c. Sensitivity characteristic

symbol	Parameters	Technical parameters	Remark
Rs	Surface resistance Of sensitive body	2-20k	In 100ppm Carbon Monoxide
a (300/100ppm)	Concentration slope rate	Less than 0.5	Rs (300ppm)/Rs(100ppm)
Standard working condition	Temperature -20°C ± 2°C Vc:5V ± 0.1V VH:5V ± 0.1V	relative humidity 65% ± 5% RL:10K Ω ± 5%	
Preheat time	No less than 48 hours	Detecting range: 20ppm-2000ppm carbon monoxide	

Tabla 13: Especificaciones del sensor MQ7

Aspecto final del sistema

La conexión de la Raspberry con todos los sensores se realiza a través de una placa de pruebas (Figura 36), también llamada protoboard o breadboard y cableado. La placa de pruebas viene soldada por dentro de tal manera que hay 4 líneas de conexión en vertical, pudiendo conectar 63 cables por línea y 126 líneas de conexión en horizontal, pudiendo conectar 5 cables por línea (Figura 37). Las líneas horizontales suelen utilizarse para conectar la alimentación y en la tierra, siendo en este caso ideal debido a que son necesarias dos alimentaciones (5V y 3,3V) con sus respectivas tierras. Para evitar confusiones se ha decidido seguir un código de colores con los cables, utilizándose el rojo o naranja para alimentación, el negro o azul para tierra, y el blanco y amarillo para la comunicación I²C.

Los pines de la Raspberry se conectan por medio de un ‘cobbler’ en forma de T (Figura 38) que, aunque ocupa mucho espacio, simplifica enormemente las conexiones. Una vez unida la Raspberry a la protoboard, simplemente se trata de realizar las conexiones para cada sensor explicadas anteriormente, con especial cuidado de no provocar cortocircuitos y alimentar cada sensor con el valor asignado en su hoja de características. Por último, para funcionar como una estación independiente, la Raspberry se debe conectar por medio de sus puertos a una pantalla (HDMI), un teclado y un ratón (USB), además de a la propia alimentación y a una conexión local (Ethernet) o Wifi para ser capaz de transmitir los datos recibidos (Figura 40).

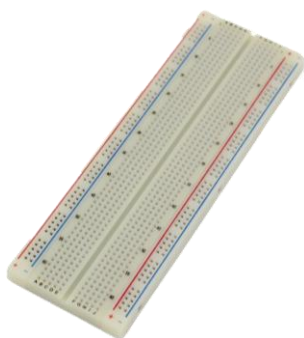


Figura 36: Placa de pruebas o protoboard

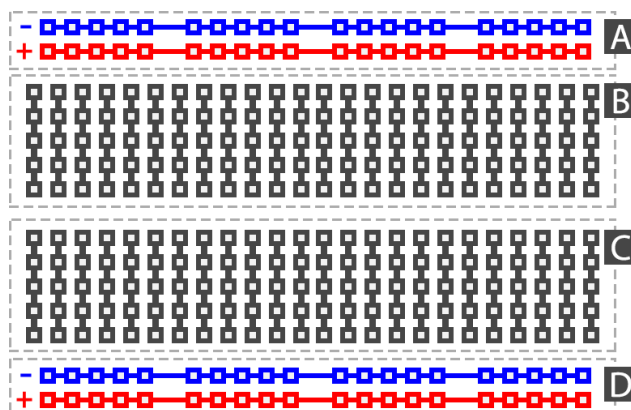


Figura 37: Esquema de conexión de la placa de pruebas



Figura 38: Cobbler y conector para la Raspberry

El medidor de contaminación propuesto aprovecha la versatilidad que ofrece la comunicación I²C, permitiendo la conexión de la mayoría de los sensores sobre una misma pareja de pines de la Raspberry y consultándolos uno por uno. Aun así, no todos los sensores utilizan esta comunicación y es necesario el uso de protocolo UART para el sensor de CO₂ y los pines GPIO directamente para los sensores de presencia y temperatura y humedad.

Debido a que los sensores comerciales de partículas PM₁₀ transmiten datos mediante UART y la Raspberry solo permite una conexión con este protocolo, no ha podido ser posible la implementación de un sensor de PM₁₀. Además, los sensores de radón (Figura 39) se desecharon rápidamente debido a su elevado precio. El radón es uno de los contaminantes principales en interiores, pero respetando la idea inicial de un medidor de bajo coste, no es posible invertir varios cientos de euros en un único sensor.

El aspecto final puede observarse desde distintos puntos de vista en la Figura 40 y sucesivas. Como puede observarse se ha añadido un pequeño ventilador que permite el enfriamiento del procesador de la Raspberry, disipando el calor producido al funcionar durante horas o incluso días sin descanso.

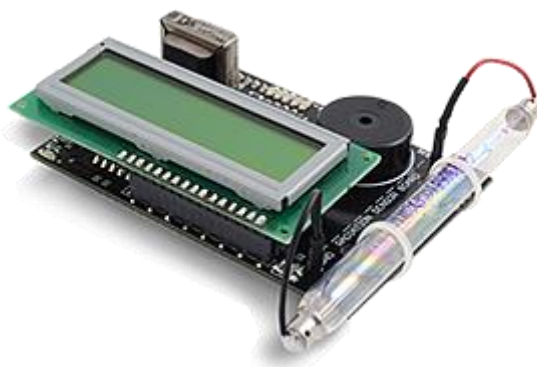


Figura 39: Sensor Geiger utilizado para medir radón



Figura 40: Puertos de la Raspberry

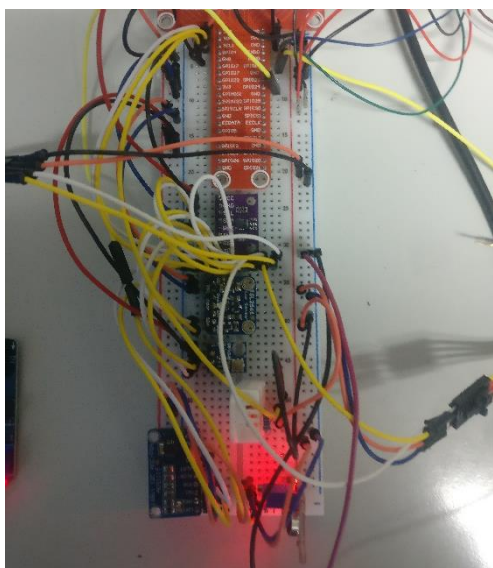


Figura 41: Conexiones sobre la protoboard

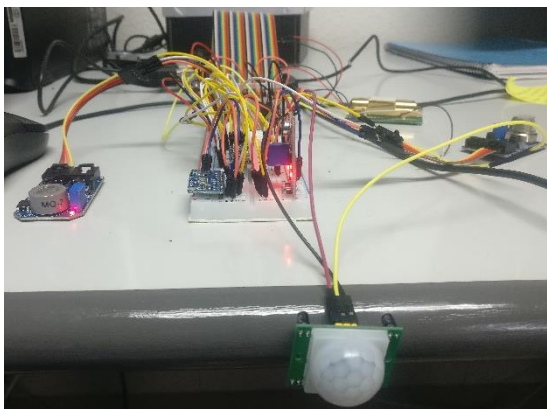


Figura 42: Vista frontal del sistema

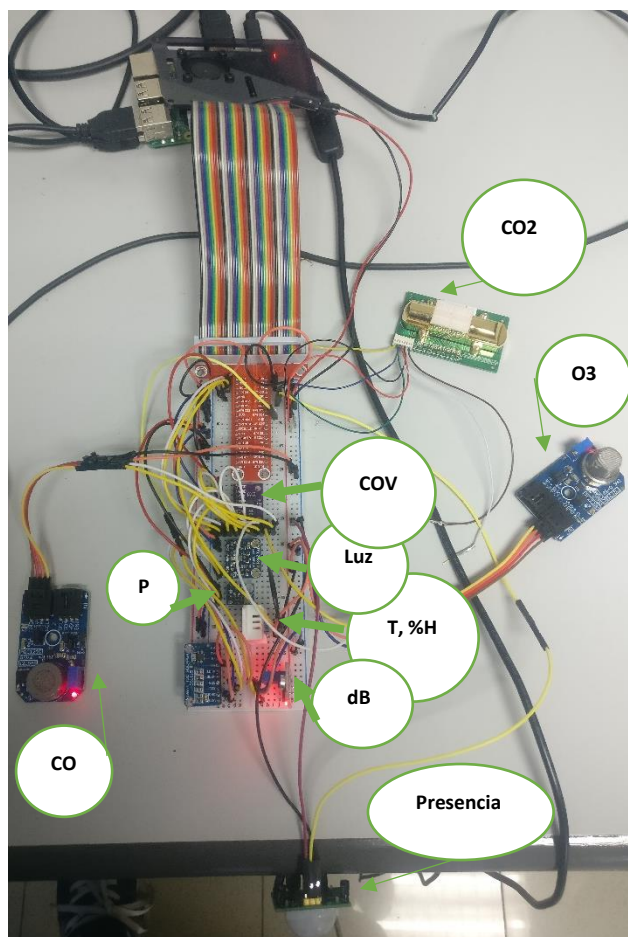


Figura 43: Vista en planta del sistema

Como puede observarse, el aspecto final del sistema no es el de un producto terminado, mucho menos el aspecto que podría tener en su comercialización. Aunque la realización de un prototipo real queda fuera del alcance del proyecto, se darán unas claves a tener en cuenta para un diseño final, además de alguna propuesta simplificada.

En primer lugar se encuentra el aspecto visual. No es agradable encontrarse con un amasijo de cables, que además de ser poco atractivo es incómodo durante su uso y sobre todo poco seguro. Los cables se pueden soltar y producir cortocircuitos o contactos no deseados, además de darse posibles roturas o sobrecalentamientos. Por ello para cualquier diseño final del producto se hace imprescindible eliminar, o en su defecto limitar, los cables. Esto puede conseguirse diseñando una placa de circuito impresa (PCB por sus siglas en inglés Printed Circuit Board), en las que las conexiones se establecen internamente, soldando los componentes directamente a la placa (Figura 44). Este método exige diseñar también algún tipo de carcasa o aislamiento que proteja a los usuarios a la exposición a corriente.

El uso de una PCB también permite una mayor integración de los sensores, llevando a un ahorro significativo de espacio. El problema que surge es el que tiene la integración de todos los circuitos electrónicos, y que cuestiona el cumplimiento en el futuro de la primera ley de Moore [36], la dificultad para disipar el calor en componentes electrónicos integrados (Figura 45). Para este caso el problema resulta nimio comparado con el de grandes empresas de microprocesadores, pero aun así debe tenerse en cuenta. Debe evitarse el sobrecalentamiento de los sensores y de la PCB para proteger a los usuarios y para evitar fallos de los componentes. Para ello es imprescindible que la carcasa protectora actúe como encapsulado y sea capaz de disipar el calor generado, sobre todo por los sensores de CO y ozono. Este encapsulado debe diseñarse de tal manera que no dificulte las medidas de los propios sensores, evitando limitar el acceso del aire del ambiente interior al sistema.

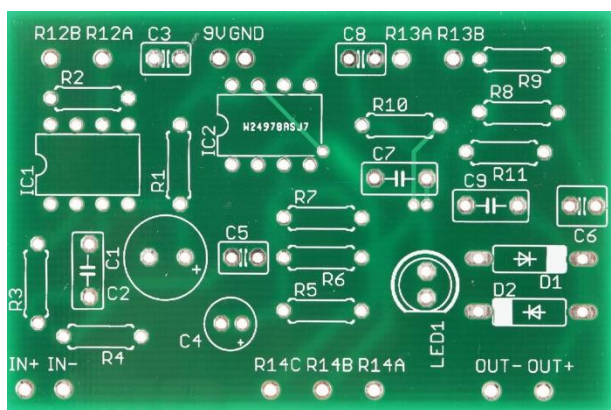


Figura 44: Ejemplo de una PCB sencilla



Figura 45: El uso de disipadores soluciona en gran medida la evacuación de calor

En conclusión, la solución propuesta consiste en una PCB diseñada con Eagle o algún programa similar, utilizando los modelos de los sensores proporcionados por el fabricante (y diseñando los que no se encuentren), con disipadores e incluso ventiladores en la proximidad de los sensores de CO y ozono para renovar el aire y disipar el calor generado en estos sensores, y con una cubierta aislante eléctricamente en la cara de la PCB en la que no están soldados los sensores. Esta base puede ir cubierta con más disipadores o podría soldarse o atornillarse al otro extremo la propia Raspberry, permitiendo al sistema actuar como un todo en lugar de componerse por una Raspberry y una placa con sensores independientes. El conjunto podría situarse encima de una mesa o incluso anclarse a una pared si se quiere mantener fijo y que no ocupe espacio en la mesa.

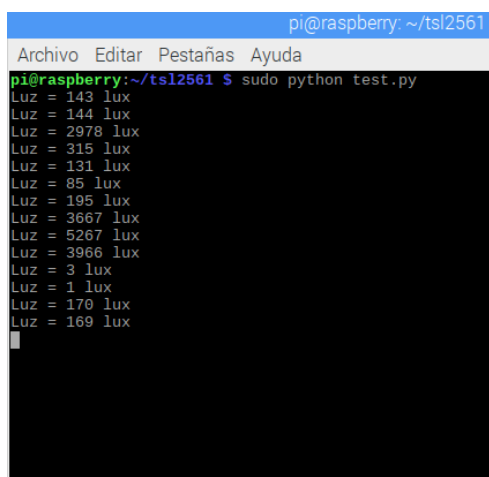
Programación

Una vez terminado el hardware es necesario trabajar el software. En este caso el objetivo era en un principio la lectura en serie de los distintos sensores, pudiendo mostrarlos por pantalla.

El lenguaje utilizado es Python en su versión 3 debido a la sencillez del lenguaje, a que en la Raspberry se encuentra instalada una aplicación capaz de ejecutar programas en Python (se elimina la necesidad de instalar un compilador) y a que la mayoría de los repositorios y bibliotecas están en este lenguaje.

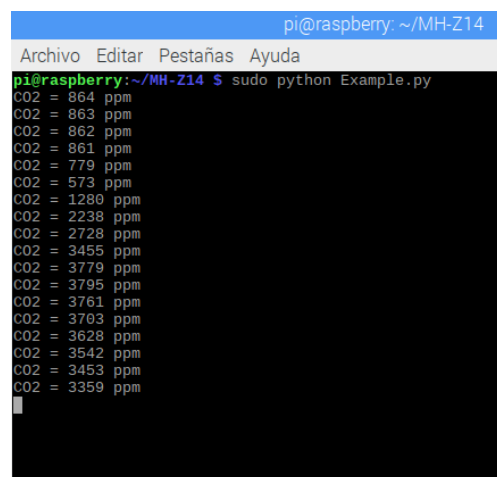
En la mayoría de los casos la biblioteca viene proporcionada por el propio fabricante, como en el caso de los sensores de Adafruit o de Ncd.io, pero en otros ha sido necesaria la descarga de repositorios en páginas como StackOverflow o GitHub. Incluso en alguno de los sensores el código ha sido de elaboración propia, por ejemplo en el sensor de presencia. La autoría original de las librerías utilizadas se menciona en el código principal, y las licencias de uso de las mismas, en el caso de requerirlas, han sido incluidas en la carpeta de la Raspberry en la que se encuentra el propio programa.

Para no complicar excesivamente, es recomendable probar cada sensor por separado con su código correspondiente (Figura 46, Figura 47, Figura 48), y una vez verificado todo, y comprobado que las medidas recibidas por cada uno de los sensores son coherentes con el lugar en el que se han tomado, puede pasarse a escribir un código que comprenda todo el objetivo del proyecto.



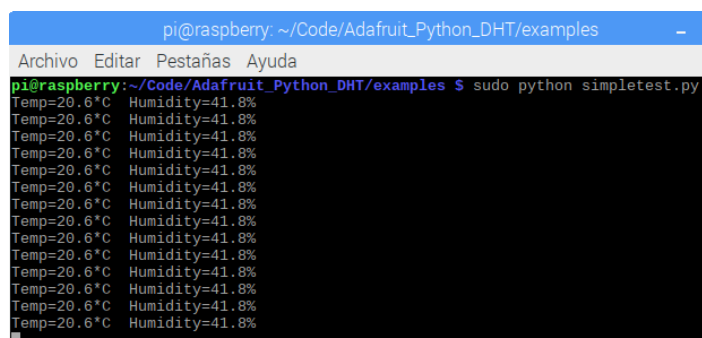
```
pi@raspberrypi: ~/ts12561
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi:~/ts12561 $ sudo python test.py
Luz = 143 lux
Luz = 144 lux
Luz = 2978 lux
Luz = 315 lux
Luz = 131 lux
Luz = 85 lux
Luz = 195 lux
Luz = 3667 lux
Luz = 5267 lux
Luz = 3966 lux
Luz = 3 lux
Luz = 1 lux
Luz = 170 lux
Luz = 169 lux
```

Figura 46: Pruebas del sensor de luz con distintas iluminaciones



```
pi@raspberrypi: ~/MH-Z14
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi:~/MH-Z14 $ sudo python Example.py
CO2 = 864 ppm
CO2 = 863 ppm
CO2 = 862 ppm
CO2 = 861 ppm
CO2 = 779 ppm
CO2 = 573 ppm
CO2 = 1280 ppm
CO2 = 2238 ppm
CO2 = 2728 ppm
CO2 = 3455 ppm
CO2 = 3779 ppm
CO2 = 3795 ppm
CO2 = 3761 ppm
CO2 = 3703 ppm
CO2 = 3628 ppm
CO2 = 3542 ppm
CO2 = 3453 ppm
CO2 = 3359 ppm
```

Figura 47: Pruebas del sensor de CO2



```
pi@raspberrypi: ~/Code/Adafruit_Python_DHT/examples
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi:~/Code/Adafruit_Python_DHT/examples $ sudo python simpletest.py
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
Temp=20.6°C Humidity=41.8%
```

Figura 48: Pruebas del sensor de temperatura y humedad

El código está estructurado de la siguiente manera. En primer lugar deben definirse las librerías o las funciones a importar (Figura 49). De estas librerías pueden distinguirse las básicas, presentes en la propia Raspberry (time, RPi.GPIO, sleep...); y las de cada sensor en particular. A continuación se definen objetos o instancias de los sensores que así lo requieran (los que en su librería estén definidos como clase), y se configuran los pines GPIO (entrada y salida) de los sensores que leen directamente y no utilizan ningún protocolo de comunicación. Lo descrito hasta ahora comprenderá el *setup* del programa.

```

1  #Codigo para la monitorizacion de presencia y calidad de aire indoor de bajo coste mediante Raspberry PI
2  # Luis Menendez Dominguez
3  # Librerias con Copyright desarrolladas por Adafruit, ControlEverythingCommunity, MBTechWorks y Free Software Foundation
4  # Licencias de uso de las mismas en la carpeta raiz
5
6  import RPi.GPIO as GPIO
7  import time
8  from time import sleep
9  from Adafruit_CCS811 import Adafruit_CCS811
10 import Adafruit_BMP.BMP085 as BMP085
11 from tsl2561 import TSL2561
12 import Adafruit_DHT
13 import mhz14
14
15 #Definicion de los sensores a utilizar
16
17 ccs = Adafruit_CCS811()
18 sensor_pre = BMP085.BMP085()
19 sensor_temp = Adafruit_DHT.DHT22
20 tsl = TSL2561(debug=True)
21 sensor_CO2 = mhz14.mhz14("/dev/ttyAMA0")
22

```

Figura 49: Librerías importadas y definición de los sensores

Por último deben leerse los sensores y mostrar los resultados por pantalla. La estructura elegida se basa en definir una función de lectura a cada sensor en la que, utilizando las librerías, se asigna a una variable la lectura del sensor y a continuación se muestra por pantalla. Estas funciones serán llamadas una por una en el *loop* del programa, componiendo este un bucle infinito (Figura 50). Para evitar que errores de ejecución puedan afectar al programa se ha utilizado una estructura *try*, que solo ejecuta esa parte del código si no hay errores, con un *except* que finaliza la ejecución del programa en el caso de que se pulse el comando *ctrl + c*. El comportamiento del programan queda resumido en el flujograma adjunto (Gráfico 4).

```

68 try:
69     while True:
70         leerPresencia()
71         leerTemperatura()
72         leerContaminantes()
73         leerPresion()
74         leerCO2()
75         leerLuz()
76         time.sleep(0.5)
77
78 except KeyboardInterrupt:
79     pass
80
81 finally:
82     GPIO.cleanup()
83     print ("Programa terminado")

```

Figura 50: Estructura del programa inicial

```

pi@raspberrypi: ~/Code
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi:~/Code $ sudo python code_sinozono.py
Temp=20.9°C Humidity=42.1%
Presion = 92805.00 Pa
Altitud = 734.15 m
CO2 = 983 ppm
Luz = 161 lux
Temp=20.9°C Humidity=42.1%
Presion = 92803.00 Pa
Altitud = 734.96 m
CO2 = 982 ppm
Luz = 161 lux
Temp=20.8°C Humidity=42.1%
Presion = 92803.00 Pa
Altitud = 734.69 m
CO2 = 979 ppm
Luz = 161 lux
Temp=20.8°C Humidity=42.1%
Presion = 92795.00 Pa
Altitud = 734.51 m
CO2 = 978 ppm

```

Figura 51: Ejecución del programa inicial

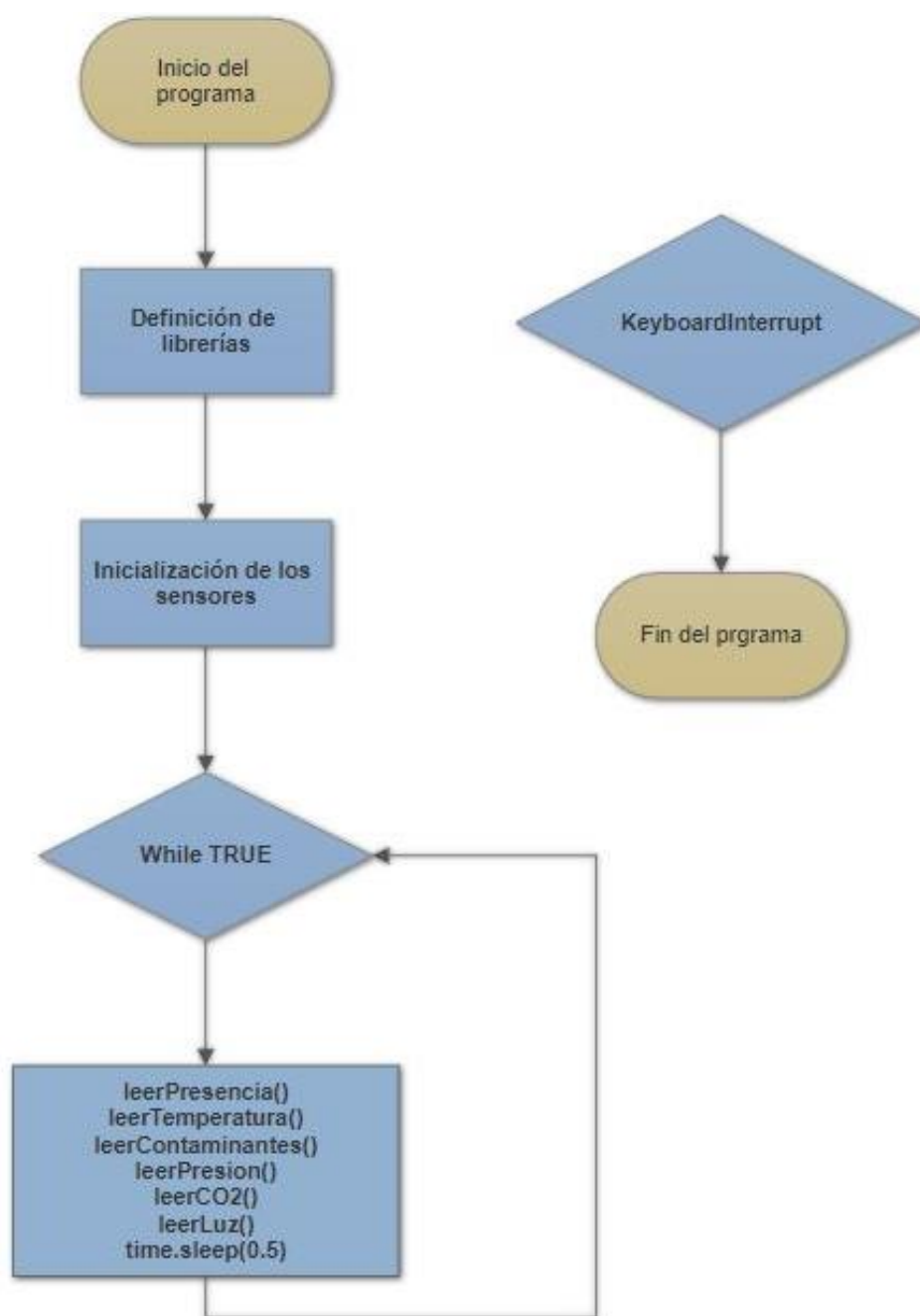


Gráfico 4: Flujograma del programa original

Para ejecutar el programa será necesario habilitar los protocolos a utilizar (I²C y UART) en la configuración del sistema. Para comprobar que los puertos asignados para I²C han establecido la conexión, debe ejecutarse en el símbolo del sistema la sentencia “sudo i2cdetect -y 1”, la cual mostrará un mapa de los puertos de la Raspberry (Figura 52), marcando los que están conectados por I²C, siendo en este caso los puertos 39, 48, 50, 52, 5a y 77 y correspondiendo a los sensores de luz, sonido, ozono, CO, COV y presión respectivamente.

Una vez concluido el objetivo principal del trabajo, al ser un poco limitado y no alcanzar todo el potencial posible para una pequeña estación de toma de datos ambientales, se decide avanzar más en el proyecto. De este modo los datos tomados no solo serán mostrados como pantalla, sino que se utilizará la Raspberry como un emisor de datos a través del protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport). La adición de esta función es posible al código proporcionado por otro alumno de la ETSII en su trabajo de fin de grado [37], Víctor Román, el cual fue adaptado y ampliado para las necesidades de este proyecto.

El protocolo MQTT es muy común para la comunicación entre máquinas en aplicaciones de IoT (Internet of Things), una rama con multitud de aplicaciones en la Industria 4.0, y su popularidad se debe al bajo consumo de ancho de banda, pudiendo utilizarse en dispositivos con poca memoria RAM y una CPU sencilla. Este protocolo tiene una arquitectura en forma de estrella (Figura 53), con un nodo central que hace de servidor o “broker” encargado de gestionar la red y distribuir los mensajes y varios nodos cliente que pueden recibir los mensajes. Los mensajes se organizan en temas conocidos como “topics” y cada uno de los clientes puede elegir a cuáles de los topics se suscribe, recibiendo todos los mensajes incluidos. Los topics siguen una estructura jerárquica, con varios niveles, por lo que el cliente puede elegir suscribirse a un topic en concreto, pero también a uno con una mayor jerarquía del que pueden depender varios topics y recibiendo los mensajes de todos ellos.

Para implementar el uso de MQTT en el sistema son necesarios dos códigos. En el primero de ellos (código emisor), se leen y se publican los datos recibidos de los sensores. En este caso, al ser una aplicación sencilla, el broker tendrá cuatro topics sin ninguna jerarquía entre ellos y el cliente elegirá el que más le interese. Estos cuatro temas son “data”, en el que se incluye el valor de todos los sensores registrados; “ambiental”, con las mediciones de gases (CO₂, CO, O₃ y COVs); “físico”, en el que se encuentra el valor de la humedad, la temperatura, la presión y la altitud; y “extra”, con datos que no incluye normalmente un medidor de este tipo (luz, presencia y sonido).

El segundo código se denomina código cliente. En él se recibirán los datos proporcionados por el sistema emisor utilizando el protocolo MQTT. En este caso, se ha supuesto que el cliente está suscrito a los cuatro temas, pero la configuración puede cambiarse a voluntad del usuario, o incluso utilizar el mismo código para varias máquinas a la vez, suscribiéndose en cada una a distintos temas.

Para el uso de este protocolo es necesario descargarse un software libre de MQTT, siendo elegido en este caso el “paho.mqtt.python” [38]. También es necesario el software de intercambio de datos “JSON” (JavaScript Object Notation) y “mosquitto”, que permite establecer la Raspberry como broker en el protocolo MQTT.

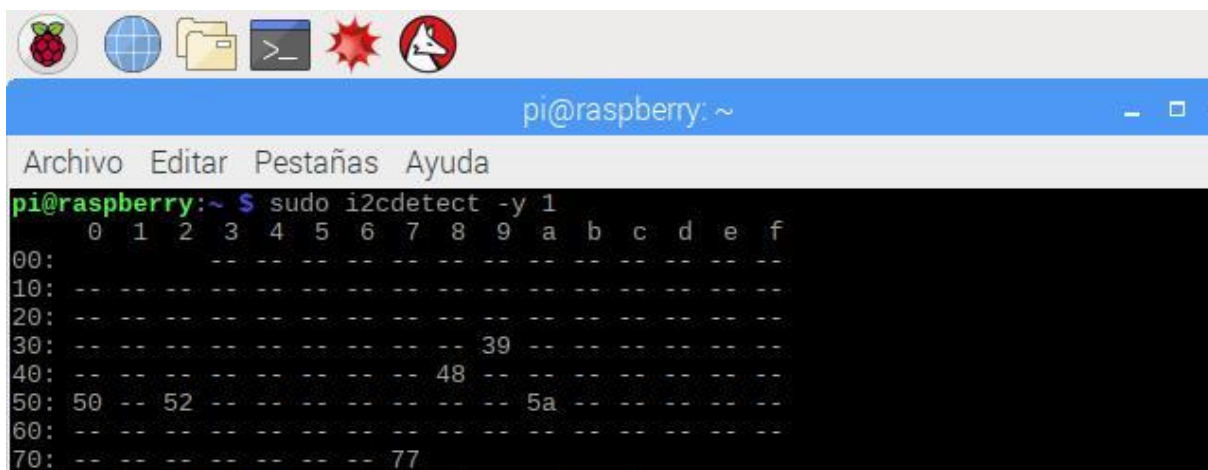


Figura 52: Puertos conectados por I2C

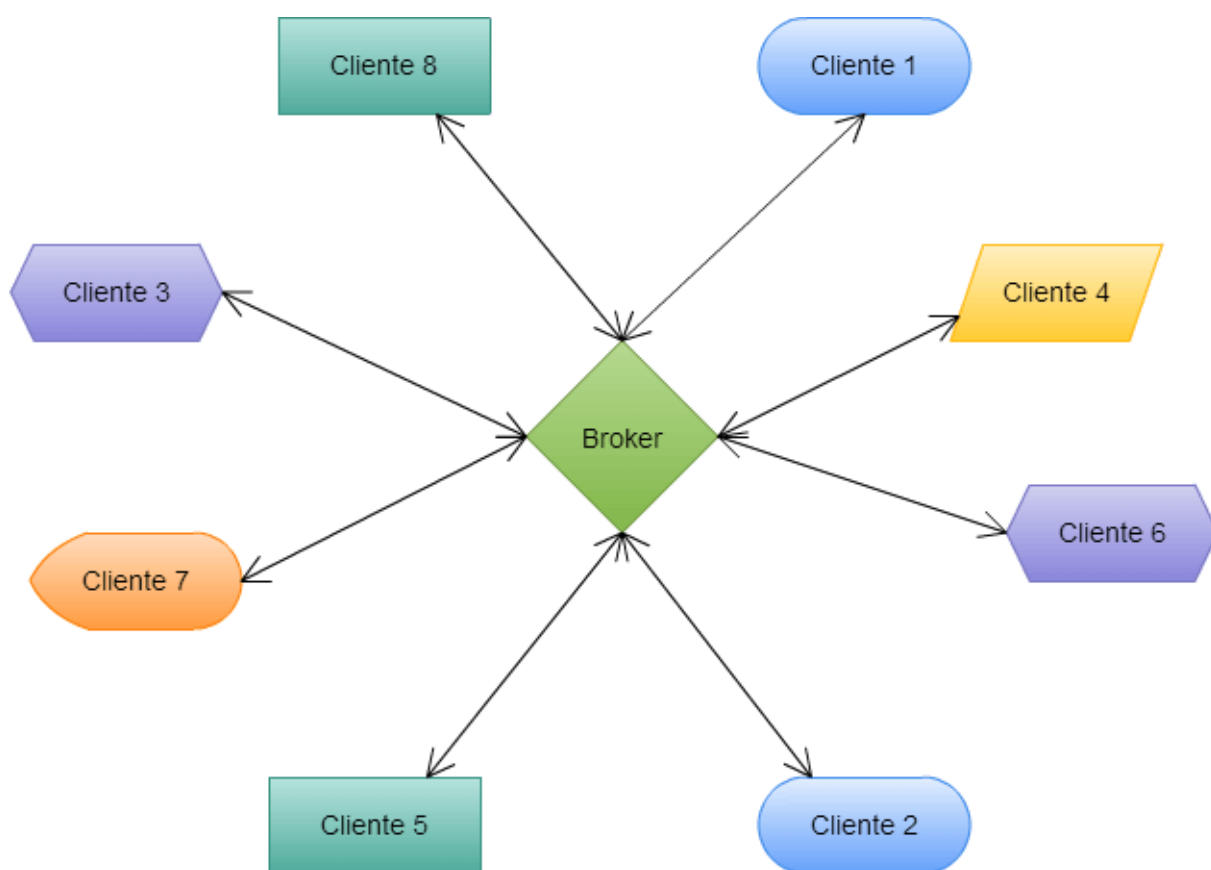


Figura 53: Arquitectura del protocolo MQTT

El código emisor tiene una estructura similar a la descrita en la fase del desarrollo en la que únicamente se mostraban los datos por pantalla. En primer lugar es necesario incluir todas las librerías que vayan a utilizarse durante el programa, en este caso la librería del protocolo MQTT, la de JSON, las desarrolladas para monitorizar los sensores (incluidas las de elaboración propia), y las que realizan otras tareas auxiliares (time, RPi.GPIO, datetime, math...). También deben crearse los objetos o particularizaciones de cada sensor, además de definir los pines para aquellos que operen directamente con la Raspberry. A continuación se dan valor a algunas variables necesarias para la conexión MQTT, entre ellas los propios topics en los que se va a enviar la información y los vectores en los que se va a almacenar la información para enviarla. Por último se debe establecer la conexión con el broker y, una vez establecida, se inicia un bucle infinito en el que se leen los sensores y se publican los datos.

La función principal que monitoriza los sensores uno a uno y almacena los valores en los vectores es `get_sense_data()`. En ella se ejecutan en serie las funciones implementadas en librerías para leer los sensores y se almacenan los datos obtenidos en cada una de las posiciones de un vector. De esta manera cada topic tiene asociado un vector y la escritura de cada parámetro se realizará en los vectores a cuyo topic pertenece ese sensor en concreto, escribiéndose siempre en dos de ellos (“data”, para todos ellos y “ambiental”, “físico” o “extra” dependiendo del sensor leído). Es de vital importancia el nombre de los campos en los que se almacena cada dato, porque el vector se almacenará posteriormente en una base de datos y los nombres deben coincidir con los de la base de datos para un correcto posicionamiento. La función `get_sense_data()` es llamada en el bucle principal para más adelante publicar cada vector obtenido en su topic correspondiente mediante la función `publish` de la librería de MQTT (Figura 54).

```
146 while True:
147     client.publish(pub_topic, json.dumps(get_sense_data()))
148     client.publish(pub_topic1, json.dumps(sense_data1))
149     client.publish(pub_topic2, json.dumps(sense_data2))
150     client.publish(pub_topic3, json.dumps(sense_data3))
151     time.sleep(1)
152
```

Figura 54: Publicación de los datos correspondientes a los cuatro topics

Como se ha mencionado en el párrafo anterior, con el objetivo de implementar en el futuro un sistema de tratamiento de datos, código del cliente está modificado de tal forma que es capaz de enviar los datos obtenidos a una base de datos de MariaDB, un derivado de MySQL, para poder acceder a ellos a través de una cuenta en phpMyAdmin. En primer lugar se suscribe a los topics elegidos y a continuación se espera la recepción de un mensaje. El envío a la base de datos se realiza inmediatamente después de recibir el mensaje, mediante la función `store_mysql(sensor_data)` (Figura 55). Para evitar saturar la base de datos con medidas repetidas debe distinguirse el topic del que viene el mensaje leído, y si se trata de “data” será almacenado y si no, no lo hará debido a que los otros tres topics solo otorgan información repetida. La base de datos desarrollada se trata simplemente de una tabla con tantas columnas como parámetros distintos se recojan y tantas filas como mediciones se hagan. Resulta de gran utilidad para análisis posterior de los datos, pudiendo generarse gráficas con los datos obtenidos o consultar valores que cumplan una o varias condiciones en particular. Para escribir en la base de datos es necesaria la descarga del software MySQL1.

La estructura final de los dos programas principales se resume en los siguientes flujogramas (Gráfico 5, Gráfico 6), pudiendo encontrarse en los anexos ambos códigos completos para resultar más aclaratorio.

```
### WHEN CONNECTION IS DONE ###
def on_connect(client, userdata, flags, rc):

    # Eliges los temas a los que suscribirte
    print("Connected with result code " + str(rc))
    client.subscribe(sub_topic)
    client.subscribe(sub_topic1)
    client.subscribe(sub_topic2)
    client.subscribe(sub_topic3)

### WHEN RECIEIVING A MESSAGE ###
def on_message(client, userdata, msg):
    global first_message
    print(msg.topic + " " + str(msg.qos) + " " + str(msg.payload))
    sensor_data = json.loads(msg.payload)
    if len(sensor_data) > 10 :
        store_mysql(sensor_data)
    else :
        pass

client = mqtt.Client()
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message
client.connect(mqtt_broker, mqtt_port, 60)
```

Figura 55: Estructura del código cliente, primero se conecta a los topics mediante `on_connect` y luego se reciben los mensajes y se almacenan si provienen del topic "data" por medio de `on_message`

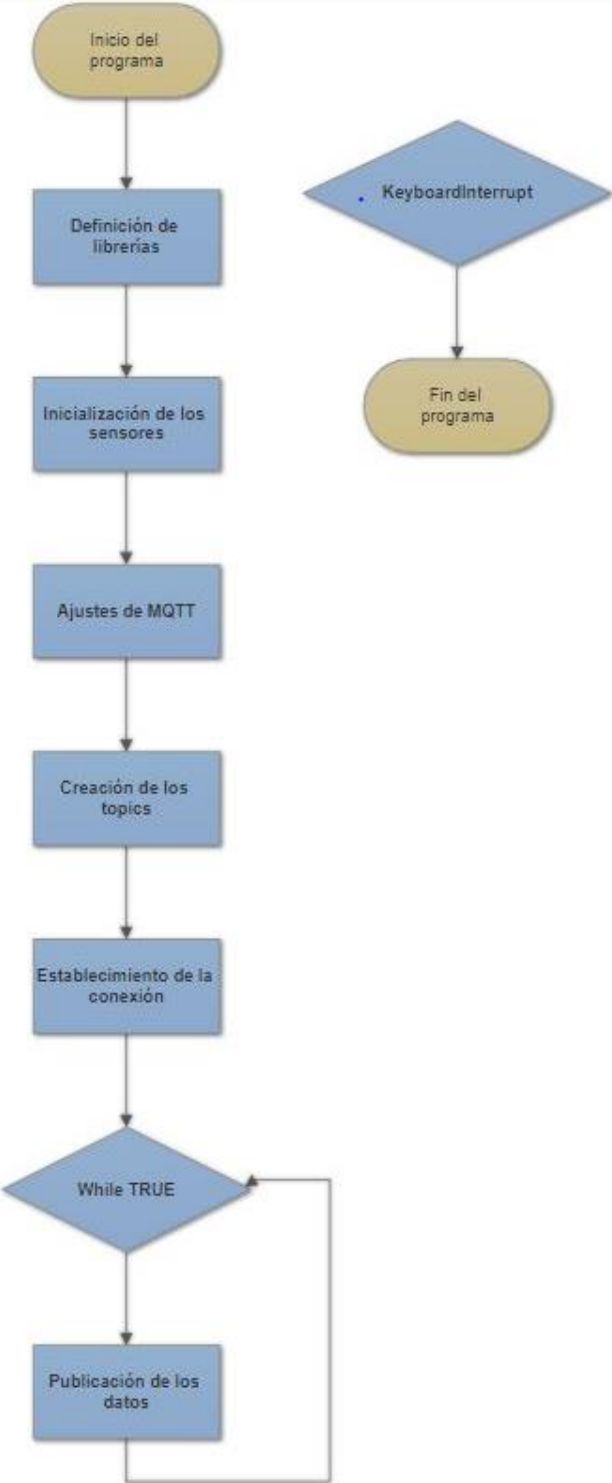


Gráfico 5: Flujograma del código emisor

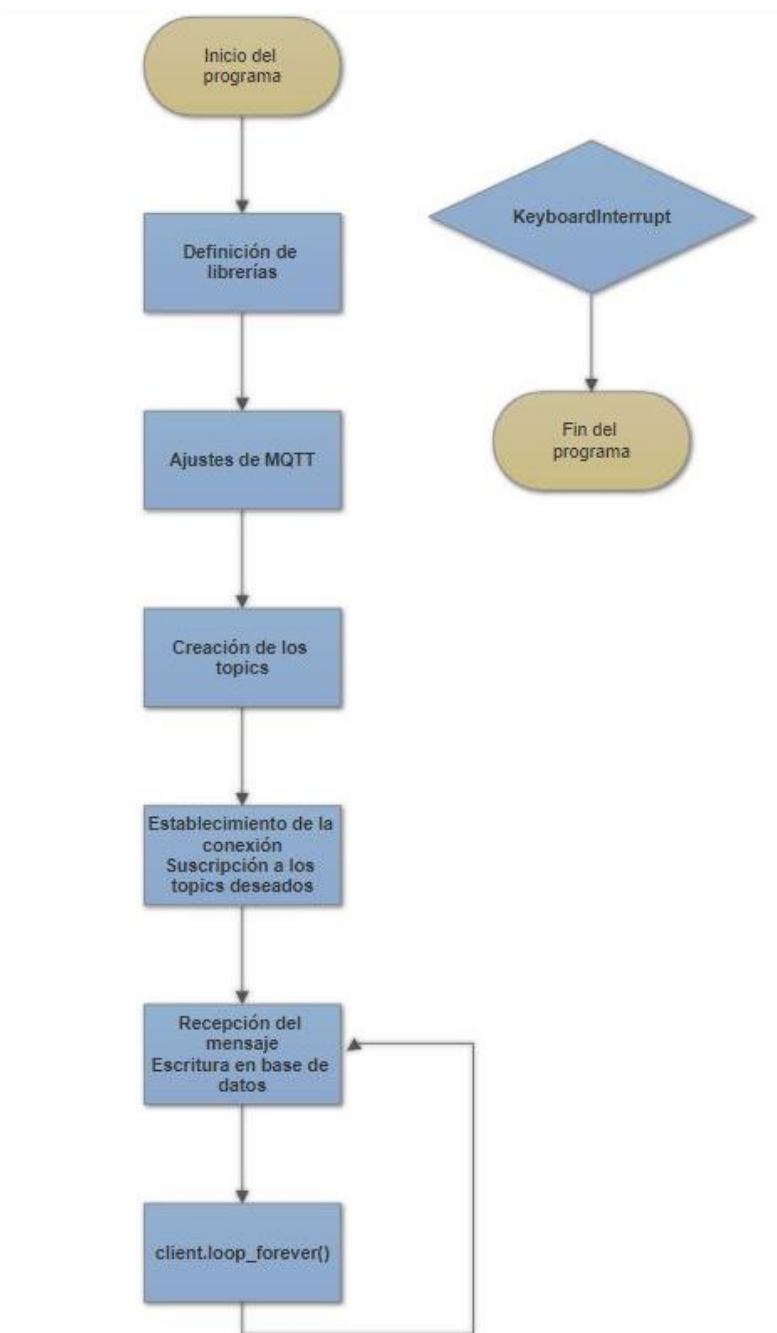


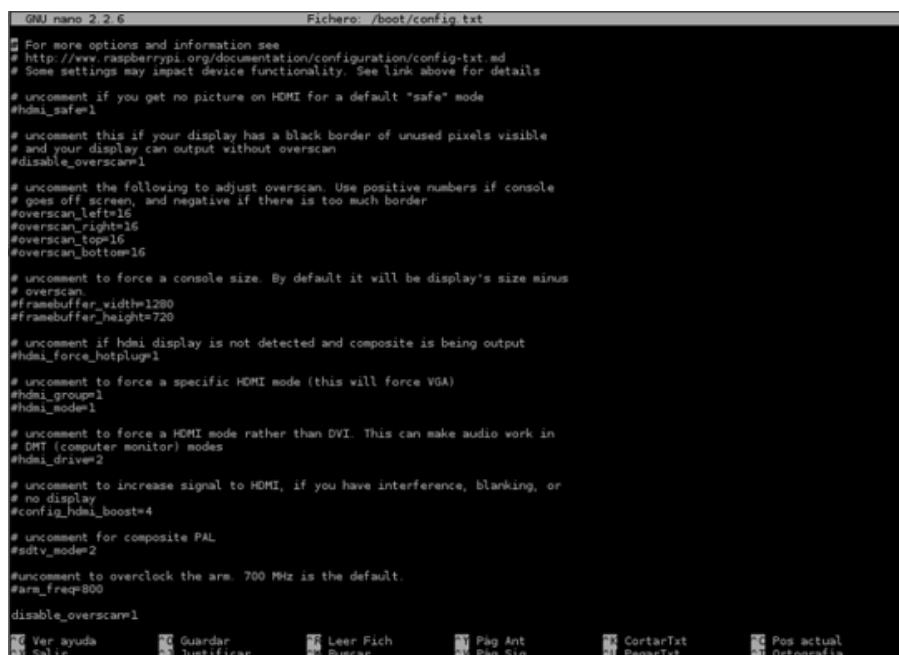
Gráfico 6: Flujograma del código cliente

El sistema en conjunto funciona de la siguiente manera:

En primer lugar, con la Raspberry conectada a sus periféricos correspondientes (teclado, pantalla, ratón, etc.) se ejecuta el código emisor. Este hace que los sensores comiencen a leer datos y los envíen, aunque no haya ningún receptor al otro lado que quiera almacenar los datos.

Una vez comenzada la emisión, en otro dispositivo, o en la Raspberry misma por medio del protocolo SSH comentado más adelante, se ejecuta el código cliente. Este puede modificarse para estar suscrito a cualquiera de los cuatro topics utilizados, pero es recomendable que por lo menos esté suscrito a “data”, ya que es el topic cuyos datos van a escribirse en la base de SQL. Al ejecutarse el código cliente, si el emisor está funcionando correctamente, el nuevo dispositivo comenzará a recibir datos, los cuales serán mostrados por pantalla pero a su vez serán almacenados en la base de datos.

Para una mayor comodidad a la hora de utilizar el sistema, se ha modificado el archivo que la Raspberry lee durante su encendido (boot), para que ejecute en segundo plano el código emisor. De este modo en la estación solo es necesario encender el dispositivo, evitando así el tener que ir al símbolo del sistema y ejecutar el programa por medio de sentencias de código. Lo único que debe hacer el usuario es conectarse a otra máquina cuando desee recabar datos y ejecutar el código cliente, pudiendo modificarlo para suscribirse a los topics deseados.



```
GNU nano 2.2.6          Archivo: /boot/config.txt
# For more options and information see
# http://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/config-txt.md
# Some settings may impact device functionality. See link above for details
# uncomment if you get no picture on HDMI for a default "safe" mode
#hdmi_safe=1

# uncomment this if your display has a black border of unused pixels visible
# and your display can output without overscan
#disable_overscan=1

# uncomment the following to adjust overscan. Use positive numbers if console
# goes off screen, and negative if there is too much border
#overscan_left=16
#overscan_right=16
#overscan_top=16
#overscan_bottom=16

# uncomment to force a console size. By default it will be display's size minus
# overscan
#framebuffer_width=1280
#framebuffer_height=720

# uncomment if hdmi display is not detected and composite is being output
#hdmi_force_hotplug=1

# uncomment to force a specific HDMI mode (this will force VGA)
#hdmi_group=1
#hdmi_mode=1

# uncomment to force a HDMI mode rather than DVI. This can make audio work in
# DMT (computer monitor) modes
#hdmi_drive=2

# uncomment to increase signal to HDMI, if you have interference, blanking, or
# no display
#config_hdm_boost=4

# uncomment for composite PAL
#sdtv_mode=2

#uncomment to overclock the arm. 700 MHz is the default.
#arm_freq=800

disable_overscan=1

Ver Ayuda      Guardar      Leer Fich     Pág Ant      CortarTxt    Pos actual
Salir          Justificar   Buscar        Pág Sig     PegarTxt     Ortografía
```

Figura 56: Para ejecutar un programa con el inicio hay que sobrescribir el boot de la Raspberry

Comprobación del sistema y pruebas

En proyectos de monitorización y tratamiento de datos cobra especial importancia el análisis de resultados obtenidos, tanto para verificar que los valores puntuales medidos son correctos, como para asegurarse que el sistema cumple su función de medición de datos durante el suficiente tiempo, algo que podría producirse por fallos de sobrecarga, sobrecalentamiento de los sensores e incluso del propio microprocesador de la Raspberry.

La verificación de las medidas de los sensores se hace en la primera fase de desarrollo, antes de programar, y se hace comprobando que los valores resultantes de la lectura de los mismos son coherentes con el ambiente en el que se prueban. En este caso las mediciones se han realizado en una sala de trabajo localizada en la Cátedra de Proyectos, un lugar similar a una oficina, con ventilación constante y en verano. Las mediciones de prueba se encuentran en los siguientes rangos:

- Temperatura: entre 25 y 28 °C, elevada debido a la estación del año.
- Humedad: entre un 35 y un 50%, baja debido a la situación geográfica (Madrid).
- Presión: cerca de los 95 kPa, baja debido a la situación geográfica (Madrid está situada a más de 600 m de altitud).
- CO₂: en torno a 400 ppm, valor muy bajo al no haber ninguna fuente y al ser la ventilación adecuada.
- CO: entre 0,45 y 0,60 ppm, valor bajo por la misma razón que el CO₂.
- O₃: entre 1,50 y 1,60 ppb.
- COV: de 1 a 30 ppb.
- Luz: algo más de 300 lux, valor típico presente en oficinas.
- dB medios: entre los 35 y los 50 dB, debido a la ausencia de ruidos en el lugar de trabajo durante el mes de julio. Aun así, los valores parecen algo bajos, por las mediciones realizadas el sensor de sonido parece demasiado impreciso y lo más sensato sería utilizarlo como sensor de ruidos fuertes, cuando se dé una diferencia grande entre los valores de dB máximo y medio.

Una vez realizadas las comprobaciones en cada sensor es necesario verificar que el sistema es capaz de enviar datos y que estos se reciben correctamente desde otras máquinas puntuales. Para comprobar la emisión se añaden en el código líneas que muestren por pantalla los datos después de enviarlos, asegurando de este modo que no se da ningún error en la conexión y envío de los datos. Para la recepción se han hecho dos comprobaciones. En primer lugar, directamente desde una máquina diferente conectada a la misma red (el código del cliente está configurado para que cliente y emisor estén conectados a la misma red aunque podría configurarse para que no fuera así). El otro método resulta útil para los casos en los que no se pueda tener acceso a una máquina distinta, por ejemplo en el caso de que haya un empleado utilizando el ordenador y se quiera recibir y acceder a los datos. Consiste en acceder de forma remota a la máquina Linux desde la propia Raspberry, por medio de un protocolo SSH (Secure Shell). De este modo se aprovecha la capacidad de las máquinas Linux de abrir varias ventanas de terminal de comandos (también llamado en Windows símbolo del sistema) y operar en ellas de forma simultánea, emitiendo y recibiendo datos y pudiendo consultarlos con la necesidad de un único dispositivo, pero con la flexibilidad de poder hacerlo en dos máquinas distintas si así se prefiere.

El último testeo que debe hacerse para asegurar que el sistema es completamente operativo es una simulación de su funcionamiento real. Para ello se mantiene el dispositivo en operación durante un largo periodo de tiempo y se comprueba que no ocurre ningún tipo de sobrecarga o de calentamiento excesivo. Como prevención del calentamiento del procesador se sitúan varios disipadores sobre los puntos más calientes de la Raspberry, además de un ventilador con alimentación de 5V que mantiene la placa a una temperatura adecuada.

El problema principal aparece en el comportamiento real de los sensores. Esto es debido a que los sensores son comerciales de bajo coste, y no es de esperar que tengan un comportamiento dinámico perfecto, pudiendo surgir errores con el tiempo. Después de mantener el sistema operativo durante varios periodos de días, incluso de semanas, surgieron fallos en los componentes. Los sensores de ozono y monóxido de carbono alcanzan altas temperaturas durante su funcionamiento, hasta el punto de quemar en contacto con la piel. Aun así sus medidas no se ven afectadas y los valores no cambian debido a este fenómeno. En cambio, hay sensores que no aumentan su temperatura durante el servicio, pero sus medidas sí se ven afectadas. Este es el caso del sensor de CO₂, cuyas medidas van aumentando con el tiempo desde los 400 ppm en los primeros usos, hasta los 500-600 ppm después de estar funcionando durante días sin descanso. Este no es el problema más serio, ya que no afecta al funcionamiento del dispositivo; el fallo más grave tiene lugar en el sensor de COVs. Sus medidas aumentan casi linealmente con el tiempo que está el sensor funcionando, pasando de los 0-1 ppb al comienzo, hasta más de 100 ppb en pocas horas. Si se obvia el fallo en la medida y se mantiene en funcionamiento, antes de cumplir un día operativo, el sensor acaba dando un fallo de conexión en el puerto, deteniendo la ejecución del programa. Las detenciones inesperadas del programa resultarían en un fallo estrepitoso para su objetivo final, ya que lo más común es encender el sistema y dejar que recabe y envíe datos mientras el usuario se dedica a otras labores. Es por ello que, después de probar con otro sensor del mismo modelo al adquirido inicialmente y con uno de una empresa distinta, obteniéndose los mismos resultados en ambos casos, se ha decidido eliminar la funcionalidad de medida de COVs, quedando esta propuesta para posibles avances posteriores del proyecto.

El resto de los sensores sí han tenido el comportamiento deseado durante las pruebas de comportamiento real. El sensor de luz tuvo algún error puntual (medidas con valor 0 cuando no debía), pero los sensores de temperatura, humedad, presión, altitud, CO y O₃ dan continuamente valores coherentes con el ambiente en el que han sido probados.

RESULTADOS

Para analizar los resultados obtenidos se pone en funcionamiento el dispositivo durante un día completo. Con los valores añadidos a la base de datos (en la que ocupan aproximadamente 1,5 MB) se genera una gráfica respecto al tiempo en MATLAB y se establecen conclusiones.

Como la velocidad de toma de datos es aproximadamente de una muestra cada 5 segundos, la densidad de los datos en un día es demasiado grande y las gráficas resultan algo difusas. Por ello se discriminan los datos de tal manera que el número de muestras pasa a ser un minuto. Además los valores se filtran posteriormente en MATLAB. Las gráficas obtenidas son las siguientes:

- **Temperatura** (Gráfico 7): El intervalo entre mayor y menor temperatura es menor de 2 °C, por lo que se trata de una propiedad bastante estable. Es una temperatura algo baja para haber sido tomada en verano, pero se debe a que está el aire acondicionado está encendido durante el día. Esto hace además que la temperatura diurna y nocturna sea muy similar.

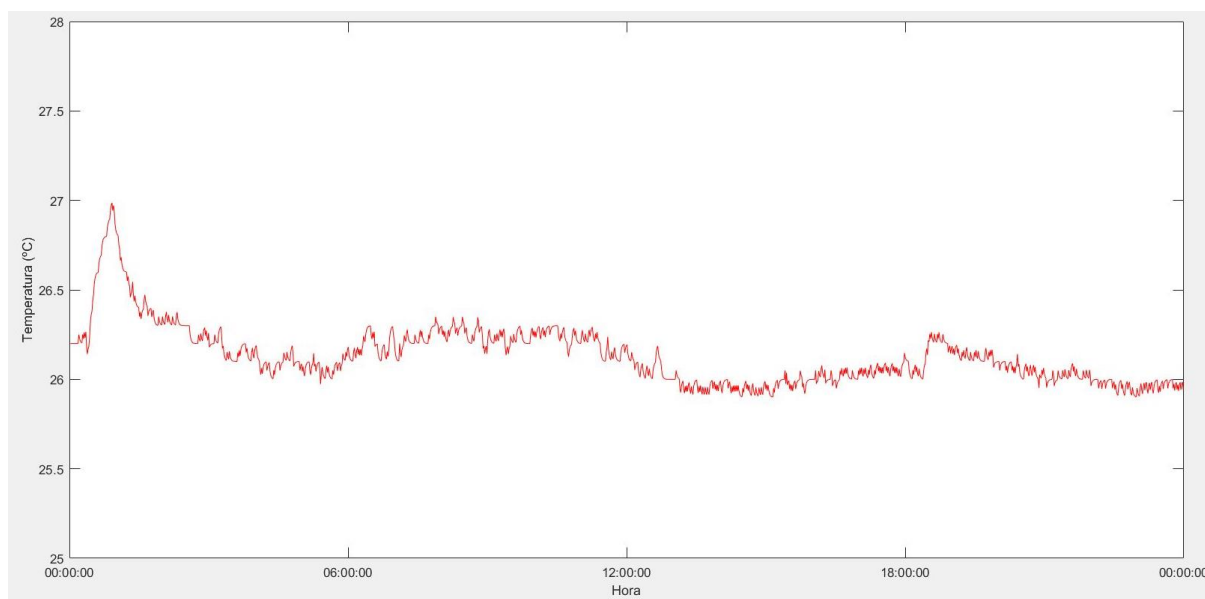


Gráfico 7: Temperatura frente a la hora del día

- **Humedad** (Gráfico 8): Los cambios entre humedad relativa máxima y mínima son más acusados que para la temperatura. Como la temperatura varía poco, no puede observarse variación de la humedad debido a ella (normalmente al amanecer, con temperaturas bajas, el aire puede almacenar una mayor cantidad de agua). Se observa una caída de más de un 7% en la segunda mitad del día, llegando a estar por debajo del 36%, un valor enormemente seco aún para tratarse de Madrid, debido de nuevo al aire acondicionado, que absorbe y condensa la humedad del ambiente.

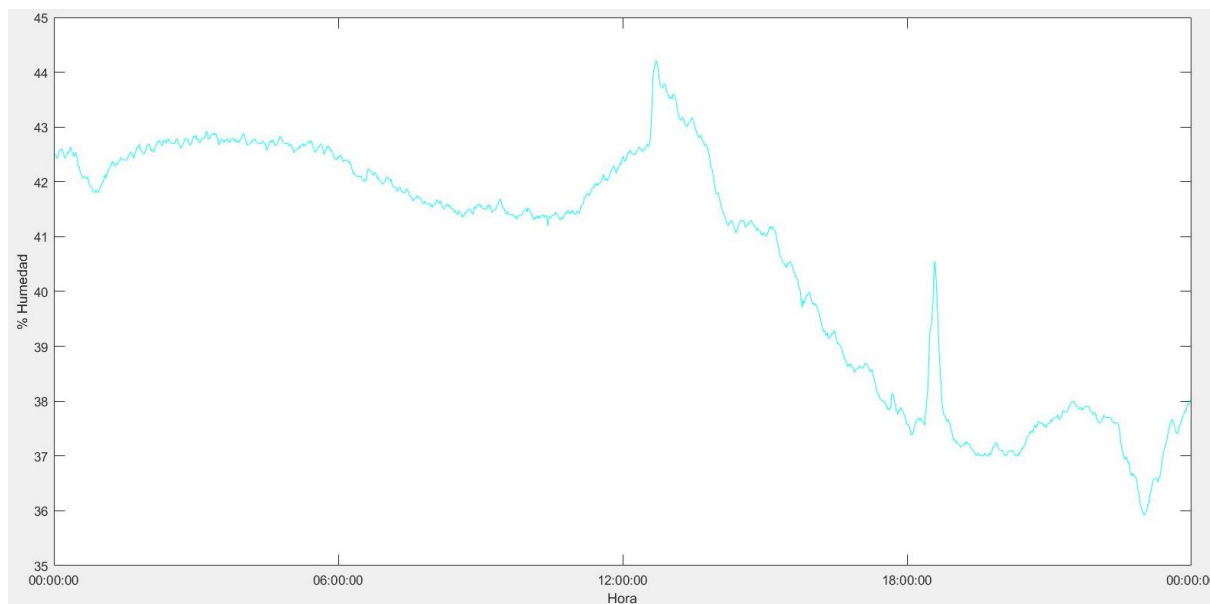


Gráfico 8: Humedad frente a la hora del día

- **Presión atmosférica** (Gráfico 9): El valor de la presión atmosférica está íntimamente relacionado con la altitud a la que se mide (Ecuación 1). El salto entre valor máximo y valor mínimo es pequeño, en torno a 3 milibares, por lo que aunque la gráfica se aprecie un cambio, este no es realmente apreciable. Esto se debe a que los cambios de presión necesitan un intervalo de tiempo mayor de un día y a que el sistema no se ha movido de sitio durante sus medidas.

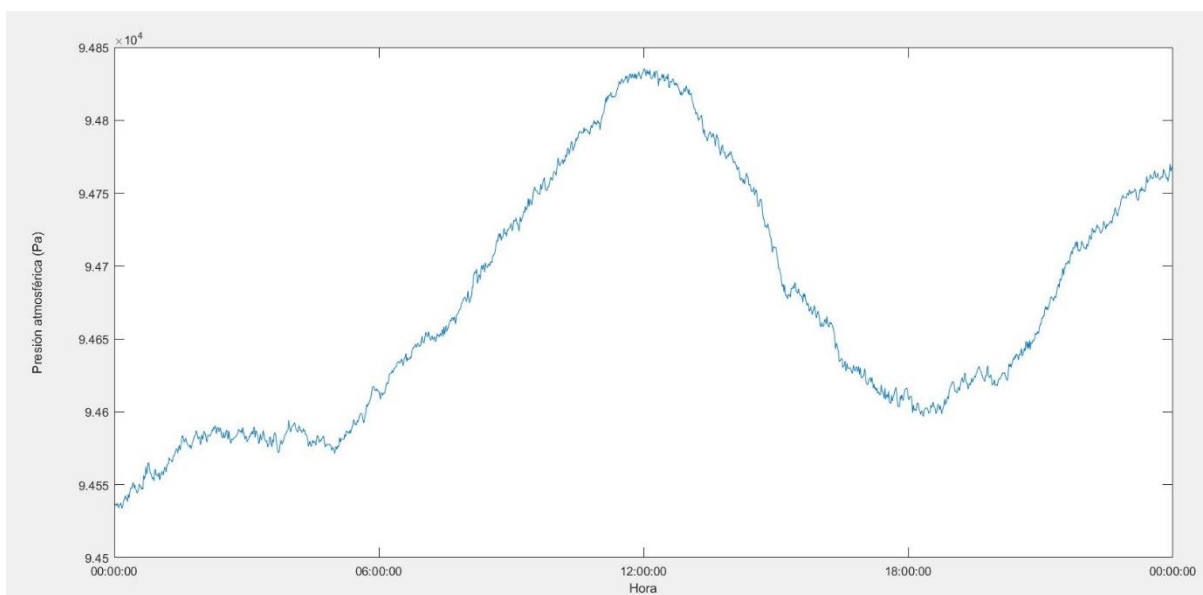


Gráfico 9: Presión atmosférica frente a la hora del día

- Concentración de CO2** (Gráfico 10): El valor base de CO2 se sitúa cerca de los 400 ppm, una cantidad muy pequeña (llegando a ser el límite inferior de varios sensores de este gas). Durante las horas de mayor actividad (mediodía y media tarde) se establece una gran variación relativa en la concentración (más de un 50%) debido a estar en un ambiente más cargado, aunque el valor al que se llega de 600 ppm sigue siendo un valor reducido y nada peligroso.

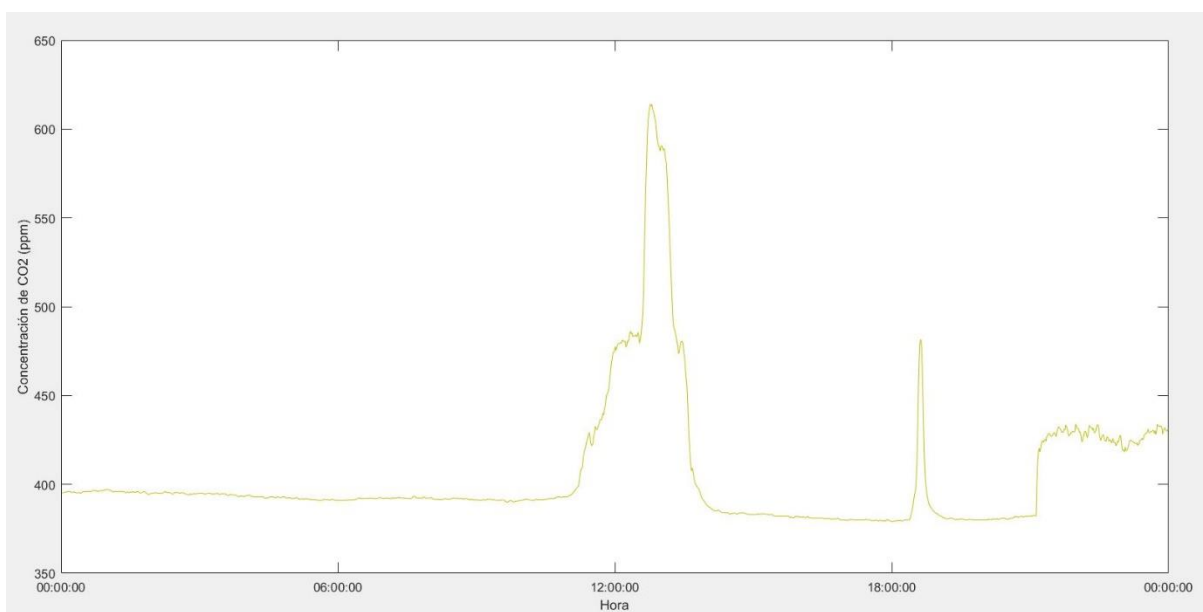


Gráfico 10: Concentración de CO2 frente a la hora del día

- **Concentración de CO** (Gráfico 11): El análisis es similar al de la concentración de CO₂. En las horas de mayor actividad en la cátedra el ambiente está más cargado y los contaminantes no se eliminan con tanta rapidez como se generan y por tanto se dan los picos que pueden observarse sobre las 12:00 y sobre las 18:00. En este caso además se da algo que no ocurría con el CO₂. Cuando tiene lugar el pico de mediodía aumenta cerca de un 10%, pero al terminar no se vuelve a la concentración previa, sino que baja una cantidad similar a la que había subido previamente en el pico. Por último puede apuntarse que la concentración tomada es menos estable que la medida para el CO₂, algo que puede deberse a una mayor resolución de este sensor frente al de dióxido de carbono.

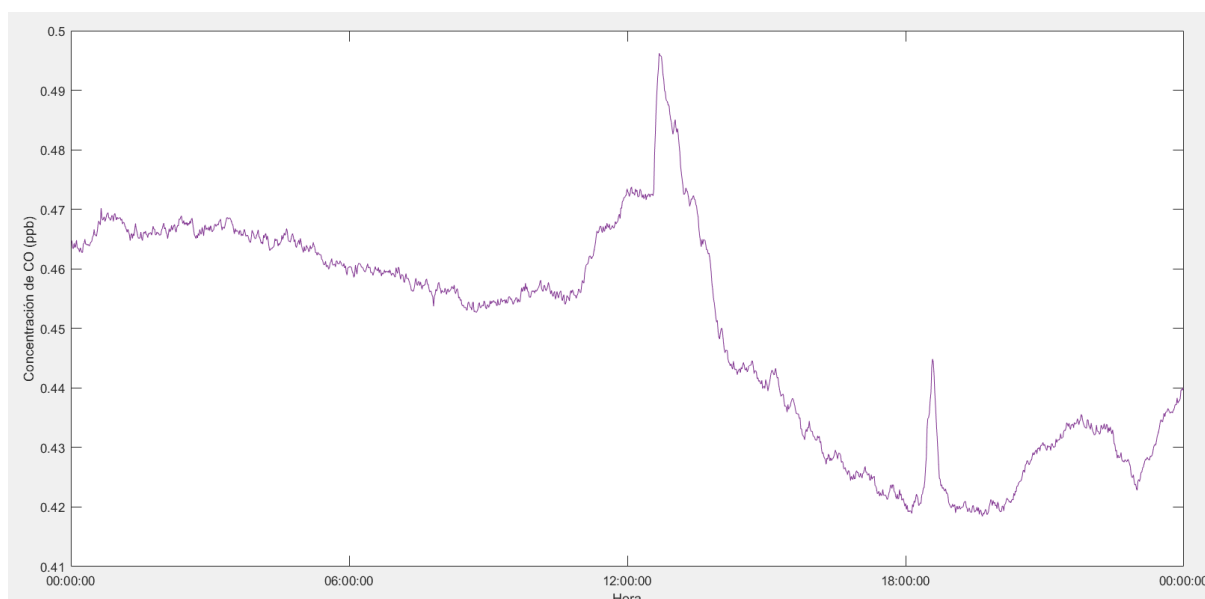


Gráfico 11: Concentración de CO (ppb) frente a la hora del día

- **Concentración de ozono** (Gráfico 12): Al igual que la concentración medida en los otros dos gases, tiene picos en los momentos de mayor actividad. La gráfica es más similar a la del CO debido sobre todo a que el sensor utilizado es de la misma familia, y por tanto tiene la misma resolución y precisión. Los cambios aquí presentes no son demasiado grandes (menos de un 10% entre valor máximo y mínimo a lo largo del día), estando además realmente lejos de las concentraciones que pueden considerarse límite, estando este valor límite en torno a los 50 ppb frente al 1,5-1,6 ppb medidos durante este periodo de tiempo.

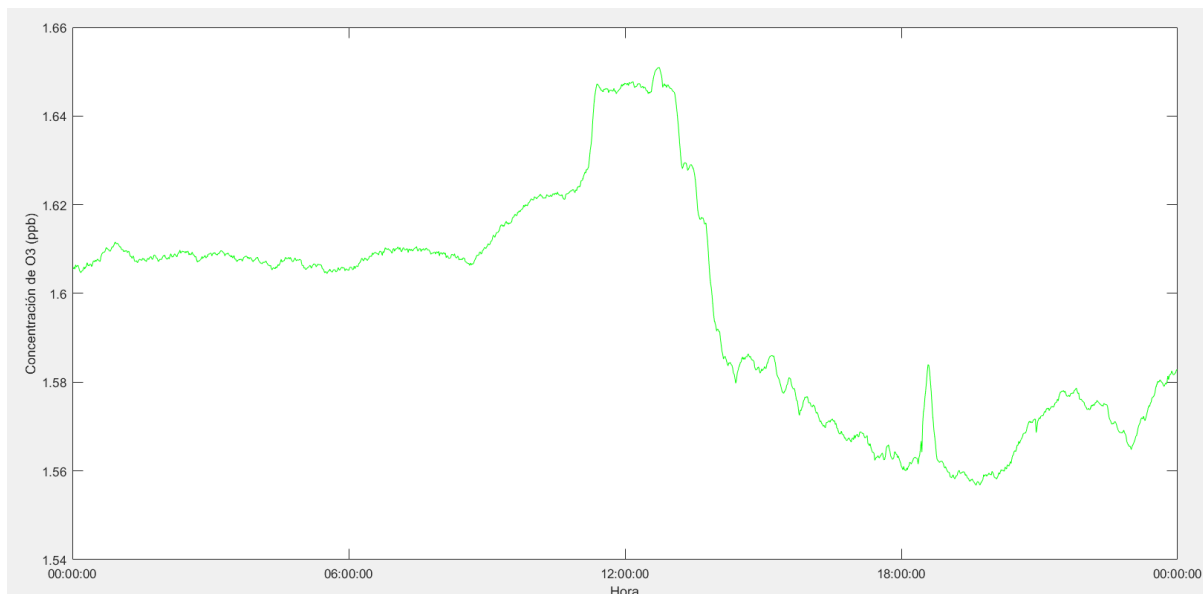


Gráfico 12: Concentración de ozono (ppb) frente a la hora del día

- Intensidad del sonido** (Gráfico 13): En primer lugar es necesario indicar que el sensor de sonido utilizado de bajo coste está diseñado para actuar como sensor digital, pudiendo regularse con un potenciómetro al valor a partir del cual su salida digital se hace 1. Para su utilización como sensor analógico, y sobre todo como medidor de dB, es necesario un convertidor analógico-digital y se recomienda un dispositivo amplificador para leer la señal adecuadamente. Al no hacerlo de esta manera, la amplificación se ha realizado por software y la transformación del valor analógico del sensor a decibelios se ha hecho tomando la referencia de un valor conocido (medido con un sonómetro) y calculando a partir de esa referencia y el valor medido con la Ecuación 2.

Esta manera de medir puede inducir errores en varios de los pasos intermedios y es por ello que las medidas deben tomarse más como referencias que como valores exactos. En las tres gráficas pueden observarse el valor mínimo, el máximo y el medio de los valores tomados en intervalos de un segundo. Lo ideal sería colocar las tres gráficas en una misma, pero para evitar confusión se colocan las tres por separado, aunque con la misma escala en el eje y para favorecer las comparaciones. Como el sensor está situado en una zona de trabajo, pero no de silencio absoluto, el valor medio se sitúa en torno a los 40-45 dB. A diferencia del resto de gráficas, en las que lo más importante era observar la evolución de las mediciones frente al tiempo, aquí lo más destacable, además del valor medio, es la presencia de picos de valores máximos, indicando ruidos puntuales o algún golpe que detecte el sensor, destacando el presente entre las 14 y las 15 horas y que llegó a alcanzar más de 55 dB en ese instante, un valor más propio de una aglomeración.

$$dB = dB_{ref} + 10 * (\log_{10} \frac{x}{x_{ref}})$$

Ecuación 2: Decibelios a partir del valor medido y una referencia

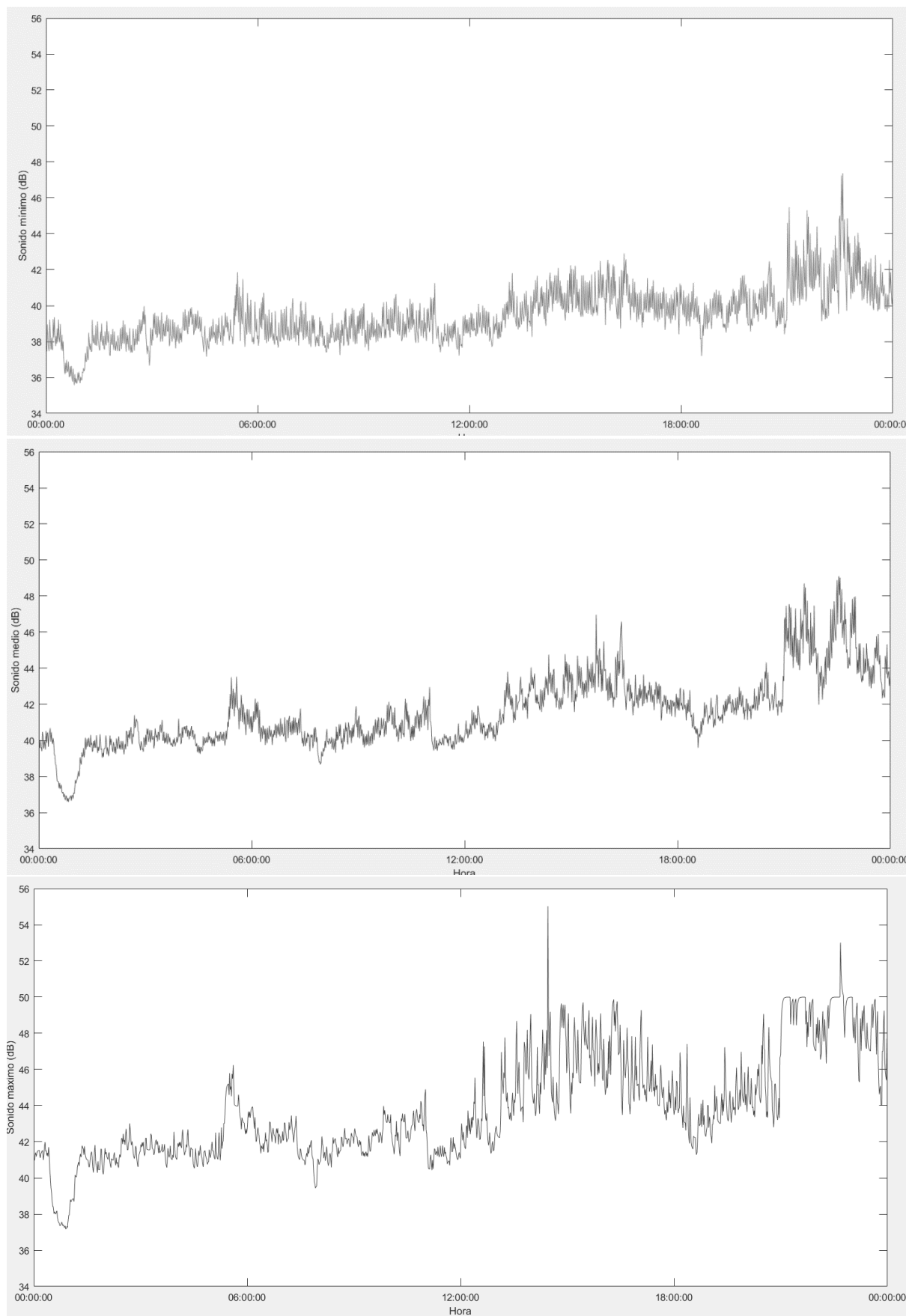


Gráfico 13: Sonido mínimo, medio y máximo (dB) frente al tiempo

CONCLUSIONES

En primer lugar, resulta interesante analizar si los objetivos propuestos en un principio se han cumplido, y si no es así analizar por qué no ha sido posible y soluciones propuestas para el futuro.

Se ha logrado crear un sistema de tipo smart-sensor de configuración flexible y bajo coste que obtenga el valor de parámetros típicos como humedad, temperatura, luz, ruido y contaminantes mediante sensores comerciales típicos, además de atender peticiones de otros sistemas mediante el protocolo MQTT. De los contaminantes a estudiar propuestos se descartó el radón por el alto coste de sus sensores; las partículas, debido a que los sensores presentes utilizan un protocolo UART, el mismo que el sensor de CO₂. La Raspberry solo dispone de una conexión UART por lo que se ha priorizado la medición de CO₂, aunque las partículas constituyen un contaminante de aire interior realmente importante. También debió descartarse a mitad del proyecto la medida de COVs debido a que los sensores probados durante ese tiempo se calentaban internamente y provocaban un aumento progresivo de la medida con el tiempo, no siendo válidos para mediciones durante largos períodos de tiempo. Por último se ha decidido mantener el sensor de sonido dado que, aunque el método de medida no es el utilizado normalmente y no parece muy preciso, los resultados obtenidos se corresponden bien con los que deberían resultar en el ambiente en el que se han probado. Es por ello que habría que tener cuidado si se requiere medir el sonido en otros ambientes, las medidas podrían no adaptarse bien a lo que se espera.

Además, como podrá observarse en la sección de presupuesto, el coste unitario del sistema no se ha ido demasiado lejos de los 300 euros. Teniendo en cuenta que la mayor parte de las horas de mano de obra han sido de desarrollo del producto y para siguientes unidades no serían necesarias; y que varios de los costes de material también forman parte del desarrollo (pantalla, teclado y protoboard), el coste unitario puede situarse en torno a los 400 euros (redondeando al alza para tener un margen de seguridad). Es un coste aceptable teniendo en cuenta que se han incluido los costes estimados de desarrollo futuro del proyecto (también al alza), y la mayoría de ellos podrían reducirse con la producción de más de una unidad, como la impresión y el material de la PCB. Es por ello que se considera cumplido el objetivo de mantener el sistema como uno de bajo coste, aunque sin excesivo margen.

Se ha logrado estructurar un programa en Python capaz de leer los sensores uno por uno con un tiempo de muestreo que no sobrecargue la Raspberry (y configurable en el código mediante un retardo). Los resultados medidos se pueden mostrar por pantalla pero para una mayor comodidad en la gestión de datos posterior se han conseguido guardar en una base de datos de phpMyAdmin, concretamente en una tabla cuyas filas son las mediciones y cuyas columnas son los parámetros medidos.

Además se han conseguido algunos de los objetivos que se proponían como ampliación en un primer momento, como la posibilidad de que el sistema actúe como estación de medida remota y emisora de los parámetros leídos, pudiendo recibirse los datos en otro computador, eligiendo además los datos que se quieren recibir (los ambientales, físicos o extra). Esto se ha logrado mediante el protocolo MQTT, muy utilizado en aplicaciones de IoT, y gracias al código proporcionado por Víctor Román [37].

No ha sido posible en cambio, por problemas de tiempo, diseñar un aspecto final con fines más comerciales, eliminando la incomodidad para el usuario de los cables. Aun así, se dan unas pautas descriptivas de los aspectos de diseño a tener en cuenta, así como una posible alternativa.

Resumiendo, se han conseguido cumplir los objetivos propuestos al comienzo del proyecto, además de alguno más que en un primer momento estaban pensado líneas futuras. Durante el desarrollo del proyecto han surgido problemas, sobre todo con los sensores y su lectura, pero la mayoría de ellos se han arreglado, quedando pendiente la medida de COVs.

LÍNEAS FUTURAS

Debido a que el objetivo inicial de crear un producto de utilidad en el marco de la sostenibilidad, llegando al punto de poder comercializarse, era realmente ambicioso; tras la finalización del proyecto se proponen una serie de líneas futuras para terminar el sistema tal y como se concibió en un primer momento.

En primer lugar, si se quiere conseguir un aparato realmente completo, se debe lograr la medida de algunos parámetros fundamentales que no se consiguieron durante el desarrollo. Estos son principalmente los COVs y las partículas, sobre todo a partir de PM₁₀ debido a que cuando las partículas son lo suficientemente pequeñas como para ser respirables, tienen más riesgo para la salud. Para medir COVs deberá buscarse un sensor que mantenga estable su medida con el tiempo y permita mantenerlo conectado largos períodos de tiempo. Para medir partículas deberá estudiarse la manera de leer dos sensores que utilicen el protocolo UART por la misma línea, o en caso de no ser posible, encontrar un sensor que lea mediante el protocolo I²C.

Otra línea futura sería la elaboración del prototipo final, más comercial, eliminando todos los cables mediante una PCB que realice las conexiones internamente, e integrando la Raspberry y la PCB en un mismo sistema, siendo capaz el sistema integrado de disipar la mayor cantidad de calor posible, sobre todo de los sensores de CO y de ozono. También en este objetivo se incluye la elaboración de una carcasa o cubierta que le dé un aspecto más atractivo a la vista, pero también que haga el sistema seguro, evitando posibles contactos del usuario con puntos en tensión o con las zonas internas más calientes. A la hora de diseñar esta cubierta hay que tener en cuenta que para que los sensores de contaminantes y de luz midan adecuadamente, se debe tener un contacto con el aire del exterior, por lo que debe pensarse la manera de que el aire llegue a los sensores de CO, CO₂, COVs y ozono, además de que no se tape el acceso de la luz al sensor de luz y evitar la atenuación del sonido para el sensor de sonido.

Por último podría incluirse un mayor tratamiento de los datos en el programa, pudiendo por ejemplo mostrar una gráfica con los datos registrados a lo largo del día, como la mostrada en el apartado de resultados, siendo esta actualizada con cada nueva medida o generándose una única gráfica al final de cada día. El tratamiento de grandes cantidades de datos es una de las novedades introducidas en la Industria 4.0, realizándose por medio de Big Data, y se deja a criterio de aquel que se proponga seguir desarrollando el proyecto las estrategias de tratamiento y gestión de datos a seguir.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. de D. S. Cf, “Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development,” 2015.
- [2] CIS, “Ecología y Medio Ambiente (I),” 1996.
- [3] CIS, “Ecología y Medio Ambiente (II),” 2005.
- [4] CIS, “Ecología y Medio Ambiente (III),” 2007.
- [5] CIS, “Barómetro de abril 2018,” 2018.
- [6] CIS, “Barómetro de enero 2014,” 2014.
- [7] W. H. Organization and others, “Air quality guidelines for Europe,” 1987.
- [8] W. H. O. (WHO and others), “Air quality guidelines for Europe,” 2000.
- [9] O. M. de la Salud, “Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre,” p. 25, 2006.
- [10] M. de C. y Tecnología, “Nomenclatura Internacional de la UNESCO para los campos de Ciencia y Tecnología,” 1983.
- [11] I. Turiel, C. D. Hollowell, R. R. Miksch, J. V Rudy, R. A. Young, and M. J. Coye, “The effects of reduced ventilation on indoor air quality in an office building,” *Atmos. Environ.*, vol. 17, no. 1, pp. 51–64, 1983.
- [12] S. K. Brown, M. R. Sim, M. J. Abramson, and C. N. Gray, “Concentrations of volatile organic compounds in indoor air--a review,” *Indoor Air*, vol. 4, no. 2, pp. 123–134, 1994.
- [13] L. Fang, G. Clausen, and P. O. Fanger, “Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality,” *Indoor Air*, vol. 8, no. 2, pp. 80–90, 1998.
- [14] S. D. Hartenstein, P. L. Tremblay, M. O. Fryer, and F. A. Hohorst, “Method, system and apparatus for monitoring and adjusting the quality of indoor air.” Google Patents, 2004.
- [15] S. A. Frecska and W. T. K. Bischel, “Sensor system for measuring and monitoring indoor air quality.” Google Patents, 2005.
- [16] S. Abraham and X. Li, “A cost-effective wireless sensor network system for indoor air quality monitoring applications,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 34, pp. 165–171, 2014.
- [17] R. de Castro, *Persona, sociedad y medio ambiente: perspectivas de la investigación social de la sostenibilidad*, Conserjería. 2006.
- [18] K. De Brouwere, E. Goelen, M. Spruyt, and R. Torfs, “Ranking indoor air health problems using health impact assessment: Final Report,” 2007.
- [19] U. Ackermann-Lieblich *et al.*, “Lung function and long term exposure to air pollutants in Switzerland. Study on Air Pollution and Lung Diseases in Adults (SAPALDIA) Team.,” *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, vol. 155, no. 1, pp. 122–129, Jan. 1997.

-
- [20] D. W. Dockery *et al.*, “An association between air pollution and mortality in six US cities,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 329, no. 24, pp. 1753–1759, 1993.
- [21] W. H. Organization, UNAIDS, and others, *Air quality guidelines: global update 2005*. World Health Organization, 2006.
- [22] I. N. de S. e H. en el T. (INSHT), “NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior,” 2000.
- [23] R. Coburn, ... R. F.-T. J. of clinical, and undefined 1965, “Considerations of the physiological variables that determine the blood carboxyhemoglobin concentration in man.,” *Am Soc Clin Investig.*
- [24] M. T. Kleinman, D. M. Davidson, R. B. Vandagriff, V. J. Caiozzo, and J. L. Whittenberger, “Effects of Short-Term Exposure to Carbon Monoxide in Subjects with Coronary Artery Disease,” *Arch. Environ. Heal. An Int. J.*, vol. 44, no. 6, pp. 361–369, Dec. 1989.
- [25] K. S. Crump and B. C. Allen, “Quantitative estimates of risk of leukemia from occupational exposure to benzene. Prepared for the Occupational Safety and Health Administration by Science Research Systems,” *Inc., Ruston, LA*, 1984.
- [26] RA Rinsky - Environmental health and U. 1989, “Benzene and leukemia: an epidemiologic risk assessment.,” *ncbi.nlm.nih.gov*.
- [27] W. H. Organization and others, “Formaldehyde,” 1989.
- [28] I. N. de S. e H. en el T. (INSHT), *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo*, Instituto. Madrid, 2015.
- [29] Aoson Electronics, “Datasheet DHT22.” .
- [30] Winsen Electronics, “User’s Manual MH-Z14A,” 2015. [Online]. Available: https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z14a_co2-manual-v1_01.pdfhttps://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z14a_co2-manual-v1_01.pdf.
- [31] ams AG, “Datasheet CCS811,” 2016. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf.
- [32] T. A. O. S. Inc., “Datasheet TSL2560, 2561,” 2009. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>.
- [33] Bosch Sensortech, “Datasheet BMP180 Digital pressure sensor,” *BST-BMP180-DS000-09*, 2013. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.
- [34] Electrodragon, “HC-SR501 PIR Motion Sensor (Passive Infrared Sensor).” [Online]. Available: <https://electronilab.co/wp-content/uploads/2013/12/HC-SR501.pdf>.
- [35] Ncd.io, “Datasheet MQ131.” [Online]. Available: <http://www.sensorica.ru/pdf/MQ-131.pdf>.
-

- [36] L. B. Kish, “End of Moore’s law: thermal (noise) death of integration in micro and nano electronics,” *Phys. Lett. A*, vol. 305, no. 3–4, pp. 144–149, 2002.
- [37] V. Román Aragay, “Insertion of IoT Data In Blockchain Technologies,” Madrid, 2018.
- [38] Pypi, “Paho MQTT website,” 2018. [Online]. Available: <https://pypi.org/project/paho-mqtt/>.

PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

Planificación

A la hora de abordar un proyecto con tantas horas de duración es importante hacer una adecuada planificación. Esta comienza con la estructura de descomposición del proyecto (EDP), en la que se divide el proyecto en paquetes de trabajo principales que se espera que consuman un tiempo considerable. En este caso, el paquete de trabajo mínimo se ha considerado de cuatro horas de duración. Estas actividades se agrupan en otras más importantes hasta que finalmente se llega a la totalidad del proyecto. La EDP utilizada puede verse en la Figura 57. Los cuadros que parten del proyecto son las siete divisiones principales y de ellas cuelgan los paquetes de trabajo correspondientes a cada una, siendo un total de veintidós.

Una vez desarrollada la EDP, a partir de ella se puede construir un diagrama de Gantt, el cual mostraría las previsiones temporales para cada actividad, es decir, la programación del proyecto. Además de la duración de cada paquete de trabajo, en el Gantt también puede observarse la relación entre comienzos y fines de las distintas actividades. Se trata de una herramienta muy visual para comprender todas las etapas del desarrollo del proyecto.

En el Gantt (Figura 58) puede observarse que han sido incluidas las líneas futuras aunque por falta de tiempo solo se pudo comenzar el diseño de la PCB, buscando los modelos en EAGLE de los sensores que componen el sistema. La línea de puntos representa el final de este proyecto, lo que deja las horas invertidas totales en 311.

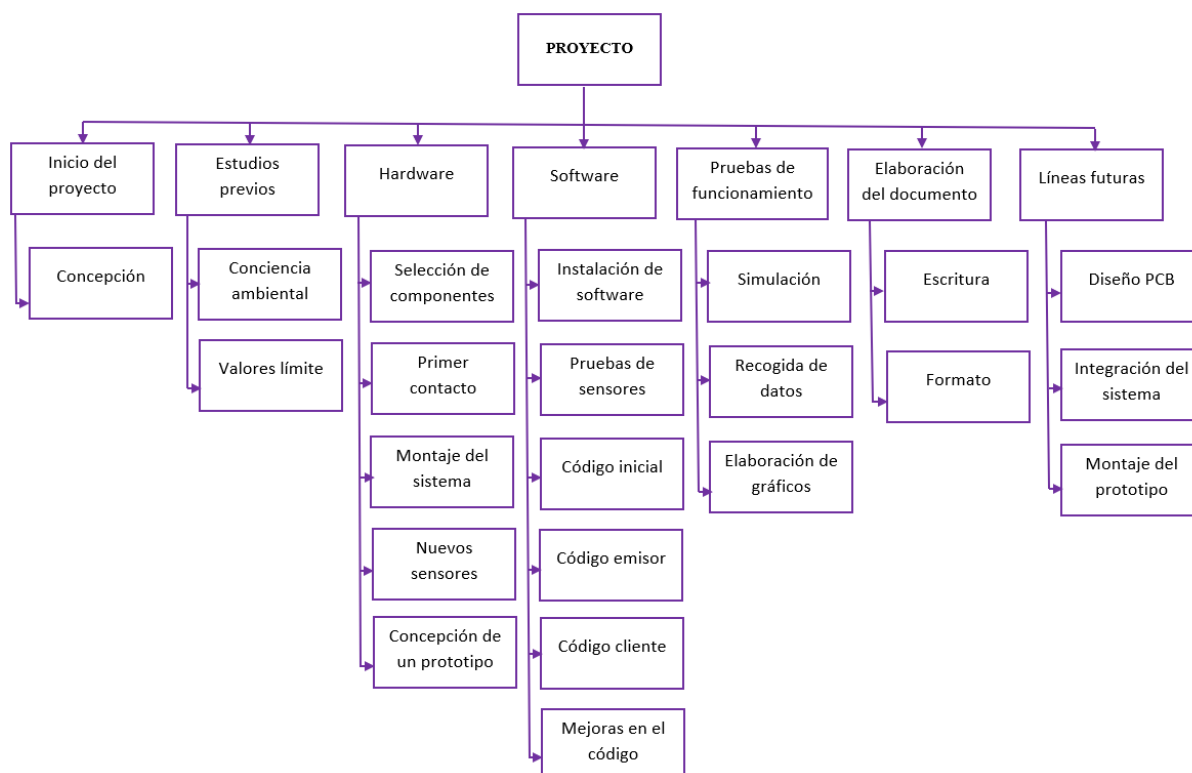


Figura 57: EDP del proyecto

Diagrama de Gantt del proyecto

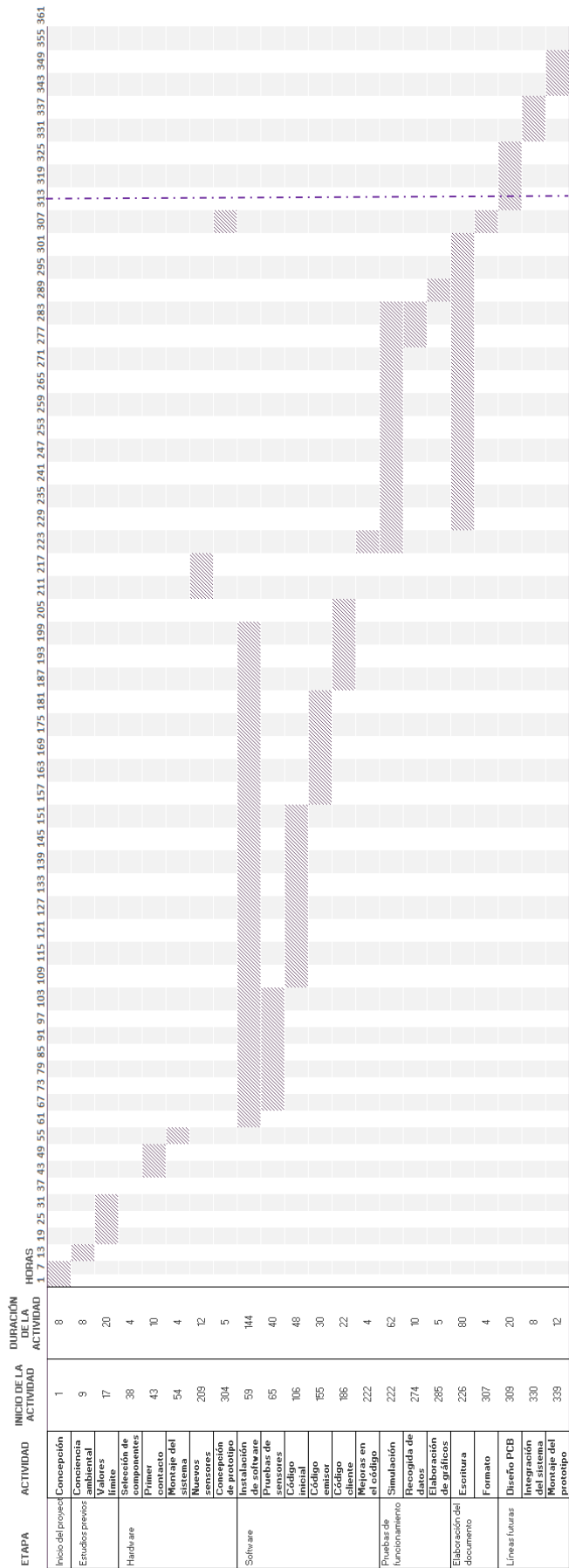


Figura 58: Diagrama de Gantt del proyecto. La línea discontinua representa al punto al que se ha llegado el proyecto, comenzando pero sin completar el diseño de la PCB

Presupuesto

A la hora de elaborar el presupuesto se ha tenido en cuenta el desarrollo futuro que podría tener el proyecto, por lo que además de los costes de material y de personal hasta el momento, se estimarán los costes necesarios para dar por finalizado un prototipo que pudiera comercializarse. En los costes de material se han tenido en cuenta todos los sensores, cables y otros dispositivos utilizados durante el desarrollo del proyecto, además de los costes estimados del material base de la PCB, de la impresión del circuito en la base y del montaje del prototipo final. En los costes de mano de obra se han tenido en cuenta el coste de los participantes del proyecto. El alumno tendría un coste horario de graduado y el número de horas correspondiente al desarrollo del proyecto; y al posible futuro alumno se le asignan las horas supuestas para la finalización. Un resumen de todos los costes considerados puede verse en la Figura 59, ascendiendo el total; después de añadir un 6% de beneficio industrial, un 10% de gastos generales al coste estimado, y un 21% de IVA al total; a 16551.07 €, dieciséis mil quinientos cincuenta y un euros con siete céntimos.

Material		Mano de obra		Coste horario	Horas empleadas	Coste neto	Coste bruto	Coste SS	Coste total
Raspberry Pi 3	35,00€	Estudiante	20	311	6220	7712,8	2313,84	10026,64	
Accesorios	24,00€	Futuro estudiante	20	40	800	992	297,6	1289,6	
Pantalla	60,00€								
Teclado	14,00€								
DHT22 (Temperatura)	5,52€								
MH-Z14A (CO2)	34,83€								
CCS811 (COVs)	28,77€								
TSL2561 (luz)	7,71€								
KY-038 (sonido)	7,04€								
BMP180 (presión)	3,29€								
HCSR501 (presencia)	7,70€								
MQ131 (ozono)	42,95€								
MQ7 (CO)	27,95€								
ADC	4,99€								
Otros sensores	50,00€								
Protoboard + cobbler	11,53€								
Material PCB	11,35€								
Impresión PCB	49,00€								
Material prototipo	50,00€								
						Coste estimado	11791,87		
						Gastos generales (10%)	1179,187		
						Beneficio industrial (6%)	707,5122		
						IVA (21%)	2872,499532		
COSTE MATERIAL	475,63€	COSTE MANO DE OBRA	11316,24			COSTE TOTAL	16.551,069 €		

Figura 59: Presupuesto del proyecto

Aclaración: no se han tenido en cuenta amortizaciones debido a que la mayoría del material utilizado durante el desarrollo iría incluido en el propio producto, por lo que no se consideran como equipos amortizables. Los únicos que podrían considerarse así son la pantalla, la protoboard y el teclado; y al no llegar la suma de todos ellos a los 100 euros, se considera innecesario.

ABREVIATURAS, UNIDADES Y ACRÓNIMOS

°C: grados Celsius	INSHT: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo	ppb: partes por billón
A: Amperio		ppm: partes por millón
AC: alternating current	IoT: Internet of Things	PWM: Pulse Width Modulation
BOE: Boletín Oficial del Estado	JSON: JavaScript Object Notation	RAM: Random Access Memory
Bq: becquerel o becquerelio	LEP: Límite de Exposición Profesional	RH: Humedad Relativa
CIS: Centro de Investigaciones Sociológicas	MB: Megabyte	RL: resistencia de carga
C ₆ H ₆ : benceno	MATLAB: Matrix Laboratory	RPi: Raspberry Pi
CH ₂ O: formaldehído / metanal	Micras: micrómetros	RSC: Responsabilidad Social Corporativa
CO: monóxido de carbono	M ₂ M: Machine to Machine	RXD: receive data (UART)
CO ₂ : dióxido de carbono	MQTT: Message Queuing Telemetry Transport	SCL: Serial Clock (I ² C)
COHb: carboxihemoglobina	NO ₂ : dióxido de nitrógeno	SDA: Serial Data (I ² C)
COV / VOC: Compuesto Orgánico Volátil	NTP: Notas técnicas de prevención	SO ₂ : dióxido de azufre
CPU: Central Processing Unit	Ω: ohmio / ohm	SSH: Secure Shell
dB: decibelio	O ₃ : ozono	TXD: transmit data (UART)
DC: direct current	ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible	μg: microgramos
EDP: Estructura de descomposición del proyecto	OGSHT: Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo	UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ETSII: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	OMS: Organización Mundial de la Salud (WHO en inglés)	UPM: Universidad Politécnica de Madrid
GCA: Guía de Calidad del Aire	ONU: Organización de las Naciones Unidas (UN en inglés)	USB: Universal Serial Bus
GND: ground (tierra analógica)	PCB: Printed Circuit Board	UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
GPIO: General Purpose Input/Output	PIR: sensor piroeléctrico infrarrojo	V: voltio
HDMI: High-Definition Multimedia Interface	PM ₁₀ : material particulado menor de 10 micrómetros	Vcc: Alimentación eléctrica
I ² C: Inter-Integrated Circuit		VLA: Valor Límite Ambiental

GLOSARIO

- Big Data: disciplina de las tecnologías de información y comunicación dedicada al tratamiento de conjuntos de datos tan grandes y complejos que no están al alcance de herramientas informáticas tradicionales. Se basa en encontrar patrones repetitivos en los datos y extraer con ello la información necesaria incluso para hacer predicciones.
- Boot: programa arrancado por el gestor de arranque de una computadora (bootloader) en el que se inicializa el sistema operativo y el resto de los dispositivos. Como administrador puede modificarse para que arranque algún programa presente en la memoria de la computadora.
- Broker: ver ‘Protocolo MQTT’.
- Calidad del aire: refleja las cantidades de contaminantes presentes en el aire. Cuando la calidad del aire es buena (tiene pocos contaminantes), las personas pueden respirarlo indefinidamente sin que su salud se vea afectada. Cuando es mala pueden darse irritaciones oculares, todo tipo de problemas respiratorios e incluso cardíacos. Más técnicamente se puede definir la calidad del aire o inmisión como la concentración de contaminante que llega a un receptor.

Para cada sustancia contaminante se reglamenta la cantidad máxima que puede estar presente en el aire interior. Los valores máximos son fijados generalmente por la autoridad nacional que se ocupa del medio ambiente y comprenden dos conceptos similares:

Valor límite ambiental (VLA): indica, para cada sustancia, la cantidad máxima aceptable.

Valor de guía: indican, para cada sustancia, la cantidad máxima deseable.

Además, para evitar consecuencias sobre las personas expuestas a los contaminantes, no solo sobre el medio ambiente, se establecen unos límites de exposición profesional (LEP) con los valores que garantizan una adecuada seguridad y salud.

- Desarrollo sostenible: teoría de desarrollo socioeconómico basado en la satisfacción de las necesidades sociales y económicas de la población, pero sin comprometer la supervivencia de la especie humana en el planeta. Defiende enfocar las mejoras tecnológicas y la organización social de forma que el medio ambiente pueda recuperarse al mismo ritmo que es afectado por la actividad humana, para de tal forma evitar un déficit de recursos en el futuro.

- Eficacia: concepto presente en el desarrollo sostenible y referido a la capacidad de lograr un resultado o efecto. Es un concepto enfocado al fin y no se centra en los medios requeridos para conseguir ese resultado.
- Eficiencia: concepto presente en el desarrollo sostenible y referido a la capacidad de invertir la menor cantidad de recursos o tiempo posibles a la hora de alcanzar un objetivo. Está por tanto enfocado a los medios utilizados para alcanzar un objetivo. De la unión de eficacia y eficiencia surge la efectividad, la consecución de un objetivo en el menor tiempo posible y con la menor cantidad de recursos.
- Encuestas monográficas: División dentro de las encuestas realizadas por el CIS, las cuales abarcan un amplio abanico temático: juventud, inmigración, estilos de vida, seguridad ciudadana, cultura política, o en el caso que incumbe a este proyecto; ecología y medio ambiente.
- I²C: bus serial de datos desarrollado por Phillips y frecuentemente utilizado para comunicación entre un controlador principal y varios periféricos. Se trata de un bus diseñado para actuar como maestro-esclavo, aunque también admite el modo multimaster, en el que los dos maestros se turnan para actuar uno como maestro y el otro como esclavo. Un maestro se encarga de iniciar la comunicación y de la transmisión de datos por la línea de datos (SDA) y el esclavo reacciona a ella, pudiendo enviar respuestas. Para regular esta transmisión de datos, se requiere una línea de reloj (SCL), que marca la frecuencia con la que se realizan las operaciones.
- Internet of Things (IoT): concepto referido a una interconexión digital de objetos cotidianos con Internet. Esto permite que objetos de la vida cotidiana puedan ser identificados y gestionados por otros equipos, de la misma manera que si lo fuesen por seres humanos. Los sistemas con capacidad de establecer una comunicación machine to machine (M2M) podrían encargarse de recolectar información en diferentes entornos, desde ecosistemas naturales hasta edificios y fábricas, por lo que una de sus aplicaciones es el monitoreo ambiental y planeamiento urbanístico.
- Límite de exposición profesional (LEP): ver ‘calidad del aire’.
- Loop: en el campo de la programación, un loop consiste en una parte del programa que se ejecuta una y otra vez, es decir, se trata de un bucle infinito. Es útil en aplicaciones con actividades repetitivas y en las que únicamente se busca ejecutar una función principal. Un ejemplo sería la monitorización de datos, ya que el objetivo es estar continuamente midiendo los mismos sensores en el mismo orden. Normalmente se programa mediante una sentencia *while (TRUE)*, en la que se establece un bucle *while* en el que su condición de entrada siempre se cumple, logrando que el programa se quede en el bucle hasta la finalización del programa.

- Protocolo MQTT: protocolo usado para la comunicación machine to machine (M2M) en el Internet of Things. Este protocolo está orientado a la comunicación de sensores, debido a que consume muy poco ancho de banda y puede ser utilizado en la mayoría de los dispositivos empotrados con pocos recursos (CPU, RAM, ...). La arquitectura de MQTT sigue una topología de estrella, con un nodo central que hace de servidor o "broker". El broker es el encargado de gestionar la red y de transmitir los mensajes a otros dispositivos. La comunicación se basa en unos "topics" o temas, que el cliente que publica el mensaje crea y los nodos que deseen recibirlo deben subscribirse a él. La comunicación puede ser de uno a uno, o de uno a muchos, pudiendo enviar un mismo paquete de datos a varios dispositivos a la vez.
- Partes por millón (ppm): unidad de concentración comúnmente utilizada para expresar la concentración de gases contaminantes. En general expresa el número de unidades de una determinada sustancia con respecto a un millón de unidades del conjunto. Es un concepto homólogo al porcentaje pero permitiendo expresar cantidades muy pequeñas cómodamente.

En la contaminación atmosférica representa las partes de un gas determinado por cada millón de partes del aire que lo contiene, lo que es equivalente a cm^3/m^3 . Si se quiere establecer una relación con la concentración en masa (mg/m^3) se debe establecer una conversión entre ambas medidas, con un factor de conversión dependiente de la densidad del gas a una presión y temperatura dadas.

Del mismo modo se define la unidad de partes por billón (ppb), aunque hay que tener en cuenta que esta unidad toma como referencia el billón anglosajón (10^9), por lo que una parte por millón equivale a mil partes por billón y no a un millón como sería de esperar en España.

- Responsabilidad social corporativa (RSE): contribución activa y voluntaria por parte de las empresas al desarrollo social, económico y ambiental. Trata no solamente del cumplimiento obligado de la legislación, sino de ir más allá y tener en cuenta el cumplimiento de normas culturales y éticas. La empresa socialmente responsable establece metas compatibles con el respeto de la diversidad y promoviendo la reducción de las desigualdades sociales. Además estas medidas no solo repercuten de manera positiva sobre la sociedad y el medio ambiente, sino que también resultan en un mayor beneficio para la empresa, debido a que, al cumplir las expectativas de sus grupos de interés, son capaces de mejorar su situación competitiva y su valor añadido.

- Setup: en el campo de la programación, el setup consiste en una parte de un código que se ejecuta únicamente al comienzo del programa y que comprende la inicialización de las variables, la definición de constantes y demás ajustes necesarios una única vez durante la ejecución de un programa.
- Topic: ver ‘Protocolo MQTT’.
- UART: bus serial de datos presente en la mayoría de los microcontroladores que permite establecer una conexión serial mediante hardware. El funcionamiento es sencillo debido a que cada dispositivo UART cuenta con una línea de recepción de datos (RXD) y una línea de transmisión de datos (TXD). Esto hace que el único requerimiento de hardware para enviar datos se trata de conectar la línea de TXD de un dispositivo con la de RXD de otro y viceversa, pudiendo establecerse una comunicación bidireccional, aunque debido a esta sencillez no es adecuado para conectar más de dos elementos. El UART toma bytes de datos y los envía bit a bit a una velocidad determinada por la tasa de baudios (caracteres por segundo, no necesariamente igual a bits por segundo). Esta velocidad es tan alta que le permite competir con otros buses de comunicación en paralelo, que permiten enviar varios datos a la vez pero con una velocidad menor entre comunicaciones.
- Valor límite admisible (VLA): ver ‘calidad del aire’.

ANEXOS

Anexo I: Código emisor

```
1 #Codigo para la monitorizacion de presencia y calidad de aire indoor
2 # de bajo coste mediante Raspberry PI
3 # Luis Menendez Dominguez
4 # Librerias con Copyright desarrolladas por Adafruit,
5 # ControlEverythingCommunity, MBTechWorks y Free Software Foundation
6 # Licencias de uso de las mismas en la carpeta raiz
7 # Comunicacion MQTT proporcionada por Victor Roman Aragay
8
9 from datetime import datetime
10 from threading import Thread
11 import math, signal, sys, os
12 import paho.mqtt.client as mqtt
13 import paho.mqtt.publish as publish
14 import json
15 import RPi.GPIO as GPIO
16 import time
17 from time import sleep
18 from Adafruit_CCS811 import Adafruit_CCS811
19 import Adafruit_BMP.BMP085 as BMP085
20 from tsl2561 import TSL2561
21 import Adafruit_DHT
22 import mhz14
23 import ADS1x15
24 from sonido import getdB
25 from ozono import read_O3
26 from co import read_CO
27
28 #Definicion de los sensores a utilizar
29
30 ccs = Adafruit_CCS811()
31 sensor_pre = BMP085.BMP085()
32 sensor_temp = Adafruit_DHT.DHT22
33 tsl = TSL2561(debug=True)
34 sensor_CO2 = mhz14.mhz14("/dev/ttyAMA0")
35
36 #Inicializacion de pines
37
38 GPIO.setmode (GPIO.BOARD)
39 pir = 12
40 GPIO.setup(pir, GPIO.IN)
41 time.sleep(0.5)
42 pin_sonido = 18
43 GPIO.setup(pin_sonido, GPIO.IN)
44 time.sleep(0.5)
```

```
45
46 ##### Logging Settings #####
47
48 FILENAME = "sensordata"
49 WRITE_FREQUENCY = 100
50 sense_data1={}
51 sense_data2={}
52 sense_data3={}
53
54 ##### MQTT Settings #####
55 Broker = "localhost"
56
57 sub_topic = "test/instructions" # receive messages on this topic
58
59 pub_topic = "test/data" # send messages to this topic (todos los sensores)
60
61 pub_topic1 = "test/ambiental" # datos ambientales (CO2, COVs, Ozono)
62
63 pub_topic2 = "test/fisico" # datos fisicos (Temperatura, humedad, presion, altitud)
64
65 pub_topic3 = "test/extra" # datos extra (presencia, luz, sonido)
66
67 ##### FUNCTIONS #####
68
69 def get_sense_data():
70     sense_data={}
71
72     if GPIO.input(pir) == True: #Medida presencia
73         presencia = True
74     else:
75         presencia = False
76     sense_data["Presencia"] = presencia
77     sense_data3["Presencia"] = presencia
78     time.sleep(1)
79
80     #if not ccs.readData():
81     #     ppbCOVs = ccs.getTVOC()
82     #     sense_data["ppbCOVs"] = ppbCOVs
83     #     sense_data1["ppbCOVs"] = ppbCOVs
84
85     presion = sensor_pre.read_pressure()
86     sense_data["Presion"] = presion
87     sense_data2["Presion"] = presion
88
89     altitud = sensor_pre.read_altitude()
90     sense_data["Altitud"] = altitud
91     sense_data2["Altitud"] = altitud
92
93     humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(sensor_temp, 4)
94     if humidity is not None and temperature is not None:
95         sense_data["Temperatura"] = temperature
96         sense_data2["Temperatura"] = temperature
97         sense_data["Humedad"] = humidity
98         sense_data2["Humedad"] = humidity
99
100     CO = read_CO()
101     sense_data["ppmCO"] = CO
102     sense_data1["ppmCO"] = CO
103
104     CO2 = sensor_CO2.readvalue()
105     sense_data["ppmCO2"] = CO2
106     sense_data1["ppmCO2"] = CO2
107
108     O3 = read_O3()
109     sense_data["ppbO3"] = O3
110     sense_data1["ppbO3"] = O3
```

```
111     |
112     |     luz = tsl.lux()
113     |     sense_data["Luz"] = luz
114     |     sense_data3["Luz"] = luz
115     |
116     |     datadB = getdB()
117     |     sense_data["dBavg"] = datadB[0]
118     |     sense_data["dBmax"] = datadB[1]
119     |     sense_data["dBmin"] = datadB[2]
120     |     sense_data3["dBavg"] = datadB[0]
121     |     sense_data3["dBmax"] = datadB[1]
122     |     sense_data3["dBmin"] = datadB[2]
123     |
124     |     fecha = time.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S', time.localtime())
125     |     sense_data["Fecha"] = fecha
126     |     sense_data1["Fecha"] = fecha
127     |     sense_data2["Fecha"] = fecha
128     |     sense_data3["Fecha"] = fecha
129     |
130     |     return sense_data
131     |
132     |
133     |     ##### MQTT Section #####
134     |
135     |     # when connecting to mqtt do this
136     |
137     |     def on_connect(client, userdata, flags, rc):
138     |         print("Connected with result code "+str(rc))
139     |
140     |
141     |         client = mqtt.Client()
142     |         client.on_connect = on_connect
143     |         client.connect(Broker, 1883, 60)
144     |         client.loop_start()
145     |
146     |     while True:
147     |         client.publish(pub_topic, json.dumps(get_sense_data()))
148     |         client.publish(pub_topic1, json.dumps(sense_data1))
149     |         client.publish(pub_topic2, json.dumps(sense_data2))
150     |         client.publish(pub_topic3, json.dumps(sense_data3))
151     |         time.sleep(1)
152     |
```

Python file

Anexo II: Código cliente

```
1 import paho.mqtt.client as mqtt
2 from tomysql import store_mysql
3 import json
4
5 ### MQTT SETTINGS ###
6 mqtt_broker = "192.168.1.11" # MQTT broker IP Adress
7 mqtt_port = 1883 # MQTT port
8 sub_topic = "test/data" # receive messages on this topic
9 sub_topic1 = "test/ambiental" # datos ambientales (CO2, COVs, Ozono)
10 sub_topic2 = "test/fisico" # datos fisicos (Temperatura, humedad, presion, altitud)
11 sub_topic3 = "test/extra" # datos extra (presencia, luz, sonido)
12 pub_topic = "test/instructions" # send messages to this topic
13
14 ### WHEN CONNECTION IS DONE ###
15 def on_connect(client, userdata, flags, rc):
16
17     # Eliges los temas a los que suscribirte
18     print("Connected with result code " + str(rc))
19     client.subscribe(sub_topic)
20     client.subscribe(sub_topic1)
21     client.subscribe(sub_topic2)
22     client.subscribe(sub_topic3)
23
24     ### WHEN RECIEVING A MESSAGE ###
25 def on_message(client, userdata, msg):
26     global first_message
27     print(msg.topic + " " + str(msg.qos) + " " + str(msg.payload))
28     sensor_data = json.loads(msg.payload)
29     if len(sensor_data) > 10 :
30         store_mysql(sensor_data)
31     else :
32         pass
33
34     client = mqtt.Client()
35     client.on_connect = on_connect
36     client.on_message = on_message
37     client.connect(mqtt_broker, mqtt_port, 60)
38
39     ### Start the MQTT forever loop
40     client.loop_forever()
```