

Ayudas a PROYECTOS DE INNOVACIÓN Y

MEJORA DOCENTE

2021-2022



**VNiVERSiDAD
DSALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Informe Final

Ref. ID2021/100

Proyecto de Innovación Docente

BASES FÍSICAS Y APLICACIÓN DE SENSORES ELECTRÓNICOS DE GASES: APRENDIZAJE PRÁCTICO BASADO EN PROYECTOS

Centro de ejecución	Facultad de Ciencias
Departamento y Área de Ejecución	Física Aplicada / Electrónica
Miembros del equipo	Jesús Enrique Velázquez Pérez (IR) María Susana Pérez Santos José Manuel Caridad Hernández

INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS

El presente Proyecto de Innovación Docente bajo el título “**Bases físicas y aplicación de sensores electrónicos de gases: aprendizaje práctico basado en proyectos**” se ha dirigido a la primera acción del Programa de Ayudas: “Proyectos dirigidos a la innovación en: las clases magistrales, estudios de casos prácticos, resolución de ejercicios y problemas, aprendizaje basado en problemas, aprendizaje por proyectos, aprendizaje cooperativo y clases prácticas” y dentro de las opciones disponibles hemos optado por orientarlo al desarrollo de contenidos para la enseñanza de casos prácticos basada en una organización de tipo proyecto, en particular, hemos optado por restringir el primer desarrollo a dos proyectos que presentaremos en lo que sigue.

Los sensores son dispositivos capaces de transducir señales de un tipo de energía a señales de otro tipo de energía; muy comúnmente, se acepta de manera implícita que un sensor transforma señales no eléctricas en eléctricas. Aunque esta restricción es incorrecta a nivel de aplicaciones comerciales es aceptable. Los sensores, por lo tanto, detectan eventos o cambios en el entorno y proporcionan la salida eléctrica correspondiente. Ejemplos de entradas físicas al sensor son la luz, el calor, el movimiento, la humedad, la presión, etc. y los sensores responden produciendo una señal eléctrica de salida (voltaje, corriente o potencia eléctrica) que tras ser acondicionada por un circuito eléctrico puede presentarse en una pantalla, transmitirse como información en forma electrónica (analógica o digital) para su posterior procesamiento o almacenamiento, etc. Los sensores son ubicuos ya que tienen aplicaciones en todas las actividades humanas: sistemas de monitoreo (*monitoring*) de inundaciones y nivel de agua, monitoreo ambiental, monitoreo y control de tráfico, ahorro de energía en iluminación artificial, monitoreo remoto de sistemas y diagnóstico de fallas de equipos, agricultura de precisión, defensa y seguridad, medicina, Los sensores su mayor uso en productos electrónicos de consumo, seguidos por la automoción y las tecnologías de la información y las telecomunicaciones (TICs). A modo de ejemplo: los teléfonos inteligentes incorporan sensores como acelerómetro, giroscopio, sensor de luz ambiental, sensor de proximidad y detectores de temperatura para realizar un seguimiento de los parámetros y

proporcionar un sistema centralizado para el control automático. Factores como el aumento en la adopción de sensores de temperatura y proximidad en dispositivos de atención médica portátiles y avanzados y la adopción de sensores de movimiento y posición en las industrias impulsan el crecimiento del mercado de sensores. Sin embargo, los problemas de escalabilidad y confiabilidad en el despliegue de sensores en el sistema en chip (SoC, System on a Chip) que son la base del paradigma de la IoT (Internet of Things) son una restricción importante para el mercado global. Además, se espera que el aumento en la adopción de giroscopios y acelerómetros en la electrónica de consumo, junto con aplicaciones innovadoras que incluyen reconocimiento de gestos, biometría y detección de movimiento, cree oportunidades para la industria de sensores. Se prevé que el mercado global de sensores sea testigo de un crecimiento significativo durante los próximos años. Se estima que el mercado global de sensores crecerá de 156,6 mil millones en 2021 a 249,6 mil millones de dólares en 2026 con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR, Compound Annual Growth Rate) del 9.8% durante ese periodo 2021 (<https://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensors/sensors-technologies-markets-report.html>) para alcanzar los 345,77 miles de millones de dólares en 2028 (<https://www.alliedmarketresearch.com/sensor-market#:~:text=The%20global%20sensor%20market%20size,8.9%25%20from%202021%20to%202028>).

Desde un punto de vista académico el interés, más allá de la necesidad de formación de estudiantes en el campo de los sensores que muchos de ellos van a encontrar y contribuir a desarrollar en tras su incorporación a la vida laboral, de los sensores reside en, por un lado, el estudio de las bases de funcionamiento del sensor y, por otro lado, la posibilidad de usarlos para diseñar, fabricar y usar células básicas de medida (constituidas por el propio sensor, circuitería de acondicionamiento de señal, circuitería digital y software que permita dotar de una interfaz software a la célula) como un recurso de bajo costo para el aprendizaje de sensores sin necesidad de realizar una instrumentación especializada o como complemento a ésta. Este uso es de gran interés porque permite cubrir todos los niveles del encargo docente

del área de Electrónica desde asignatura de 1º de Grado hasta asignaturas Máster modulando el uso de estas nuevas herramientas y de los propios sensores.

El **objetivo general** del presente PID fue la actualización y extensión de prácticas de laboratorio de las asignaturas relacionadas en la tabla inferior incorporando a la docencia en el área el uso de sensores de gases de monóxido y dióxido de carbono.

ASIGNATURAS Y TITULACIONES QUE SE HAN BENEFICIADO DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN
Física de Sensores, Máster en Física y Matemáticas, Fac. de Ciencias
Caracterización de materiales y dispositivos, Máster en Física y Matemáticas, Fac. de Ciencias
Instrumentación Electrónica, 2º curso, Grado en Física, Fac. Ciencias
Electrónica y Electrotecnia, 3º curso, Grado en Ingeniería Química, Fac. Ciencias Químicas
Arquitectura de Computadores I, 1º curso, Grado en Ingeniería Informática en Sistemas de Información, EPSZA
Fundamentos de Electrónica, 2º curso, Grado en Ingeniería de Materiales, EPSZA

Tabla 1. Asignaturas objetivo del PID.

Los objetivos concretos tanto técnicos como pedagógicos fueron:

1. Estudio de las diferentes ofertas tecnológicas y determinación de las óptimas para su aplicación en docencia.
2. Modelización SPICE de sensores de gas.
3. Adquisición, instrumentación y puesta en servicio de circuitos con sensores controlados por software.
4. Generación de contenidos, guiones de prácticas y recursos docentes.
5. Medida de parámetros de varios tipos de sensores y comparación con experimentales en prácticas de la asignatura “Física de Sensores”.
6. Documentación y notas de aplicación sobre el montaje de los sensores y uso de su software de control que se pone en Studium a disposición de los estudiantes.

El proyecto ha permitido generar, como se había propuesto en la memoria, recursos y contenidos para su uso en docencia – especialmente de tipo práctico – de un gran interés para ser aplicado en la **docencia práctica transversal** en varias asignaturas impartidas por el área de Electrónica. En alguna de ellas los recursos ya han sido directamente aplicados en el presente curso académico y en otras se desplegarán de manera modulada y progresiva a lo largo de los próximos cursos.

La [docencia en sensores es de tipo transversal](#) ya que, como señalamos en la sección anterior, los sensores están presentes en numerosos campos. Limitándonos a la docencia en el área de Electrónica, se hacen prácticas con sensores en numerosas asignaturas (además que las expuestas en la tabla de la sección anterior) aunque la dificultad en la instrumentación limita su inclusión en prácticas a asignaturas en las que los estudiantes poseen un nivel suficiente para hacer el montaje y, aún en ese caso, la escasa disponibilidad de tiempo en laboratorio limita la práctica al montaje y alguna medida de comprobación de funcionamiento del sensor. A modo de ejemplo, en la asignatura “Instrumentación Electrónica” de segundo curso del Grado en Física, con un bajo contenido de teoría, no se puede dedicar mucho tiempo al estudio de sensores. Se dedica una parte de la última sesión de laboratorio en la parte de electrónica analógica al montaje y medida con un sensor de temperatura, aunque se usa un sensor similar en dos prácticas de instrumentación virtual integrado en un cabezal controlado por una DAQ y LabView. La impresión de los estudiantes es que los sensores son un apartado de limitada importancia dado el tiempo que se les dedica en comparación con el dedicado al montaje de amplificadores o filtros y, adicionalmente, que la medida DC de los sensores – obviamente, simple, rápida y de carácter puntual – es de escasa complejidad e interés. Aquellos estudiantes que posteriormente cursan la asignatura de “Física de Sensores” del Máster en Física y Matemáticas (MFyM) perciben de manera muy diferente la importancia de los sensores y su uso en medidas.

El presente proyecto se encuadra dentro de la estrategia del grupo que ha ejecutado el proyecto de instrumentar nuevos tipos de sensores, desarrollar contenidos docentes para los sensores e irlos introduciendo progresivamente en la docencia. Esta introducción sigue la misma pauta que el anterior proyecto ejecutado (PID2019/090 Internet de las cosas: Formación de Estudiantes en Sensores) desarrollando los contenidos con estudiantes de Máster para, en el curso siguiente, usarlos en asignaturas impartidas a estudiantes con menores conocimientos en Instrumentación Electrónica.

DESARROLLO DEL PROYECTO y RESULTADOS

Como hemos señalado antes el planteamiento básico que motivó la propuesta de este PID fue la generación de contenidos prácticos de sensores de gases para complementar la teoría impartida a nivel de Máster y que, posteriormente, los contenidos prácticos puedan usarse en otras de menor profundidad teórica a nivel de Grado. El PID se diseñó, como se señala en el apartado anterior, para maximizar su relevancia en términos de transversalidad, generalización para su uso en diferentes centros y titulaciones y alto impacto en la mejora de la enseñanza en la USAL. La estructuración, desarrollo y despliegue se han desarrollado del modo siguiente:

- En la primera fase del proyecto, se combinaron contenidos teóricos en la asignatura “Física de Sensores” del Máster en Física y Matemática usando herramientas de modelización eléctrica de sensores
- En la segunda fase hemos realizado medidas e instrumentación con dos sensores comerciales discretos
- En la tercera fase hemos adquirido una plataforma de desarrollo (evaluation board) de la empresa Silicon Labs que permitirá en el futuro un uso simplificado de la instrumentación
- En la última fase se han consolidado los contenidos generados.

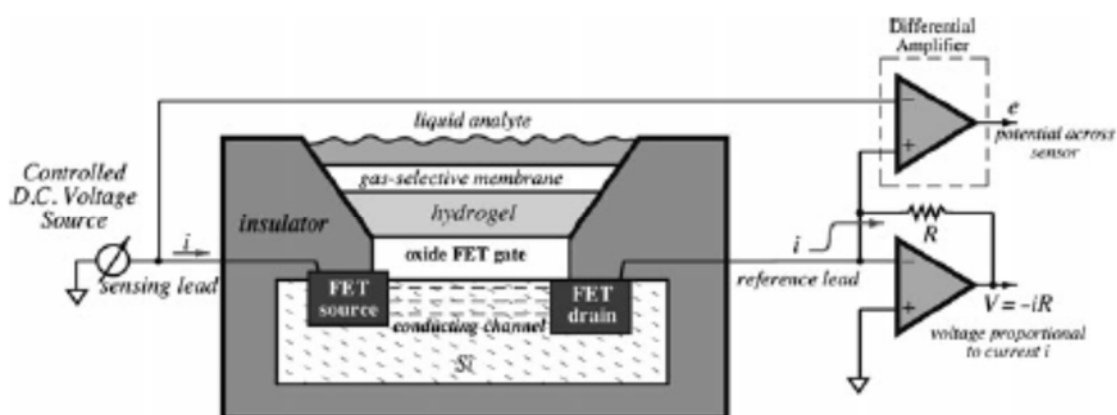


Figura 1. Ejemplo de sensor ChemFET con indicación cualitativa de la instrumentación (J. Fraden, Handbook of Modern Sensors, Springer, 2010). Este sensor se estudia ampliamente de manera teórica ya que se basa en un dispositivo electrónico de uso común: el transistor de efecto de campo.

Los sensores químicos -que se estudian explícitamente en la asignatura Física de Sensores del Máster en Física y Matemáticas (MFyM)- se utilizan ampliamente desde el ámbito de la industria y el laboratorio hasta aplicaciones domésticas. Ejemplos bien conocidos son la

monitorización de contaminantes en aire y en aguas subterráneas cerca de emplazamientos militares, civiles e industriales, medida del pH, identificación de sustancias basada en su espectro infrarrojo, monitorización de la calidad del aire (CO₂ y CO), ... Entre los sensores químicos los más extendidos son los sensores de gases. Existen numerosas tecnologías (ChemFET -ver Figura 1-, de ondas acústicas en superficie (SAW), espectroscopía de infrarrojos, ...) cuya teoría se expone, como hemos dicho, en el MFyM.

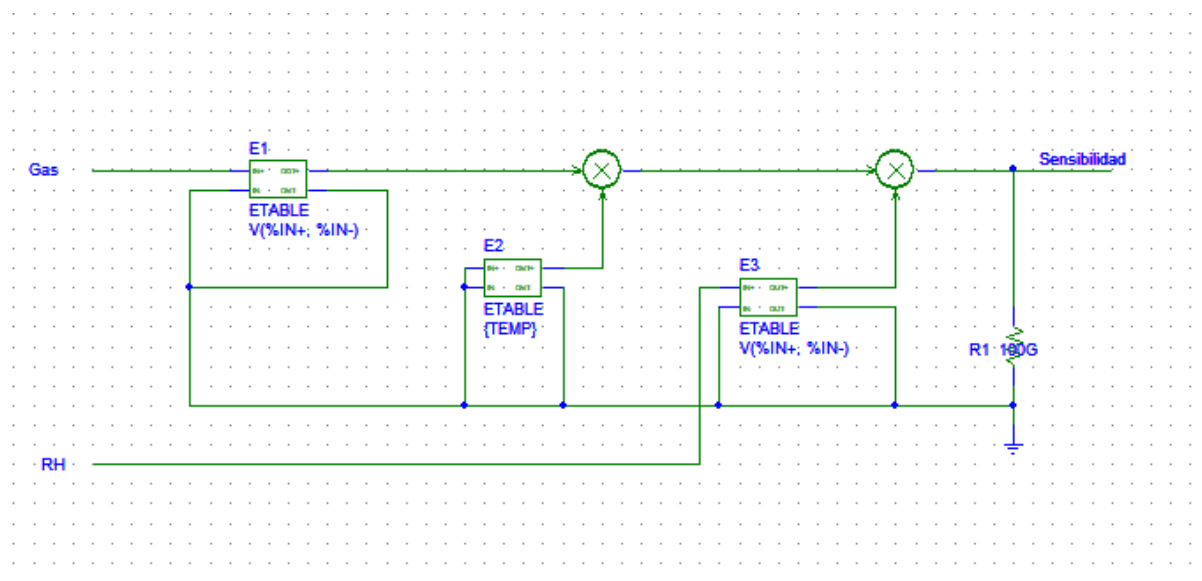


Figura 2. Ventana Schematics de PSPICE que muestra la modelización ABM de un sensor de gases resistivo..

Es bien conocido que la medida mediante sensores electrónicos alcanza valores de sensibilidad y resolución netamente inferiores a las de las técnicas analíticas disponibles en laboratorio pero presenta la ventaja de su uso in situ, su bajo coste y su posible automatización para operación sin intervención humana. De esta manera, a nivel docente parece posible eliminar la labor de realizar medidas de manera manual (una tarea tediosa y repetitiva que no aporta conocimientos al estudiante y consume tiempo de laboratorio) que puede reemplazarse por análisis de datos y comparación con modelos que mejoren el aprendizaje. De esta manera se garantiza la **transversalidad** al poder ser usado en asignaturas de diferentes titulaciones.

En lo que sigue vamos a repasar alguno de los contenidos generados en las diferentes fases del proyecto. En la Figura 2 mostramos la modelización ABM (Analog Behavioural Model) de un

sensor de gas de tipo resistivo. Algunos óxidos metálicos (SnO_2 , TiO_2 , ZnO , Mn_2O_3 y WO_3) se usan muy comúnmente como sensores de gases (conocidos como de tipo Taguchi) de bajo coste. Su principio de funcionamiento se basa en la variación de la conductividad en presencia de gases oxidantes y reductores. Los parámetros específicos del sensor de gas son: sensibilidad, selectividad, tiempo de respuesta, los efectos a largo plazo y la temperatura de la superficie del sensor.

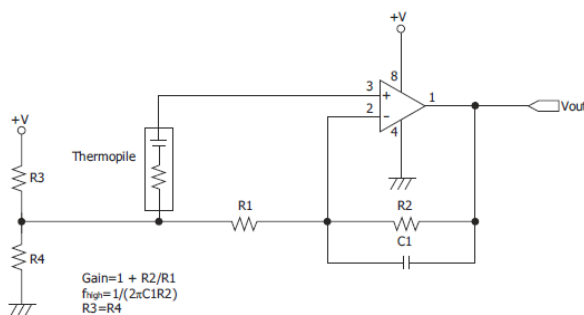


Figura 3a. Circuito de acondicionamiento para la medida de CO_2 usando un detector de tipo pila.

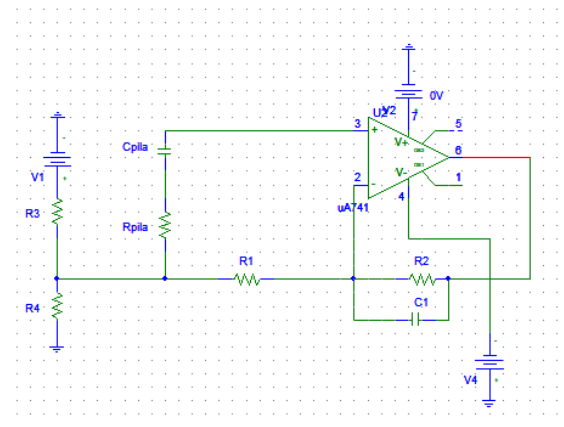


Figura 3b. Ventana Schematics del simulador de circuitos PSPICE del circuito de instrumentación de un detector de gases de tipo térmico basado en una termopila.



Figura 4a. Sensores usados y detector comercial usado como referencia para medidas de dióxido de carbono.



Figura 4b. Detector comercial no profesional de calidad de área.

El primer parámetro, la sensibilidad, es la capacidad de detectar pequeñas concentraciones de un gas. Típicamente, la sensibilidad se mide como la pendiente de la curva de respuesta (también conocida como la curva de calibración). Este término también se utiliza para referirse al nivel más bajo de concentración química que se puede detectar o hasta el menor incremento de concentración que se puede detectar en el entorno de detección. En la Figura 2 se implementa el cálculo de la sensibilidad definida por el cambio de resistencia del sensor expuesto a una concentración determinada de gas usando la temperatura como parámetro. Los sensores basados en óxidos tienen también un cierto grado de selectividad entre diversos gases.

En la Figura 3a mostramos el circuito de instrumentación utilizado típicamente con sensores discretos de termopila. Dado que la respuesta del sensor es muy débil (en el rango de microvoltios) deben emplearse amplificadores para detectar la señal. En la Figura 3b se muestra la interfaz del simulador PSPICE usado para estudiar el circuito acondicionador y el propio sensor que se modeliza mediante una red RC en serie (componentes R_{pila} y C_{pila} en la Figura 3.b). La fotosensibilidad típica de este tipo de sensores es de 50V/W y su detectividad de $10^8 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$.

Dentro de las tareas ejecutadas al inicio del proyecto se eligió el tipo de sensor. Hemos optado por usar **un sensor de dióxido de carbono (CO₂) y otro de monóxido de carbono (CO)** de tipo discreto. En el procedimiento de caracterización se incluyó un detector comercial (Figuras 4a y 4b) para comparar los resultados de medidas de dióxido de carbono, los detectores de monóxido comerciales son de un precio muy elevado y hemos optado por un comprar un sensor calibrado. En la Figura 4a se muestran los dos sensores empleados junto al dispositivo comercial.

Sensor de dióxido de carbono. El dióxido de carbono es vital para la vida en la Tierra. También es fundamental para muchos procesos biológicos e industriales. La medida precisa de la concentración de CO₂ en la atmósfera de la Tierra, actualmente cercana a 412 partes por millón (ppm), es de especial importancia para el estudio del cambio climático. La exposición a altas concentraciones de CO₂ también puede ser letal para los seres humanos. Por lo tanto, la detección y el monitoreo del CO₂ es fundamental para conocer los mecanismos de creación, almacenamiento y desaparición del dióxido de carbono CO₂ y controlarlos. Las condiciones en

las que se monitorea también dictan el método y los materiales que pueden usarse para fabricar el sensor. Se ha desarrollado una gran variedad de sensores basados en diferentes principios de detección que incluyen absorción óptica, variación de la resistencia eléctrica, transistores de efecto de campo y amperometría. Los sensores de CO₂ de bajo coste tienen varias limitaciones, como baja sensibilidad y escasa durabilidad. En el proyecto hemos usado el sensor MQ-7 utilizados en aire libre que utiliza óxido de estaño (SnO₂) de baja conductividad que se muestra en la Figura 5 montado en una PCB (www.hwsensor.com). Las hojas técnicas pueden consultarse en <http://www.datasheet.es/PDF/694312/MQ7-pdf.html>.

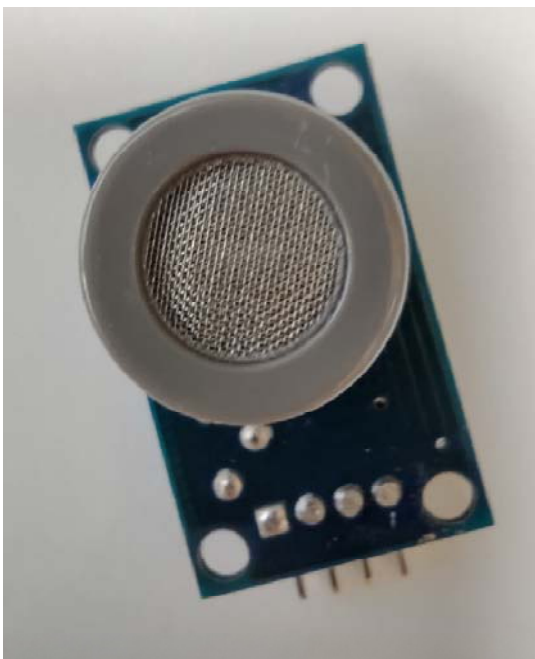


Figura 5a. Vista superior del MQ-7.

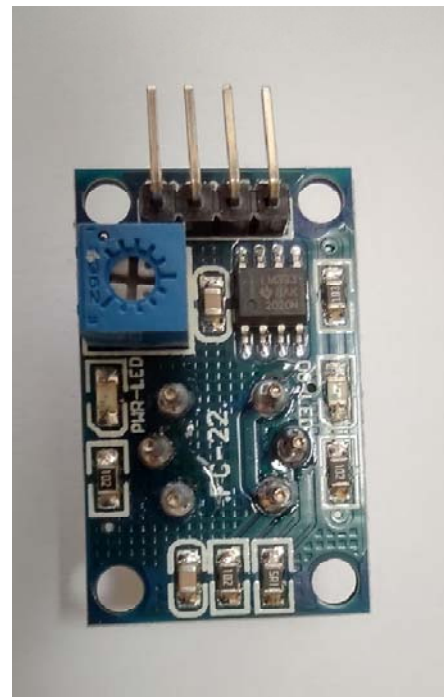


Figura 5b. Vista inferior de la placa PCB del MQ-7.

Sensor de monóxido de carbono. La concentración de gas CO debe considerarse que puede afectar a los seres vivos, incluidos los seres humanos. La Organización Mundial de la Salud ha publicado directrices para los niveles de CO en el aire, para evitar que los niveles de COHb en la sangre humana aumenten por encima del 2,5%. Un nivel de concentración de 2-20% de COHb conduce a efectos equívocos en la percepción visual, la audición, el rendimiento motor y sensoriomotor. Actualmente existen muchas técnicas o métodos generales para detectar gases, incluido el gas CO, como celdas electroquímicas, sensores catalíticos y detectores de

fotoionización. Sin embargo, estas técnicas requieren un manejo especial con respecto a sus procedimientos operativos, altos costos y rango de detección limitado. En este proyecto, hemos optado por la detección de CO utilizando el principio de infrarrojo no dispersivo (NDIR). Se debe aplicar en este método un filtro óptico de paso de banda que sea apropiado a las características del gas. Típicamente se emplean técnicas de interferometría para construir los filtros. El sensor elegido es el MH-Z19B (ver Figura 6; las hojas técnicas pueden consultarse en www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf). El sensor aparece con una cobertura porosa de color blanco que puede identificarse fácilmente en la Figura 6a.



Figura 6a. Vista superior del MH-Z19B.

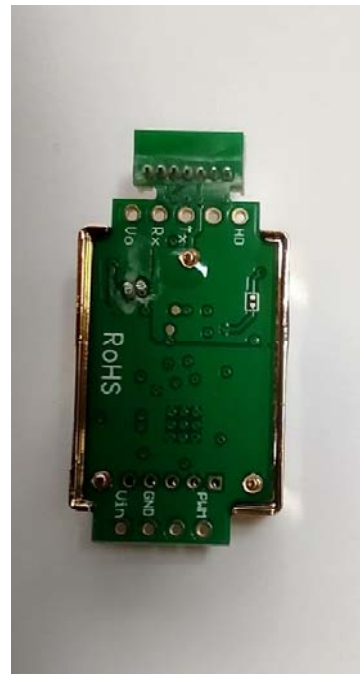


Figura 6b. Vista inferior del MH-Z19B.

Finalmente, señalemos que hemos iniciado el uso de starter kits de Silicon Labs (el EFM32WG-STK3800, Figura 7) con el entorno de programación Symplicity Studio que usaremos como interfaz a sensores discretos. Debido a los problemas de aprovisionamiento en semiconductores las placas se han recibido al final del proyecto con un retraso de más de cinco meses y esta parte no ha podido aún concluirse para ser usada en docencia a nivel de grado

según se propuso en la memoria inicial del proyecto. No obstante, en el proyecto previo arriba citado hemos adquirido experiencia significativa con productos similares del mismo fabricante de sensores por lo que no esperamos problemas en su uso.



Figura 7. Vista superior de la evaluation board EFM32WG-STK3800

CONCLUSIONES

Se ha completado el PID con éxito en el plazo previsto y alcanzando los objetivos centrales propuestos. Hemos desarrollado tanto los contenidos prácticos que permitan la simulación ABM de sensores y la puramente eléctrica que incluye los circuitos de acondicionamiento de la señal en varias tecnologías de sensores. También hemos identificado y acondicionado para su caracterización sensores para medir dos tipos de gases de gran interés: monóxido y dióxido de carbono. En el primer caso hemos adquirido un sensor de gran calidad (con un coste superior a 40 euros) por la ausencia de equipamiento adicional de verificación de la medida. En el caso de la medida de dióxido de carbono hemos optado por un sensor de bajo precio (inferior a 10 euros) montado en PCB. En ambos casos hemos elegido sensores con un ciclo de vida largo para permitir el máximo aprovechamiento del ciclo de vida del trabajo aquí realizado. Finalmente, en cursos posteriores se va a extender la caracterización realizada a una *evaluation board* para docencia a estudiantes de grado según lo previsto en la propuesta inicial del proyecto.