



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y construcción de un medidor de concentración de gases
para su empleo en sistemas de reformado*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jorge Larrañaga Cores

DIRECTORES: Víctor Alfonsín Pérez
Pablo Falcón Oubiña

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y construcción de un medidor de concentración de gases
para su empleo en sistemas de reformado

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Hoy en día el planeta se encuentra en una situación crítica debido al calentamiento global y al agotamiento de los recursos energéticos fósiles, por eso, la necesidad de una transformación energética hacia fuentes de energía renovables y limpias es cada vez más urgente. En este contexto, el hidrógeno se ha convertido en una alternativa cada vez más prometedora para la generación de energía limpia. En el caso de España, se ha fijado la hoja de ruta del hidrógeno como una forma de impulsar la transición energética hacia fuentes más limpias y renovables, incluyendo en este proceso a la Armada, la cual, a través de la ETID, fomenta la propulsión de sus buques, como el nuevo submarino clase S-80, mediante el uso de combustibles limpios como el hidrógeno. No obstante, la implementación de esta tecnología implica el uso de costosos y sofisticados equipos para el monitoreo de los gases que se generan. Es aquí donde tiene cabida el proyecto planteado, que, mediante el uso de unos sensores de bajo coste, fabricados para la detección de fugas, se explorarán las posibilidades de elevar su rango de detección para su empleo en otros campos como el de la energía. Por tanto, este enfoque ofrece una solución económica y prometedora para la monitorización de gases tanto en aplicaciones militares como civiles.

PALABRAS CLAVE

Monitorización de gases, Análisis, Sensores, Calibración, Concentración

AGRADECIMIENTOS

La finalización de este proyecto supone, sin ninguna duda, el fin de una etapa y el salto hacia una nueva vida, que espero, por lo menos, tenga tan buenos momentos como los vividos durante estos cinco años viviendo junto con mis compañeros, a los que, a muchos, ya considero parte de mi familia.

No podría empezar estos agradecimientos sin acordarme de mi familia, la cual siempre me ha apoyado y animado a seguir adelantado, viendo una versión de mí que ni yo mismo creía posible. Una vez más, gracias, papá, por esos viajes a Madrid en los que casi vivías con más energía que yo todas esas pruebas para poder entrar en la que, sin duda, ha sido la elección de mi vida. Gracias a ti también, mamá, por esos consejos tan sabios que me has brindado a lo largo de mi vida y por tu inmenso sacrificio durante tantos años que, sin duda, solo puede ser cosecha de una madre entregada a sus hijos.

A mis hermanos, Javi y María, muchas gracias por vuestra ayuda, por vuestras llamadas, por los viajes juntos y todos los buenos momentos que hemos compartido juntos.

A mis amigos de la infancia Pablo, Lois, Nano, Kiko, Gus, Doro, Nacho, Gonzalo, Edu, gracias por haberme enseñado este mundo y por todos esos años inolvidables en el Montón.

A mi grupo, por esas tardes de pádel, por todas las fiestas y aventuras juntos, pero sobre todo por vuestro apoyo incondicional. Teneros a vosotros, gente que lo dejaría todo por ayudarte, es sin duda un estímulo para no rendirme nunca.

A ti, Nut, por demostrarnos durante estos cinco años el significado del compañerismo. Muchas gracias por toda tu ayuda y entrega sin esperar nada a cambio. Me siento muy agradecido de poder haberte conocido, y ahora que nuestros caminos se separan, solamente puedo desearte todo lo mejor.

Finalmente, muchas gracias a mis tutores, Victor Alfonsín y Pablo Falcón. No lo podría haber hecho sin vuestros consejos y ayuda. Os agradezco enormemente toda vuestra dedicación a lo largo de estos meses.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura de la memoria	8
2 Estado del arte	11
2.1 Sistemas de obtención de hidrógeno	11
2.1.1 Electrólisis	12
2.1.2 Gasificación de carbón	12
2.1.3 Reformado de naftas	13
2.1.4 Reformado con vapor de agua	13
2.2 Sistema AIP.....	15
2.2.1 Concepto sistema AIP.....	15
2.2.2 Sistemas AIP actuales.....	16
2.3 Sistemas actuales de pilas de combustible	18
2.3.1 Principios básicos	18
2.3.2 Principio de funcionamiento.....	19
2.3.3 Tipos de pilas de combustible actuales.....	21
2.3.4 Ventajas de las pilas de combustible	22
2.4 Sistemas de análisis de gases	23
2.4.1 Principios básicos	23
2.4.2 Sistemas de adquisición de datos.....	23
2.5 Fabricación aditiva	25
2.5.1 Concepto fabricación aditiva	25
2.5.2 Modelado por deposición fundida	25
2.5.3 Limitaciones de los procesos de impresión 3D	26
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Sensores	27
3.1.1 Arduino	27
3.1.2 Sensor de gas (serie TGS2600).....	28
3.1.3 Sensor de gas (serie MQ).....	32

3.1.4 Esquema de montaje	33
3.2 Calibración sensores MQ	33
3.2.1 Calibración teórica.....	34
3.2.2 Calibración directa.....	44
3.2.3 Calibración en una cápsula parcialmente cerrada.....	52
3.3 Visualización de las mediciones	60
3.3.1 Pantalla LCD	60
3.3.2 Microprocesador ESP8266	61
3.4 Tubo de medición.....	64
3.5 Presupuesto	67
4 Resultados	69
4.1 Discusión de resultados.....	69
4.2 Montaje final	70
5 Conclusiones y líneas futuras	73
5.1 Conclusiones	73
5.2 Líneas futuras	74
6 Bibliografía.....	75
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	79
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	80
Anexo III: Datos calibración	81
Anexo IV: Planos	96
Anexo V: Código Arduino	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Distribución de los principales métodos de producción de hidrógeno [Autoría propia]	12
Figura 2-2 Procedimiento de reformado de vapor de agua [Autoría Propia]	14
Figura 2-3 Submarino Ictíneo II [16]	16
Figura 2-4 Esquema simplificado de funcionamiento del modelo MESMA [Autoría Propia]	17
Figura 2-5 Esquema simplificado del funcionamiento del motor Stirling [Autoría propia]	17
Figura 2-6 Esquema transformación de energía [Autoría propia]	19
Figura 2-7 Entrada y salida de una célula de combustible de hidrógeno [19]	19
Figura 2-8 Funcionamiento de una célula de combustible común [Autoría propia]	20
Figura 2-9 Apilamiento de una celda tipo PEMFC [20]	20
Figura 2-10 Tecnología FDM [Autoría propia]	25
Figura 3-1 Esquema placa Arduino Mega	28
Figura 3-2 Respuesta del sensor TGS 2600 a múltiples gases (izquierda) y respuesta a diferentes condiciones de temperatura y humedad (derecha) [29]	29
Figura 3-3 Circuito y estructura del sensor Figaro TGS 2600 [29]	29
Figura 3-4 Curva de concentraciones de gases del sensor TGS2600	31
Figura 3-5 Esquema de montaje en aplicación Fritzing	33
Figura 3-6 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-4	35
Figura 3-7 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-4	36
Figura 3-8 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-7	37
Figura 3-9 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-7	38
Figura 3-10 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-8	39
Figura 3-11 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-8	40
Figura 3-12 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-135	41
Figura 3-13 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-135	42
Figura 3-14 Montaje calibración	44
Figura 3-15 Bolsa estanca con H ₂ y jeringuilla	45
Figura 3-16 Calibración directa del sensor MQ-4 a 18,5 °C y 47% de humedad relativa	48
Figura 3-17 Calibración directa del sensor MQ-7 a 19,5 °C y 53% de humedad relativa	50
Figura 3-18 Calibración directa del sensor MQ-8 a 21,3 °C y 43% de humedad relativa	52
Figura 3-19 Capsula parcialmente cerrada con válvula antirretorno	53
Figura 3-20 Calibración MQ-4 en una cápsula parcialmente cerrada	55
Figura 3-21 Calibración MQ-7 en una cápsula parcialmente cerrada	57
Figura 3-22 Calibración MQ-8 en una cápsula parcialmente cerrada	59
Figura 3-23 Medición sensores (1/2)	60

Figura 3-24 Medición sensores (2/2).....	60
Figura 3-25 Medición de Temperatura, humedad relativa y presión	61
Figura 3-26 Mensaje de bienvenida	61
Figura 3-27 Visualización de mediciones en Thinkspeak (1/2)	62
Figura 3-28 Visualización de mediciones en Thinkspeak (2/2)	62
Figura 3-29 Representación de dos mediciones en la misma gráfica.....	63
Figura 3-30 Esquema de montaje definitivo en aplicación Fritzting	64
Figura 3-31 Tubo de medición desensamblado.....	64
Figura 3-32 Tubo de medición ensamblado	65
Figura 3-33 Interior de la primera pieza del tubo de medición	66
Figura 3-34 Interior de la segunda pieza del tubo de medición	66
Figura 4-1 Cableado del interior del tubo de medición.....	71
Figura 4-2 Montaje final del medidor de concentración de gases.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Submarinos actuales con sistema Stirling [17]	18
Tabla 2 Relación figura-componentes.....	28
Tabla 3 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas metano.....	31
Tabla 4 Tabla resumen sensores MQ	32
Tabla 5 Explicación de los cables utilizados.....	33
Tabla 6 Resistencia del PCB de cada sensor MQ	34
Tabla 7 Datos sensor MQ-4.....	35
Tabla 8 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas metano.....	36
Tabla 9 Datos sensor MQ-7.....	37
Tabla 10 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas monóxido de carbono.....	38
Tabla 11 Datos sensor MQ-8.....	39
Tabla 12 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas hidrógeno	40
Tabla 13 Datos sensor MQ-135.....	41
Tabla 14 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas dióxido de carbono.....	42
Tabla 15 Resumen datos calculados sensores MQ.....	43
Tabla 16 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	47
Tabla 17 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	48
Tabla 18 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	49
Tabla 19 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	50
Tabla 20 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	51
Tabla 21 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición	52
Tabla 22 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	54
Tabla 23 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición	55
Tabla 24 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	56
Tabla 25 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición	57
Tabla 26 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición	58
Tabla 27 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición	59
Tabla 28 Total de presupuesto gastado en material	67
Tabla 29 Comparación de las técnicas de medición.....	69

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En los últimos años, la producción y uso del H_2 como fuente de energía limpia ha ganado cada vez más atención a nivel mundial, hasta tal punto, que la Unión Europea, en la Directiva 2018/2001 del 11 de diciembre de 2018, ha reconocido la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y lograr la neutralidad climática para 2050 [1]. Esta preocupación se puede apreciar en el recientemente aprobado plan de recuperación ocasionado por el COVID-19, en el que la UE incluye una inversión de 750.000 millones de euros para impulsar la economía y para lograr la transición hacia una sociedad más verde y sostenible [2].

En este contexto, el hidrógeno desempeña un papel fundamental debido a que su producción y uso se puede realizar mediante procesos que no generan emisiones de dióxido de carbono (CO_2), lo que hace que el H_2 sea considerado una fuente de energía limpia y renovable. Convirtiendo a este tipo de energía en una alternativa cada vez más atractiva para alcanzar una economía baja en carbono.

En España, con la intención de seguir los pasos que marca la política europea del H_2 , se crea la Hoja de Ruta del Hidrógeno, que tiene como objetivo principal impulsar el desarrollo de esta tecnología y fomentar la producción y uso del hidrógeno en el país [3]. Además, esta hoja de ruta también incluye el desarrollo de proyectos de investigación, la promoción de la inversión en infraestructuras de producción y distribución de hidrógeno o la creación de un marco regulatorio adecuado para el despliegue de esta tecnología.

Dentro del ámbito de las Fuerzas Armadas, la Armada española, en línea con la Hoja de Ruta del Hidrógeno en España, ha reconocido en el documento de Estrategia e Innovación para la defensa (ETID 2020) [4] la importancia del hidrógeno como una alternativa sostenible para la propulsión de sus buques. Este compromiso, se puede ver la instalación de la planta piloto de producción de hidrógeno renovable en la Base Naval de Rota o en el proyecto de los nuevos submarinos clase S-80, que estarán equipados con un sistema de propulsión AIP (Air Independent Propulsion).

Actualmente, se busca constantemente la reducción de costos en todos los ámbitos, incluyendo la Armada. Sin embargo, la implementación de esta tecnología emergente requiere de dispositivos y sensores sofisticados para monitorear estos compuestos de manera eficaz, precisa y segura, lo que implica un costo elevado. Es por esto por lo que este trabajo se basa en poder disminuir costes en equipos que emplean medición de gases, como lo puede ser el hidrógeno.

Por otro lado, en ingeniería, el control de cualquier proceso de monitoreo de gases requiere la medición de los fenómenos físicos involucrados en la transmisión de las entradas y salidas. En el campo científico, la comprensión de todos los fenómenos físicos requiere de su medición para poder llevar a cabo cualquier estudio o análisis.

Por lo general, la medición de una magnitud física utiliza sensores que pueden generar una señal de salida, a menudo electrónica, en respuesta a la estimulación provocada por el fenómeno de estudio. Por lo tanto, se puede concluir, que los sensores se utilizan en prácticamente todos los campos de la ciencia e ingeniería como biomédica, industrial, robótica, aeroespacial e indiscutiblemente química y mecánica.

Hoy en día, se han utilizado varias tecnologías para monitorear gases. Las metodologías más empleadas en entornos con bajas concentraciones son la cromatografía de gases con ionización de llama o la espectrometría de anillo de cavidad. No obstante, estas técnicas requieren de instrumentación muy característica como pueden ser los analizadores de gases con gases portadores, lo que, debido a su complejidad, implican altos costos de adquisición, operación y mantenimiento. Por estos motivos, para mediciones locales o puntuales, el uso de estos analizadores de gases no es viable. Por lo tanto, existe un interés creciente en los sensores de bajo coste que pueden monitorear gases con fiabilidad y que pueden incorporarse en sistemas portátiles o en redes de monitorización.

Uno de los tipos de sensores de bajo coste que más se están desarrollando son los sensores resistivos basados en óxidos metálicos de semiconductores. Sin embargo, estos sensores, tienen la desventaja que presentan rangos de medición relativamente pequeños (limitados a concentraciones inferiores a las 10000 ppm), por lo que son dedicados a la detección de fugas de gas en sistemas de seguridad.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado es diseñar y construir un medidor de gases procedentes del reformado. Para ello, se debe estudiar la posibilidad de adaptar estos sensores resistivos para medir concentraciones de gases en el sector de la energía, por lo que, una de las tareas principales para lograrlo es llevar a cabo una calibración precisa y fiable de los sensores.

Además, para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Creación de un código en la plataforma Arduino, que sea capaz de relacionar la respuesta, en voltaje, del sensor ante la presencia de un gas con la concentración en ppm.
- Diseño y construcción de una pieza que permita conectar el medidor de concentración de gases en serie con la salida del reformador, para así, poder realizar mediciones de varios gases (presentes en una mezcla de gases como, por ejemplo, la producida en el reformado de glicerina), con varios sensores a la vez.

1.3 Estructura de la memoria

Este trabajo supone una investigación en el desarrollo de la tecnología de la monitorización y análisis de gases con sensores de bajo coste. Con la presente memoria se busca hacer una descripción detallada de cada una de las metodologías de calibración de los sensores y terminar con una comparativa entre ellas, buscando demostrar la eficiencia y posibilidad de uso en el sector de la energía.

Con el apartado “Estado del Arte” se trata de establecer unas líneas generales desde la obtención de hidrógeno y su empleo en el sistema AIP hasta los sensores de análisis de gases y la fabricación aditiva.

En el apartado “Desarrollo” se va siguiendo una línea continua en el proceso de calibración de los sensores de gas. Se comienza por la presentación de los sensores que se van a utilizar, describiendo su funcionamiento, los componentes por los que están compuestos, sus características y el esquema de montaje. A continuación, se realizan las calibraciones, empezando por la calibración teórica, posteriormente la calibración experimental en la que se introducirá el gas directamente al sensor que se

llamará “calibración directa” y finalmente una calibración en la que se introducirá el gas en una cápsula que contiene al sensor que se llamará “calibración en una cápsula parcialmente cerrada”. Una vez finalizadas estas calibraciones, se implementarán sensores y elementos adicionales para su mejor visualización. Primero, se introducirá una pantalla LCD que le permitirá al usuario ver las mediciones de concentraciones ppm, temperatura, presión y humedad relativa en tiempo real y de una manera más fácil. Segundo, se implementará un procesador que permite enviar estos datos vía Internet, por lo que permitirá una accesibilidad remota, y una representación gráfica, al poder visualizar los datos en gráficas en tiempo real. Finalmente, la última parte del desarrollo concluye con el cálculo del presupuesto total necesitado para la realización del proyecto.

Los datos obtenidos a lo largo de las diferentes calibraciones de los sensores se ven sintetizados en el apartado “Resultados”, comparando las distintas metodologías de calibración y demostrando la efectividad de los sensores fuera de su rango de medición.

Con las conclusiones se busca la recapitulación del desarrollo y los resultados y con las líneas futuras se busca clarificar que esto es solo el principio en el desarrollo de esta tecnología tan novedosa y que hay múltiples opciones para realizar nuevos avances.

Por último, en los anexos se han tratado las implicaciones sociales, económicas y ambientales del proyecto, así como unas reflexiones éticas y sociales. Además, se ha incluido el código de la plataforma Arduino, los planos de las piezas diseñadas e impresas mediante la fabricación aditiva y los datos obtenidos en la calibración de uno de los sensores MQ (solamente se muestran los datos de un sensor debido a la gran cantidad de datos que se obtienen en cada repetición. No obstante, se podrá tener acceso al resto de datos al final del citado anexo)

2 ESTADO DEL ARTE

Con el fin de entender el proceso, en los siguientes apartados se introducirán las tecnologías actuales de vanguardia que existen en el campo de medición de concentración de gases en materia de reformado, empezando desde una vista más general como son los diferentes sistemas de obtención de hidrógeno hasta una vista más pormenorizada como es la explicación de los sistemas de adquisición de datos y la fabricación aditiva.

Como se indicó en el anterior párrafo, este estado del arte se inicia con la explicación de la importancia del hidrógeno y sus diferentes sistemas de obtención que existen como son la electrólisis, gasificación de carbón y el reformado. Ligado a esta técnica de obtención de hidrógeno se encuentra la Armada, por lo que no se podía dejar la oportunidad de mencionar el sistema AIP que implementarán los submarinos S-80 de clase “Isaac Peral”. Por ello se hablará sobre este tema, explicando tanto su concepto como los diferentes tipos de sistemas AIP actuales en el mundo (Modelo MESMA, Motor Stirling y pilas de combustible). Posteriormente, se le dará prioridad a la explicación de los principios básicos, funcionamiento y tipología de las pilas de combustible, no solo por ser el sistema que emplearán los submarinos S-80 sino porque son el sistema AIP que más se está desarrollando en los últimos tiempos.

Por último, se abordará el tema de los sistemas de análisis de gases, haciendo una distinción entre los sistemas de alto costo y los de bajo coste (grupo en el que se incluye el prototipo que se diseñará y construirá en el presente trabajo) y se desarrollará el tema de la impresión 3D ya que a lo largo del proyecto se han diseñado e impresos diversas piezas para la realización de calibraciones y mediciones.

2.1 Sistemas de obtención de hidrógeno

Hoy en día, debido a las múltiples cualidades que presenta, el hidrógeno es considerado como una de las energías más atractivas del mercado para el futuro cercano. Entre sus principales ventajas se encuentran las siguientes:

- Fuente de energía renovable y limpia, ya que, al quemarse, solamente produce vapor de agua como residuo, por lo tanto, se puede decir que su combustión no resulta contaminante.
- Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero al poder reemplazar a los combustibles fósiles en una variedad de aplicaciones.
- Capacidad de almacenarse como gas a presión, líquido, o distribuirse mediante gasoductos, por lo que se considera que puede reemplazar al gas natural a medio-largo plazo.

Sin embargo, el hidrógeno solo se puede encontrar en forma de compuesto en la naturaleza. Por tanto, para obtener este tipo de elemento en forma pura, serán necesarias técnicas para descomponer la materia prima portadora del mismo. Por tanto, en los siguientes apartados, se explicarán algunas técnicas que se utilizan en la actualidad para llevar a cabo esta separación.

Además, es importante mencionar que, hoy en día, el H_2 puede producirse mediante una amplia gama de procesos químicos, biológicos y termoquímicos con cierta consistencia y empaque. Tal y como se puede observar en la Figura 2-1 la mayor parte de la producción de H_2 se obtiene mediante el reformado con vapor de agua o más comúnmente conocido por sus siglas en inglés SMR (Steam methane reforming). Gracias a estas técnicas se producen en el mundo millones de toneladas cada año. No obstante, es pertinente mencionar que todos estos procedimientos presentan mucho margen de mejora. Además, se puede afirmar que los procesos de generación de H_2 se encuentran en plenas vías de investigación y desarrollo ya que el principal objetivo es hacer de esta forma de energía un medio rentable económicamente [2–4].

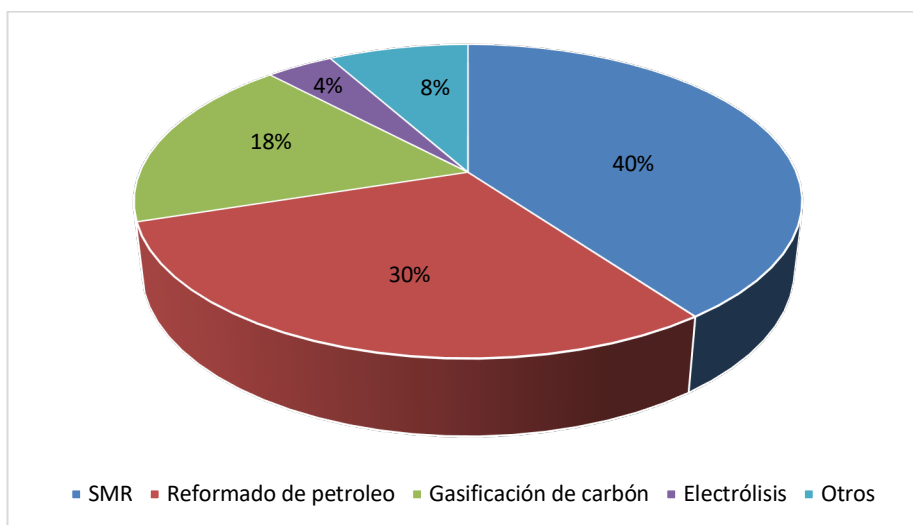


Figura 2-1 Distribución de los principales métodos de producción de hidrógeno [Autoría propia]

2.1.1 Electrólisis

Esta tecnología implica la separación de moléculas de H_2O en oxígeno e hidrógeno en estado gaseoso utilizando una corriente eléctrica continua suministrada por una fuente de alimentación conectada a dos electrodos, en cuya superficie se encuentra la disociación de la molécula de agua [3].

Actualmente, existen 2 tipos de electrólisis. Por un lado, se encuentra la electrólisis a baja temperatura y por otro lado la electrólisis de alta temperatura. La principal diferencia se encuentra en que la electrólisis a baja temperatura utiliza un consumo eléctrico muy elevado del orden de la energía contenido en el hidrógeno producido, por tanto, no es tan rentable como la electrólisis a alta temperatura que, pese a que el consumo de energía también es muy elevado, comienza a ser rentable energéticamente hablando [7].

2.1.2 Gasificación de carbón

La gasificación es un proceso termoquímico por el que se transforma el carbón en un gas combustible (gas de síntesis), mediante la oxidación parcial con oxígeno, vapor de agua o aire. A diferencia de los otros métodos de combustión de carbón, la gasificación se realiza prácticamente en ausencia de oxígeno. Por tanto, el gas combustible contiene principalmente monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2) conservando la mayor parte de la energía del combustible original [7].

Actualmente, este proceso ha cobrado un gran interés en la generación de electricidad en ciclos combinados. Esto se debe a que esta tecnología permite la utilización del carbón (mediante el gas de síntesis, producto de la gasificación del carbón) como combustible en las modernas centrales eléctricas

de ciclo combinado de una manera más limpia y eficiente. De esta forma, el proceso completo asociado a esta tecnología consta de dos elementos principales [8]:

- Gasificación del carbón
- Generación eléctrica en Ciclo Combinado

La gasificación de carbón y la generación de electricidad en ciclo combinado son tecnologías importantes para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, es importante destacar que el empleo de combustibles fósiles para producir hidrógeno no es una solución sostenible a largo plazo, y que cada vez se están desarrollando más tecnologías para producir hidrógeno a partir de fuentes renovables, como la energía solar y eólica.

2.1.3 Reformado de naftas

El reformado de naftas para obtener hidrógeno es un proceso químico en el cual se convierten las naftas en una mezcla de gases rica en hidrógeno mediante un proceso conocido como reformado catalítico. El proceso se lleva a cabo en presencia de un catalizador y se requieren altas presiones y temperaturas.

Este tipo de reformado se divide en dos etapas: En la primera se realiza la descomposición térmica de las naftas en una mezcla de gases conocida como "gas de reformado". Mientras que, en la segunda etapa, se lleva a cabo una reacción química conocida como "reformado catalítico", en la cual el gas de reformado se somete a una serie de reacciones químicas en presencia de un catalizador para producir hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono.

El proceso de reformado de naftas es más complejo que el reformado con vapor de agua debido a la presencia de hidrocarburos con cadenas más largas en las naftas, y se requieren condiciones más severas. Sin embargo, el proceso de reformado de naftas tiene el potencial de producir grandes cantidades de hidrógeno, lo que lo convierte en una opción atractiva para su uso en la producción de combustibles y en la industria química [9].

2.1.4 Reformado con vapor de agua

Aproximadamente, como se aprecia en la Figura 2-1, la mitad de todo el hidrógeno producido en el mundo proviene del reformado con vapor de agua, y dentro de ese 40%, una gran parte se debe al reformado de metano, hecho que haga que el reformado de vapor de agua se conozca comúnmente como SMR o "Steam methane reforming". No obstante, como se citará posteriormente, existen otros tipos de reformado con vapor de agua como el reformado de etanol o el reformado de glicerina (sustancia objeto de estudio en este proyecto).

Como se aprecia en la Figura 2-2. La tecnología de reformado con vapor se desarrolla en un reactor (reformador), donde reacciona vapor a alta temperatura y presión con los hidrocarburos en presencia de un catalizador de base metálica, y se produce un gas de síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono). Posteriormente suele haber dos etapas de WGS (Water Gas Shift) para obtener más H_2 (y al mismo tiempo CO_2) y una etapa final de purificación de H_2 [3].

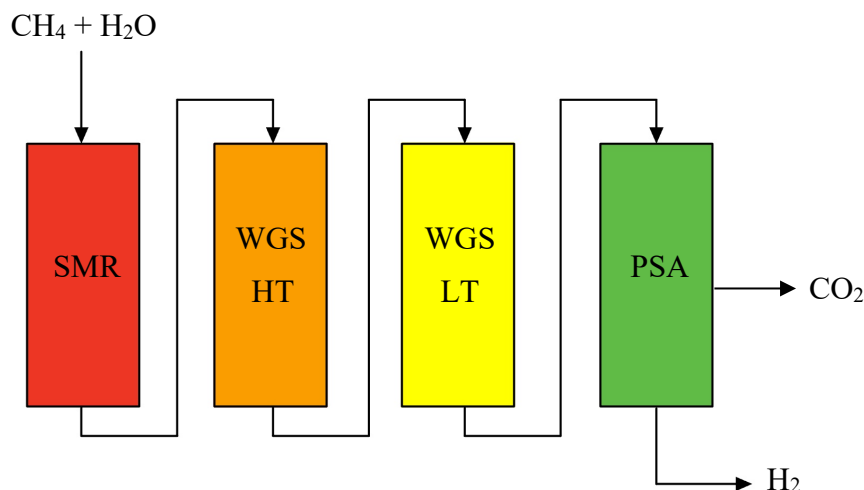


Figura 2-2 Procedimiento de reformado de vapor de agua [Autoría Propia]

2.1.4.1 Tipos de reformado con vapor de agua

Como se citó anteriormente, existen varios tipos de reformado con vapor de agua. En este subapartado se detallarán algunos de los más habituales dejando para el final el reformado de glicerina que, pese a que no es el más habitual, se trata del reformado para el que se planteará la construcción de un medidor con el objetivo de cuantificar la concentración de cada gas del producto.

◇ *Reformado de metano con vapor de agua*

Dentro de los diversos tipos de reformados que existen hoy en día, el reformado de metano es el proceso más empleado en la industria para la obtención tanto de hidrógeno como de gas de síntesis [10].

El refinado del metano es un proceso en el cual, mediante una reacción química, se utiliza vapor de agua para convertir el metano (CH_4) en hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso se utiliza comúnmente para producir hidrógeno puro a partir de metano, ya que el metano es una fuente abundante y económica de hidrógeno.

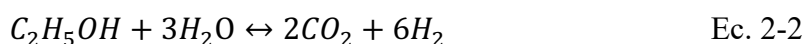


En esta reacción, el metano se combina con vapor de agua para producir hidrógeno y dióxido de carbono. El hidrógeno producido en este proceso es de alta pureza y se utiliza en una variedad de aplicaciones, como la producción de combustibles, la generación de energía y la fabricación de productos químicos como puede ser la síntesis de amoníaco, metanol, hidrocarburos, dimetileter, ácido acético, y para oxosíntesis [11].

Hay que mencionar que este tipo de reformado solo se puede llevar a cabo en un reactor específico que permita llevar el control de la temperatura y de la presión. Por ello los reactores que se suele utilizar en este tipo de reformado son los reactores de lecho fluidizado, los reactores de lecho fijo y los reactores de membrana.

◇ *Reformado de etanol con vapor de agua*

El reformado del etanol o más comúnmente conocido por sus siglas en inglés “ESR” (Ethanol Steam Reforming) es un proceso químico en el cual el etanol se somete a una reacción con vapor de agua para producir hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2).



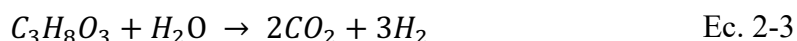
Este proceso se lleva a cabo en un reactor de reformado, en el cual el etanol y el vapor de agua se mezclan y se someten a altas temperaturas (alrededor de 400-800 °C) y presiones moderadas (alrededor de 1-3 atm) para llevar a cabo la reacción.

El proceso de reformado del etanol con vapor de agua es importante porque el hidrógeno producido es utilizado en una variedad de aplicaciones industriales, como la producción de amoníaco, metanol y diésel, así como en la generación de energía.

Además, el hidrógeno producido a partir de etanol es considerado como un combustible limpio, ya que su combustión solo produce vapor de agua como residuo, lo que lo hace una alternativa atractiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el proceso de reformado del etanol con vapor de agua tiene algunas desventajas, como el requerimiento de altas temperaturas y presiones, que aumenta el uso de energía y los costes de operación [10 – 11].

◇ *Reformado de glicerina con vapor de agua*

El reformado de glicerina con vapor de agua es un proceso que se utiliza para producir hidrógeno a partir del subproducto de la producción de biodiesel. En este proceso, la glicerina se combina con vapor de agua a altas temperaturas y presiones moderadas en un reactor de reformado, dando lugar a la siguiente reacción química:



La glicerina es un compuesto orgánico compuesto de carbono, hidrógeno y oxígeno. Es un subproducto de la producción de biodiesel, y se obtiene a través del proceso de transesterificación de los triglicéridos presentes en los aceites vegetales o animales. La glicerina es un compuesto de bajo valor comercial, y su producción en grandes cantidades ha llevado a un excedente de glicerina en el mercado.

Por tanto, el reformado de glicerina es una forma de convertir ese excedente en hidrógeno, un combustible limpio y renovable. En el proceso, la glicerina se somete a altas temperaturas (alrededor de 400-800 °C) y presiones moderadas (alrededor de 1-3 atm) en un reactor de reformado. En este ambiente, la glicerina reacciona con el vapor de agua para producir hidrógeno y dióxido de carbono (CO₂).

El hidrógeno producido puede ser utilizado en una variedad de aplicaciones industriales, como la producción de amoníaco, metanol y diésel, así como en la generación de energía. Además, el proceso de reformado de glicerina con vapor de agua tiene una serie de ventajas en comparación con otras formas de producir hidrógeno. Por ejemplo, es un proceso más eficiente y menos costoso que la producción de hidrógeno a partir de metano.

No obstante, el proceso de reformado de glicerina con vapor de agua también tiene algunas desventajas. El requerimiento de altas temperaturas y presiones para llevar a cabo la reacción aumenta los costos de operación y el uso de energía. Además, el proceso también produce dióxido de carbono, que debe ser capturado y almacenado si se desea utilizar el hidrógeno producido como un combustible limpio. Es importante mencionar que aún se requiere de más investigación para optimizar y escalar este proceso [12–14].

2.2 Sistema AIP

En este apartado se explicará el concepto del sistema de propulsión autónomo. Además, se citarán y definirán los sistemas actuales como son el Modelo Mesma, Modelo Stirling y la Pila de Combustible. Este último se explicará en el siguiente apartado con más detalle debido a su importancia en la actualidad y que está muy relacionado con la construcción de los submarinos españoles de la clase “Isaac Peral” (S-80) que para suministrar la potencia eléctrica emplearan estas pilas de combustibles tras un proceso químico de reformado de Etanol.

2.2.1 Concepto sistema AIP

El término AIP se refiere al acrónimo inglés de Air-independent Propulsion, un sistema de propulsión comúnmente utilizado en el entorno marino para dar a los submarinos no nucleares la ventaja táctica de aumentar su tiempo en profundidad y evitar el uso de una atmósfera de oxígeno.

Aunque varios científicos e ingenieros han contribuido al desarrollo de los sistemas AIP, Narciso Monturiol i Estarriol es considerado como uno de los primeros pioneros en este campo. Monturiol, vivió en el siglo XIX, fue un inventor, ingeniero y escritor catalán que construyó, en 1858, el primer submarino en utilizar un sistema de propulsión independiente del aire llamado Ictineo II. Como se puede ver en la Figura 2-3, este submarino construido de madera usaba una caldera de vapor para calentar agua y generar aire comprimido que, a su vez, se utilizaba para impulsar el submarino. Además, el submarino también tenía un sistema de recirculación de aire que permitía a los tripulantes respirar mientras estaban sumergidos.

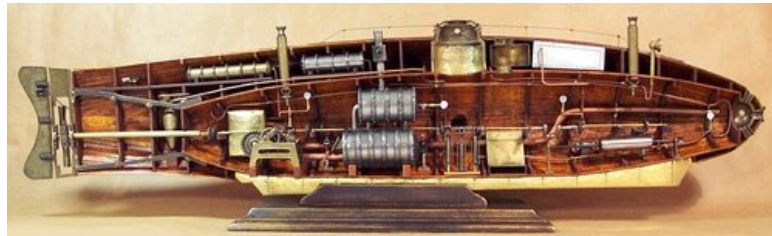


Figura 2-3 Submarino Ictineo II [16]

Este hito sentó las bases de lo que hoy en día se conoce como sistema AIP. Como era de esperar, con el paso del tiempo se fueron desarrollando múltiples formas y variedades como por ejemplo los submarinos alemanes que utilizaban un sistema de propulsión de batería durante la Segunda Guerra Mundial, pero todos ellos con el mismo objetivo de aumentar el tiempo de inmersión del submarino y por tanto reducir la vulnerabilidad y desventaja táctica que el “Snorkel” provoca en las diferentes misiones del submarino.

En la actualidad siguen existiendo diferentes tipos de sistemas de propulsión AIP en submarinos. Aunque exista algún otro prototipo en fase de desarrollo, se pueden clasificar en tres diferentes tecnologías, que cuentan con la finalidad común de alimentar un motor eléctrico. Entre las tres diferentes tecnologías de propulsión AIP se encuentran el modelo MESMA, el motor Stirling y las pilas de combustible.

2.2.2 Sistemas AIP actuales

Hoy en día, existen diferentes tipos de sistemas que emplean la propulsión independiente de aire. La razón por la cual existe tanta diversidad es debido a la necesidad de encontrar soluciones eficientes y fiables para la alimentación de energía en los barcos y submarinos. En este apartado se centrará en los sistemas AIP más actuales. Además, cada uno de estos sistemas tiene características únicas y aportan soluciones innovadoras a los desafíos de la propulsión independiente de aire en el mar.

2.2.2.1 Modelo MESMA

Sistema de propulsión de hidrógeno desarrollado por Francia para su uso en sus buques (concretamente los submarinos). Como se observa en la siguiente figura, este sistema consiste en un módulo de una turbina de vapor convencional, donde la energía térmica es convertida en energía eléctrica utilizando un ciclo convencional de Rankine.

El vapor es calentado por un circuito primario en una cámara de combustión, quemando una mezcla gaseosa de etanol y oxígeno puro, proveniente de un tanque de oxígeno. Esta combustión a posteriori da lugar a energía eléctrica y dióxido de carbono que es desechado por el submarino.

El sistema de vapor secundario es responsable de accionar la turbina. Este movimiento, a través de una conexión mecánica con un alternador, genera energía eléctrica para cargar baterías. Además, el vapor que sale de la turbina se recircula a un condensador, donde calienta un circuito de agua salada. Este circuito de agua caliente ayuda a aumentar la temperatura de un circuito intermedio, que vaporiza el oxígeno líquido, maximizando así la eficiencia energética.

Este modelo presenta muchas ventajas como su gran fiabilidad y su seguro funcionamiento, no obstante, también presenta alguna desventaja como su reducido rendimiento (cercano al 20%) o que el O₂ líquido y etanol deben almacenarse por separado y a suficiente distancia por motivos de seguridad [17].

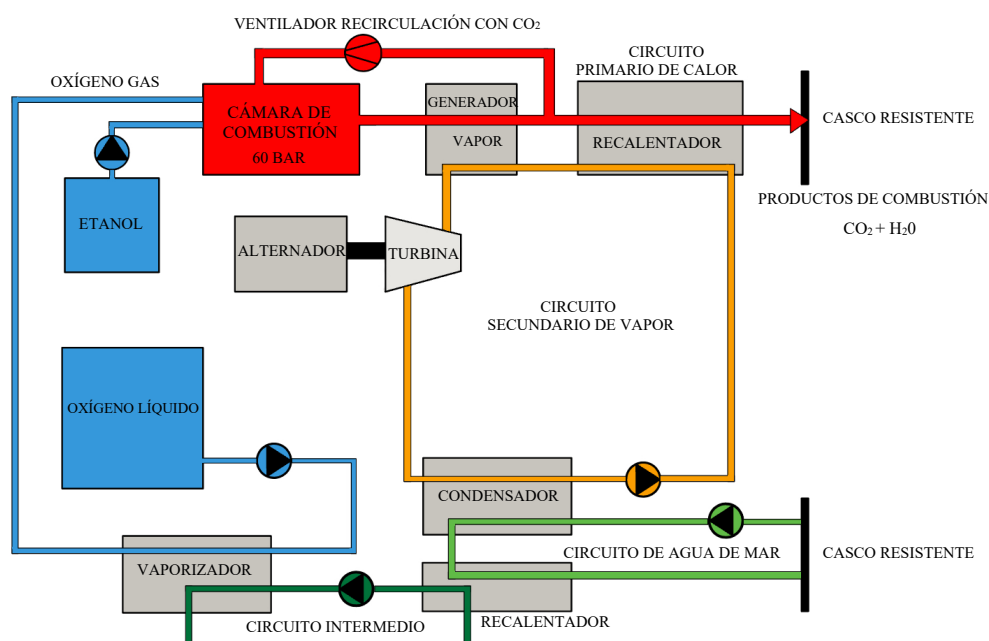


Figura 2-4 Esquema simplificado de funcionamiento del modelo MESMA [Autoría Propia]

2.2.2.2 Motor Stirling

Los sistemas de propulsión Stirling son motores de combustión interna que utilizan hidrógeno como combustible y oxígeno del aire para generar electricidad y propulsión. Como se observa en la siguiente figura, estos motores funcionan mediante un ciclo termodinámico en el cual el hidrógeno es quemado con oxígeno del aire para generar calor, el cual es utilizado para calentar un gas que se expande para mover un pistón o una turbina.

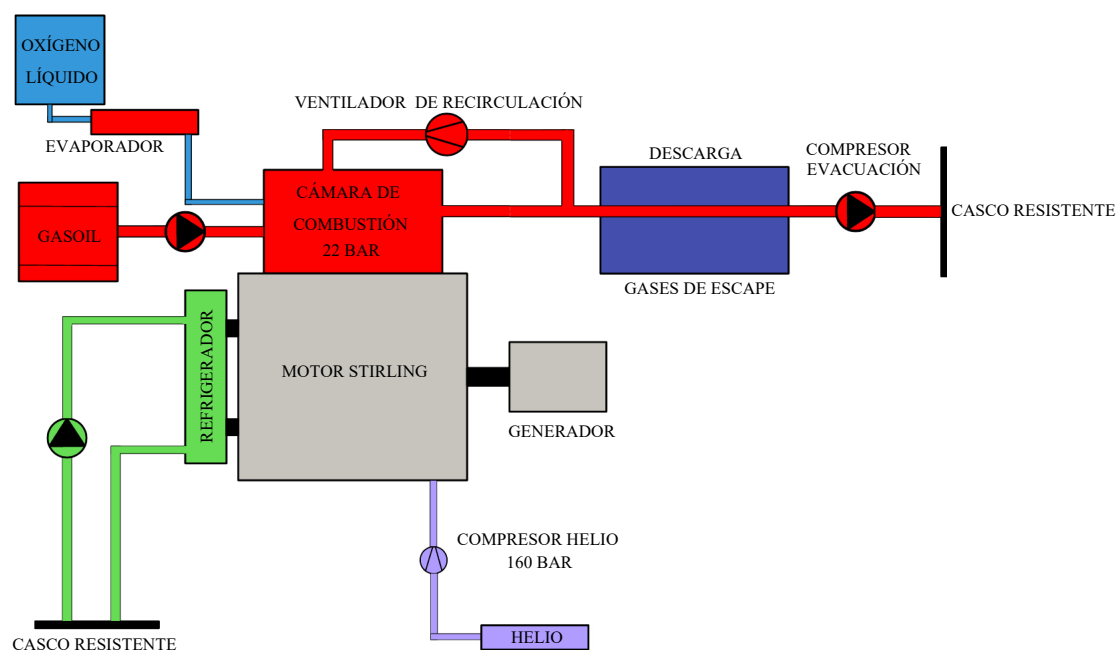


Figura 2-5 Esquema simplificado del funcionamiento del motor Stirling [Autoría propia]

El motor Stirling es el único capaz de aproximarse (teóricamente lo alcanza) al rendimiento máximo teórico conocido como rendimiento de Carnot, por lo que, en lo que a rendimiento de motores térmicos se refiere, es la mejor opción. No obstante, hay que mencionar que este tipo de sistema no se puede emplear por ejemplo como motor de un coche, porque, aunque su rendimiento es superior, su potencia a igualdad de peso es inferior y este rendimiento óptimo sólo se alcanza a velocidades bajas.

Tal y como se ve en la Tabla 1, existen hasta 17 buques submarinos con este tipo de tecnología, pero la gran mayoría pertenecen a Armadas donde sus aguas territoriales son de carácter frío. Esto se debe a que el rendimiento del ciclo es sensible a la temperatura exterior, por lo que su eficiencia es mayor en climas fríos como el invierno en los países nórdicos.

País	Número	Clase	Empresa
Suecia	3	Gotland	---
Suecia	2	Södermanland	Kockums
Singapur	2	Archer	---
Japón	5	Sóryüs	Mitsubishi Heavy Industries
Japón	5	Sóryüs	Kawasaki Heavy Industries

Tabla 1 Submarinos actuales con sistema Stirling [17]

2.2.2.3 Pilas de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos que convierten la energía química de un combustible en electricidad mediante un proceso electroquímico. Están compuestas por dos electrodos (ánodo y cátodo) y un material electroquímico (membrana), que separa los electrodos y permite la circulación de iones entre ellos.

Cuando se suministra un combustible (comúnmente hidrógeno) y un oxidante (comúnmente oxígeno) a la pila de combustible, los iones fluyen a través de la membrana desde el ánodo hasta el cátodo. Al mismo tiempo, los electrones fluyen desde el ánodo a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica.

2.3 Sistemas actuales de pilas de combustible

Este apartado tiene el objetivo de explicar con más detalle las pilas de combustible, ya que, este sistema es el que se encarga de proporcionar la potencia eléctrica (después de realizarse el proceso químico de reformado de etanol) a los submarinos S – 80 de la Armada.

2.3.1 Principios básicos

Como se ha definido anteriormente y se observa en la siguiente figura, una pila o célula de combustible es un dispositivo electroquímico que es capaz de convertir la energía química contenida en un combustible directamente en energía eléctrica.

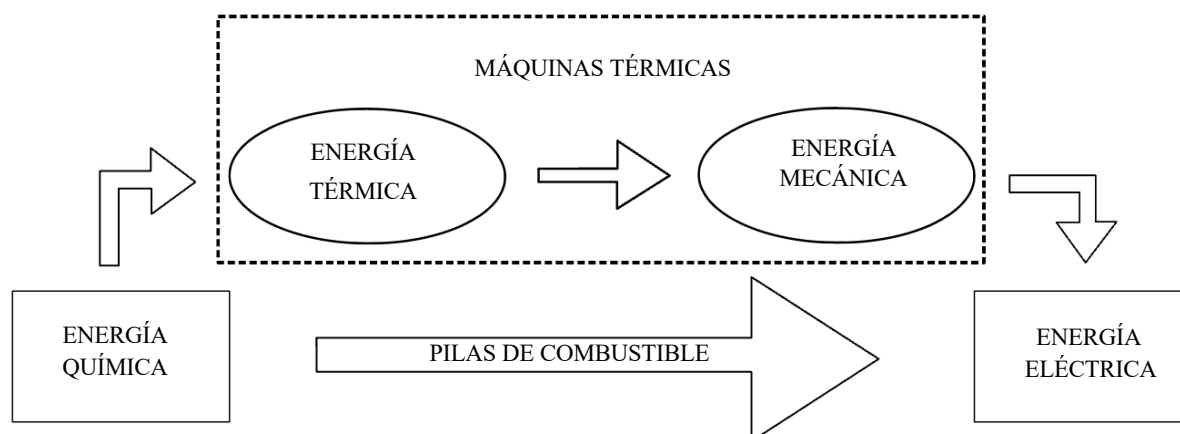


Figura 2-6 Esquema transformación de energía [Autoría propia]

La eficiencia es una de las ventajas más destacables de las pilas de combustible en comparación con las máquinas convencionales de generación de electricidad. Y es que, mientras la eficiencia de las máquinas térmicas está limitada por el ciclo de Carnot, las pilas de combustible no tienen límite, y su eficiencia se basa en los principios termodinámicos[18].

Se podría llegar a decir que las pilas de combustible se asemejan a las baterías actuales. Esto se debe a que ambas tienen un electrolito y dos electrodos. Además, ambas son capaces de generar electricidad a través de una serie de reacciones electroquímicas. No obstante, la diferencia está en que las pilas de combustible tienen la capacidad de ser reabastecidas continuamente con combustible y oxidante, mientras que las baterías tienen una capacidad limitada de almacenamiento de energía.

Por otro lado, los electrodos en las baterías cambian dependiendo de su carga, mientras que en las pilas de combustible los electrodos son estables y catalíticos. Como se representa en la siguiente figura, las pilas de combustible utilizan hidrógeno y oxígeno como reactivos, mientras que las baterías requieren reactivos sólidos que una vez agotados deben ser reemplazados o recargados [19].



Figura 2-7 Entrada y salida de una célula de combustible de hidrógeno [19]

2.3.2 Principio de funcionamiento

El funcionamiento básico de una pila de combustible se produce a través de una reacción química inversa a la hidrólisis. Como se puede observar en la Figura 2-8. El ánodo está formado por hidrógeno y el cátodo por oxígeno, y su oxidación y reducción catalítica, respectivamente, generan una diferencia de potencial entre los electrodos. Esta diferencia se puede aprovechar mediante un circuito externo con un electrolito aislante que permita la transferencia iónica de cargas. Como se verá más adelante, las pilas de combustible se clasifican en cinco tipos diferentes según el tipo de electrolito utilizado. En la figura siguiente se muestra el principio de funcionamiento de una célula de combustible genérica y por lo tanto es aplicable a todos los tipos de pila posibles.

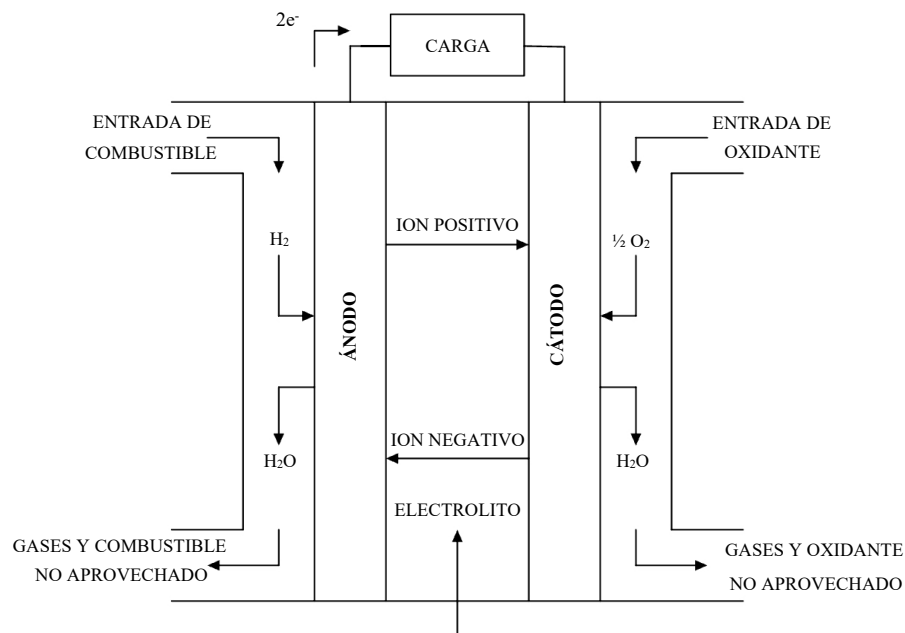


Figura 2-8 Funcionamiento de una célula de combustible común [Autoría propia]

La figura muestra que en algunas pilas de combustible hay transporte de iones negativos en el electrolito mientras que, en otras, el transporte es de cargas positivas. La formación de agua en la reacción de oxidación del hidrógeno puede ser añadida al gas cátodo o al gas ánodo. Además, no sólo el hidrógeno y oxígeno pueden ser utilizados como combustible y oxidante, respectivamente, sino que cualquier sustancia que pueda ser oxidada y reducida se puede emplear en una pila de combustible. Dependiendo del tipo de pila y el electrolito empleado, se pueden utilizar diferentes sustancias, como metano o monóxido de carbono.

Como las reacciones electroquímicas de los electrodos pueden ser catalizadas por distintos materiales a diferentes temperaturas, las pilas de combustible pueden funcionar en una amplia gama de temperaturas, desde las condiciones ambientales hasta los 1000°C. La selección de la pila adecuada para una aplicación depende de la temperatura de funcionamiento y de la posibilidad de aprovechar la energía térmica residual para aumentar el rendimiento global.

A grandes rasgos, como se ve representada en la siguiente figura, una pila de combustible consiste en varias celdas individuales conectadas eléctricamente en serie, donde cada celda tiene dos placas bipolares por donde entran los gases reactantes (hidrógeno y oxígeno) y salen los productos de la reacción. En cada extremo de las placas están el ánodo y el cátodo, con una capa de elemento catalizador que descompone el hidrógeno en protones y electrones. Por último, en medio de los electrodos se encuentra la membrana semipermeable que actúa como conductor de iones.

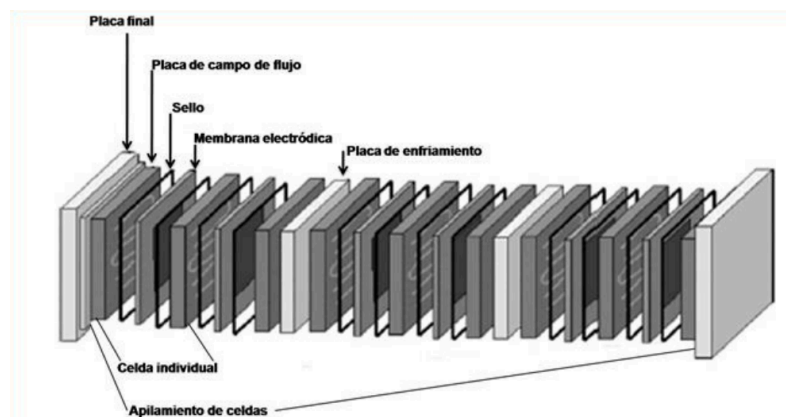


Figura 2-9 Apilamiento de una celda tipo PEMFC [20]

Es importante mencionar que la cantidad total de celdas determina la tensión total que la pila proporciona. Además, la agrupación de todas las celdas con el fin de proporcionar una tensión eléctrica suficientemente grande según los requerimientos de cada aplicación recibe el nombre de apilamiento o “stack”.

2.3.3 Tipos de pilas de combustible actuales

Existen diferentes tipos de pilas de combustible, clasificadas en base a la sustancia utilizada como electrolito. Cada tipo de pila funciona a diferentes temperaturas y requiere niveles diferentes de pureza del hidrógeno. Según el tipo de electrolito, estos son los cinco tipos de pila de combustible existentes:

- Pilas de Membrana de Intercambio de Protones o de Membrana Polimérica (PEMFC)
- Pilas de combustible Alcalinas (AFC)
- Pilas de Ácido Fosfórico (PAFC)
- Pilas de Carbonato Fundido (MCFC)
- Pilas de Óxido Sólido (SOFC)

Estos 5 tipos de pilas de combustible se dividen en dos grandes grupos según la temperatura.

2.3.3.1 Pilas de Combustible de Baja Temperatura

- **Pilas de combustible Alcalinas (AFC):** Utilizan una disolución alcalina, por ejemplo, de KOH, como electrolito donde la conducción se produce por iones OH⁻. Operan a temperaturas inferiores a 100 °C y deben usar H₂ muy puro como combustible para no contaminar el electrolito. Por ello su uso está restringido a misiones espaciales u otras aplicaciones especiales [20–21].
- **Pilas de Membrana de Intercambio de Protones o de Membrana Polimérica (PEMFC):** Funcionan a temperaturas bajas, inferiores a 120 °C y usan una membrana polimérica sólida como conductor de protones que evita problemas de corrosión de los componentes. Sin embargo, requieren una gestión adecuada del agua generada en la reacción para evitar inundación o resecamiento excesivo de la membrana. También necesitan platino como catalizador, lo que las hace sensibles a la presencia de CO y requieren hidrógeno extremadamente puro. También fueron usadas por la NASA en las misiones espaciales “Gemini” y “Apolo” respectivamente. En la actualidad se han desarrollado mucho y numerosos fabricantes de coches las han instalado en prototipos de vehículos, pero todavía su coste es muy alto y la duración baja [20–22].
- **Pilas de Ácido Fosfórico (PAFC):** Funcionan a una temperatura cercana a los 200 °C y pueden utilizar diferentes tipos de combustible, como gas de síntesis o hidrocarburos. Estas pilas han sido implementadas en plantas de energía con una capacidad de 200 KW en todo el mundo, incluso una planta de 11 MW [21–23].

2.3.3.2 Pilas de Combustible de Alta Temperatura

- **Pilas de Carbonato Fundido (MCFC):** Funcionan a temperaturas elevadas, alrededor de 650°C a 800°C, y utiliza un electrolito líquido de carbonato fundido. A diferencia de otras pilas de combustible, pueden funcionar con una variedad de combustibles, incluyendo gas natural, gas de síntesis e hidrocarburos. Estas pilas ofrecen altas tasas de conversión energética y tienen una larga vida útil, pero requieren un sistema de refrigeración y un equipo

de seguridad costoso debido a sus altas temperaturas de funcionamiento [18]. Actualmente, las MCFC se utilizan principalmente en aplicaciones industriales y de energía, pero su uso está expandiéndose a otros sectores, como la generación de electricidad en centrales eléctricas y el transporte [22].

- **Pilas de Óxido Sólido (SOFC):** utilizan un material conductor sólido (como cerámica) como electrolito. Estas pilas funcionan a temperaturas elevadas (alrededor de 800-1000°C) y tienen una alta eficiencia en la conversión de energía [18]. Las SOFC pueden utilizar una amplia variedad de combustibles, incluyendo hidrocarburos y gases de síntesis, y emiten bajas emisiones. A pesar de que su alto costo y la complejidad en su fabricación y mantenimiento son algunos de los obstáculos que aún deben superarse, las SOFC son consideradas prometedoras en el desarrollo de tecnologías de energía renovable y sostenible [22].

2.3.4 Ventajas de las pilas de combustible

Como ya se ha ido mencionando a lo largo del apartado, son muchas las ventajas que hacen que la pila de combustible empiece a ser considerada como un sustituto a los sistemas de producción de electricidad más convencionales.

Sin embargo, las pilas de combustible aún tienen un alto costo debido a la utilización de materiales costosos, como el platino en las pilas PEM, y la producción limitada de algunos componentes que es ocasionada porque este tipo de tecnología no está muy empleada. No obstante, hay un esfuerzo por parte de múltiples empresas y universidades en la investigación para reducir los costos, con el objetivo de que las pilas de combustible sean una revolución en la energía.

Entre las principales ventajas que aportan las pilas de combustibles se encuentran las siguientes:

- **Eficiencia:** Por lo general, las células de combustible tienen una mayor eficiencia que los motores de combustión convencionales. Además, la eficiencia de la pila no cambia con el tamaño (las pilas de potencias pequeñas trabajan con eficiencias relativamente similares a las de mayor potencia). En gran parte, esto es ocasionado ya que las pilas convierten directamente la energía del combustible en energía eléctrica. Si se compara con los motores de combustión tradicionales, para una misma cantidad de energía del combustible, la eficiencia de la pila de combustible será mayor que la del motor. Por otro lado, el hecho de que se pueda aprovechar el calor residual hace que la eficiencia de las pilas pueda aún aumentar [18].
- **Bajas emisiones:** Debido a que su funcionamiento se basa en reacciones electroquímicas en lugar de en la combustión, por lo que no generan gases contaminantes como los motores de combustión [15].
- **Nivel de ruido bajo:** Provocado por la inexistencia de partes móviles, el poco ruido que pueda haber es el proveniente de los sistemas de alimentación de combustible o de refrigeración de la pila. Esto, permite su utilización en lugares densamente poblados [22].
- **Bajo mantenimiento:** El hecho de que no tengan partes móviles, por tanto, sometidas a desgaste, hace que el mayor limitante de su vida útil, en el actual estado de investigación, sea el envenenamiento de sus catalizadores [19].
- **Admisión de combustibles diversos:** Como se ha mencionado anteriormente, estas pilas admiten cualquier combustible que contenga hidrógeno. Los combustibles admitidos varían desde gaseosos como gas natural, GLP hasta combustibles refinados, como gasolina o diésel, y otros combustibles orgánicos como metanol y etanol [19].

2.4 Sistemas de análisis de gases

En este apartado se explicará la importancia de la técnica de análisis de datos, se establecerán los principios fundamentales sobre los que se basa esta metodología y se realizará una distinción entre los dos grandes tipos de equipos de análisis de datos, dejando para el final los sistemas de adquisición de bajo costo ya que es el principal objeto de estudio del proyecto. Por último, se darán unas pequeñas pinceladas sobre los sensores y la plataforma de desarrollo “Arduino”.

2.4.1 Principios básicos

La técnica analítica es la ciencia que se encarga de realizar un análisis químico y determinar la concentración de un compuesto. En la actualidad, este tipo de técnica esta tan desarrollada que permite identificar la estructura, composición y cantidad de una sustancia con un enorme grado de exactitud. Las técnicas analíticas se pueden clasificar según los principales tipos de instrumentalización que se utilizan en los siguientes tipos:

- **Técnicas espectroscópicas:** Se basan en la interacción de radiación electromagnética y la materia, lo que permite identificar la sustancia o incluso determinar su concentración. El analito (sustancia que se está utilizando) sufre procesos de absorción, emisión o luminiscencia. Espectrometría de rayos X o espectrofotometría de infrarrojos son algunos ejemplos de este tipo de técnica.
- **Técnicas electroquímicas:** Se basan en introducir una señal eléctrica y analizar la respuesta eléctrica que genera en la materia que se estudia mediante la aplicación de energía e iones químicos. Voltamperometría, electrogravimetría o potenciometría son algunos ejemplos de técnica electroquímica.
- **Técnicas cromatográficas:** Técnica de separación, que es también una técnica de análisis en sí misma, ya que permite separar e identificar los compuestos en gases y líquidos.
- **Espectrometría de masas:** Técnica que permite determinar la masa de una molécula. Requiere de cantidades muy pequeñas de muestras y permite obtener más información sobre la estructura y propiedades químicas de las moléculas.

2.4.2 Sistemas de adquisición de datos

Se han empleado diferentes tecnologías para monitorizar y adquirir un análisis fiable de los gases. Por un lado, se encuentran las metodologías más cotidianas que se fundamentan en técnicas ópticas, cromatográficas o colorimétricas, y por otro lado están aquellos métodos que requieren de una instrumentación más delicada como pueden ser los analizadores de gases y gases portadores, lo que, debido a su complejidad, implica altos costos de adquisición, operación y mantenimiento. No obstante, a pesar de los costos de estos instrumentos, comúnmente instalados en ubicaciones estratégicas o en laboratorios profesionales, tienen una clara ventaja y es que presentan una alta precisión. Sin embargo, para mediciones locales o puntuales, el uso de analizadores de gases se vuelve costoso y requiere de un técnico especializado para realizar la tarea. Por lo tanto, existe un interés creciente por sensores de bajo costo que puedan monitorear gases con alta confiabilidad e incorporarlos en sistemas portátiles utilizando plataformas de desarrollo de hardware y software de código abierto, como puede ser Arduino o MicroPython.

2.4.2.1 Equipos de alta precisión

Como se comentó previamente, los dispositivos de alto coste son aquellos que cuentan con tecnologías avanzadas y son diseñados para realizar mediciones precisas y confiables. Estos dispositivos son utilizados en aplicaciones donde la precisión y la fiabilidad son críticas, como en la industria química, petroquímica, aeroespacial, procesamiento de alimentos, investigaciones científicas etc.

Entre los principales equipos de alta precisión se encuentran:

- **Analizador de gases por infrarrojos:** Dispositivo que emplea la tecnología infrarroja para medir la concentración de gases en una muestra. Su funcionamiento se basa en emitir un haz de luz infrarroja a través de la muestra para medir la cantidad de luz que es absorbida por los gases en la muestra (la cantidad de luz absorbida es proporcional a la concentración de gases en la muestra) [24].
- **Analizador de gases por espectroscopía de masas:** Instrumento que utilizando la tecnología de espectroscopía de masas consigue medir la concentración de gases en una muestra. Este dispositivo funciona ionizando los gases en la muestra y luego utiliza un campo eléctrico para separar los iones por su masa (la cantidad de iones de cada masa es proporcional a la concentración de los gases correspondientes en la muestra) [25].

Estos equipos de alta precisión se podrían considerar como equipos de medición “batch” ya que, en la gran mayor parte de los casos, toman una muestra de gas y se lleva el equipo para su análisis. En cambio, los equipos de bajo costo como puede ser el detector de gas portátil o el monitor de gases por sensores electrónicos podrían considerarse como equipos de medición “en línea” ya que se pueden conectar, como su propio nombre indica, en línea con el proceso para obtener mediciones en tiempo real

2.4.2.2 Equipos de bajo coste

Los dispositivos de bajo coste son aquellos que cuentan con tecnologías simplificadas y son diseñados para ser más accesibles en cuanto a su costo. Estos dispositivos son utilizados en aplicaciones donde la precisión no es crítica y se requiere una solución más económica, como en aplicaciones de monitoreo ambiental, en la industria alimentaria y en el uso personal.

Entre los principales equipos de bajo coste se encuentran:

- **Detector de gas portátiles:** Dispositivo compacto diseñado para detectar y medir la concentración de gases en el aire. Estos artefactos suelen tener una sonda que se inserta en el aire para recoger una muestra de gas, que luego es analizada por el detector para determinar la concentración de gases.
- **Monitor de gases por sensores electrónicos:** Dispositivo que se utiliza para medir la concentración de gases en el aire de manera continua. Estos monitores están equipados con una combinación de sensores electrónicos y tecnología de procesamiento de señal para detectar y medir la presencia de gases en el aire. Además, utilizan tecnologías como la detección infrarroja, la espectroscopía de masas o la detección electroquímica para detectar y medir la concentración de gases. Estos sensores electrónicos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la industria, seguridad en el trabajo, vigilancia ambiental, protección contra incendios ya que son capaces de detectar gases como el monóxido de carbono (MQ7), dióxido de carbono (MQ135), metano (MQ4), hidrógeno (MQ8), entre otros.

2.5 Fabricación aditiva

Por último, este apartado tiene el objetivo de explicar, de una manera somera, la tecnología de la fabricación aditiva o más comúnmente conocida como impresión 3D. Esto, se debe a la estrecha relación que tienen los sensores de bajo coste con esta técnica, ya que en muchas ocasiones se necesitan piezas como cápsulas para la calibración de los sensores o tubos de ensayo muy particulares para determinados sensores que solo se pueden conseguir con esta nueva tecnología.

2.5.1 Concepto fabricación aditiva

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, es un proceso para crear objetos físicos a partir de un diseño digital. Pese a que existen diferentes tecnologías de impresión 3D y materiales de impresión, todas están basadas en el mismo principio: Un modelo digital es convertido en un objeto sólido físico tridimensional a base de añadir material capa a capa [26].

Es necesario reseñar que la técnica de la fabricación aditiva no está formada por una sola tecnología, sino que se trata de un conjunto de procesos de fabricación, bastante diferenciados, que comparten en común tres características. La primera es que todas son procesos de adición de material para la construcción de sólidos tridimensionales, la segunda es que estos objetos son contruidos superponiendo sucesivas capas de material y la última es que todos los sólidos se fabrican a partir de un modelo 3D digital.

2.5.2 Modelado por deposición fundida

Actualmente, existen números tipos de fabricación aditiva. Algunos de los más comunes son la estereolitografía, la cual utiliza un láser para solidificar resina líquida capa por capa hasta crear el objeto, la sinterización selectiva por láser o el modelado por deposición de luz. No obstante, en el presente trabajo se explicará el modelado por deposición fundida o más comúnmente conocido por sus siglas en ingles FDM (Fused Deposition Modeling).

El modelado por deposición fundida trabaja extruyendo un polímero termoplástico a través de una boquilla caliente, que se va depositando en una plataforma de construcción. Como se puede ver en la Figura 2-10, el proceso involucra un filamento de plástico que es alimentado, gracias a un carretel, a la boquilla, donde el material es fundido para “dibujar” en la plataforma. Al tocar la superficie de impresión, este filamento se endurece mientras se deposita gradualmente siguiendo una estructura determinada. Cuando se termina de dibujar una capa, la plataforma desciende la altura de una capa para que la impresora sea capaz de empezar a trabajar en la siguiente capa [26].

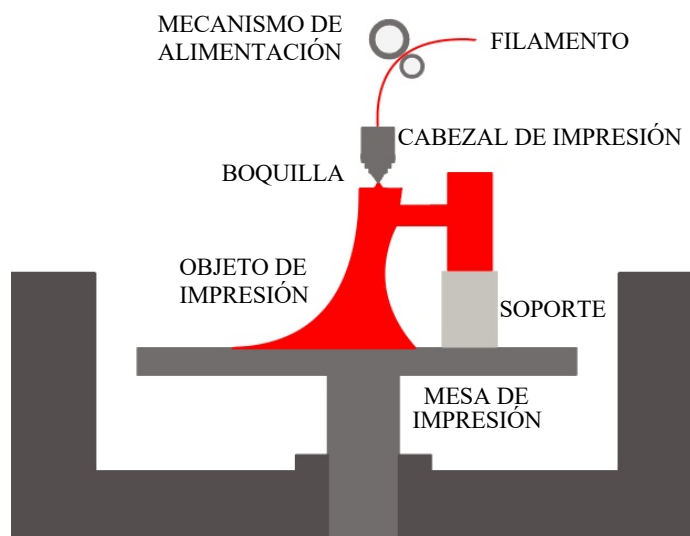


Figura 2-10 Tecnología FDM [Autoría propia]

Como se ha comentado, este tipo de tecnología extruye un filamento compuesto por un polímero termoplástico. Hoy en día, existen múltiples materiales que se pueden utilizar para el modelado por deposición fundida, pero, entre los más comunes se encuentra el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), PLA (Ácido Poliláctico) y el Nylon.

2.5.3 Limitaciones de los procesos de impresión 3D

Pese a que los procesos de impresión 3D tengo numerosas ventajas como la reducción de costes y tiempos de producción o la creación de diseños complejos. Existen limitaciones que hacen que la fabricación aditiva no esté implementada en algunos sectores ingenieriles [27]. Algunas de estas limitaciones son las siguientes:

- **Tamaño de las piezas:** El tamaño de las piezas a construir es el del plato de impresión. Aunque, cierto que muchas piezas grandes pueden trocearse y luego unirse mediante procesos de unión.
- **Acabado y precisión:** Por norma general, conseguir un muy buen acabado y una muy buena precisión requiere un coste elevado, ya que, sería necesario recurrir a tecnologías y máquinas más caras. Además, las piezas pueden requerir de post-procesos o sub-procesos especiales.
- **Inversión inicial:** Aunque, es cierto que las impresoras FDM de escritorio suelen ser económicas, las impresoras necesarias para otras tecnologías, (más si se buscan mayores tamaños de impresión), suponen una inversión inicial elevada.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Sensores

Como se comentó anteriormente, hoy en día existe un interés generalizado por desarrollar sistemas de análisis de gases de bajo coste que se acerque a niveles de precisión parecidos o iguales a los sistemas más sofisticados que existen en el mercado. Para ello, en el presente trabajo se ha llevado a cabo el diseño y construcción de un medidor que sea capaz de perseguir este objetivo mediante el empleo de monitores de gases por sensores electrónicos e incorporándolos al sistema portátil (Arduino) mediante la codificación de una serie de acciones.

En el siguiente apartado se describirá el sistema computacional de bajo coste empleado (Arduino), los sensores de gases empleados para la obtención de medidas, tanto los de la serie TGS como los de la serie MQ.

3.1.1 *Arduino*

Plataforma de hardware libre basada en una placa con un microcontrolador, programado mediante el lenguaje propio de programación de Arduino (basado en Wiring). Entre las principales ventajas de esta plataforma se encuentran la gran flexibilidad que proporciona, su gran compatibilidad con una amplia gama de componentes y el concepto de comunidad activa, y es que Arduino cuenta con una comunidad muy activa de usuarios y desarrolladores que implica que haya una infinidad de soluciones y recurso para cualquier problema planteado en esta plataforma.

Actualmente, existen muchos tipos de placas de Arduino disponibles en el mercado, cada una con diferentes características y especificaciones. Algunos ejemplos de placas de Arduino incluyen la Arduino Uno R3, la Arduino Nano, la Arduino Leonardo o la Arduino Pro Mini. Sin embargo, para la realización del proyecto, se ha optado por la utilización de las placas Arduino clásicas, en especial la Arduino MEGA 2560 R3. Esta placa es adecuada para el proyecto ya que ofrece una amplia variedad de pines de entrada/salida y una capacidad de almacenamiento suficiente para las necesidades requeridas. Además, la Arduino MEGA es una de las placas más utilizadas y es un buen punto de partida para proyectos futuros[28].

Antes de continuar con la descripción de los sensores utilizados es importante conocer los componentes de la placa utilizada. Para ello en la siguiente figura y tabla se describirá la estructura de la placa de Arduino MEGA 2560 R3 empleada.

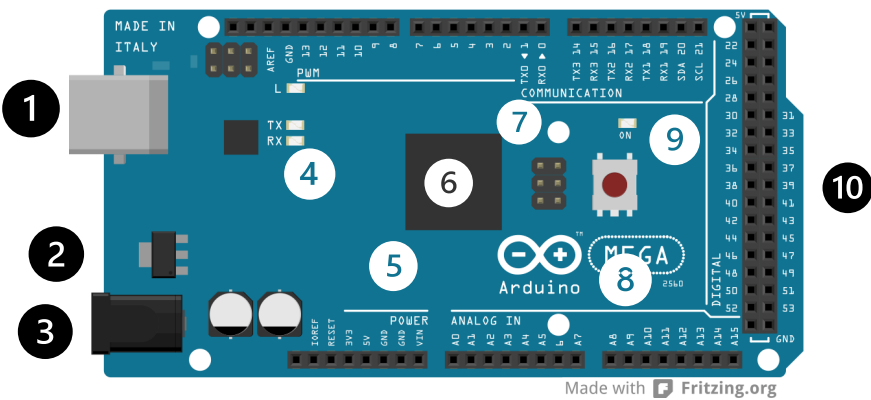


Figura 3-1 Esquema placa Arduino Mega

Número	Componente
1	Conector USB para cable tipo AB
2	Regulador de voltaje
3	Conector hembra 2,1 mm con centro positivo
4	Sensores led
5	Pines de voltaje (5 V) y tierra
6	Microcontrolador ATmega2560
7	Puerto ICSP para programación serial
8	Entradas analógicas
9	Pulsador de Reset
10	Pines digitales

Tabla 2 Relación figura-componentes

3.1.2 Sensor de gas (serie TGS2600)

Sensor semiconductor, capaz de detectar metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), etanol (C₂H₆O), isobutano (C₄H₁₀) e hidrógeno (H₂). Es importante tener en cuenta que la precisión de los resultados obtenidos por este sensor está altamente influenciada por factores como la temperatura y la humedad relativa, como se muestra en la Figura 3-2, por lo que se requiere de ciertas correcciones para obtener mediciones confiables. Por ello, se ha incorporado al medidor de concentración de gases dos sensores más. Por un lado, se encuentra el sensor de temperatura y humedad relativa del aire SHT31-D y por otro lado se encuentra el sensor de temperatura y presión (utilizado para contrastar la temperatura del anterior sensor mencionado) BME280.

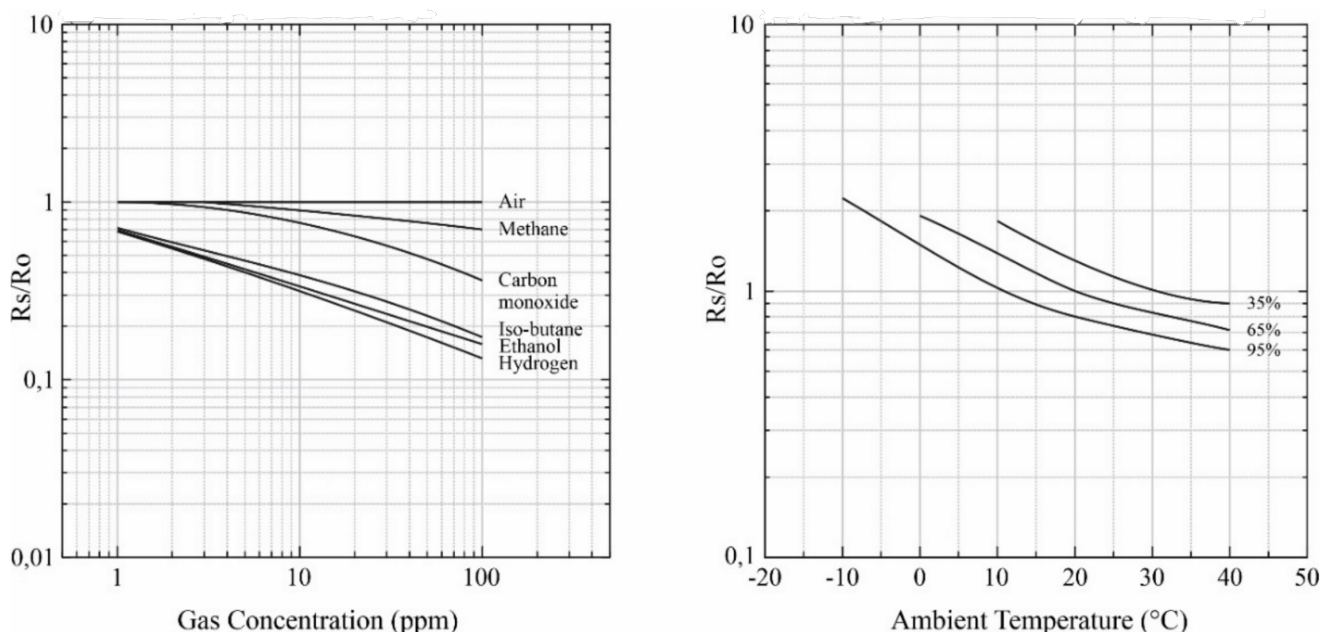


Figura 3-2 Respuesta del sensor TGS 2600 a múltiples gases (izquierda) y respuesta a diferentes condiciones de temperatura y humedad (derecha) [29]

En este estudio, se utilizó la configuración del sensor TGS2600 tal como se describe en la documentación técnica del sensor [29]. Además, se aplicó el mismo valor de resistencia de carga (R_L) que se usó en el trabajo de Eugster y Kling [30], que consistió en una resistencia de precisión de 5 k Ω /1%. La Figura 3-3 muestra la estructura y el circuito básico del sensor utilizado en este estudio.

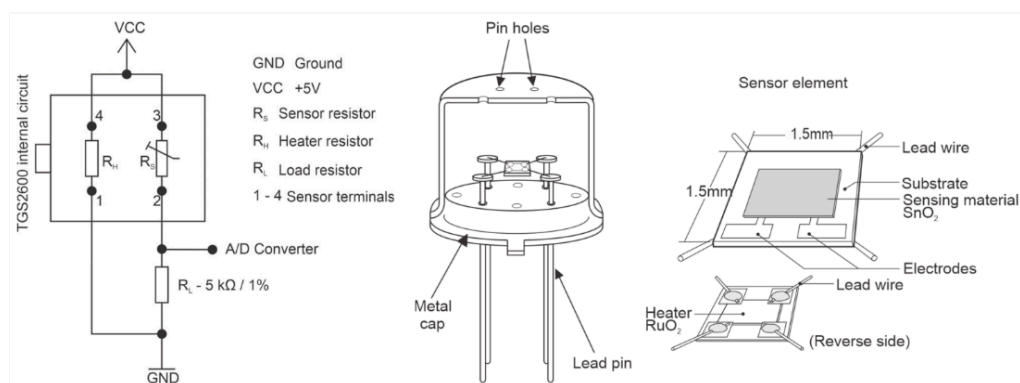


Figura 3-3 Circuito y estructura del sensor Figaro TGS 2600 [29]

Los pines 1 y 4 tienen la función de alimentar la resistencia calefactora (R_H), que se encarga de calentar el dispositivo a su temperatura de operación, lo que ayuda a promover las reacciones químicas con el gas que se está midiendo. El sistema de detección del sensor, que consiste en dos electrodos conectados a una capa de dióxido de estaño (material del sensor), se alimenta a través de los pines 2 y 3 y funciona de manera similar a una resistencia ajustable (R_s), ya que su valor varía en función de la concentración del gas a medir.

El TGS2600 detecta gases midiendo las variaciones en la resistencia eléctrica que resultan de las reacciones químicas (adsorción, oxidación, difusión) que ocurren entre la superficie del electrodo del sensor y el aire ambiente. Cuando el sensor se calienta, se produce la adsorción de oxígeno atmosférico en la superficie del electrodo en forma de iones O_2^- , lo que forma una barrera que restringe el movimiento de electrones y aumenta la resistencia del sistema. Cuando el sensor se expone al gas que se desea detectar, ocurre una reacción de oxidación que involucra al gas y a los iones O_2^- , lo que libera

los iones de óxido que estaban unidos a la superficie del sensor [31]. Este proceso aumenta el flujo de electrones y disminuye la resistencia del sensor, lo que se utiliza para medir la concentración del gas objetivo. Por esta razón, cuando se enciende, el sensor TGS2600 necesita un tiempo de estabilización para alcanzar la temperatura ideal para que ocurran las reacciones, donde se observa un aumento en la resistencia del sensor [32].

3.1.2.1 SHT31-D y BME280

Como se comentó en el apartado anterior, estos sensores se implementaron dada la alta influencia que tiene la temperatura y humedad relativa en los resultados obtenidos por el sensor Sensor de gas (serie TGS2600). Mientras que el sensor SHT31-D está enfocado en la medición de la temperatura y la humedad relativa, el sensor BME280 se centra en el estudio de la presión barométrica y la temperatura. Se ha decidido implementar este último sensor para así poder corroborar la temperatura y reducir el error.

El modo de funcionamiento de estos sensores es diferente. Por un lado, el sensor SHT31-D funciona midiendo la variación de la resistencia eléctrica de una capa de polímero capacitivo que se contrae o expande en función de la temperatura y humedad relativa. Mientras que, por el otro lado, el sensor BME280 funciona midiendo la variación de la resistencia eléctrica de un sensor piezoeléctrico de doble capa, que es sensible a la deformación causada por la presión barométrica.

El modo de comunicación empleado por estos dos sensores sí que es el mismo. Tanto el SHT31-D como el BME280 utilizan el protocolo de comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit) para transmitir los datos (hecho que hace que sean fácilmente integrables en el sistema electrónico empleado). Este modo de comunicación es un protocolo maestro-esclavo, ya que, un dispositivo maestro tiene el control del flujo de comunicación mientras que uno o varios dispositivos esclavos responden a sus solicitudes. En este caso, el dispositivo maestro siempre que quiera iniciar una comunicación mandará una dirección de 7 bits del dispositivo esclavo con el que se quiera comunicar, seguida de un bit donde le indicará si quiere leer o escribir datos. Por el contrario, el dispositivo esclavo seleccionado solo responderá con un pulso de ACK (Acknowledge) o NACK (No Acknowledge) para confirmar o denegar la comunicación. Para llevar a cabo este protocolo de comunicación se utilizan dos tipos de cables: Uno para la transmisión de datos (SDA) y otro para la transmisión de señales de reloj (SCL)[33].

3.1.2.2 Calibración sensor TGS2600

El sensor TGS2600 es un sensor analógico y como se puede observar en la Figura 3-2 mide la concentración del gas de estudio en función de la relación entre las resistencias R_s (Resistencia del sensor que varía dependiendo de la concentración de un determinado gas) / R_o (Resistencia del sensor en aire fresco). No obstante, ante la presencia de un gas el sensor devuelve un valor en voltaje, por lo que serán necesarios los siguientes pasos para lograr transformar la respuesta del sensor en voltios en la concentración del gas en ppm.

$$R_s = \frac{\text{Voltaje entrada} \times R_L}{\text{Voltaje sensor}} - R_L \quad \text{Ec. 3-1}$$

Donde el “Voltaje de entrada” es con el que se alimenta el sensor del gas (5 V), el “Voltaje del sensor” es el que está midiendo el TGS2600 en presencia de aire y la “ R_L ” es la resistencia de precisión para medir el metano o CH_4 , que en este caso tendrá un valor de $5 \text{ k}\Omega$.

A partir de la Figura 3-2 se sabe que la relación R_s/R_o en aire es 1, por tanto, se puede deducir la siguiente ecuación.

$$R_s = R_o \quad \text{Ec. 3-2}$$

Sin embargo, como se comentó anteriormente, el principal problema a superar es la sensibilidad del sensor a la temperatura ambiente y a la humedad relativa. Para ello, el fabricante aconseja un enfoque empírico de corrección [34] que incluye en primer lugar la identificación del rango de temperaturas y humedad ambiental, posteriormente, la obtención de las curvas de sensibilidad para el gas de estudio y

por último la aplicación de una corrección para aproximar la curva promedio. En el presente trabajo se seleccionó la siguiente ecuación, que fue calculada por W.Eugter y G.W.King cuando estaban utilizando este sensor en su estudio del metano [30].

$$\frac{R_S}{R_{O_{corr}}} = \frac{R_S}{R_O} (0,024 + (0,072 \times Hum.rel) + (0,0246 \times Temp)) \quad \text{Ec. 3-3}$$

Donde la humedad relativa se introduce en porcentaje y la temperatura en grados centígrados.

Una vez calculada la ecuación anterior. A partir de la siguiente figura, se calculará la ecuación de la curva de concentración de gases que tiene el sensor TGS2600. Lo primero que se necesita es un punto inicial de la gráfica en logaritmo de base 10. Para el presente caso se ha cogido el punto de menor concentración, una vez que se tiene ese punto en la gráfica hay que determinar la curvatura (pendiente) que tiene el gas que se quiere estudiar (CH_4).

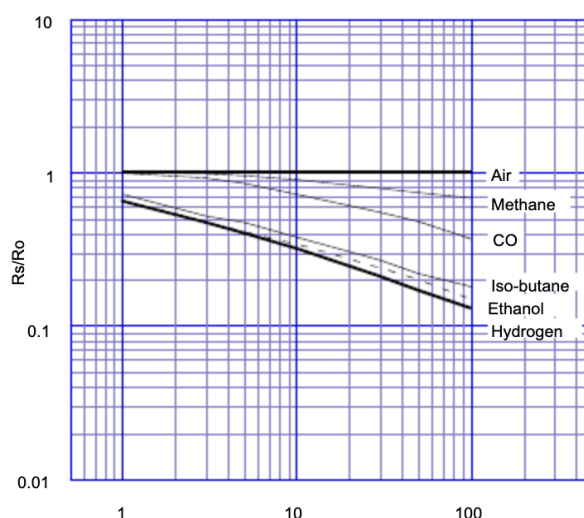


Figura 3-4 Curva de concentraciones de gases del sensor TGS2600

	Punto Inicial	Punto final
Eje X	1 ppm	100 ppm
Eje Y	1 Rs/Ro	0,7 Rs/Ro

Tabla 3 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas metano

$$X_{referencia} = \log_{10}(1) = 0,000 \quad \text{Ec. 3-4}$$

$$Y_{referencia} = \log_{10}(1) = 0,000 \quad \text{Ec. 3-5}$$

$$pendiente\ curva\ CH_4 = \frac{\log_{10}(0,7) - \log_{10}(1)}{\log_{10}(100) - \log_{10}(1)} \quad \text{Ec. 3-6}$$

$$pendiente\ curva\ CH_4 = \frac{-0,155 - 0,000}{2,000 - 0,000} = -0,077 \quad \text{Ec. 3-7}$$

Al tener el eje X e Y más la pendiente del gas. Aplicando la siguiente ecuación, se puede calcular la concentración del gas en todas las posibles situaciones con veracidad

$$Concentración_{PPM} = 10^{\left(\frac{\log\left(\frac{R_s}{R_o}\right)_{corr} - Y_{referencia}}{Pendiente\ de\ la\ curva} + X_{referencia} \right)} \quad \text{Ec. 3-8}$$

3.1.3 Sensor de gas (serie MQ)

Los sensores de gases MQ son una familia de dispositivos diseñados para detectar la presencia de distintos componentes químicos en el aire. Esta clase de sensores no son de precisión ni profesionales, pero son un tipo de dispositivos con un funcionamiento llave mano, fáciles de usar y que basta con tener un simple manual para poder utilizarlos e integrarlos en sistemas y laboratorios.

Para entender el funcionamiento de este tipo de sensores de gas, es necesario conocer que estos dispositivos están compuestos, al igual que en el caso del Sensor de gas (serie TGS2600, por una resistencia variable en su interior la cual reacciona con el gas a medir, haciendo que pase más o menos voltaje a través de esta. Cabe destacar, que lo que se mide realmente de este tipo de sensores es el voltaje de la salida analógica, por tanto, al detectar un aumento de voltaje, se conoce que ha aumentado la concentración de uno de los gases que es capaz de leer el sensor.

El tiempo de calentamiento de este tipo de sensores depende del modelo del sensor. En la mayoría de los casos basta con esperar unos pocos minutos, pero en algunos modelos se puede llegar a requerir hasta 12 y 48 horas para eliminar posibles residuos que se hayan quedado adheridos a la resistencia generados en la producción de los sensores. En el caso de este estudio, los sensores MQ utilizados se han tenido una media de 12 horas encendido antes de su uso.

A continuación, en la siguiente tabla se especifican los distintos modelos de sensores que se han utilizado en el presente trabajo, los gases a los que son sensibles, y algunos datos sobre el calentador

Modelo	Gases detectados	Calentador
MQ4	Metano, Gas Natural Comprimido	5 V
MQ7	Monóxido de carbono	Alternado 1,4 y 5 V
MQ8	Hidrógeno	5 V
MQ135	Dióxido de carbono, benceno, alcohol	5 V

Tabla 4 Tabla resumen sensores MQ

3.1.4 Esquema de montaje

Dada la complejidad y el numeroso número de cables utilizado. En la siguiente tabla se comentará para qué se ha utilizado cada color de cable y de esta manera tener el esquema de montaje más claro

Color de cable	Utilidad
Rojo	Positivo (Proporciona la energía de 5 V)
Negro	Negativo/Tierra
Verde	MQ-135
Naranja	MQ-8
Morado	MQ-7
Gris	MQ-4
Blanco	Canal SCL Y SDA

Tabla 5 Explicación de los cables utilizados

Una vez vista la utilidad de cada cable, la siguiente Figura 3-5 muestra el esquema de montaje.

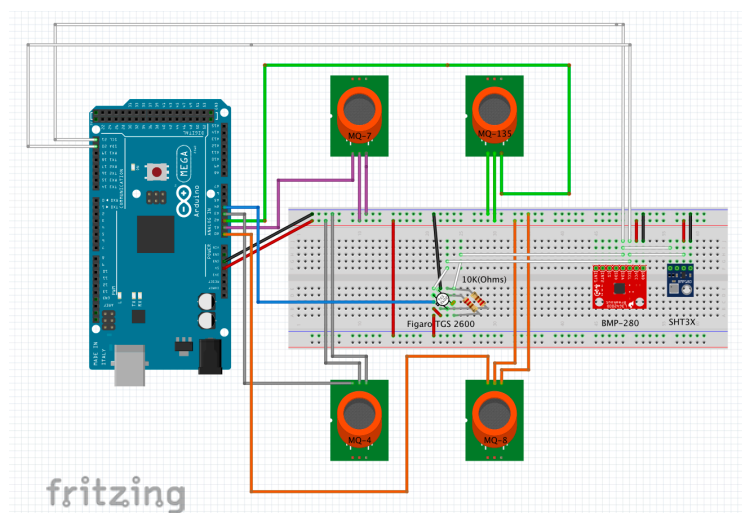


Figura 3-5 Esquema de montaje en aplicación Fritzing

3.2 Calibración sensores MQ

Como se ha descrito anteriormente, los sensores MQ son sensores analógicos que miden la concentración de diferentes gases a través de la relación R_s / R_o . Sin embargo, los sensores responden a la presencia del gas en voltaje, por lo que se necesitan algunos pasos para convertir esa señal en la relación de resistencias y posteriormente en concentración de ppm o mg/L.

En primer lugar, en este apartado se realizará una calibración teórica, ya que, ayudará a establecer una relación entre la señal de salida del sensor y la concentración de gas en la muestra. Esto, principalmente, se debe a que los sensores de la serie MQ son altamente sensibles a varios gases, por lo que es necesario conocer la respuesta del sensor a diferentes concentraciones de gas y establecer una relación matemática que permita convertir la señal de salida del sensor en una concentración de gas. Posteriormente, en segundo lugar, una vez que se ha establecido la relación entre la señal de salida del sensor y la concentración de gas, se realizará una calibración experimental para ajustar está relación en

función de las condiciones específicas de su aplicación. Por tanto, en este tipo de calibración experimental, se expone el sensor a diferentes concentraciones de gas en un entorno controlado y se comparará las respuestas del sensor con los valores teóricos.

Es importante destacar que no se ha podido realizar la calibración experimental del sensor MQ-135. Esto se debe a que la calibración experimental se realizó con una mezcla de gases a la que se añade aire. Al tratarse de un sensor diseñado para la detección de fugas, presenta un rango de medición entre 10 y 200 ppm cuando en el aire ambiente hay una concentración media entre 400 y 1500 ppm. Por lo que, al realizar las calibraciones, se obtenían valores máximos en cada una de las repeticiones y el sensor se calentaba demasiado, llegando a parecer que se había fundido la resistencia. No obstante, el sensor respondió de una manera razonable y correcta a las dos primeras mediciones, por lo que se puede decir que el sensor es capaz de leer hasta 1100 ppm de una manera efectiva.

3.2.1 Calibración teórica

La calibración teórica se realiza utilizando los datos de la hoja de especificaciones del fabricante del sensor, que incluyen la respuesta típica del sensor a diferentes concentraciones de gas en condiciones controladas de temperatura y humedad. Esto proporciona una referencia para comparar las respuestas experimentales del sensor. No obstante, antes de comenzar, es necesario determinar la resistencia inicial de cada sensor, que, como se ha comentado, se emplearán los siguientes datos de la hoja de especificaciones del fabricante:

- **Voltaje de entrada:** Voltaje con el que se alimenta el sensor del gas, como se está utilizando una placa Arduino Mega con 5 V
- **Voltaje inicial:** Voltaje del sensor en el pin de salida en un entorno de concentración nula del gas que mide a 20°C y 65% de humedad. Cada sensor dará un voltaje diferente. Además, es muy importante dejar el sensor MQ encendido durante varias horas para quemar los residuos que pueda tener la resistencia y así obtener un voltaje estable.
- **Resistencia del PCB:** Medida de oposición que presenta el material conductor del circuito impreso al paso de la corriente eléctrica. Se obtiene mirando el sensor por la parte trasera y observando la resistencia central. En la siguiente tabla se encuentra el valor de cada resistencia en función del sensor MQ, además, se ha comprobado cada valor en el laboratorio con un multímetro con el fin de minimizar el error y de esta forma obtener los resultados más precisos posibles.

Sensor	Resistencia teórica	Resistencia teórica ($k\Omega$)	Resistencia real ($k\Omega$)
MQ-4	202	2	1,83
MQ-7	103	10	9,98
MQ-8	202	2	1,96
MQ-135	473	47	44,92

Tabla 6 Resistencia del PCB de cada sensor MQ

- **Resistencia al aire:** Al igual que con el voltaje inicial, este valor es diferente para cada gas, por lo que se obtendrá a partir de tablas de la dicha técnica de cada sensor.

Calculados los anteriores datos mencionados, la fórmula utilizada para calcular la resistencia inicial de cada sensor es la siguiente:

$$R_o = \frac{\text{Resistencia del PCB} \times \frac{\text{Voltaje de entrada} - \text{Voltaje inicial}}{\text{Voltaje inicial}}}{\text{Resistencia al aire}} \quad \text{Ec. 3-9}$$

Posteriormente, se calculará la ecuación de cada curva de concentración de gases que tiene cada sensor, ya que, en la ficha técnica no se da esta fórmula y es de vital importancia para poder calcular la resistencia al aire de cada sensor. Lo primero que se necesita es un punto inicial de la gráfica en logaritmo de base 10. Para el presente caso se ha cogido siempre el punto de menor concentración de cada gas, una vez que se tiene ese punto en la gráfica hay que determinar la curvatura que tiene el gas que se quiere estudiar en su determinado sensor. Así, al tener el eje X e Y más la curva del gas, se puede calcular la concentración del gas en todas las posibles situaciones con veracidad.

$$\text{Ecuación de la curva} = \frac{\log_{10}\left(\frac{R_s}{R_o \text{ max}}\right) - \log_{10}\left(\frac{R_s}{R_o \text{ min}}\right)}{\log_{10}(\text{PPM max}) - \log_{10}(\text{PPM min})} \quad \text{Ec. 3-10}$$

◇ MQ-4

Cálculo de Ro a partir de los datos de la siguiente figura y tabla:

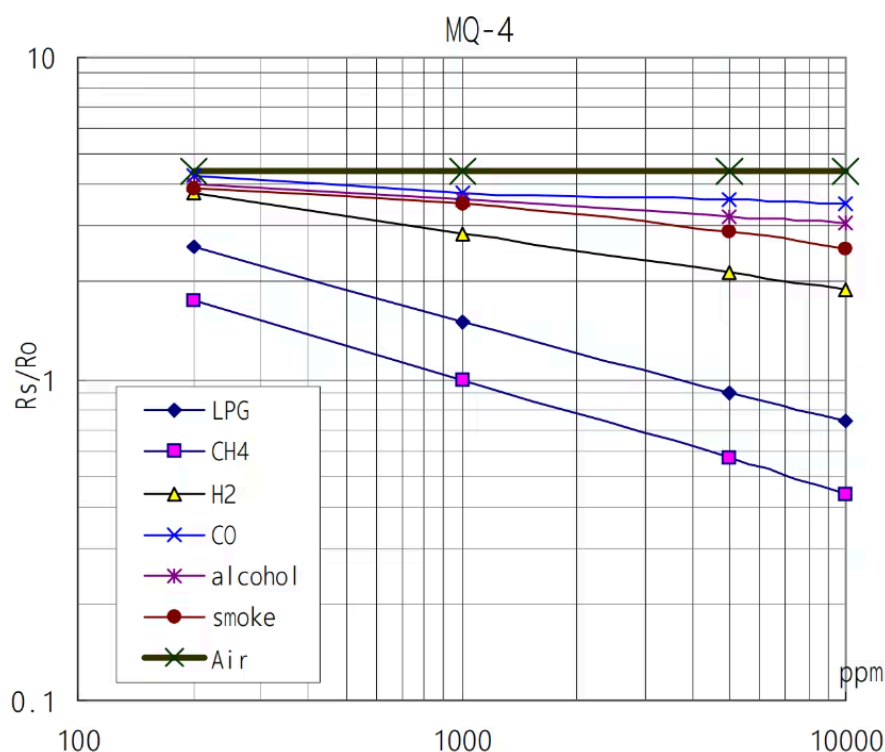


Figura 3-6 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-4

Dato	Valor
Voltaje de entrada	5 V
Voltaje inicial	1,150 V
Resistencia del PCB	1,83 kΩ
Resistencia al aire	4.45 Rs/Ro

Tabla 7 Datos sensor MQ-4

$$R_o = \frac{1,83 \text{ k}\Omega \times \frac{5 \text{ V} - 1,150 \text{ V}}{1,150 \text{ V}}}{4,45 R_s/R_o} = 1,376 \text{ k}\Omega \quad \text{Ec. 3-11}$$

Cálculo de la curvatura del metano a partir de los datos de la siguiente tabla:

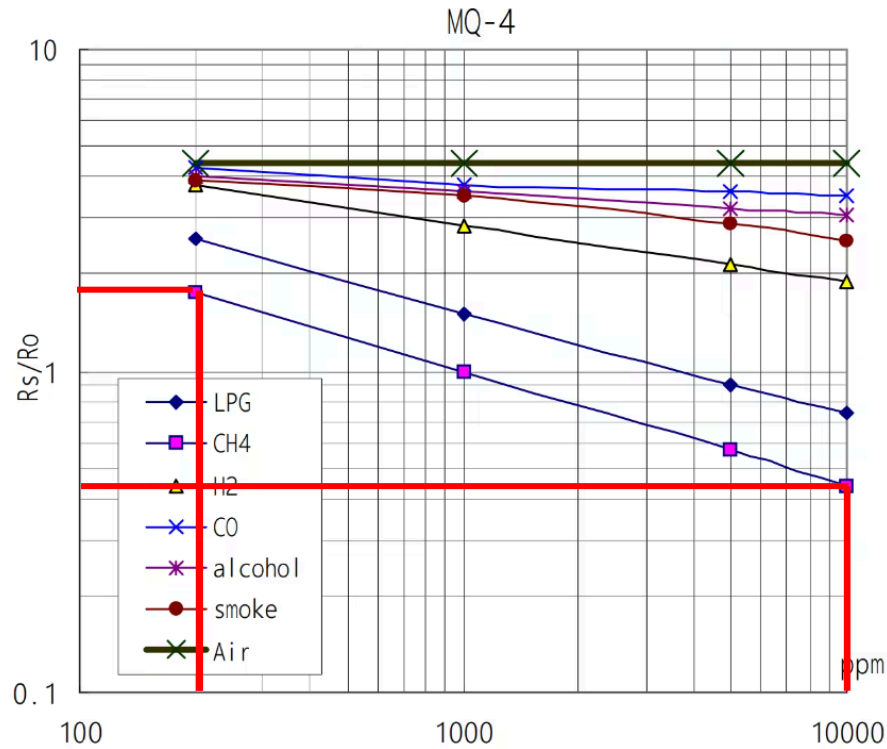


Figura 3-7 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-4

	Punto Inicial	Punto final
Eje X	200 ppm	10000 ppm
Eje Y	1,8 R_s/R_o	0,44 R_s/R_o

Tabla 8 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas metano

$$X_{referencia} = \log_{10}(200) = 2,301 \quad \text{Ec. 3-12}$$

$$Y_{referencia} = \log_{10}(1,8) = 0,255 \quad \text{Ec. 3-13}$$

$$\text{pendiente curva } CH_4 = \frac{\log_{10}(0,44) - \log_{10}(1,8)}{\log_{10}(10000) - \log_{10}(200)} \quad \text{Ec. 3-14}$$

$$\text{pendiente curva } CH_4 = \frac{-0,356 - 0,255}{4,000 - 2,301} = -0,360 \quad \text{Ec. 3-15}$$

◇ **MQ-7**

Cálculo de R_o a partir de los datos de la siguiente figura y tabla:

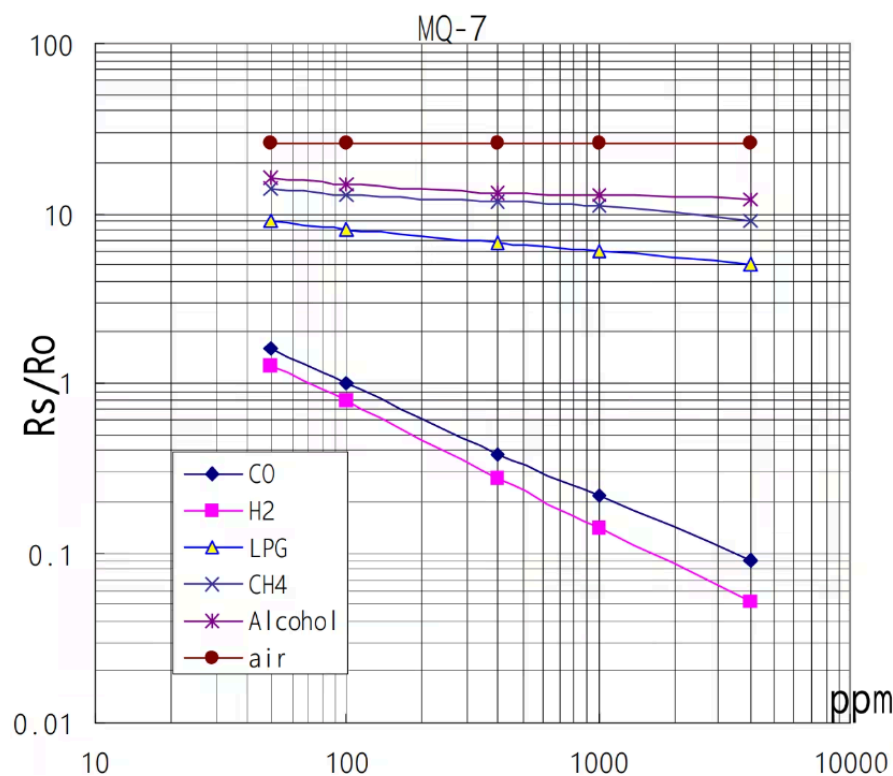


Figura 3-8 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-7

Dato	Valor
Voltaje de entrada	5 V
Voltaje inicial	0,30 V
Resistencia del PCB	10 kΩ
Resistencia al aire	26.75 R_s/R_o

Tabla 9 Datos sensor MQ-7

$$R_o = \frac{9,98 \text{ k}\Omega \times \frac{5 \text{ V} - 0,30 \text{ V}}{0,30 \text{ V}}}{26,75 R_s/R_o} = 2,857 \text{ k}\Omega \quad \text{Ec. 3-16}$$

Cálculo de la curvatura del monóxido de carbono a partir de los datos de la siguiente tabla:

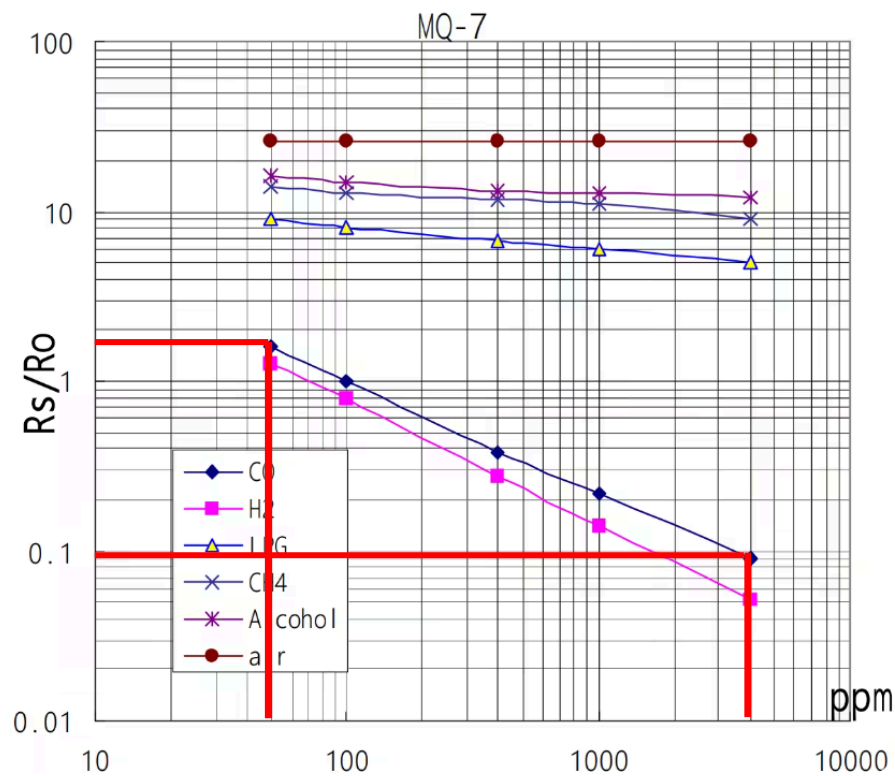


Figura 3-9 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-7

	Punto Inicial	Punto final
Eje X	50 ppm	4000 ppm
Eje Y	1,66 R_s/R_o	0,09 R_s/R_o

Tabla 10 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas monóxido de carbono

$$X_{referencia} = \log_{10}(50) = 1,699 \qquad \text{Ec. 3-17}$$

$$Y_{referencia} = \log_{10}(1,66) = 0,220 \qquad \text{Ec. 3-18}$$

$$pendiente\ curva\ CO = \frac{\log_{10}(0,09) - \log_{10}(1,66)}{\log_{10}(4000) - \log_{10}(50)} \qquad \text{Ec. 3-19}$$

$$pendiente\ curva\ CO = \frac{-1,046 - 0,220}{3,602 - 1,698} = -0,665 \qquad \text{Ec. 3-20}$$

◇ MQ-8

Cálculo de R_o a partir de los datos de la siguiente figura y tabla:

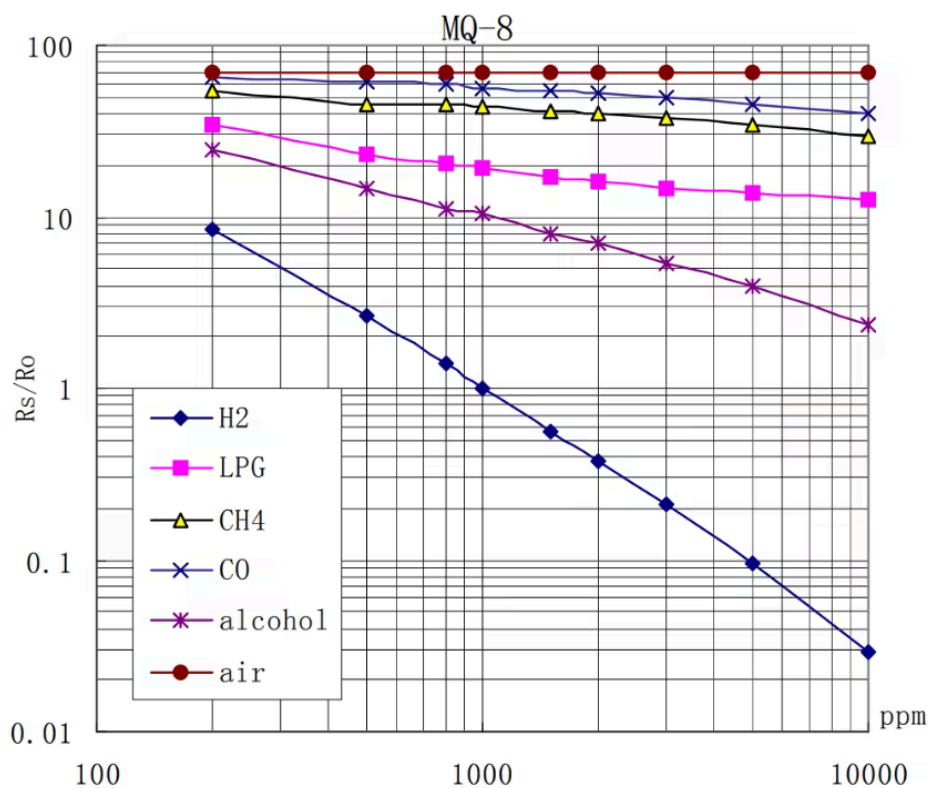


Figura 3-10 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-8

Dato	Valor
Voltaje de entrada	5 V
Voltaje inicial	1,072 V
Resistencia del PCB	1,96 kΩ
Resistencia al aire	70 R_s/R_o

Tabla 11 Datos sensor MQ-8

$$R_o = \frac{1,96 \text{ k}\Omega \times \frac{5 \text{ V} - 1,072 \text{ V}}{1,072 \text{ V}}}{70 R_s/R_o} = 0,099 \text{ k}\Omega$$

Ec. 3-21

Cálculo de la curvatura del hidrógeno a partir de los datos de la siguiente tabla:

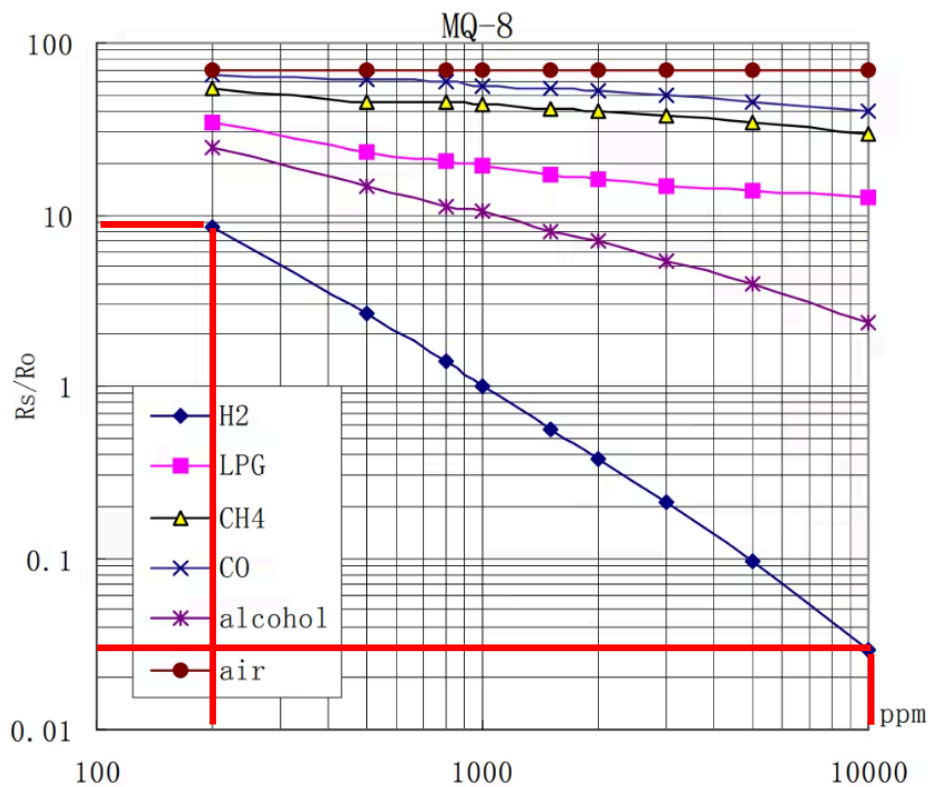


Figura 3-11 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-8

	Punto Inicial	Punto final
Eje X	200 ppm	10000 ppm
Eje Y	8,56 R_s/R_o	0,03 R_s/R_o

Tabla 12 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas hidrógeno

$$X_{referencia} = \log_{10}(200) = 2,301 \quad \text{Ec. 3-22}$$

$$Y_{referencia} = \log_{10}(8,56) = 0,932 \quad \text{Ec. 3-23}$$

$$\text{pendiente curva } H_2 = \frac{\log_{10}(0,03) - \log_{10}(8,56)}{\log_{10}(10000) - \log_{10}(200)} \quad \text{Ec. 3-24}$$

$$\text{pendiente curva } H_2 = \frac{-1,523 - 0,932}{4,000 - 2,301} = -1,450 \quad \text{Ec. 3-25}$$

◇ **MQ-135**

Cálculo de R_o a partir de los datos de la siguiente figura y tabla:

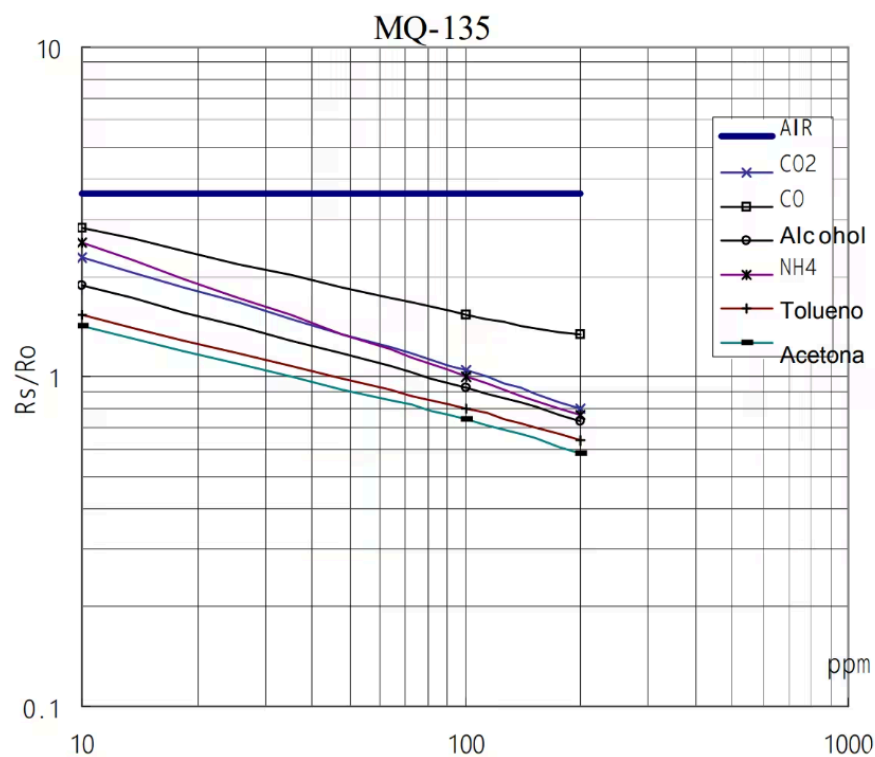


Figura 3-12 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-135

Dato	Valor
Voltaje de entrada	5 V
Voltaje inicial	0,225 V
Resistencia del PCB	44,92 kΩ
Resistencia al aire	3,65 R_s/R_o

Tabla 13 Datos sensor MQ-135

$$R_o = \frac{44,92 \text{ k}\Omega \times \frac{5 \text{ V} - 0,225 \text{ V}}{0,225 \text{ V}}}{3,65 R_s/R_o} = 261,179 \text{ k}\Omega$$

Ec. 3-26

Cálculo de la curvatura del dióxido de carbono a partir de los datos de la siguiente tabla:

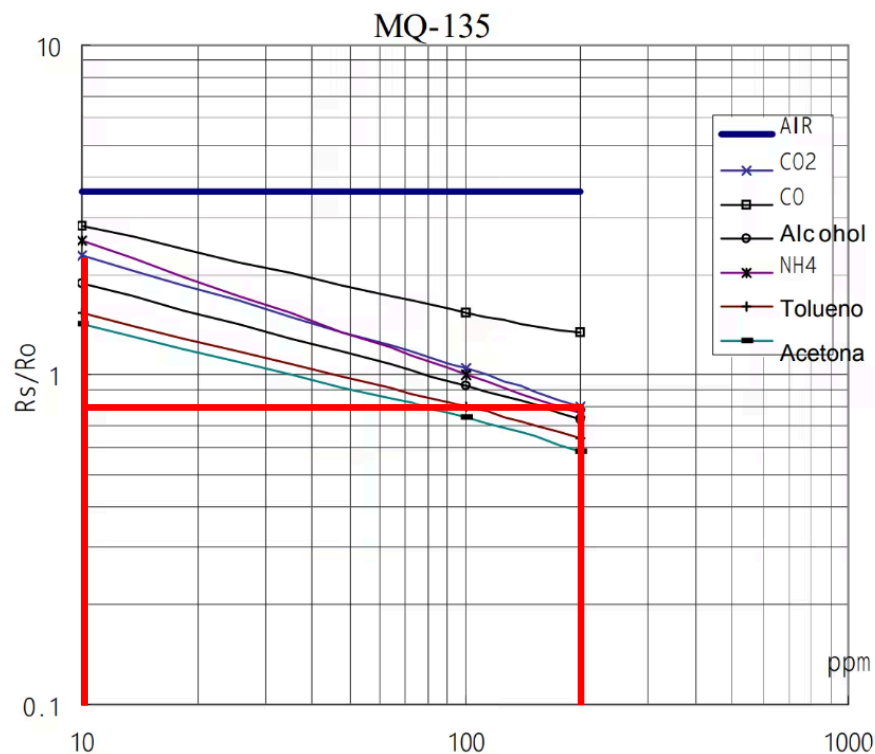


Figura 3-13 Curva de concentraciones de gases del sensor MQ-135

	Punto Inicial	Punto final
Eje X	10 ppm	200 ppm
Eje Y	2,35 R_s/R_o	0,80 R_s/R_o

Tabla 14 Datos para el cálculo de la ecuación de la curvatura del gas dióxido de carbono

$$X_{referencia} = \log_{10}(10) = 1,000 \quad \text{Ec. 3-27}$$

$$Y_{referencia} = \log_{10}(2,35) = 0,371 \quad \text{Ec. 3-28}$$

$$\text{pendiente curva } CO_2 = \frac{\log_{10}(0,80) - \log_{10}(2,35)}{\log_{10}(200) - \log_{10}(10)} \quad \text{Ec. 3-29}$$

$$\text{pendiente curva } CO_2 = \frac{-0,097 - 0,371}{2,301 - 1,000} = -0,360 \quad \text{Ec. 3-30}$$

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de los datos calculados para los cuatro sensores MQ

Datos	MQ-4	MQ-7	MQ-8	MQ-135
Ro ($k\Omega$)	1,376	5,857	0,099	261,179
Pendiente de la curva	-0,360	-0,665	-1,450	-0,360
X referencia	2,301	1,699	2,301	1,000
Y referencia	0,255	0,220	0,932	0,371

Tabla 15 Resumen datos calculados sensores MQ

◇ Cálculo ppm

Como se comentó al inicio del apartado, los sensores MQ son analógicos, por lo que al medir la concentración de un determinado gas a través de la relación R_S/R_O solo se puede obtener un voltaje. Por ello, con los datos calculados anteriormente y recopilados en la Tabla 15 y las siguientes fórmulas, se podrá obtener la concentración en ppm o Mg/L.

$$R_S = \frac{\text{Resistencia del PCB} \times (\text{Voltaje de entrada} - \text{Voltaje inicial})}{\text{Voltaje inicial}} \quad \text{Ec. 3-31}$$

$$\text{Ratio} = \frac{R_S}{R_O} \quad \text{Ec. 3-32}$$

$$\text{Concentración}_{PPM} = 10^{\left(\frac{\log(\text{Ratio}) - Y_{\text{referencia}}}{\text{Pendiente de la curva}} + X_{\text{referencia}} \right)} \quad \text{Ec. 3-33}$$

Dada la dificultad de verlo sin ningún ejemplo, a continuación, se realizará un cálculo cogiendo los datos del metano en el sensor MQ-4. Para realizar el ejemplo se cogerá la resistencia teórica del PCB del sensor que en MQ-4 es de $2\text{ k}\Omega$, voltaje de entrada que al utilizar la placa Arduino Mega son 5 V y el voltaje inicial (voltaje de la salida analógica) se asumirá que son $0,750\text{ V}$ para facilitar los cálculos.

$$R_S = \frac{2,000 \times (5,000 - 0,750)}{0,750} = 11,333\text{k}\Omega \quad \text{Ec. 3-34}$$

$$\text{Ratio} = \frac{11,333}{1,376} = 8,236 \quad \text{Ec. 3-35}$$

$$\text{Concentración}_{PPM} = 10^{\left(\frac{\log(8,236) - 0,255}{-0,360} + 2,301 \right)} = 2,922\text{ PPM} \quad \text{Ec. 3-36}$$

3.2.2 Calibración directa

Según el fabricante, el rango de medición de los sensores MQ es de 200 a 10.000 ppm en el caso de los sensores MQ-4 y MQ-8, de 50 a 4000 ppm para el MQ-7 y de 10 a 200 ppm para el MQ-135. Este rango se adapta bien a la aplicación de estos sensores en trabajos como puede ser la detección de fugas, ya que lo más importante en este caso sería la activación de un sistema de seguridad en cuanto se sobrepasase el umbral mínimo. No obstante, la aplicación de estos sensores para aplicaciones en la medida cuantitativa de gases, el límite superior (1% en el caso del sensor MQ-4 y MQ-8), restringe drásticamente el uso de estos ya que la concentración de los gases a medir puede llegar a exceder este límite. Por lo tanto, como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos del proyecto es encontrar una técnica que permita la medición de gases con una concentración superior al 1% para los sensores MQ-4 y MQ-8 por ejemplo.

Una vez realizada la calibración teórica de cada sensor que compone el medidor de concentración de gases, dentro de su rango de medición, se realizará su calibración experimental en el laboratorio fuera de este rango.

Para la aproximación se utilizará la siguiente ecuación calculada por S. Yang, donde propuso una solución al problema ya que demostró que es posible ajustar la concentración del gas para que esté dentro del rango de medición del sensor MQ diluyéndolo con aire[35].

$$X = M \times \frac{(Vol_{inj} + Vol_{chamb})}{Vol_{inj}} \quad \text{Ec. 3-37}$$

Donde “X” es la verdadera concentración del gas que debe identificarse, “M” es la concentración medida por el sensor MQ, “Vol_{inj}” el volumen de gas inyectado y “Vol_{cham}” es el volumen de aire (En el presente estudio se tomará este volumen como el introducido en la jeringuilla)

El procedimiento para realizar dicha calibración será el siguiente: En primer lugar, como se puede observar en la siguiente figura, se conectará una botella, que contenga el gas a estudiar, con una tubería de plástico de aproximadamente 5 mm de diámetro que a su vez está conectado en su otro extremo a una llave de paso. Hay que destacar que el sistema cuenta con un caudalímetro para poder regular el paso de gas y, además, con un barómetro que será de utilidad para contrastar la presión con el sensor BME-280.

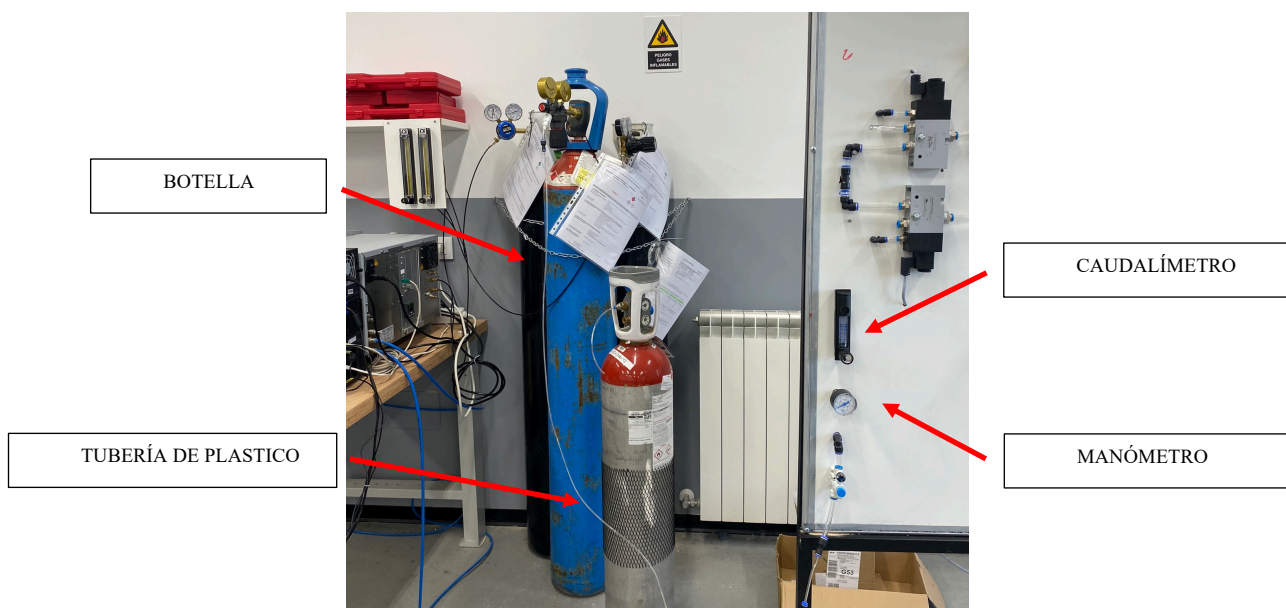


Figura 3-14 Montaje calibración

En segundo lugar, una vez esté conectado y abierto el circuito se procederá al llenado de bolsas estancas, y finalmente, para realizar las calibraciones, con la ayuda de una jeringuilla de 100 ml se cogerá la cantidad necesaria de gas de la bolsa y se procederá a expulsarlo encima del sensor que se quiera calibrar. En la siguiente figura, se puede apreciar una bolsa estanca con gas H_2 en su interior y en la llave de paso que tiene la bolsa se ha conectado la jeringuilla para coger el dicho gas.

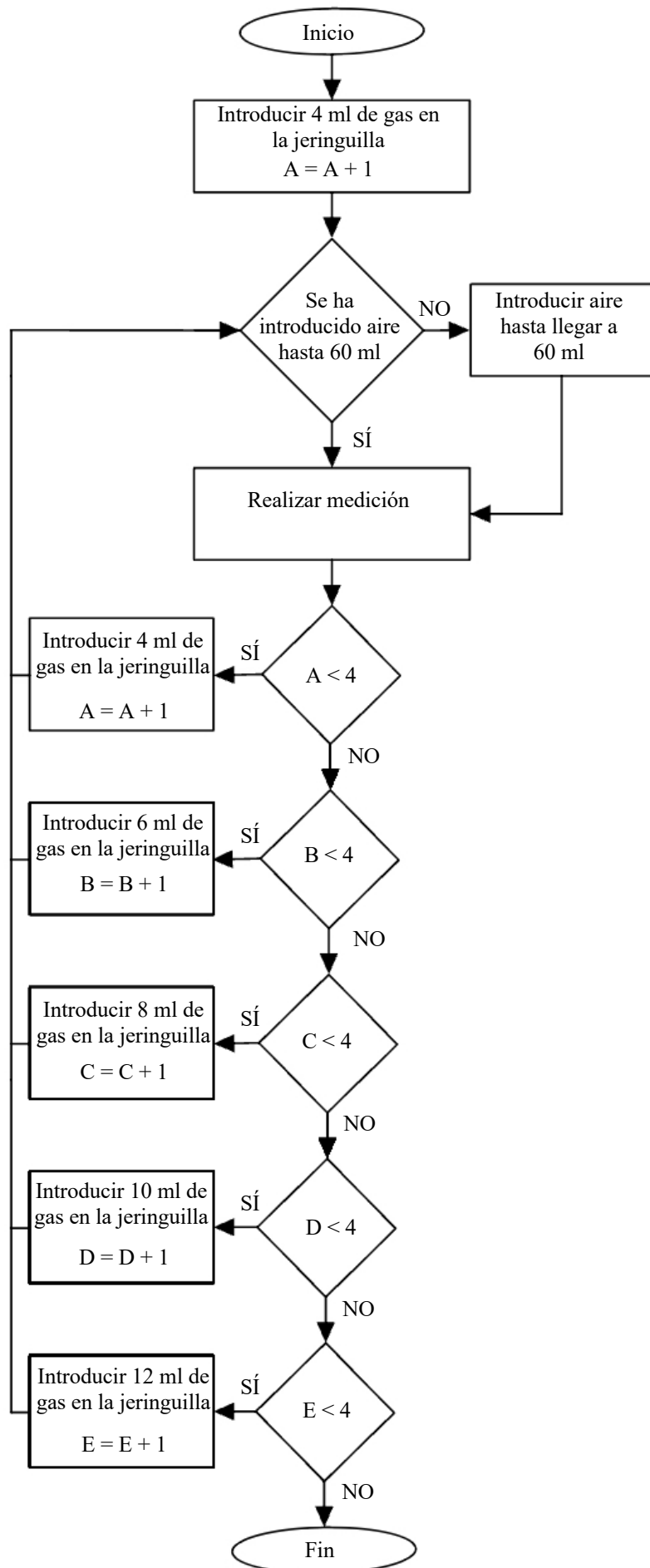


Figura 3-15 Bolsa estanca con H_2 y jeringuilla

Dada la gran cantidad de datos que se han obtenido en los procesos de calibración. En el presente documento solamente se muestran los datos obtenidos en los ensayos del sensor MQ-4 (Anexo III: Datos calibración). No obstante, al final del citado anexo, se incluye una dirección de Google Drive en la que se encuentra el resto de datos que se han obtenido.

A continuación, se expondrán las gráficas obtenidas de la calibración directa de cada sensor. Para obtener estas gráficas se han hecho mediciones con 4,6,8,10 y 12 ml del gas a estudiar que se encuentra en una mezcla de gases (50% de H_2 , 20% de CO, 15% de CH_4 y 15% de CO_2) y hasta llegar a los 60 ml en la jeringuilla se ha introducido aire. Estas mediciones se han repetido 5 veces (realizándose un total de 25 mediciones por gráfica). Este proceso, se puede entender más gráficamente mediante el diagrama de flujo que se encuentra en la página siguiente.

Por último, se ha calculado la mediana, varianza y desviación típica total que son los datos que se pueden observar en las gráficas. Además, se ha realizado también la medición de la temperatura y humedad en cada ensayo.



◇ **MQ-4**

En la tabla que se muestra a continuación se muestra un resumen del cálculo de la mediana y desviación típica de cada una de las cinco repeticiones que se efectúan dentro de cada una de las cinco mediciones.

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
Mediana (4 ml)	2,860 V	2,630 V	2,620 V	2, 830 V	2,645 V
Mediana (6 ml)	2,930 V	2,780 V	2,865 V	2,860 V	2,790 V
Mediana (8 ml)	2,880 V	2,630 V	3,060 V	3,010 V	2,890 V
Mediana (10 ml)	2,960 V	2,970 V	3,040 V	3,050 V	3,070 V
Mediana (12 ml)	3,130 V	3,230 V	3,255 V	3,275 V	3,190 V
Des. Típica (4 ml)	7,751 %	12,487 %	11,255 %	18,846 %	21,698 %
Des. Típica (6 ml)	11,260 %	14,942 %	9,140 %	15,967 %	12,974 %
Des. Típica (8 ml)	13,135 %	15,426 %	12,734 %	14,203 %	13,886 %
Des. Típica (10 ml)	5,417 %	6,488 %	8,591 %	7,601 %	11,041 %
Des. Típica (12 ml)	13,157 %	15,158 %	16,886 %	12,013 %	11,763 %

Tabla 16 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

Una vez calculada la mediana y desviación típica en cada una de las repeticiones, en la siguiente tabla se muestra la mediana, desviación típica y concentración en ppm de cada una de las 5 mediciones.

	Medición 1 (4 ml)	Medición 2 (6 ml)	Medición 3 (8 ml)	Medición 4 (10 ml)	Medición 5 (12 ml)
Mediana	2,670 V	2,835 V	2,935 V	3,030 V	3,190 V
Des. Típica	14,407 %	14,121 %	16,257 %	8,006 %	16,343 %
Concentración	22032 ppm	29110 ppm	27412 ppm	27318 ppm	33212 ppm

Tabla 17 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

En la siguiente figura se puede observar la gráfica que se ha obtenido al realizar la calibración experimental del sensor MQ-4 en el laboratorio. La desviación estándar de cada medición (compuesta por 5 repeticiones cada una de ellas) se representa mediante las barras de error.

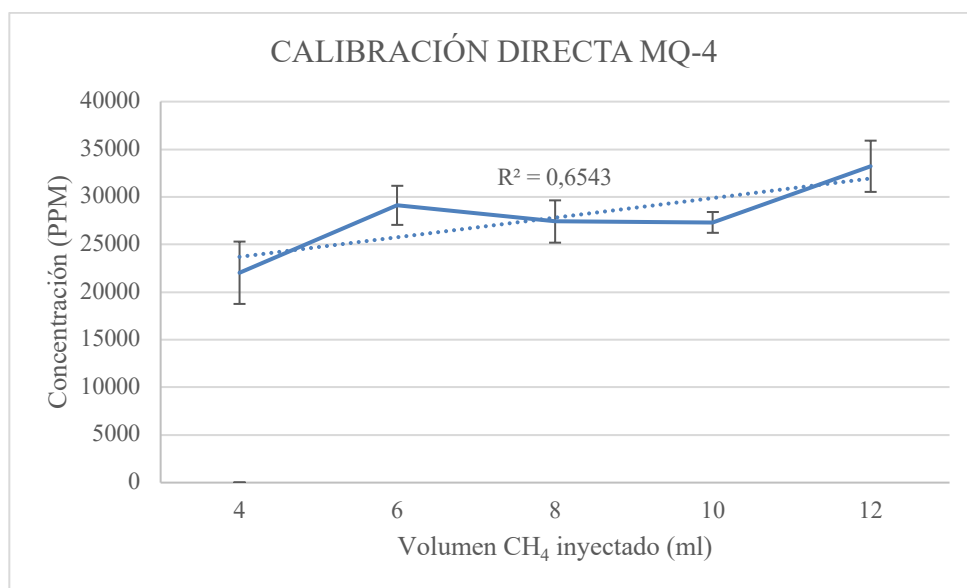


Figura 3-16 Calibración directa del sensor MQ-4 a 18,5 °C y 47% de humedad relativa

◇ **MQ-7**

En la tabla que se muestra a continuación se muestra un resumen del cálculo de la mediana y desviación típica de cada una de las cinco repeticiones que se efectúan dentro de cada una de las cinco mediciones.

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
Mediana (4 ml)	0,740 V	0,760 V	0,710 V	0,770 V	0,800 V
Mediana (6 ml)	1,015 V	1,000 V	0,980 V	0,935 V	0,995 V
Mediana (8 ml)	1,330 V	1,380 V	1,280 V	1,350 V	1,295 V
Mediana (10 ml)	1,590 V	1,715 V	1,670 V	1,655 V	1,765 V
Mediana (12 ml)	2,180 V	2,130 V	2,150 V	2,095 V	2,140 V
Des. Típica (4 ml)	4,000 %	4,335 %	3,865 %	6,285 %	5,341 %
Des. Típica (6 ml)	9,395 %	6,182 %	5,111 %	8,574 %	4,739 %
Des. Típica (8 ml)	5,158 %	8,533 %	8,488 %	11,038 %	9,374 %
Des. Típica (10 ml)	4,438 %	6,815 %	6,404 %	8,688 %	7,924 %
Des. Típica (12 ml)	5,163 %	11,620 %	7,475 %	6,250 %	7,729 %

Tabla 18 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

Una vez calculada la mediana y desviación típica en cada una de las repeticiones, en la siguiente tabla se muestra la mediana, desviación típica y concentración en ppm de cada una de las 5 mediciones

	Medición 1 (4 ml)	Medición 2 (6 ml)	Medición 3 (8 ml)	Medición 4 (10 ml)	Medición 5 (12 ml)
Mediana	0,745 V	0,990 V	1,315 V	1,670 V	2,140 V
Des. Típica	5,238 %	7,131 %	9,231%	8,583 %	8,258 %
Concentración	501 ppm	570 ppm	732 ppm	976 ppm	1485 ppm

Tabla 19 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

En la siguiente figura se puede observar la gráfica que se ha obtenido al realizar la calibración experimental del sensor MQ-7 en el laboratorio. La desviación estándar de cada medición (compuesta por 5 repeticiones cada una de ellas) se representa mediante las barras de error.

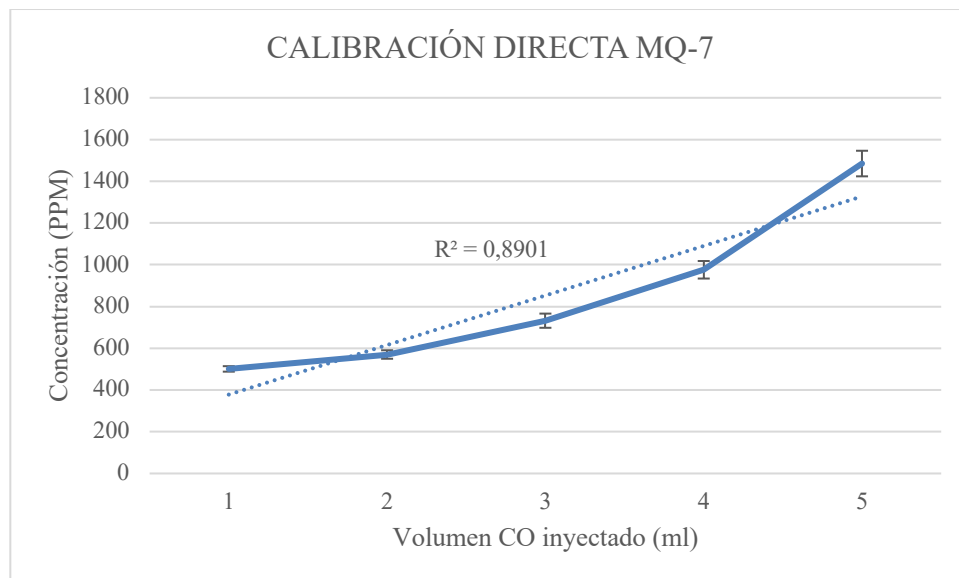


Figura 3-17 Calibración directa del sensor MQ-7 a 19,5 °C y 53% de humedad relativa

◇ **MQ-8**

En la tabla que se muestra a continuación se muestra un resumen del cálculo de la mediana y desviación típica de cada una de las cinco repeticiones que se efectúan dentro de cada una de las cinco mediciones, ya que se calibra el sensor con ensayos desde 4 hasta 12 ml de gas.

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
Mediana (4 ml)	0,670 V	0,575 V	0,510 V	0,520 V	0,635 V
Mediana (6 ml)	0,830 V	0,755 V	0,790 V	0,880 V	0,825 V
Mediana (8 ml)	1,145 V	1,040 V	0,905 V	1,060 V	0,905 V
Mediana (10 ml)	2,160 V	2,150 V	2,100 V	2,070 V	1,995 V
Mediana (12 ml)	2,400 V	2,360 V	2,370 V	2,340 V	2,380 V
Des. Típica (4 ml)	14,215 %	13,636 %	9,392 %	7,023 %	7,769 %
Des. Típica (6 ml)	15,915 %	17,356 %	14,565 %	14,371 %	9,319 %
Des. Típica (8 ml)	7,584 %	8,554 %	9,457 %	11,817 %	12,013 %
Des. Típica (10 ml)	16,281 %	7,769 %	15,774 %	9,914 %	12,233 %
Des. Típica (12 ml)	11,282 %	14,196 %	18,896 %	14,679 %	13,461 %

Tabla 20 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

Calculada la mediana y desviación típica en cada una de las repeticiones, en la siguiente tabla se muestra la mediana, desviación típica y concentración en ppm de cada una de las 5 mediciones.

	Medición 1 (4 ml)	Medición 2 (6 ml)	Medición 3 (8 ml)	Medición 4 (10 ml)	Medición 5 (12 ml)
Mediana	0,570 V	0,820 V	1,055 V	2,125 V	2,370 V
Des. Típica	13,432 %	16,878 %	15,604 %	14,395 %	14,003 %
Concentración	13200 ppm	11784 ppm	10952 ppm	17706 ppm	16904 ppm

Tabla 21 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición

En la siguiente figura se puede observar la gráfica que se ha obtenido al realizar la calibración experimental del sensor MQ-8 en el laboratorio. La desviación estándar de cada medición (compuesta por 5 repeticiones cada una de ellas) se representa mediante las barras de error.

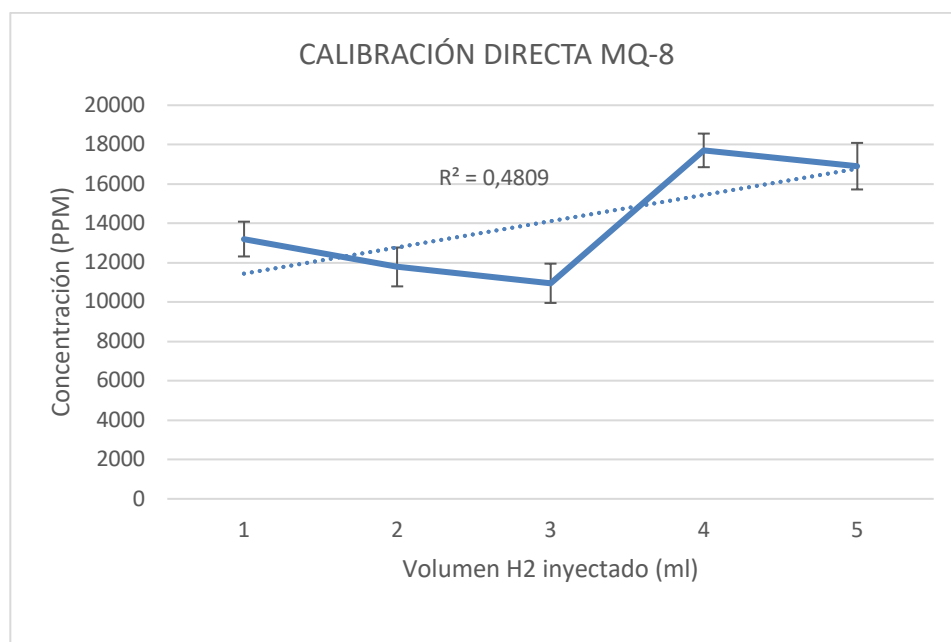


Figura 3-18 Calibración directa del sensor MQ-8 a 21,3 °C y 43% de humedad relativa

3.2.3 Calibración en una cápsula parcialmente cerrada

La técnica de medición directa propuesta en el anterior apartado presenta algunas desventajas. La primera es que la inyección del gas en un ambiente abierto no permite que el gas permanezca suficientemente en contacto con el sensor y, en consecuencia, reduce la calidad de la medición. Además, por otro lado, la repetibilidad de la medición depende de posibles movimientos de aire alrededor del sensor.

Para solucionar estos problemas, se propone un segundo prototipo de medición que se basa en introducir el sensor en una cápsula parcialmente cerrada. Como se puede ver en la Figura 3-19, la cápsula, que ha sido diseñada utilizando el software Autodesk Inventor y posteriormente construida con una impresora 3D, tiene un volumen reducido (se calculará posteriormente para obtener el nuevo

Vol_{chamb}) que limita el movimiento del gas en su interior. La estrecha brecha que existe entre las paredes internas de la cápsula y la superficie activa del sensor permite que éste detecte el gas con mayor sensibilidad, lo que a su vez resuelve el problema detectado en el primer prototipo.

Para permitir la inyección del gas, la cápsula tiene un tubo de 2,5 cm de longitud que está conectado con una válvula antirretorno que será por donde se introduzca el gas que se quiera estudiar. Por tanto, Al crear un aislamiento parcial, se reduce la velocidad de evacuación del gas, lo que prolonga el tiempo de contacto entre éste y el sensor. Además, el aislamiento que proporciona la cápsula ayuda a eliminar la influencia del movimiento del aire del ambiente externo en la medición, mejorando así su repetibilidad.



Figura 3-19 Capsula parcialmente cerrada con válvula antirretorno

Como se ha comentado, es necesario volver a calcular el Vol_{chamb} ya que a diferencia de la calibración directa en la que este volumen era solamente el volumen de aire introducido en la jeringuilla hasta llegar a 60 ml. En este segundo prototipo a ese volumen de aire introducción en la jeringuilla hay que sumarle el aire ocupado por la cápsula y la válvula antirretorno. Para ello se calculará el volumen en el interior de cápsula con la siguiente ecuación. Hay que destacar que los datos de la cápsula han sido sacados de los planos que se encuentran en el Anexo IV: Planos.

$$Vol_{chamb} = \pi \times r^2 \times h \quad \text{Ec. 3-38}$$

No obstante, el sensor MQ-7 tiene un diámetro menor al resto de sensores, por tanto, se han tenido que diseñar y construir dos cápsulas. Por un lado, la capsula del sensor MQ-7 que tiene un diámetro interior de 1,7 cm y, por otro lado, la cápsula común para el resto de sensores que tiene un diámetro interior de 1,9 cm. Por tanto, aplicando la ecuación anterior, se obtienen los dos siguientes Vol_{chamb} :

$$Vol_{chamb(MQ-7)} = \pi \times 0,85^2 \times 6 = 13,618 \text{ cm}^3 \quad \text{Ec. 3-39}$$

$$Vol_{chamb(genérica)} = \pi \times 0,95^2 \times 6 = 17,01 \text{ cm}^3 \quad \text{Ec. 3-40}$$

Además, para ser totalmente exacto el cálculo del Vol_{chamb} de cada sensor, sería necesario tener en cuenta el aire que se encuentra dentro de los tubos de plástico que conectan las diversas piezas y el volumen encerrado dentro de la cámara antirretorno. En total, esto sumaría un volumen cercano a los 5 cm³, pero no se tiene el dato del coeficiente de ocupación (μ) del interior de la válvula, por tanto, se ha considerado un valor de 0,3 de este coeficiente, dejando un $Vol_{chamb(MQ-7)}$ de 15,118 cm³ y un $Vol_{chamb(genérica)}$ de 18,5 cm³.

◇ **MQ-4**

En la siguiente tabla se muestra un resumen del cálculo de la mediana y desviación típica de cada una de las cinco repeticiones que se efectúan dentro de cada una de las cinco mediciones en una capsula parcialmente cerrada

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
Mediana (4 ml)	2,450 V	2,520 V	2,465 V	2,395 V	2,430 V
Mediana (6 ml)	2,690 V	2,540 V	2,680 V	2,680 V	2,680 V
Mediana (8 ml)	2,890 V	2,895 V	2,900 V	2,910 V	2,900 V
Mediana (10 ml)	3,050 V	3,100 V	3,100 V	2,095 V	3,130 V
Mediana (12 ml)	3,470 V	3,330 V	3,220 V	3,310 V	3,220 V
Des. Típica (4 ml)	6,019 %	4,713 %	2,392 %	3,698 %	2,531 %
Des. Típica (6 ml)	8,577 %	5,092 %	8,740 %	5,699 %	5,889 %
Des. Típica (8 ml)	6,222 %	7,136 %	3,771%	3,636 %	3,297 %
Des. Típica (10 ml)	9,249 %	8,922 %	13,127 %	10,724 %	7,281 %
Des. Típica (12 ml)	16,833 %	7,524 %	9,238 %	8,640 %	7,332 %

Tabla 22 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

Calculada la mediana y desviación típica en cada una de las repeticiones, en la siguiente tabla se muestra la mediana, desviación típica y concentración en ppm de cada una de las 5 mediciones.

	Medición 1 (4 ml)	Medición 2 (6 ml)	Medición 3 (8 ml)	Medición 4 (10 ml)	Medición 5 (12 ml)
Mediana	2,400 V	2,660 V	2,900 V	3,090 V	3,300 V
Des. Típica	6,070 %	10,720 %	5,050 %	10,530 %	12,210 %
Concentración	18388 ppm	21860 ppm	28145 ppm	34965 ppm	44772 ppm

Tabla 23 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición

A continuación, en la siguiente figura se puede observar la gráfica que se ha obtenido al realizar la calibración experimental del sensor MQ-4 en el laboratorio. La desviación estándar de cada medición (compuesta por 5 repeticiones cada una de ellas) se representa mediante las barras de error, se obtiene una desviación estándar bastante menor que en la calibración directa (Figura 3-16). Además, también se obtiene una recta de regresión mucho más precisa. Esto se debe en gran parte a que la carcasa retiene el gas que se está midiendo e impide la tendencia que tiene el CH₄ a escaparse por arriba debido a su baja densidad.

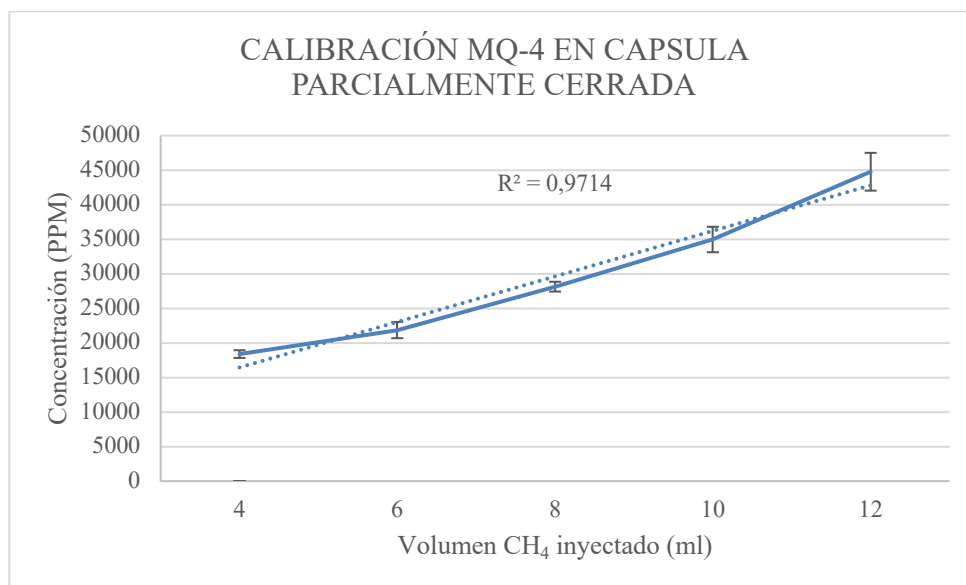


Figura 3-20 Calibración MQ-4 en una cápsula parcialmente cerrada

◇ **MQ-7**

En la siguiente tabla se muestra un resumen del cálculo de la mediana y desviación típica de cada una de las cinco repeticiones que se efectúan dentro de cada una de las cinco mediciones en una capsula parcialmente cerrada

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
Mediana (4 ml)	1,600 V	1,625 V	1,620 V	1,630 V	1,620 V
Mediana (6 ml)	2,010 V	2,140 V	2,120 V	2,090 V	2,090 V
Mediana (8 ml)	2,510 V	2,530 V	2,550 V	2,565 V	2,450 V
Mediana (10 ml)	2,920 V	2,900 V	2,830 V	2,820 V	2,770 V
Mediana (12 ml)	3,180 V	3,160 V	3,170 V	3,125 V	3,120 V
Des. Típica (4 ml)	2,693 %	3,950 %	2,513 %	3,114 %	2,961 %
Des. Típica (6 ml)	9,493 %	5,080 %	1,557 %	1,139 %	1,369 %
Des. Típica (8 ml)	3,251 %	3,562 %	4,011%	4,447 %	2,279 %
Des. Típica (10 ml)	1,697 %	2,506 %	2,825 %	1,553 %	1,590 %
Des. Típica (12 ml)	6,833 %	7,524 %	9,238 %	8,640 %	7,332 %

Tabla 24 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

Una vez calculada la mediana y desviación típica en cada una de las repeticiones, en la siguiente tabla se muestra la mediana, desviación típica y concentración en ppm de cada una de las 5 mediciones

	Medición 1 (4 ml)	Medición 2 (6 ml)	Medición 3 (8 ml)	Medición 4 (10 ml)	Medición 5 (12 ml)
Mediana	1,610 V	2,090 V	2,520 V	2,840 V	3,160 V
Des. Típica	3,109 %	6,758 %	4,956 %	5,501 %	3,948 %
Concentración	2923 ppm	3629 ppm	4585 ppm	5405 ppm	6727 ppm

Tabla 25 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición

En la siguiente figura se puede observar la gráfica que se ha obtenido al realizar la calibración experimental del sensor MQ-7 en el laboratorio. La desviación estándar de cada medición (compuesta por 5 repeticiones cada una de ellas) se representa mediante las barras de error. En este caso, se obtiene una desviación estándar baja y bastante similar a la obtenida en la calibración directa, pero en este caso se llega a obtener concentraciones por encima de las 4000 ppm. Además, se puede ver como mejora la recta de regresión. Esto se debe, principalmente, a que la carcasa ayuda a contener el gas que se está midiendo e impide esa tendencia que presentan los gases a escaparse hacia arriba debido a su baja densidad.

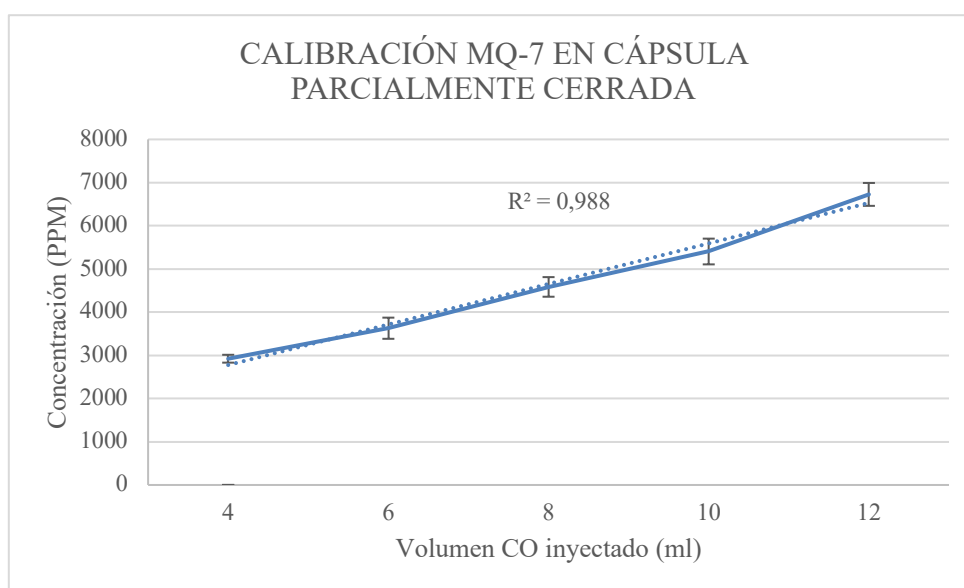


Figura 3-21 Calibración MQ-7 en una cápsula parcialmente cerrada

◇ **MQ-8**

En la siguiente tabla se muestra un resumen del cálculo de la mediana y desviación típica de cada una de las cinco repeticiones que se efectúan dentro de cada una de las cinco mediciones en una capsula parcialmente cerrada.

	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 5
Mediana (4 ml)	0,600 V	0,785 V	0,615 V	0,730 V	0,885 V
Mediana (6 ml)	1,050 V	0,970 V	1,225 V	1,150 V	1,170 V
Mediana (8 ml)	1,430 V	1,510 V	1,350 V	1,350 V	1,420 V
Mediana (10 ml)	2,540 V	2,505 V	2,620 V	3,370 V	3,130 V
Mediana (12 ml)	4,020 V	3,830 V	4,310 V	3,520 V	4,010 V
Des. Típica (4 ml)	7,721 %	14,974 %	13,626 %	13,363 %	17,561 %
Des. Típica (6 ml)	13,365 %	15,777 %	9,894 %	8,605 %	8,855 %
Des. Típica (8 ml)	17,244 %	19,854 %	14,260 %	17,545 %	18,110 %
Des. Típica (10 ml)	20,132 %	18,188 %	10,730 %	23,357 %	17,896 %
Des. Típica (12 ml)	13,417 %	23,539 %	12,040 %	24,437 %	20,465 %

Tabla 26 Resumen del cálculo de la mediana y desviación típica en cada repetición

Una vez calculada la mediana y desviación típica en cada una de las repeticiones, en la siguiente tabla se muestra la mediana, desviación típica y concentración en ppm de cada una de las 5 mediciones.

	Medición 1 (4 ml)	Medición 2 (6 ml)	Medición 3 (8 ml)	Medición 4 (10 ml)	Medición 5 (12 ml)
Mediana	0,730 V	1,200 V	1,470 V	2,860 V	4,030 V
Des. Típica	15,950 %	12,034 %	17,631 %	26,367 %	23,518 %
Concentración	15320 ppm	16419 ppm	20484 ppm	27180 ppm	35070 ppm

Tabla 27 Resumen del cálculo de la mediana, des. Típica y concentración en cada medición

En la siguiente figura se puede observar la gráfica que se ha obtenido al realizar la calibración experimental del sensor MQ-8 en el laboratorio. La desviación estándar de cada medición (compuesta por 5 repeticiones cada una de ellas) se representa mediante las barras de error, es verdad que se obtiene una desviación estándar mayor que en la calibración directa Figura 3-18, pero en este caso se llega a obtener concentraciones por encima de las 4000 ppm. Además, se puede ver como mejora la recta de regresión. Esto se debe, principalmente, a que la carcasa ayuda a contener el gas que se está midiendo e impide esa tendencia que presenta el H₂ a escaparse por arriba debido a su baja densidad.

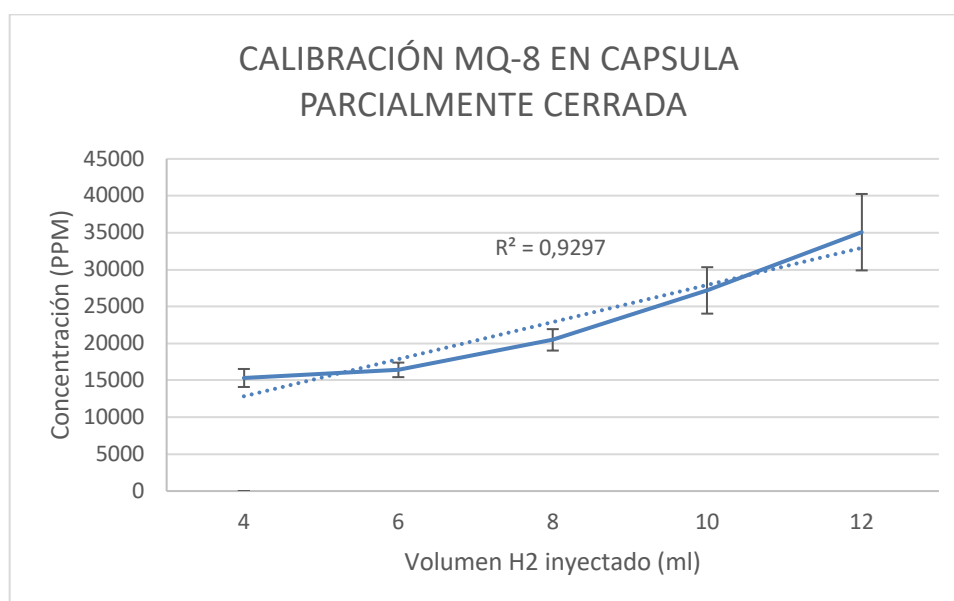


Figura 3-22 Calibración MQ-8 en una cápsula parcialmente cerrada

3.3 Visualización de las mediciones

Una vez se han realizado las calibraciones de los sensores, ya es posible conocer el valor de la concentración en ppm de cada gas. No obstante, resulta poco práctico tener este valor en la aplicación de Arduino, ya que, presenta algunos fallos como la posibilidad de que se cierre el programa y se pierdan los datos calculados, la imposibilidad de representar gráficamente todos estos datos a la vez, la dificultad de poder ver exactamente la medida en un preciso instante (el usuario tiene que estar bajando continuamente para ver el dato más reciente) o el hecho de que al realizar 10 medidas cada segundo, en un ensayo que dure aproximadamente 60 s, se tendrían un total de 4800 líneas de datos (cada medición presenta datos de los 8 sensores y cada uno de ellos supone una línea). Por todo ello, ante estos problemas se ha desarrollado las 2 soluciones siguientes.

3.3.1 Pantalla LCD

Para solucionar el problema de tener que estar bajando constantemente la barra de la plataforma de Arduino con el cursor del ordenador para poder ver la medida más reciente, se ha equipado el sistema de medición de gases con una pantalla LCD. Esta pantalla es capaz de mostrar al usuario, cada un pequeño periodo de tiempo regulable por el operador, la medición que se está realizando en ese preciso instante.

No obstante, como se puede ver en el código de Arduino, que se encuentra en el Anexo V: Código Arduino Los datos de las mediciones se representan en tres lecturas de pantalla (las dos primeras corresponden a las lecturas de los sensores de gases y la tercera con los sensores de temperatura, humedad y presión), con un tiempo para poder visualizar los datos de aproximadamente 4 s. El motivo se debe a una cuestión de espacio de la pantalla, ya que, esta cuenta con un espacio de escritura de 4x20 (4 líneas con 20 espacios). Por tanto, como se puede ver en las siguientes figuras se ha organizado la pantalla de manera que cada lectura ocupe una línea.

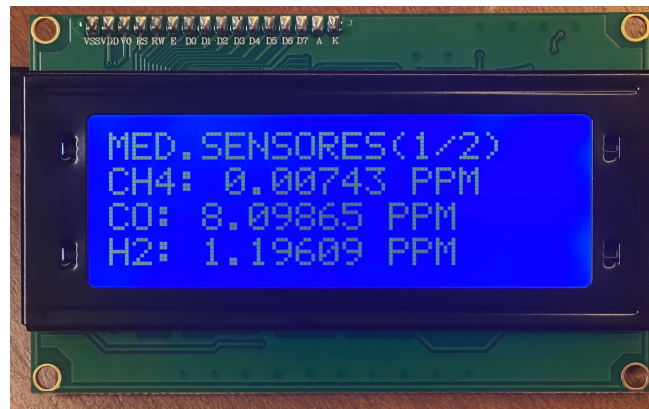


Figura 3-23 Medición sensores (1/2)

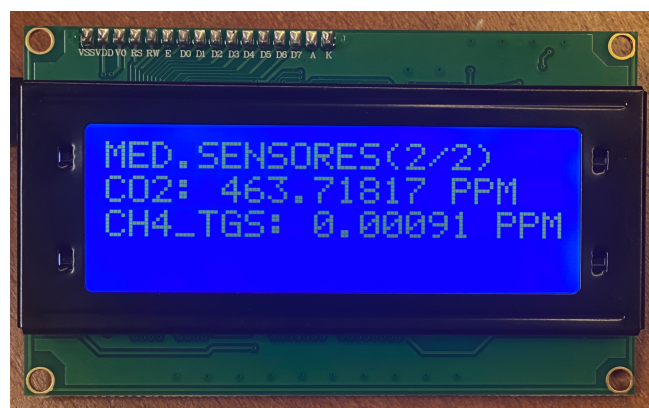


Figura 3-24 Medición sensores (2/2)

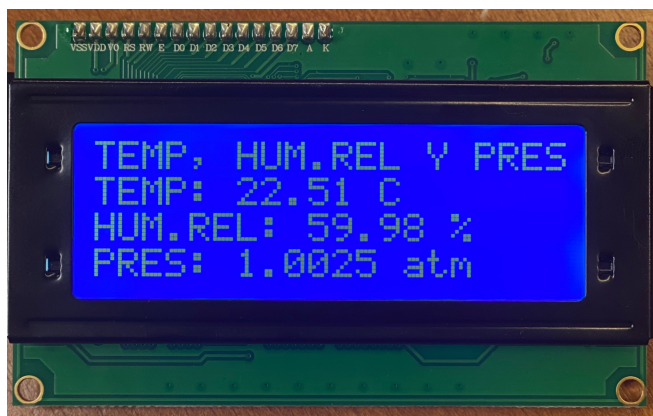


Figura 3-25 Medición de Temperatura, humedad relativa y presión

Además, también se ha implementado una lectura de pantalla con un mensaje de bienvenida que solamente se muestra por pantalla cuando se arranca el programa. Sin embargo, este mensaje que se puede ver en la Figura 3-26, también cumple otra función y es la de avisar al usuario de que el sistema se ha reiniciado, ya que, si se muestra por pantalla ese mensaje una vez que ya se estaba ejecutando el código, solamente puede significar que se ha reseteado la plataforma o la placa.

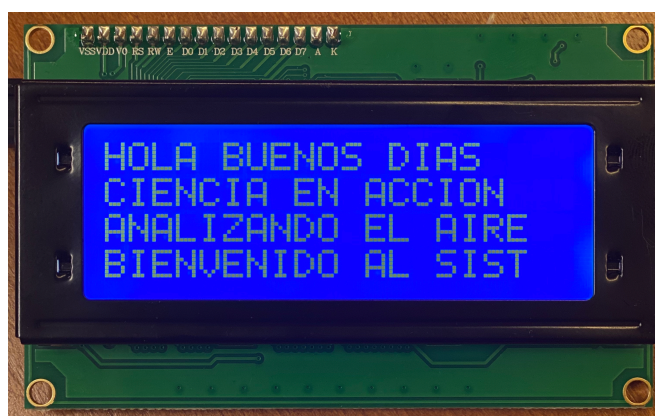


Figura 3-26 Mensaje de bienvenida

Al igual que con los sensores de presión, temperatura y humedad, la comunicación de la pantalla LCD se realiza a través del protocolo I2C. Esto, como se explicó anteriormente en el subapartado SHT31-D y BME280, implica que el controlador que se encuentra dentro la pantalla se comunica con el microprocesador a través de los pines SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock). Por tanto, en la práctica, el cableado de la pantalla consta de estos dos pines que son compartidos con los sensores SHT31-D y BME280 y de los pines de tierra y voltaje de la placa Arduino.

3.3.2 Microprocesador ESP8266

El procesador ESP8266 es un microcontrolador que, utilizando el protocolo Wi-Fi, es capaz de conectarse a redes inalámbricas y enviar y/o recibir datos. Con esta función se resuelven muchos de los problemas que se han comentado al inicio del apartado, ya que, este microprocesador ha sido implantando en el sistema para que transfiera datos vía Ethernet a la cuenta de un usuario con un determinado canal en la página web “Thinkspeak”. De esta manera, como se puede observar en las siguientes figuras, el usuario es capaz de representar gráficamente cada medición, viendo en todo momento el valor registrado más reciente (Thinkspeak genera una gráfica a medida que llegan los datos y en todo momento se puede ver el valor y la hora de entrada). Además, los datos quedan guardados en la cuenta del usuario, por lo que ya no se corre el peligro de que se pierdan los datos debido a un cierre repentino de la plataforma Arduino.

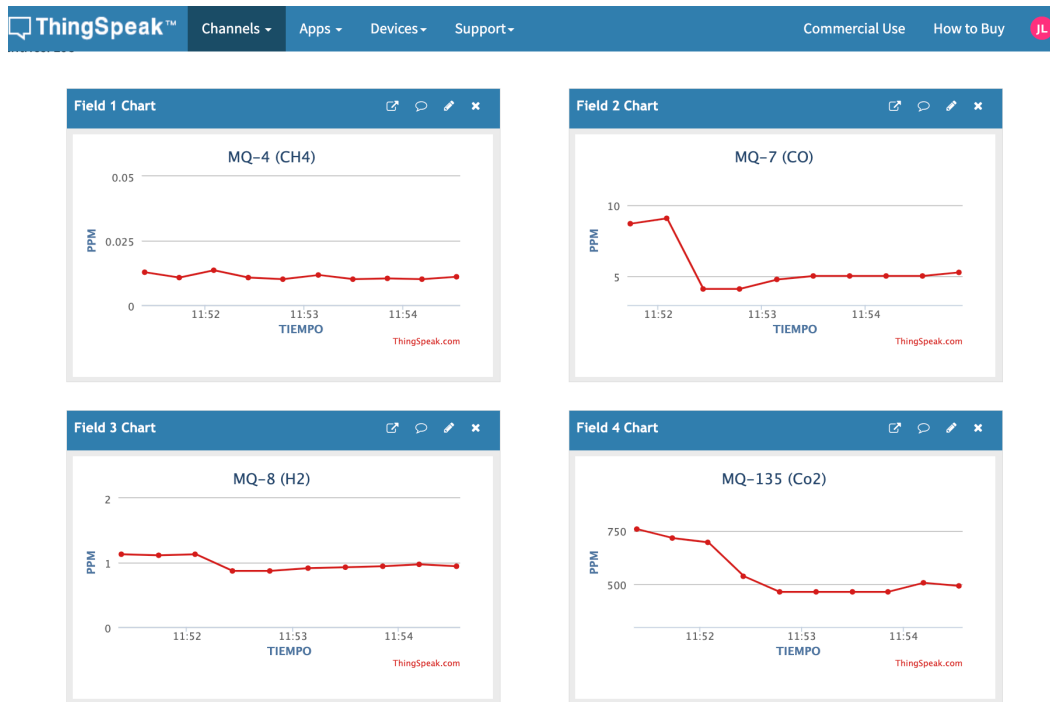


Figura 3-27 Visualización de mediciones en Thinkspeak (1/2)

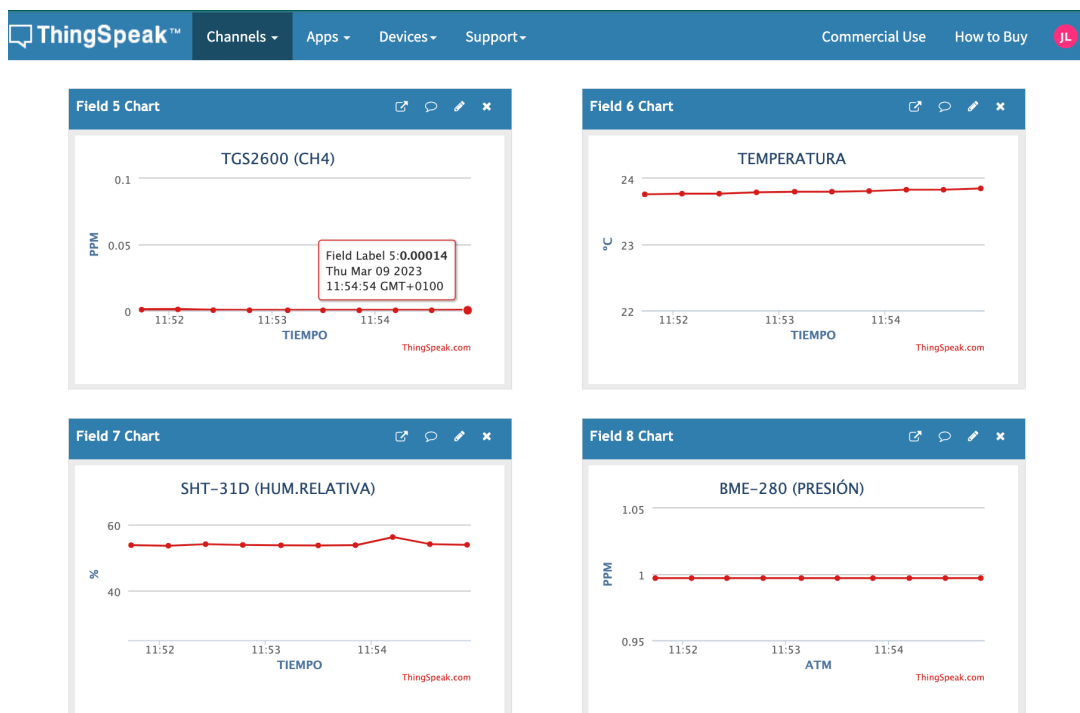


Figura 3-28 Visualización de mediciones en Thinkspeak (2/2)

Cabe destacar que, los datos han sido enviados al canal público de una cuenta en Thingspeak y que cualquier usuario es capaz de acceder a estas mediciones a través del siguiente enlace (<https://thingspeak.com/channels/2009483>) o a través del siguiente código QR



Además, en el canal público de Thingspeak, mediante la implementación de un código realizado en el software de programación científica de Matlab, se pueden visualizar varias mediciones en una misma gráfica. Este es el caso de la Figura 3-29, donde se representa al mismo tiempo la concentración de H₂ en ppm (recogida por el sensor MQ-8) y la presión (recogida por el sensor BME-280).

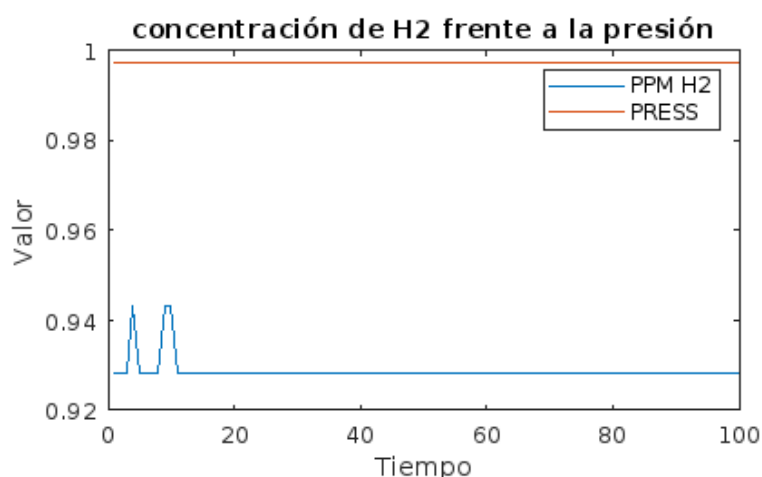


Figura 3-29 Representación de dos mediciones en la misma gráfica

No obstante, todas estas mediciones que se están enviando a un canal público, se puede modificar para que se envíe a un canal privado (codificando el nuevo número de canal y clave API) o incluso para que se envíe a otro dominio de interés como puede ser el laboratorio de investigación del Centro Universitario de la Defensa o cualquier otro centro de recogida de datos.

Por último, como se puede ver en la Figura 3-30, el microcontrolador se conecta a la placa de Arduino mediante la toma de tierra, un pin de voltaje de 3,3 V y un pin "Rx" ya que, para este caso, solo es necesario que el Arduino le envíe al procesador los datos que recibe de los diferentes sensores. Por tanto, el esquema de montaje definitivo que se ha desarrollado en el proyecto es el que se muestra a continuación.

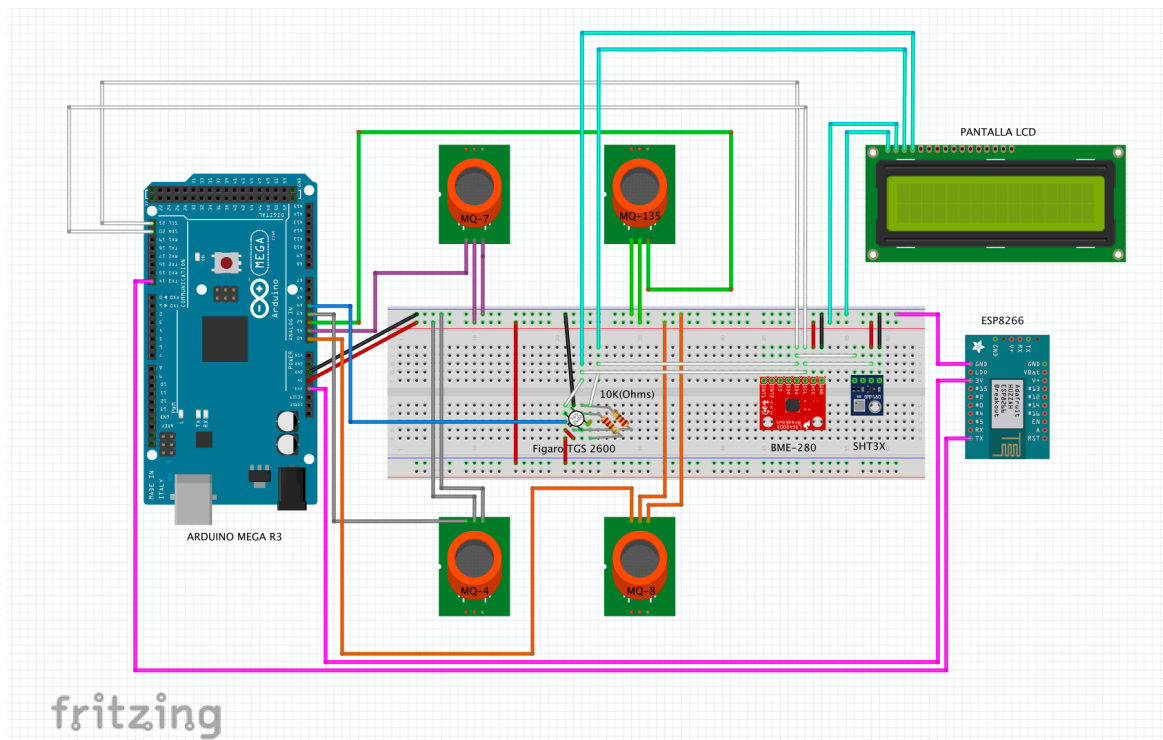


Figura 3-30 Esquema de montaje definitivo en aplicación Fritzing

3.4 Tubo de medición

Introducidos la pantalla LCD y el microprocesador ESP8266, ya sería posible visualizar y representar varios datos de concentraciones de diferentes sensores a la vez. No obstante, con el sistema que se tiene, resulta muy complicado hacer pasar el gas por todos los sensores sin que se vean afectados por corrientes de aire que alterarían drásticamente los resultados. Por este motivo, utilizando el software Autodesk Inventor, se ha diseñado un modelo de un tubo de medición que permita alojar todos los sensores en su interior para poder realizar las mediciones de concentración, temperatura, humedad relativa y presión, sin verse afectados por corrientes de aire.

Como se puede observar en las dos siguientes figuras, el tubo de medición, que tiene una longitud aproximada de 40 cm, está formado por dos piezas independientes que se juntan mediante un proceso de unión por ajuste forzado.



Figura 3-31 Tubo de medición desensamblado

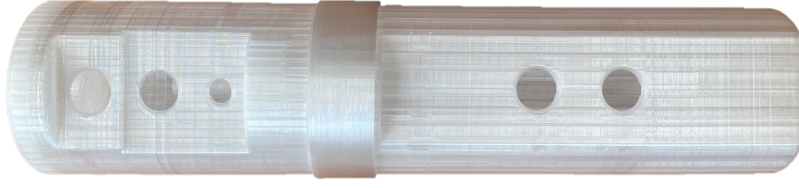


Figura 3-32 Tubo de medición ensamblado

La entrada y salida del tubo, tiene el diámetro de la tubería que sale del reformador, por si se quiere conectar el tubo en serie. No obstante, dado que se pasa de un diámetro inicial de 1cm al diámetro interior del tubo que son 8,2 cm. Es necesario determinar la longitud mínima que hay que dejar de margen para que los sensores trabajen en régimen laminar.

El cálculo de esta longitud depende de varios factores, como son la velocidad del fluido, la viscosidad de este y la rugosidad de las paredes internas del tubo. Dicho esto, se puede calcular una longitud mínima aproximada para evitar el régimen turbulento utilizando la fórmula de Reynolds, que es una ecuación que relaciona la velocidad, la densidad y la viscosidad del fluido con el diámetro del tubo y la rugosidad de sus paredes.

Se asume que el fluido que fluye dentro del tubo de medición es aire, a una temperatura de 20°C, y que las paredes internas del tubo presentan una rugosidad promedio para el PLA impreso en 3D que suele ser de alrededor de 20-30 micrómetros. Teniendo en cuenta esto, se calculará la longitud mínima aproximada necesaria para evitar el régimen turbulento mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{2 \times g \times D_{int}}{V \times f} \quad \text{Ec. 3-41}$$

Donde la “L” es la longitud mínima necesaria para evitar el régimen turbulento (en m), la “D_{int}” es el diámetro interior del tubo de medición (en m), la “g” es la gravedad (en m/s²) y la “f” es el coeficiente de Darcy, que se puede calcular con la siguiente ecuación de Moody:

$$f = 0,001375 \left[1 + \left((200 \times \varepsilon_r) + \left(\frac{10^6}{Re} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad \text{Ec. 3-42}$$

Donde la “ε_r” es la rugosidad relativa, y el “Re” es el número de Reynolds, que se calcula según la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V \times D_{int}}{\nu} \quad \text{Ec. 3-43}$$

Donde la “V” es velocidad de entrada del aire (en m/s) y la “ν” es la viscosidad cinemática del aire (en m²/s), que tiene un valor de 1,5 x 10⁻⁵ m²/s a 20°C de temperatura y 1 atm de presión [36]. Por lo tanto, se puede calcular el número de Reynolds:

$$Re = \frac{3,5 \times 0,082}{1,5 \times 10^{-5}} = 19133,66 \quad \text{Ec. 3-44}$$

Luego, se necesita calcular la rugosidad relativa de la superficie interna del tubo en metros:

$$\varepsilon_r = \frac{e}{D_{int}} = \frac{20 + 30}{2 \times 1000000} = 3,05 \times 10^{-4} \text{ m} \quad \text{Ec. 3-45}$$

Una vez calculado ε_r y Re se puede calcular el coeficiente de fricción de Darcy aplicando la ecuación 3-42

$$f = 0,001375 \left[1 + \left((200 \times \varepsilon_r) + \left(\frac{10^6}{Re} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad \text{Ec. 3-46}$$

$$f = 0,067$$

Por último, se emplea la ecuación 3-41 para calcular la longitud mínima necesaria:

$$L = \frac{2 \times 0,082 \times 9,81}{3,5 \times 0,067} = 6,86 \text{ cm} \quad \text{Ec. 3-47}$$

Por tanto, con el objetivo de evitar el flujo turbulento y de esta forma no obtener mediciones erróneas, se ha dejado una distancia aproximada de unos 7 cm desde el momento en el que se introduce el aire hasta el orificio del primer sensor. Además, debido a la gran longitud del ensamblaje de las dos piezas, como se ve en la siguiente figura, al final de la primera pieza, se ha diseñado el interior del tubo para que sea posible introducir un ventilador de 12 V que ayude al movimiento en el interior del ensamblaje. Este ventilador es alimentado con el pin “V_{in}” de la placa Arduino por lo que este voltaje de 12 V es ajeno al voltaje de 5 V o 3,3 V con el que se alimentan los sensores y el microprocesador ESP8266.



Figura 3-33 Interior de la primera pieza del tubo de medición

En la siguiente figura se puede ver el interior de la segunda pieza que conforma el tubo de medición. Las paredes que se pueden ver son para tratar de cubrir los sensores de presión, humedad relativa y temperatura (SHT31-D y BME280) ya que estos, no necesitan estar en contacto directo con el flujo de aire. En la figura también se puede apreciar una especie de túneles, estos han sido diseñados para introducir los cables necesarios para los sensores SHT31-D y BME280 y para el ventilador sin que estén en un contacto directo con el gas.

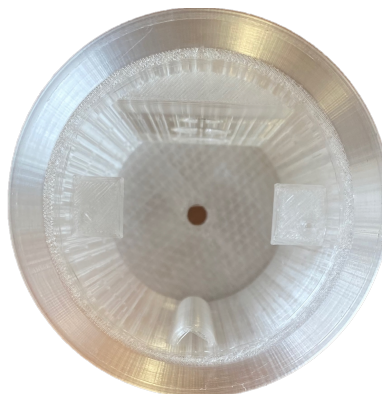


Figura 3-34 Interior de la segunda pieza del tubo de medición

3.5 Presupuesto

En el siguiente subapartado se representará mediante la siguiente tabla el presupuesto total que se ha empleado para la realización del proyecto:

Material	Coste
Placa Arduino Mega 2560 R3	25,99 €
Sensor TGS2600	35 €
Sensores MQ	24,28 €
Sensor SHT31-D	9,49 €
Sensor BME-280	7,99 €
Pantalla LCD	11,99 €
Filamento PLA	26,99 €
Ventilador axial 12V	6,78 €
Cables Elegoo	9,98 €
Placa de desarrollo de internet	8,99 €
Jeringuilla de 200 ml	9,99 €
15 jeringuillas de diferente volumen	16,02 €
Caja de conexiones estanca	11,99 €
Accesorios de bomba de aire	12,37 €
TOTAL	217,85 €

Tabla 28 Total de presupuesto gastado en material

4 RESULTADOS

4.1 Discusión de resultados

En este trabajo se han propuesto dos técnicas diferentes para la medición de gases (especialmente H₂, CH₄, CO) mediante sensores de bajo coste y piezas diseñadas y construidas mediante la técnica de impresión 3D. La evolución de la calidad del proceso de medición se puede observar en la Tabla 29. Cada una de las dos técnicas se ha estudiado y evaluado según dos parámetros, la linealidad y la repetibilidad de la medición.

Por un lado, la linealidad de la medición, es decir, la correlación entre la concentración medida y el volumen inyectado es necesaria para seleccionar el valor del rango dinámico. Esta, se caracteriza por el coeficiente de correlación lineal R². Por otro lado, la repetibilidad de la medición representa la capacidad de cada técnica para dar resultados más o menos iguales cuando se realizan varias repeticiones de mediciones en las mismas condiciones. Por tanto, la repetibilidad se caracteriza por la desviación estándar expresada como un porcentaje de la media de los valores obtenidos en cada serie de mediciones.

Gas	Técnica	R ²	Des. Típica media
H ₂	Directa	0,507	18,915%
CH ₄	Directa	0,652	13,882%
CO	Directa	0,890	7,688 %
H ₂	Cápsula parcialmente cerrada	0,923	14,863%
CH ₄	Cápsula parcialmente cerrada	0,971	8,916%
CO	Cápsula parcialmente cerrada	0,988	4,855%

Tabla 29 Comparación de las técnicas de medición

Como se puede ver en la tabla, la utilización de una cápsula parcialmente cerrada ha mejorado la linealidad de la medición. Tanto para el H_2 , CH_4 y para el CO , el valor de R^2 ha aumentado entre la medición realizada directamente sobre el sensor en un ambiente abierto y la medición en la cápsula parcialmente cerrada. Además, en comparación con la inyección directa en un entorno abierto, colocar el sensor en la cápsula parcialmente cerrada mejoró aún más la repetibilidad de la medición en todos los casos. Como se ha dicho anteriormente, esto se debe principalmente a que, al utilizar esta cápsula, se logra retener el gas que se está midiendo, ya que, al introducir el gas por una válvula de no retorno, se impide la tendencia que tienen a escaparse por arriba debido a su baja densidad. Por tanto, con un valor de coeficiente de correlación de 0,923 para el H_2 , 0,971 para el CH_4 y 0,988 para el CO y un valor de desviación típica media de 14,863% para el H_2 , 8,916 para el CH_4 y 4,855% para el CO , se puede decir que la medición de gas en la cápsula parcialmente cerrada es la mejor técnica en cuanto linealidad y repetitividad.

Sin embargo, según la hoja de datos proporcionada por el fabricante (Figura 3-6), los sensores MQ-4 y MQ-8 pueden detectar la presencia de CH_4 y H_2 entre 200 ppm y 10000 ppm, el sensor MQ-7 puede detectar CO entre 50 ppm y 4000 ppm y el sensor MQ-135 puede detectar CO_2 entre 10 ppm y 200 ppm. Es decir, del 0,02% al 1%, del 0,005% al 0,4% y del 0,001% al 0,02% respectivamente. No obstante, como la técnica de diluir el gas con aire antes de la inyección ha empujado el límite superior de detección con una linealidad aceptable, reflejada en el valor de la recta de regresión, se puede afirmar que la medición en la cápsula parcialmente cerrada tiene un rango dinámico mínimo del 0,02% al 4,477% para el CH_4 , del 0,02% al 3,507% para el H_2 y del 0,005% al 0,673% para el CO .

Con respecto a la selectividad del sistema, depende particularmente de la curva de calibración de cada sensor (Figura 3-6, Figura 3-7, Figura 3-8, Figura 3-9). Los sensores de la serie MQ utilizados son sensores semiconductores resistivos basados en óxido de estaño (SnO_2) que reaccionan simultáneamente a varios gases reductores. Si un gas, por ejemplo, contiene tanto CH_4 como H_2 en igual proporción, entonces cuando se introduzcan los sensores en el tubo de medición, la respuesta del sensor puede causar valores confusos con respecto a las dos curvas de calibración suministradas por el fabricante. En nuestra aplicación de campo (sector energético), esto nunca será un problema porque la proporción de estos gases (CH_4 y H_2) nunca está equilibrada. Por ejemplo, en el caso del gas de síntesis (es decir, el presente proyecto), la composición de H_2 (50%) es mucho mayor que la de CH_4 (15,02%), por lo que la influencia de CH_4 durante la medición de H_2 puede ser insignificante cuando se utiliza el MQ-8 e inversamente, la influencia de H_2 durante la medición de CH_4 utilizando el MQ-4 es insignificante. Sin embargo, esta selectividad sí que habrá que tenerla en cuenta cuando se introduzcan simultáneamente los sensores MQ-4 y MQ-135 ya que, en este caso, la composición en la mezcla de CH_4 y CO_2 es la misma (15,02%).

Por último, a la hora de la realización de las calibraciones, además de los errores instrumentales y humanos como puede ser la no inyección de la cantidad de gas exacta o las consideraciones que se han realizado para calcular los volúmenes de Vol_{chamb} (3.2.3), hay que destacar otros dos errores que pueden haber afectado a la hora de las mediciones. El primero es el no haber calculado el voltaje inicial real del sensor en completa ausencia del gas, para realizar este paso, hubiese sido necesario introducir los sensores en una cápsula estanca y someterlos a un gas neutro como puede ser el N_2 . El segundo es el hecho de haber trabajado con bolsas de gas estancas, ya que, pese a que no permiten la entrada de aire, si estas bolsas no se utilizan al momento de rellenarlas, se corre el peligro de que la concentración de gas varíe.

4.2 Montaje final

Una vez efectuado todas las calibraciones de los sensores, se ha realizado el montaje final del medidor de concentración de gases. En él, se incluyen los sensores de temperatura, presión y humedad relativa (SHT31-D, BME280) y el ventilador en el interior del tubo de medición, los sensores de la serie MQ y TGS2600 en el exterior y la pantalla LCD, placa Arduino, procesador ESP8266, protoboard y cableado en una caja de conexiones.

Como se puede ver en la siguiente figura, lo primero ha sido realizar el cableado en el interior del tubo. Para el funcionamiento de los sensores son necesarios 4 cables por cada uno de ellos, dos de comunicación (SCL, SDA), el cable de tierra y el cable de alimentación (estos dos últimos son los que necesita también el ventilador). Por tanto, como se necesitaban un total de 10 cables se ha decidido utilizar un cable multiconductor (con 6 cables en su interior) que entrará al tubo de medición a través de un presaestopa y en el interior se soldarán extremidades de cables para obtener el número necesario.



Figura 4-1 Cableado del interior del tubo de medición

Una vez realizado el cableado interior, se procede a ordenar también el cableado exterior. De igual forma que en el primer caso, de la caja de conexiones saldrá un cable multiconductor, pero en este caso el número de cables necesitado es bastante mayor. Por un lado, se necesitan 3 cables por cada sensor de la serie MQ (Cable de tensión, tierra y pin analógico) y, por otro lado, al contar con una resistencia en paralelo, se necesitan 4 cables para el sensor TGS2600 (Cables de tensión, tierra y pin analógico). Por tanto, como se necesitan 12 cables, se ha diseñado otra protoboard de tamaño menor que se pegará en la parte superior del tubo de medición. Como se puede ver en la siguiente figura, en la que se muestra el montaje final, en el interior de la caja de conexiones, se encuentra la pantalla LCD, el procesador ESP8266, la protoboard y la placa Arduino, mientras que en el exterior del tubo se puede ver los sensores y en la parte central la nueva protoboard que los alimenta.

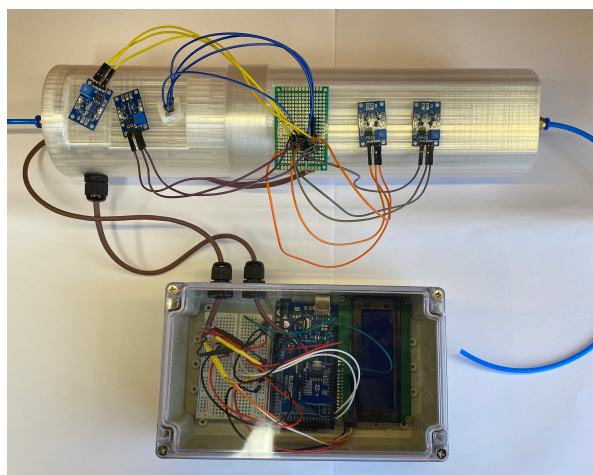


Figura 4-2 Montaje final del medidor de concentración de gases

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Con la implementación del tubo de medición para realizar el cálculo de concentración ppm de varios gases al mismo tiempo, se puede concluir que el medidor de concentración de gases para su empleo en sistemas de reformado funciona de una manera correcta.

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado era diseñar y construir un medidor de gases procedentes del reformado mediante la investigación de la posibilidad de adaptar sensores resistivos de bajo coste para medir concentraciones de gases en el sector de la energía. Para ello, en el apartado 3.1 se exponen los conceptos básicos sobre el funcionamiento y características de los sensores utilizados (serie MQ, TGS2600, BME-280 y SHT31-D). Además, también se explica la plataforma de hardware libre utilizada (Arduino), así como los componentes de la placa Arduino Mega 2560 R3. También se pretendía explicar de una forma visual, mediante la utilización de las gráficas aportadas por el fabricante, la calibración teórica de los sensores, ya que sienta la base de la calibración experimental que se desarrolla a continuación en el apartado 3.2. Esta calibración experimental con una mezcla de gases diluida con aire, la cual se realiza gracias a la creación del código en la plataforma Arduino que se encuentra en el Anexo V: Código Arduino, se realiza de dos métodos diferentes. El primero realizando dicha calibración inyectando el gas directamente al sensor (fuertemente afectado por las corrientes de aire y por la densidad del gas a medir, y el segundo mediante la creación de una cápsula parcialmente cerrada, cuyos planos se encuentran en el Anexo IV: Planos, que ayuda a retener el gas gracias a una válvula antirretorno.

Una vez realizadas las calibraciones, con una linealidad y repetibilidad aceptables como se puede ver en la Tabla 29, se obtiene que el mejor método para la medición de ppm es la calibración con la cápsula parcialmente cerrada y que los rangos dinámicos mínimos se amplían desde un 1,000% hasta un 4,477% en el caso del metano (CH_4) y 3,507% para el hidrógeno (H_2) y desde un 0,400% a un 0,673% para el monóxido de carbono (CO). Además, como conclusión del proceso de calibración, se obtiene que no se ha podido realizar la calibración experimental del sensor MQ-135 (sensor de detección de CO_2) debido a que, al realizarse esta calibración con aire, el sensor ya se encuentra expuesto a un rango dinámico bastante mayor que el que establece el fabricante (entre 50 ppm y 200 ppm), no obstante destacar que el sensor respondió de una manera razonable y correcta a las dos primeras mediciones, por lo que se puede establecer que el sensor es capaz de leer hasta 1100 ppm de una manera efectiva.

Calculados los rangos dinámicos ampliados se puede decir que estos sensores, inicialmente diseñados para mediciones de fugas, se pueden utilizar para más aplicaciones como puede ser el campo de la energía. Posteriormente se ha implementado el sistema de medición con una pantalla LCD que muestra las mediciones de concentración, temperatura, presión y humedad relativa cada 10 segundos, y

con un procesador que envía todos los datos recogidos durante la medición vía Internet a una base de datos, de acceso libre a través de la página web Thinkspeak.

Finalmente, como se indicó al principio de este apartado, se ha diseñado y construido un tubo de medición, cuyos planos se encuentran en el Anexo IV: Planos, para poder conectar en línea con cualquier salida de una mezcla de gases y poder realizar las mediciones de todos los sensores al mismo tiempo.

5.2 Líneas futuras

Hoy en día, el empleo de sensores de bajo coste se encuentra en constante evolución y con una amplia variedad de posibilidades de mejora. A lo largo del presente documento se han logrado resultados satisfactorios en el campo del monitoreo de gases aplicado al ámbito de la energía. Sin embargo, todavía existen varias áreas que podrían ser mejoradas o exploradas en futuros trabajos. Por eso, a continuación, se discutirán algunas posibles líneas futuras para este proyecto, con el objetivo de seguir mejorando a precisión y eficacia de esta tecnología puntera.

- Exponer los sensores a N_2 (gas) para determinar el valor inicial real de tensión del sensor ante la ausencia de gases.
- Realización de pruebas en diferentes condiciones ambientales para determinar si las mediciones de los sensores se ven afectadas por factores como la temperatura, presión o humedad.
- Explorar la posibilidad de utilizar inteligencia artificial o técnicas de aprendizaje automático para analizar las mediciones y detectar patrones, lo que podría ayudar a identificar problemas potenciales.
- Integración de un sistema de alarma temprana que se active en caso de que la concentración de algún gas supere un límite preestablecido o alcance niveles peligrosos.
- Añadir un sistema de autolimpieza para evitar la acumulación de suciedad en los sensores y garantizar su correcto funcionamiento a largo plazo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, «Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo». [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf>
- [2] «Next Generation EU: 750.000 millones de euros para la recuperación europea». [En línea]. Disponible en: <https://es.fi-group.com/next-generation-eu-750-000-millones-de-euros-para-la-recuperacion-europea/>
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), «Hoja de ruta del hidrógeno», *Gob. Esp.*, p. 68, oct. 2020.
- [4] Secretaría de Defensa, «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID». [En línea]. Disponible en: file:///Users/jorge/Downloads/etid_estrategia_de_tecnologia_e_innovacion_para_la_defensa_2020.pdf
- [5] «Sistema Español de Inventario de Emisiones». [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/default.aspx>
- [6] Sergi Alcalde, «Estos son los principales proyectos para producir hidrógeno verde en España», *National Geographic*, 18 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/economia-circular/estos-son-principales-proyectos-para-producir-hidrogeno-verde-espana_18710
- [7] Juan Manuel Simón Muñoz., «Sistemas de producción de hidrógeno basado en el reformado de combustibles; estado del arte del reformado autotérmico diésel y peróxido de hidrógeno.», Universidad de Sevilla, Sevilla. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/92021/fichero/TFG-2021-SIMON.pdf>
- [8] Felipe Andrés Díaz Alvarado, «gasificación de carbón en chile, para obtención de hidrógeno y electricidad en planta de ciclo combinado», universidad de chile facultad de ciencias físicas y matemáticas, Santiago de Chile, 2007. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102958/diaz_fa.pdf?sequence=3&isAllowed=y

- [9] F. Melo y N. Morlanes, «Naphtha steam reforming for hydrogen production», Instituto de Tecnología Química, UPV-CSIC, Valencia, Spain. [En línea]. Disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0920586105003469?token=0F9431356B2E795A11DE8E40DDF5C1584739744683D565F791490DE12B63052F8116D6D9AFCF4AB0782170C7D1A1D30B&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230128105637>
- [10] John N. Armor, «The multiple roles for catalysis in the production of H₂», *Elsevier* [En línea]. Disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0926860X98002440?token=64EF58154A9EE666FFD47EC848686369BFCFB6D43DF29DE1FC02B3F55B7A59297FD709243E59E10E4E49365E74704231&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230128153501>
- [11] Lorena Pérez Moreno, «Producción de hidrógeno mediante reacciones de reformado en reactor de lecho fluidizado de dos zonas», ingeniería química y tecnologías del medio ambiente, universidad de zaragoza, 2012. [en línea]. disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/7073/files/tesis-2012-046.pdf>
- [12] Juanjo González Pérez, «Reformado con vapor de agua de Bioetanol utilizando catalizadores de cobalto. influencia del método de incorporación del cobalto.», proyecto de master en química sostenible (itq), universidad politécnica de valencia, 2011. [en línea]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15712/proyecto%20master%20qs%20jjgonzalez%20.pdf?sequence=1#:~:text=el%20reformado%20de%20productos%20derivados,t%C3%B3xico%2C%20ni%20excesivamente%20vol%C3%A1til\).](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15712/proyecto%20master%20qs%20jjgonzalez%20.pdf?sequence=1#:~:text=el%20reformado%20de%20productos%20derivados,t%C3%B3xico%2C%20ni%20excesivamente%20vol%C3%A1til).)
- [13] María Laura Barbelli, Ivana N. Buffoni, Francisco Pompeo, Gerardo F. Santori, y Nora N. Nichio, «Hidrógeno a partir del reformado de glicerina». facultad de ingeniería, universidad nacional de la plata. [en línea]. disponible en: <https://www.ing.unlp.edu.ar/sitio/investigacion/archivos/jornadas2011/iq05.pdf>
- [14] Lucía Soto Perrela, «Reformado de glicerina con vapor de agua: simulación y estudio experimental», proyecto fin de carrera, universidad de zaragoza. [en línea]. disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/5229/files/taz-pfc-2010-259.pdf>
- [15] Fazil Qureshi, Mohammad Yusuf, Amjad Ali Pasha, Huma Warsi Khan, Binash Imteyaz, y Kashif Irshad, «Sustainable and energy efficient hydrogen production via glycerol reforming techniques: A review», *ScienceDirect*, [En línea]. Disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319922014756?token=39D0C7C1A7032D391D875836644E1743A35A93AC423BB13F586393C324FAD5A52EA5054E91B30137361F0DFD2671C794&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230128172919>
- [16] «A steam powered submarine: the Ictíneo», *A steam powered submarine: the Ictíneo*. <https://www.lowtechmagazine.com/2008/08/submarines-1.html>
- [17] TN Nicolas Aguirre Fontenla y TN Pablo Alvarez Llaneza, «Como funciona el sistema independiente del aire (AIP) en los submarinos?», 6 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsnorkel.com/2021/01/como-funciona-el-sistema-independiente-del-aire-aip-submarinos.html>
- [18] Rocío Martínez Reyes, «Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda.», Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/49358/Trabajo%20Fin%20de%20Grado%20RMR.pdf?sequence=1>

- [19] Javier Almarza Cano, «Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia», proyecto fin de carrera, universitat politècnica de catalunya, españa, 2010. [en línea]. Disponible en: <file:///Users/jorge/Downloads/Memoria.pdf>
- [20] José Juan Alvarado Flores, María Liliana Ávalos Rodríguez, y José Guadalupe Rutiaga Quiñones, «celdas de combustible como elementos potenciadores para un desarrollo energético sustentable». [en línea]. disponible en: <http://ru.iiec.unam.mx/4707/1/1-052-alvarado-avalos-rutiaga.pdf>
- [21] R.I. Merino, «nuevos materiales para sofc's». [en línea]. disponible en: <http://fmc0.unizar.es/people/rmerino/papers/divsofc.pdf>
- [22] Jesús García Martín, «Pilas de combustible conceptos». Escuela de organización industrial, Año de 2014. [En línea]. Disponible en: [file:///Users/jorge/ Downloads /pilas_de_combustible_conceptos%20\(1\).pdf](file:///Users/jorge/Downloads/pilas_de_combustible_conceptos%20(1).pdf)
- [23] Marco Tulio Calderón y Leonardo de J. Mesa p, «principios de funcionamnio y construcción de una celda de combustible de ácido fosfórico (pafc)». [en línea]. disponible en: [file:///users/jorge/ downloads/dialnet-principiosde_funcionamnioy_construcciondeunacelda-4842609%20\(1\).pdf](file:///users/jorge/downloads/dialnet-principiosde_funcionamnioy_construcciondeunacelda-4842609%20(1).pdf)
- [24] «Sensores IR de gases inflamables: cómo funcionan».
- [25] «Espectrometría de masas». [En línea]. Disponible en: https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/espectrometria_de_masas.pdf
- [26] «GUIA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D». 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-ES-RES.pdf>
- [27] «Fabricación Aditiva».
- [28] tecmikro, «Arduino® Mega 2560: Características». [En línea]. Disponible en: <https://tecmikro.com/content/14-arduino-mega-2560-caracteristicas>
- [29] Figaro usa, inc, «tgs 2600 - for the detection of air contaminants». [en línea]. disponible en: <https://docs.rs-online.com/8752/0900766b815a66c7.pdf>
- [30] Werner Eugster y George W. Kling, «Performance of a low-cost methane sensor for ambient concentration measurements in preliminary studies». [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/258591581_Performance_of_a_low-cost_methane_sensor_for_ambient_concentration_measurements_in_preliminary_studi
- [31] Elisabetta Comini, Guido Faglia, y Giorgio Sberveglieri, *Solid State Gas Sensing*. 2009.
- [32] Denny Richter y Holger Fritze, «High-Temperature Gas Sensors». [En línea]. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/5346_2013_56
- [33] Antonio Moreno Fernández.-Caparrós -, «EL BUS I2C». [En línea]. Disponible en: <http://www.uco.es/~el1mofer/Docs/IntPerif/Bus%20I2C.pdf>
- [34] Figaro group, «technical information for Air Quality Control Sensors». [En línea]. Disponible en: <https://manualsbrain.com/es/manuals/702436/>
- [35] Shunchang Yang, Yikan Liu, Na Wu a, Yingxiu Zhang, Spyros Svoronos, y Pratap Pullammanappallil, «Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119300965?via%3Dihub>

- [36] «Tablas viscosidad», *apuntes de ingeniería mecánica*, 30 de agosto de 2016.
<https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2016/08/tablas-viscosidad.html>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Este trabajo presenta una innovadora solución para la monitorización y análisis de gases a un precio más accesible para los consumidores. No obstante, la implementación de esta solución tiene implicaciones sociales, ambientales y económicas que deben ser consideradas.

En términos sociales, el diseño y construcción de este medidor de concentración de gases puede tener un impacto positivo en la población, ya que, al lograr abaratar los costes de este dispositivo, hace que sea más accesible para aquellos que no podían permitirse los elevados precios actuales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el fácil acceso a productos de bajo de coste puede abrir las puertas hacia el consumo excesivo y la obsolescencia programada, y, por tanto, tener un impacto negativo en la salud de las personas.

En cuanto a las implicaciones ambientales, el producto presenta un impacto negativo ya que la fabricación de dispositivos electrónicos, como las resistencias, chips, cableado, y otros componentes, tienen un impacto significativo en el medio ambiente. Esto se debe a que la extracción de los recursos necesarios para fabricar estos componentes puede tener consecuencias negativas, como la deforestación, la contaminación del aire y del agua, y la degradación del suelo. Además, el proceso de fabricación en sí mismo produce residuos tóxicos y genera emisiones de gases de efecto invernadero.

En cuanto a las implicaciones económicas, el producto puede tener un impacto positivo al ser una opción más económica en comparación con otros dispositivos electrónicos en el mercado, lo que puede beneficiar a las personas con recursos económicos limitados. Sin embargo, también puede tener efectos negativos en la economía, como la posible disminución de la demanda de otros productos electrónicos en el mercado, afectando a las empresas que los fabrican.

Por todo ello, es importante tener en cuenta todas las implicaciones sociales, ambientales y económicas antes de la fabricación de este dispositivo. La implementación de esta solución específica puede tener implicaciones tanto positivas como negativas, por lo que es importante abordar estos factores con responsabilidad para lograr un equilibrio adecuado entre el acceso a productos a precios más bajos y la sostenibilidad ambiental y económica.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En el desarrollo del presente trabajo, se han abordado diferentes aspectos relacionados con la tecnología de monitorización y análisis de gases con sensores de bajo coste. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el avance tecnológico no solo implica beneficios técnicos y económicos, sino que también tiene implicaciones éticas y sociales.

En primer lugar, es importante destacar el impacto positivo que esta tecnología puede tener en el sector energético. El monitoreo y análisis de gases tiene un papel crucial en procesos como la producción de hidrógeno (materia prima cada vez más utilizada como combustible limpio). Además, los sensores de bajo costo hacen que la tecnología sea más accesible, lo que puede atraer a las pequeñas y medianas empresas que no se pueden permitir pagar los equipos costosos. Sin embargo, también se deben considerar las implicaciones éticas de la producción y el uso de hidrógeno. Aunque el hidrógeno se considera un combustible limpio, la producción de hidrógeno aún depende en gran medida de los combustibles fósiles, lo que puede tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud pública. Por lo tanto, es importante promover un enfoque responsable y sostenible para la producción y el uso de hidrógeno y tecnologías relacionadas.

Otra implicación social y ética que es necesaria considerar es la accesibilidad de esta tecnología a diferentes sectores y comunidades. Aunque los sensores de bajo coste pueden ser una solución asequible para pequeñas y medianas empresas, también es importante considerar cómo esta tecnología puede ser accesible a comunidades desfavorecidas o en países en desarrollo, donde la monitorización de gases y la calidad del aire son una preocupación importante.

En conclusión, este trabajo de investigación en el desarrollo de tecnología de monitorización y análisis de gases con sensores de bajo coste tiene implicaciones sociales y éticas importantes que deben ser consideradas. Es fundamental promover un enfoque responsable y sostenible en la producción y uso de hidrógeno y tecnologías relacionadas, garantizar la accesibilidad de esta tecnología a diferentes sectores y comunidades, y garantizar la seguridad en su uso en procesos industriales y de producción de energía.

ANEXO III: DATOS CALIBRACIÓN

Como se ha comentado en el subapartado, en el anexo se exponen los datos del sensor MQ-4 ante la presencia de gas CH₄. El resto de los datos obtenidos durante el proceso de calibración se encuentran en el siguiente URL [MedicionesTFG](#) (usuario: **MedicionesTFG**, contraseña: **LARRANAGATFG23**).

MEDIDAS MQ-8 SIN CARCASA (4 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,55	0,85	1,77	1,47	1,99
1,55	0,86	1,97	1,46	2,34
1,52	0,86	2,13	1,46	2,54
2,64	0,86	2,26	1,74	2,65
2,73	0,86	2,35	2,1	2,71
2,77	0,86	2,44	2,31	2,76
2,82	0,86	2,5	2,47	2,8
2,84	0,86	2,56	2,58	2,82
2,85	0,87	2,61	2,64	2,86
2,87	0,89	2,64	2,68	2,88
2,88	0,93	2,67	2,71	2,89
2,9	0,97	2,7	2,74	2,87
2,88	1	2,71	2,78	2,88
2,86	1,03	2,73	2,8	2,89
2,85	1,06	2,72	2,81	2,88
2,85	1,1	2,72	2,81	2,9
2,85	1,19	2,71	2,83	2,9
2,86	1,36	2,71	2,86	2,9
2,88	1,66	2,71	2,88	2,9
2,88	1,95	2,7	2,89	2,91
2,86	2,15	2,7	2,89	2,89
2,86	2,31	2,69	2,88	2,83
2,87	2,4	2,68	2,86	2,75
2,88	2,46	2,68	2,85	2,69
2,88	2,51	2,67	2,83	2,64
2,88	2,55	2,66	2,83	2,59
2,89	2,59	2,65	2,82	2,56
2,88	2,61	2,64	2,82	2,53
2,83	2,64	2,64	2,84	2,5
2,77	2,66	2,63	2,87	2,49
2,71	2,67	2,63	2,87	2,47
2,67	2,68	2,63	2,87	2,45
2,62	2,7	2,62	2,87	2,44
2,58	2,71	2,62	2,87	2,43
2,54	2,71	2,62	2,87	2,41
2,5	2,71	2,61	2,87	2,41
2,47	2,72	2,61	2,85	2,4
2,44	2,73	2,61	2,85	2,39
2,41	2,73	2,6	2,86	2,37
2,38	2,72	2,6	2,87	2,36
2,35	2,72	2,59	2,9	2,34
2,33	2,72	2,59	2,92	2,32
2,3	2,71	2,58	2,93	2,3
2,29	2,7	2,58	2,92	2,28

MEDIDAS MQ-8 SIN CARCASA (4 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
2,27	2,68	2,57	2,86	2,26
2,24	2,66	2,57	2,79	2,25
2,22	2,63	2,56	2,71	2,23
2,2	2,6	2,56	2,66	2,21
2,19	2,59	2,56	2,61	2,2
2,17	2,6	2,55	2,57	2,18
2,15	2,6	2,55	2,53	2,17
2,13	2,63	2,55	2,5	2,15
2,12	2,61		2,48	2,14
2,1	2,63		2,46	2,12
2,08	2,62		2,43	2,11
2,07	2,52		2,41	2,1
2,06	2,42		2,38	
2,04	2,33		2,36	
2,03	2,25		2,33	
2,02	2,17		2,31	
2	2,1		2,29	
1,99	2,04		2,27	
1,98	1,97		2,25	
1,97	1,91		2,23	
1,96	1,86		2,21	
1,95	1,81		2,19	
1,94	1,77		2,18	

MEDIDAS MQ-8 SIN CARCASA (6 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,62	1,44	1,46	1,46	1,51
1,61	1,44	1,46	1,46	1,52
1,61	1,44	1,46	1,46	1,51
1,61	1,44	1,46	1,46	1,51
1,61	1,44	1,46	2,25	1,51
1,61	1,99	1,77	2,42	2,71
2,16	2,25	2,21	2,61	2,75
2,43	2,41	2,47	2,71	2,79
2,58	2,46	2,61	2,77	2,83
2,67	2,5	2,71	2,82	2,85
2,73	2,57	2,79	2,86	2,86
2,78	2,62	2,84	2,89	2,86
2,81	2,67	2,86	2,89	2,88
2,84	2,72	2,86	2,87	2,88
2,87	2,76	2,88	2,86	2,91
2,88	2,78	2,89	2,9	2,92
2,9	2,77	2,9	2,93	2,92
2,91	2,76	2,9	2,92	2,9
2,93	2,8	2,91	2,9	2,82
2,94	2,81	2,9	2,89	2,75
2,95	2,79	2,89	2,91	2,7
2,96	2,74	2,89	2,93	2,66
2,97	2,78	2,89	2,92	2,64
2,98	2,8	2,87	2,92	2,61
2,99	2,81	2,84	2,92	2,59
2,97	2,81	2,76	2,93	2,57
2,94	2,8	2,7	2,92	2,55
2,95	2,79	2,81	2,86	2,54
2,96	2,79	2,88	2,79	2,52
2,98	2,81	2,88	2,74	2,5
2,98	2,85	2,88	2,69	2,48
2,97	2,88	2,87	2,65	2,45
2,96	2,89	2,8	2,6	2,42
2,95	2,88	2,72	2,56	2,39
2,93	2,9	2,66	2,53	2,36
2,94	2,93	2,61	2,5	2,34
2,95	2,92	2,56	2,46	2,31
2,92	2,89	2,52	2,44	2,29
2,85	2,82	2,5	2,41	2,27
2,79	2,75	2,46	2,39	2,25
2,73	2,69	2,44	2,36	2,23
2,68	2,63	2,41	2,34	2,21
2,63	2,58	2,39	2,32	2,19
2,58	2,53	2,37	2,3	2,17
2,53	2,49	2,34	2,28	2,15
2,48	2,44	2,32	2,26	2,13
2,44	2,41	2,3	2,25	2,11
2,39	2,38	2,28	2,23	2,09
2,35	2,35	2,26	2,22	2,08

MEDIDAS MQ-8 SIN CARCASA (8 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,44	1,5	1,51	1,5	1,32
1,44	1,5	1,51	1,51	1,32
1,44	1,5	1,51	1,51	1,32
1,44	1,5	1,51	1,5	1,32
2,59	1,5	1,5	1,5	1,32
2,65	1,5	1,48	1,49	1,32
2,71	1,49	1,48	1,59	1,32
2,76	2,83	1,48	1,96	1,32
2,82	2,87	1,48	2,13	1,74
2,85	2,91	1,48	2,29	2,22
2,88	2,93	1,73	2,46	2,43
2,89	2,93	2,08	2,6	2,59
2,9	2,92	2,32	2,75	2,71
2,94	2,93	2,47	2,87	2,79
2,95	2,92	2,61	2,93	2,84
2,96	2,93	2,74	2,96	2,87
2,94	2,92	2,81	2,99	2,89
2,95	2,91	2,87	3,01	2,9
2,96	2,87	2,92	3,03	2,89
2,96	2,79	2,95	3,02	2,89
2,95	2,74	3	3,03	2,91
2,97	2,7	3,04	3,04	2,91
2,97	2,68	3,04	3,02	2,92
2,94	2,65	3,03	3	2,94
2,86	2,63	3,03	3,01	2,96
2,79	2,62	3,05	3,02	2,99
2,73	2,6	3,07	3	2,98
2,69	2,58	3,08	3,02	2,98
2,66	2,55	3,09	3,05	2,99
2,63	2,53	3,1	3,06	2,98
2,59	2,5	3,1	3,05	2,95
2,55	2,48	3,09	3,03	2,86
2,52	2,45	3,1	3,02	2,77
2,49	2,42	3,11	3,03	2,71
2,45	2,39	3,12	3,06	2,64
2,42	2,37	3,13	3,04	2,58
2,39	2,34	3,12	3	2,52
2,37	2,32	3,12	2,91	2,48
2,35	2,3	3,12	2,84	2,44
2,33	2,28	3,11	2,76	2,39
2,32	2,26	3,11	2,71	2,36
2,3	2,25	3,1	2,65	2,33
2,29	2,23	3,09	2,6	2,31
2,27	2,21	3,1	2,56	2,29
2,26	2,2	3,12	2,51	2,26
2,25	2,18	3,11	2,48	2,23
2,23	2,17	3,08	2,44	2,2

MEDIDAS MQ-8 SIN CARCASA (10 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,32	1,45	1,4	1,45	1,42
1,33	1,45	1,4	1,45	2
1,32	1,45	1,4	1,45	2,18
1,33	1,59	1,4	1,45	2,43
1,83	2,06	1,4	2,01	2,64
2,3	2,39	1,8	2,42	2,79
2,56	2,6	2,32	2,67	2,89
2,73	2,76	2,56	2,8	2,91
2,85	2,84	2,74	2,89	2,94
2,91	2,9	2,89	2,95	3
2,95	2,95	2,98	3	3,05
2,95	3	3,03	3,04	3,1
2,95	3	3,04	3,05	3,11
2,98	3,01	3,06	3,02	3,08
3	3,03	3,08	3,04	3,06
3,02	3,06	3,1	3,04	3,11
3,01	3,07	3,11	3,05	3,12
2,99	3,05	3,08	3,04	3,13
2,97	3,03	3,06	3,03	3,13
2,98	2,96	3,03	3,08	3,13
2,95	2,94	3,01	3,08	3,12
2,9	2,92	3,02	3,11	3,12
2,81	2,91	3	3,11	3,11
2,76	2,88	3,01	3,09	3,07
2,84	2,97	3,02	3,11	2,97
2,86	3,02	3,04	3,11	2,89
2,83	2,94	3,06	3,09	2,81
2,73	2,81	3,11	3,08	2,74
2,63	2,71	3,14	3,1	2,69
2,61	2,62	3,16	3,13	2,64
2,74	2,55	3,08	3,11	2,59
2,93	2,49	2,96	3,06	2,55
2,94	2,43	2,86	2,95	2,51
2,85	2,39	2,78	2,87	2,48
2,76	2,34	2,71	2,79	2,45
2,7	2,3	2,65	2,71	2,42
2,64	2,27	2,58	2,64	2,39
2,57	2,23	2,52	2,57	2,37

MEDIDAS MQ-8 SIN CARCASA (12 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,4	1,47	1,52	1,51	1,52
2,99	1,47	1,51	1,51	1,51
3,06	1,47	1,51	1,51	2,5
3,1	1,47	1,51	1,51	2,79
3,13	1,46	1,51	1,49	2,97
3,19	1,47	1,51	1,49	3,06
3,22	2,08	1,94	1,49	3,11
3,22	2,51	2,38	1,49	3,18
3,19	2,74	2,66	1,49	3,22
3,19	2,9	2,85	1,62	3,23
3,2	3,01	2,96	2,17	3,24
3,2	3,09	3,04	2,56	3,25
3,21	3,12	3,11	2,84	3,21
3,21	3,13	3,15	3	3,22
3,21	3,13	3,17	3,09	3,15
3,2	3,14	3,19	3,14	3,17
3,19	3,14	3,2	3,18	3,26
3,15	3,15	3,24	3,18	3,39
3,1	3,19	3,25	3,18	3,3
3,05	3,23	3,26	3,15	3,19
3	3,29	3,27	3,14	3,09
2,95	3,33	3,26	3,18	3
2,94	3,33	3,24	3,22	2,92
2,92	3,34	3,26	3,26	2,83
2,97	3,35	3,29	3,29	2,75
3,03	3,36	3,32	3,29	2,68
3,06	3,34	3,32	3,28	2,62
3,1	3,33	3,32	3,31	2,56
3,18	3,31	3,33	3,34	2,5
3,28	3,33	3,36	3,39	2,46
3,3	3,33	3,4	3,4	2,41
3,17	3,35	3,4	3,38	2,37
3,04	3,35	3,4	3,37	2,33
2,92	3,32	3,43	3,38	2,29
2,82	3,24	3,45	3,44	2,26
2,74	3,15	3,38	3,45	2,22
2,66	3,07	3,24	3,41	2,19
2,6	2,99	3,11	3,27	2,16
2,53	2,92	3	3,13	2,13
2,48	2,84	2,9	3,02	2,1
2,42	2,78	2,81	2,92	2,08
2,37	2,72	2,72	2,84	2,05
2,32	2,66	2,65	2,76	2,03

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE CONCENTRACIÓN DE GASES PARA
SU EMPLEO EN SISTEMAS DE REFORMADO

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (4 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,26	0,93	0,99	1,09	0,98
1,46	0,99	0,99	1,09	1
1,63	1,14	0,99	1,09	1,15
1,75	1,31	0,99	1,09	1,38
1,86	1,49	0,99	1,1	1,56
1,94	1,63	1	1,1	1,7
2,01	1,74	1	1,1	1,82
2,08	1,83	1	1,1	1,92
2,13	1,91	1	1,1	2
2,17	1,98	1,01	1,1	2,07
2,18	2,04	1	1,1	2,13
2,23	2,09	1,01	1,1	2,18
2,26	2,13	1,01	1,1	2,23
2,29	2,17	1,02	1,1	2,26
2,31	2,21	1,16	1,1	2,29
2,34	2,24	1,4	1,1	2,31
2,36	2,27	1,6	1,11	2,34
2,38	2,29	1,77	1,11	2,36
2,39	2,32	1,9	1,12	2,38
2,41	2,34	2,01	1,28	2,39
2,42	2,36	2,09	1,48	2,4
2,44	2,38	2,17	1,65	2,42
2,44	2,39	2,23	1,78	2,43
2,45	2,41	2,28	1,88	2,43
2,46	2,42	2,32	1,97	2,44
2,47	2,43	2,35	2,05	2,45
2,48	2,45	2,38	2,12	2,44
2,48	2,45	2,4	2,17	2,44
2,49	2,46	2,42	2,21	2,44
2,49	2,47	2,44	2,25	2,44
2,5	2,48	2,45	2,29	2,4
2,5	2,48	2,46	2,31	2,44
2,5	2,49	2,47	2,33	2,41
2,5	2,49	2,47	2,35	2,39
2,49	2,5	2,47	2,37	2,37
2,49	2,5	2,48	2,39	2,34
2,49	2,5	2,47	2,4	2,34
2,5	2,51	2,47	2,41	2,29
2,48	2,51	2,45	2,42	2,19
2,49	2,51	2,36	2,43	2,18
2,45	2,52	2,3	2,43	2,14
2,46	2,52	2,25	2,43	2,1
2,45	2,52	2,19	2,41	2,07
2,43	2,52	2,15	2,39	2,04
2,47	2,52	2,1	2,39	2,01
2,47	2,53	2,06	2,4	1,98
2,45	2,53	2,03	2,4	1,95
2,43	2,53	1,99	2,39	1,93
2,44	2,53	1,96	2,36	1,9

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (4 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1
2,43	2,54	1,93	2,29	1,88
2,4	2,54	1,9	2,26	1,85
2,33	2,53	1,88	2,2	1,83
2,29	2,54	1,85	2,15	1,81
2,18	2,54	1,83	2,11	1,79
2,17	2,54	1,81	2,08	1,77
2,13	2,54	1,79	2,04	1,75
2,09	2,54	1,77	2	1,73
2,06	2,54	1,75	1,97	1,72
2,02	2,54	1,73	1,94	1,7
1,99	2,54	1,72	1,91	1,69
1,96	2,54	1,7	1,89	1,67
1,93	2,54	1,69	1,87	1,66
1,9	2,54	1,68	1,85	1,65
1,88	2,54	1,67	1,82	1,64
1,86	2,53	1,66	1,8	
1,84	2,49	1,64	1,78	
1,82	2,51		1,76	
1,8	2,49		1,74	
1,78	2,4		1,73	
1,76	2,4		1,71	
1,74	2,32		1,7	
1,73	2,27		1,68	

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (6 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,47	1,48	0,87	1,61	1,17
1,76	1,68	0,87	1,81	1,43
1,98	1,83	0,89	1,95	1,69
2,14	1,93	1,18	2,08	1,88
2,28	2,04	1,49	2,18	2,04
2,37	2,11	1,74	2,27	2,16
2,45	2,17	1,94	2,34	2,27
2,51	2,23	2,09	2,41	2,36
2,56	2,26	2,21	2,46	2,43
2,6	2,3	2,3	2,5	2,49
2,63	2,34	2,38	2,54	2,53
2,66	2,37	2,45	2,57	2,57
2,68	2,4	2,51	2,59	2,6
2,7	2,43	2,55	2,62	2,63
2,71	2,43	2,59	2,64	2,65
2,71	2,45	2,63	2,65	2,67
2,72	2,48	2,65	2,66	2,69
2,73	2,49	2,67	2,67	2,68
2,74	2,51	2,7	2,68	2,69
2,74	2,52	2,71	2,69	2,7
2,74	2,52	2,73	2,69	2,7
2,74	2,54	2,74	2,7	2,71
2,71	2,56	2,75	2,7	2,71
2,71	2,57	2,75	2,71	2,71
2,69	2,57	2,76	2,71	2,7
2,69	2,57	2,77	2,71	2,71
2,69	2,58	2,77	2,71	2,71
2,69	2,57	2,75	2,71	2,67
2,62	2,59	2,76	2,71	2,68
2,57	2,59	2,71	2,7	2,69
2,47	2,59	2,81	2,7	2,66
2,39	2,59	2,73	2,69	2,68
2,32	2,59	2,71	2,69	2,68
2,26	2,56	2,71	2,68	2,66
2,21	2,58	2,72	2,67	2,58
2,16	2,56	2,71	2,69	2,48
2,11	2,54	2,71	2,66	2,39
2,07	2,55	2,68	2,64	2,31
2,03	2,54	2,68	2,63	2,26
1,99	2,53	2,67	2,62	2,2
1,96	2,53	2,66	2,61	2,15
1,93	2,52	2,66	2,53	2,11
1,9	2,52	2,64	2,44	2,07
1,88	2,52	2,56	2,37	2,03
1,86	2,5	2,46	2,31	2
1,83	2,47	2,39	2,25	1,97
1,81	2,37	2,31	2,2	1,94
1,79	2,3	2,26	2,15	1,91
1,77	2,26	2,2	2,11	1,88

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (8 ML)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,52	1,14	1,28	1,17	1,66
1,82	1,14	1,28	1,17	1,64
2,05	1,14	1,29	1,17	1,63
2,23	1,42	1,29	1,18	1,64
2,36	1,72	1,37	1,18	1,64
2,46	2	1,73	1,18	1,64
2,54	2,2	1,99	1,19	1,65
2,61	2,35	2,19	1,54	1,65
2,67	2,47	2,35	1,86	1,67
2,71	2,55	2,47	2,1	1,66
2,75	2,61	2,56	2,29	1,66
2,77	2,67	2,64	2,44	1,66
2,8	2,71	2,7	2,55	1,66
2,82	2,74	2,74	2,64	1,66
2,83	2,77	2,78	2,7	1,66
2,84	2,79	2,8	2,75	1,66
2,86	2,81	2,83	2,79	1,67
2,86	2,83	2,85	2,83	1,67
2,87	2,84	2,86	2,85	1,67
2,88	2,86	2,88	2,86	1,67
2,89	2,87	2,89	2,88	1,67
2,89	2,88	2,89	2,89	1,67
2,89	2,89	2,9	2,9	1,71
2,9	2,9	2,9	2,91	1,95
2,9	2,91	2,91	2,91	2,19
2,91	2,92	2,91	2,92	2,35
2,92	2,91	2,91	2,92	2,49
2,92	2,92	2,91	2,93	2,59
2,92	2,92	2,89	2,94	2,67
2,92	2,92	2,89	2,94	2,73
2,91	2,92	2,89	2,94	2,77
2,91	2,92	2,89	2,94	2,81
2,9	2,93	2,89	2,94	2,84
2,88	2,96	2,91	2,94	2,86
2,9	2,96	2,91	2,94	2,88
2,9	2,92	2,92	2,87	2,89
2,88	2,81	2,91	2,91	2,9
2,85	2,74	2,95	2,89	2,9
2,85	2,67	2,93	2,91	2,91
2,91	2,59	2,93	2,92	2,91
2,9	2,52	2,92	2,91	2,91
2,9	2,46	2,89	2,91	2,91
2,91	2,41	2,89	2,9	2,92
2,86	2,35	2,88	2,89	2,92
2,75	2,3	2,92	2,88	2,92
2,66	2,26	2,92	2,92	2,92
2,57	2,21	2,92	2,89	2,92
2,49	2,17	2,91	2,88	2,92

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (8 ML)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1
2,42	2,13	2,91	2,87	2,92
2,35	2,09	2,91	2,83	2,92
2,3	2,07	2,89	2,75	2,92
2,25	2,03	2,89	2,66	2,91
2,2	2	2,78	2,56	2,91
2,16	1,98	2,67	2,49	2,9
2,12	1,95	2,57	2,42	2,89
2,08	1,93	2,49	2,36	2,89
2,05	1,91	2,42	2,29	2,89
2,02	1,89	2,35	2,24	2,89
1,99	1,88	2,29	2,19	2,89
1,96	1,86	2,25	2,14	2,88
1,94	1,84	2,2	2,1	2,85
1,91	1,83	2,15	2,07	2,84
1,89	1,81	2,11	2,03	2,84
1,87	1,8	2,07	2	2,83
1,85	1,78	2,04	1,97	2,82
1,84	1,77	2,01	1,94	2,76

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (10 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,25	1,33	1,47	1,36	1,83
1,26	1,34	1,48	1,37	1,83
1,26	1,35	1,48	1,37	1,83
1,27	1,35	1,48	1,38	1,83
1,27	1,36	1,48	1,38	1,84
1,27	1,37	1,49	1,38	1,86
1,27	1,37	1,5	1,39	1,85
1,58	1,38	1,5	1,39	1,85
1,89	1,39	1,5	1,4	1,84
2,16	1,39	1,51	1,4	1,83
2,36	1,4	1,52	1,4	1,82
2,5	1,41	1,73	1,41	1,82
2,62	1,41	2,04	1,41	1,83
2,7	1,41	2,27	1,41	1,83
2,77	1,41	2,43	1,42	1,84
2,81	1,42	2,55	1,42	1,84
2,85	1,42	2,65	1,42	1,88
2,88	1,43	2,71	1,42	2,18
2,9	1,42	2,76	1,42	2,4
2,91	1,43	2,81	1,43	2,55
2,92	1,43	2,84	1,43	2,66
2,93	1,44	2,87	1,43	2,75
2,95	1,45	2,89	1,44	2,82
2,96	1,45	2,91	1,44	2,89
2,97	1,45	2,92	1,44	2,94
2,98	1,46	2,93	1,44	2,99
3	1,69	2,94	1,45	3,02
3,02	2,05	2,96	1,46	3,04
3,04	2,28	2,97	1,76	3,06
3,05	2,45	2,98	2,05	3,08
3,06	2,58	2,99	2,27	3,1
3,05	2,68	3	2,43	3,11
3,03	2,76	3,01	2,55	3,12
3,08	2,81	3,03	2,64	3,13
3,09	2,86	3,04	2,71	3,14
3,07	2,89	3,06	2,77	3,15
3,1	2,92	3,08	2,82	3,15
3,11	2,93	3,09	2,86	3,15
3,04	2,94	3,11	2,89	3,13
3,1	2,96	3,13	2,92	3,17
3,04	2,96	3,13	2,94	3,17
3	2,98	3,15	2,96	3,17
3,07	2,99	3,16	2,98	3,18
3,07	2,99	3,18	2,99	3,18
3,09	3	3,18	3,01	3,18
3,13	3,01	3,17	3,02	3,19
3,08	3,02	3,18	3,03	3,19
3,05	3,03	3,18	3,04	3,17
3,07	3,04	3,17	3,06	3,18

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (10 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1
3,08	3,05	3,08	3,07	3,13
3,03	3,06	3,14	3,08	3,14
3,08	3,05	3,15	3,09	3,15
3,09	3,07	3,15	3,1	3,14
3,11	3,08	3,15	3,11	3,17
3,06	3,09	3,15	3,11	3,14
3,09	3,09	3,15	3,11	3,16
3,09	3,1	3,15	3,11	3,17
3,13	3,1	3,15	3,11	3,14
3,06	3,12	3,14	3,12	3,15
3,09	3,13	3,13	3,1	3,16
3,09	3,13	3,12	3,11	3,17
3	3,14	3,1	3,1	3,16
3,07	3,14	3,11	3,12	3,14
3,06	3,15	3,1	3,12	3,13
2,94	3,14	3,11	3,13	3,13
3,02	3,14	3,11	3,12	3,13
2,96	3,14	3,11	3,12	3,13
3,05	3,12	3,11	3,13	3,13
3,04	3,12	3,1	3,13	3,11
2,97	3,13	3,1	3,12	3,11
2,86	3,1	3,1	3,13	3,1
2,78	3,12	3,1	3,11	3,08
2,68	3,13	3,1	2,99	3,07
2,58	3,13	3,1	2,86	3,06
2,5	3,13	3,09	2,76	3,07
2,42	3,12	3,1	2,67	3,05
2,35	3,12	3,09	2,59	3,06
2,29	3,12	2,99	2,52	2,97
2,24	3,12	2,84	2,45	2,98
2,18	3,11	2,71	2,39	2,87
2,13	3,11	2,61	2,33	2,75
2,08	3,1	2,52	2,28	2,65
2,04	2,98	2,44	2,23	2,56
2	2,83	2,37	2,19	2,49
1,97	2,75	2,3	2,15	2,41
1,94	2,6	2,25	2,11	2,35

MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (12 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 2	REPETICIÓN 3	REPETICIÓN 4	REPETICIÓN 5
1,07	2,5	1,42	1,55	1,74
1,06	2,5	1,42	1,55	1,74
1,09	2,5	1,42	1,55	1,74
1,48	2,5	1,42	1,55	1,74
1,85	2,5	1,42	1,56	1,75
2,1	2,56	1,42	1,56	1,75
2,31	2,74	1,42	1,56	1,75
2,48	2,9	1,42	1,56	1,75
2,61	3,01	1,42	1,56	1,75
2,7	3,09	1,42	1,57	1,75
2,77	3,15	1,42	1,57	1,75
2,83	3,19	1,43	1,57	1,97
2,87	3,22	1,42	1,57	2,28
2,91	3,24	1,42	1,58	2,52
2,93	3,26	1,43	1,57	2,7
2,96	3,26	1,43	1,56	2,82
2,98	3,27	1,43	1,55	2,91
2,99	3,27	1,43	1,55	2,97
3,02	3,28	1,44	1,56	3,01
3,04	3,28	1,86	1,56	3,04
3,05	3,29	2,22	1,56	3,06
3,07	3,3	2,47	1,56	3,08
3,09	3,31	2,64	1,56	3,09
3,12	3,33	2,76	1,56	3,11
3,14	3,35	2,84	1,56	3,12
3,17	3,36	2,91	1,57	3,13
3,2	3,37	2,96	1,57	3,15
3,23	3,39	2,99	1,57	3,18
3,26	3,39	3,02	1,57	3,2
3,29	3,4	3,04	1,57	3,23
3,32	3,41	3,06	1,57	3,24
3,34	3,41	3,07	1,57	3,26
3,33	3,38	3,09	1,58	3,28
3,36	3,39	3,11	1,58	3,29
3,39	3,38	3,13	1,58	3,3
3,41	3,39	3,17	1,58	3,31
3,43	3,39	3,19	1,58	3,32
3,45	3,39	3,22	1,58	3,31
3,48	3,39	3,24	1,58	3,31
3,48	3,39	3,26	1,58	3,27
3,49	3,39	3,28	1,58	3,3
3,49	3,39	3,3	1,59	3,3
3,5	3,39	3,31	1,58	3,3
3,49	3,4	3,32	1,59	3,31
3,47	3,4	3,33	1,59	3,25
3,48	3,4	3,33	1,71	3,31
3,48	3,4	3,34	2,03	3,31
3,48	3,4	3,35	2,26	3,31
3,49	3,37	3,35	2,46	3,3

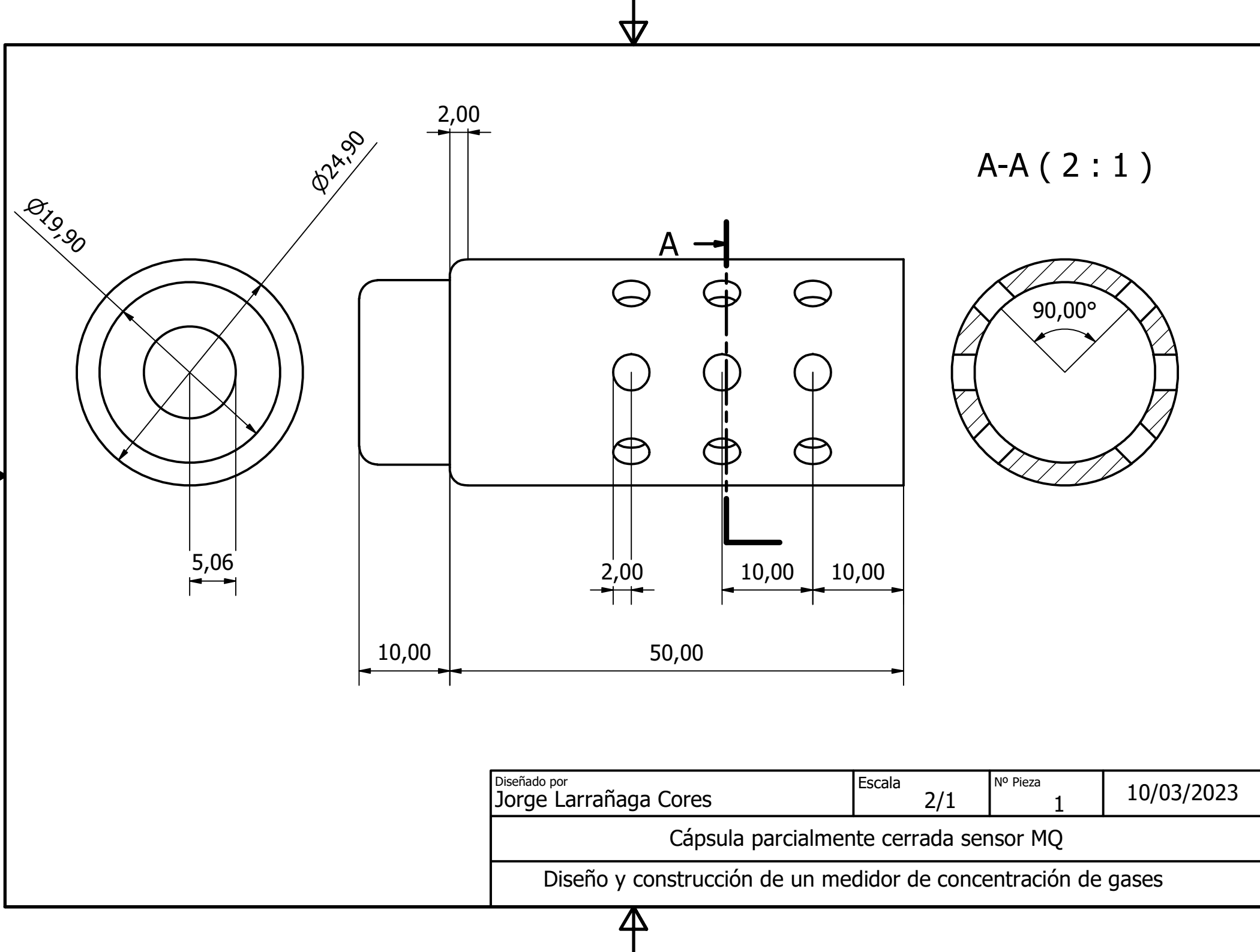
MEDIDAS MQ-8 CON CARCASA (12 ml)				
REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1	REPETICIÓN 1
3,5	3,38	3,35	2,61	3,3
3,47	3,37	3,34	2,72	3,28
3,5	3,35	3,35	2,81	3,15
3,49	3,37	3,34	2,88	3,22
3,49	3,37	3,34	2,93	3,25
3,48	3,37	3,34	2,97	3,22
3,49	3,39	3,33	3	3,26
3,5	3,38	3,34	3,03	3,26
3,5	3,37	3,34	3,05	3,16
3,5	3,34	3,32	3,07	3,19
3,5	3,37	3,36	3,08	3,19
3,5	3,37	3,34	3,1	3,17
3,5	3,38	3,31	3,12	3,05
3,5	3,37	3,37	3,14	3,22
3,5	3,37	2,96	3,17	3,25
3,5	3,37	3,22	3,2	3,25
3,5	3,36	3,27	3,23	3,25
3,5	3,35	3,33	3,26	3,25
3,5	3,34	3,31	3,3	3,25
3,5	3,35	3,2	3,33	3,25
3,49	3,34	3,23	3,35	3,24
3,49	3,34	3,24	3,36	3,24
3,49	3,34	3,24	3,37	3,23
3,49	3,34	3,24	3,37	3,22
3,49	3,34	3,24	3,37	3,22
3,48	3,34	3,24	3,37	3,22
3,48	3,33	3,23	3,38	3,21
3,48	3,33	3,23	3,38	3,21
3,48	3,33	3,23	3,38	3,22
3,48	3,33	3,23	3,38	3,22
3,47	3,33	3,23	3,32	3,22
3,47	3,33	3,22	3,28	3,21
3,47	3,33	3,22	3,26	3,19
3,47	3,33	3,22	3,36	3,18
3,46	3,33	3,22	3,33	3,14
3,46	3,33	3,22	3,35	3,13
3,46	3,32	3,22	3,35	3,13
3,46	3,32	3,21	3,34	3,13
3,45	3,32	3,22	3,33	3,13
3,45	3,32	3,21	3,34	3,13
3,45	3,32	3,21	3,34	3,15
3,44	3,31	3,21	3,34	3,15
3,44	3,31	3,21	3,33	3,16
3,44	3,31	3,21	3,33	3,16
3,44	3,31	3,21	3,33	3,16
3,43	3,31	3,21	3,33	3,15
	3,31	3,2	3,33	3,16
	3,3	3,2	3,33	3,16
	3,3	3,2	3,33	3,16

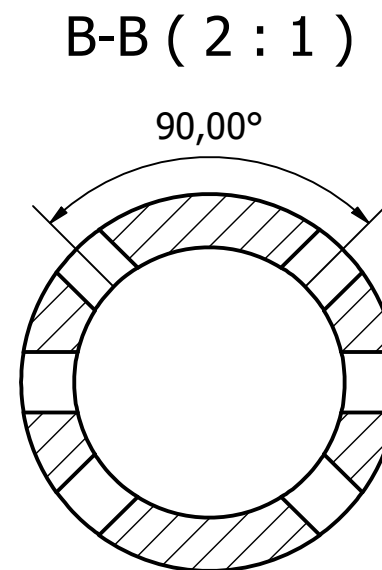
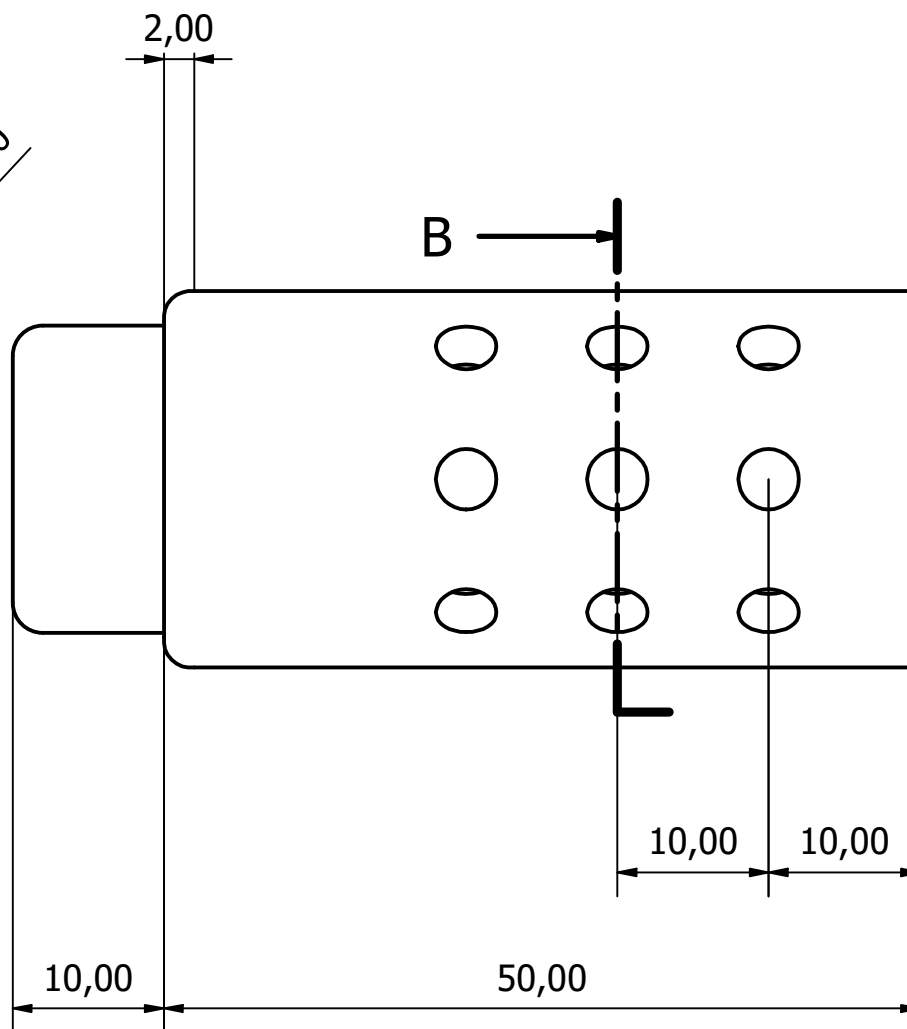
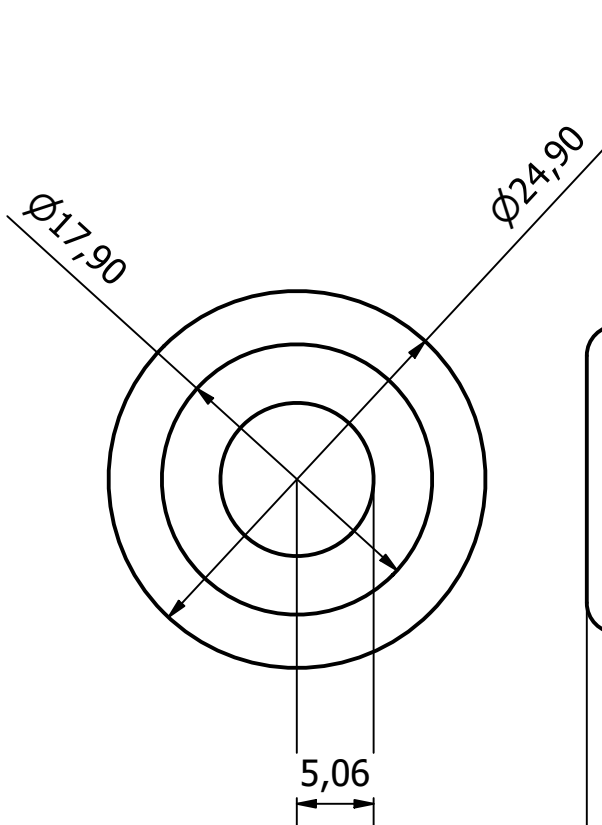
ANEXO IV: PLANOS

En el presente anexo se incluyen los planos de las piezas impresas en 3D, diseñadas en el software Autodesk Inventor para la realización de este trabajo de fin de grado. Estas piezas han sido esenciales para el desarrollo del proyecto, permitiendo la construcción de elementos clave para la calibración de los sensores y para la realización de mediciones en línea.

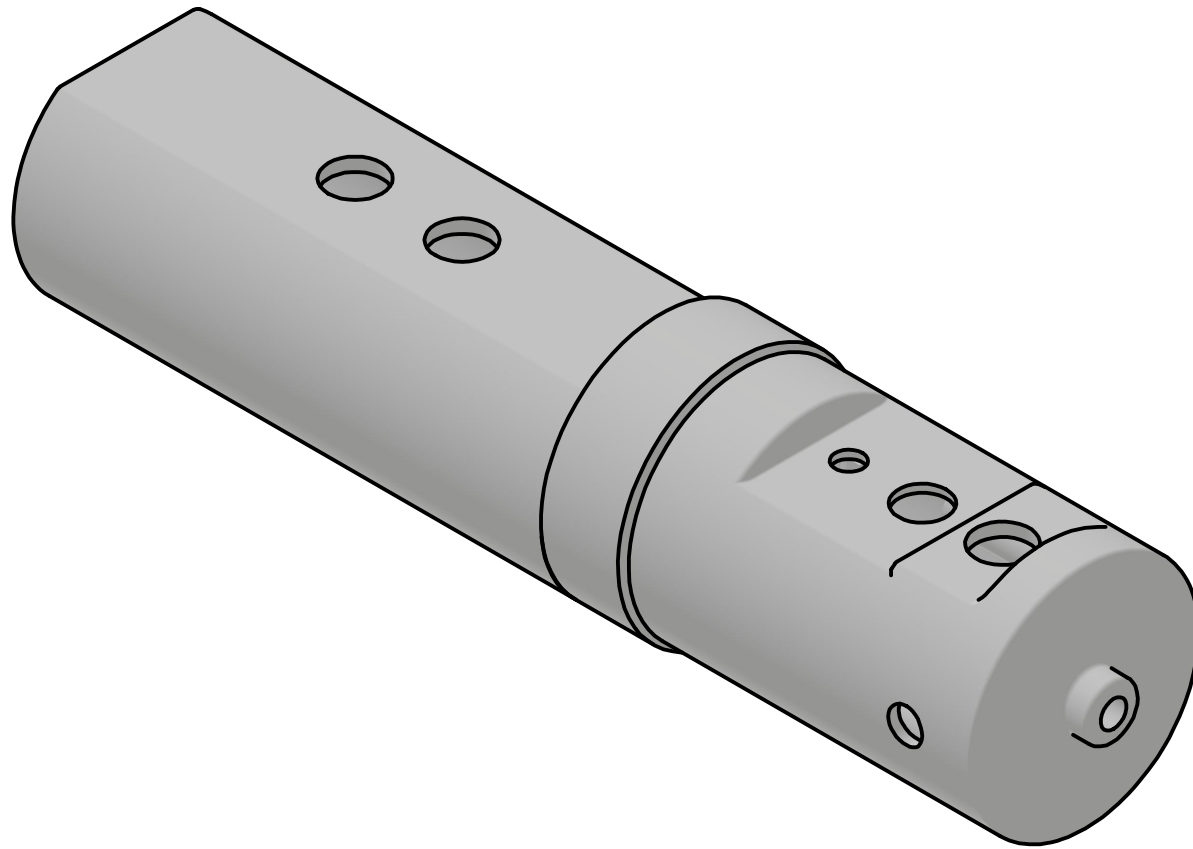
El anexo se compone de los siguientes planos:

- Plano 1: Cápsula parcialmente cerrada sensor MQ
- Plano 2: Cápsula parcialmente cerrada sensor MQ-7
- Plano 3: Ensamblaje tubo de medición
- Plano 4: Tubo de medición (1ª Pieza)
- Plano 5: Tubo de medición (2ª Pieza)

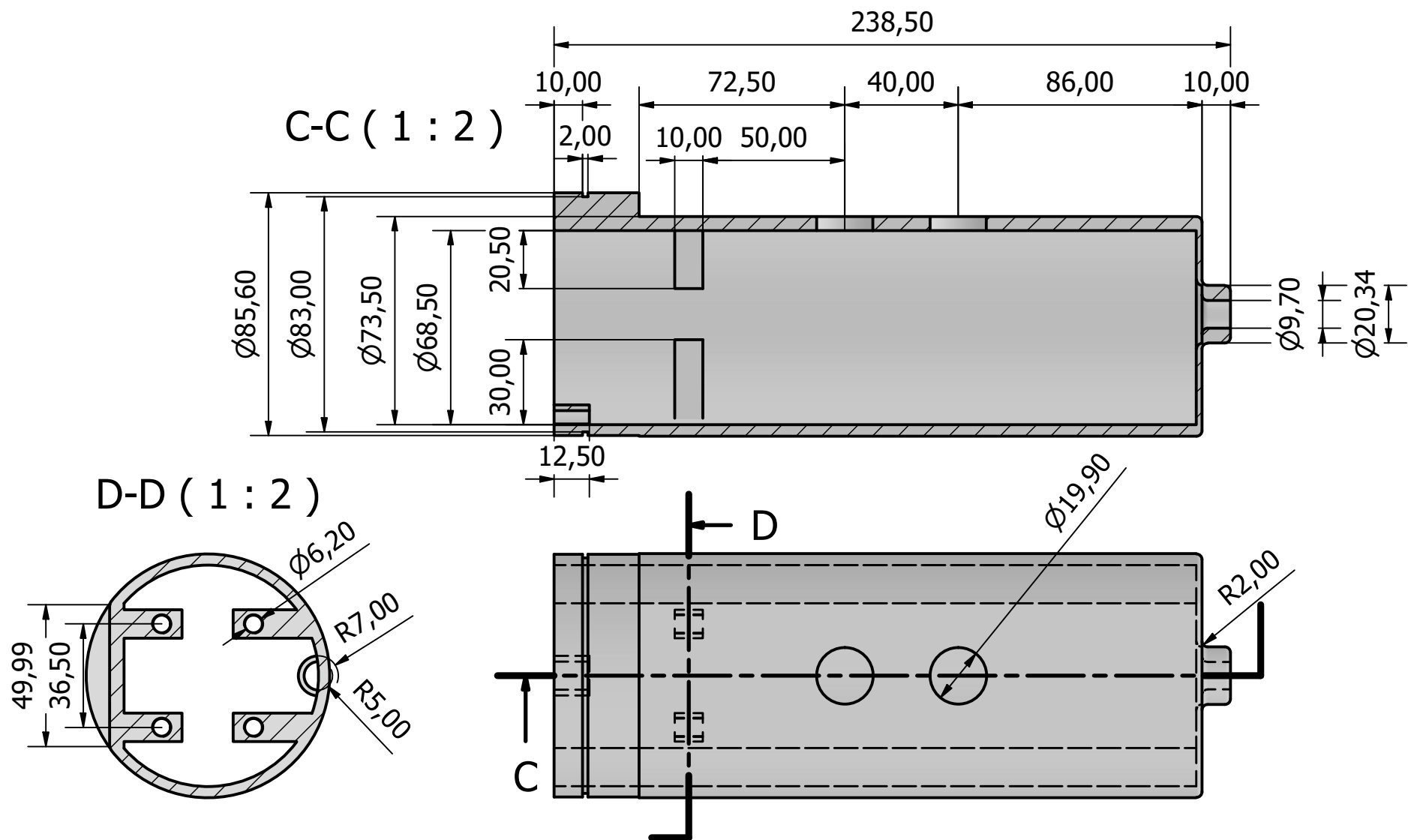




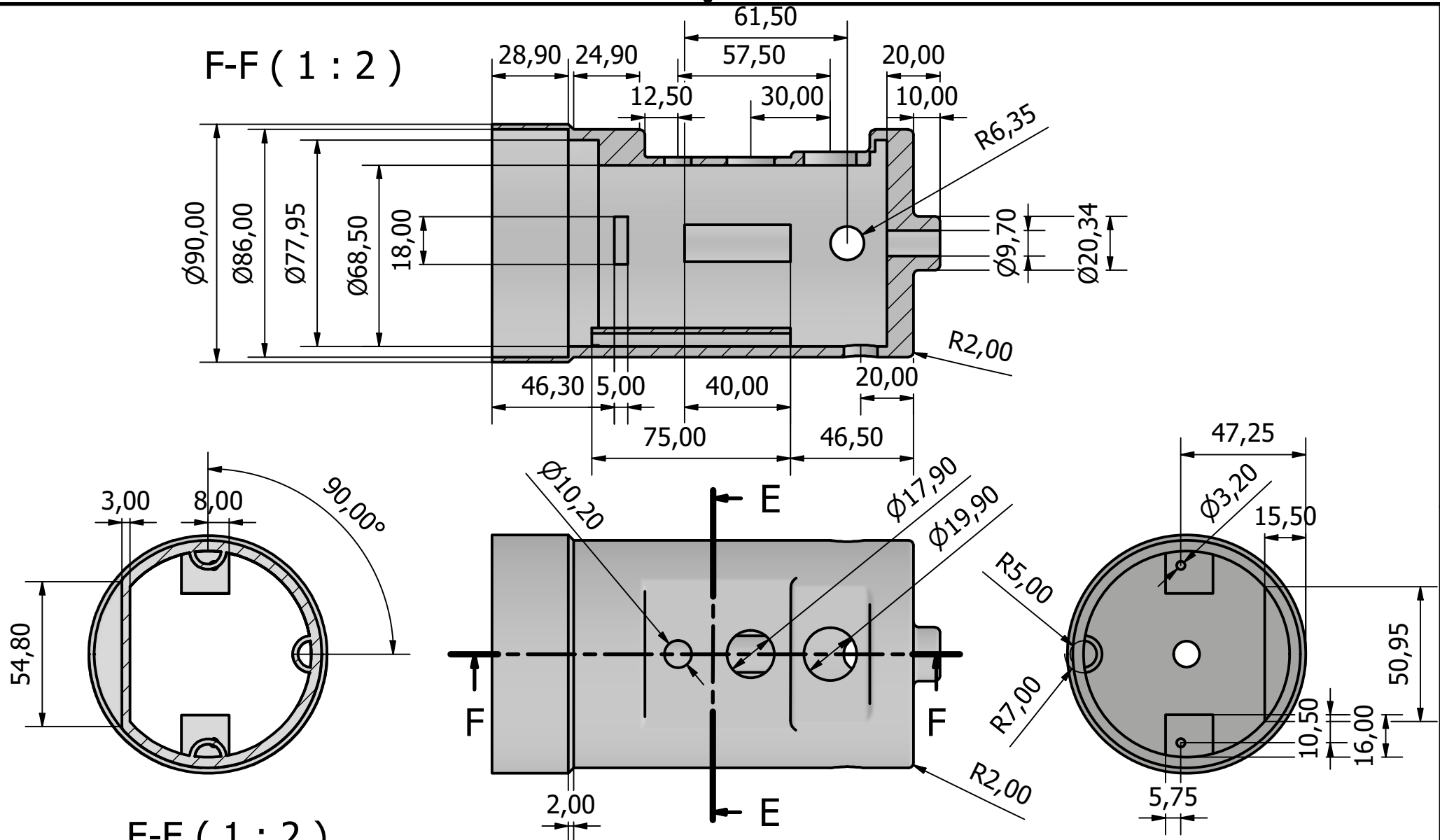
Diseñado por Jorge Larrañaga Cores	Escala 2/1	Nº Pieza 2	10/03/2023
Cápsula parcialmente cerrada sensor MQ-7			
Diseño y construcción de un medidor de concentración de gases			



Diseñado por Jorge Larrañaga Cores	Escala 1/2	Nº Pieza 3	10/03/2023
Ensamblaje Tubo de medición			
Diseño y construcción de un medidor de concentración de gases			



Diseñado por Jorge Larrañaga Cores	Escala 1/2	Nº Pieza 4	10/03/2023
Tubo de medición (1ª Pieza)			
Diseño y construcción de un medidor de concentración de gases			



Diseñado por Jorge Larrañaga Cores	Escala 1/2	Nº Pieza 5	10/03/2023
Tubo de medición (2ª Pieza)			
Diseño y construcción de un medidor de concentración de gases			

ANEXO V: CÓDIGO ARDUINO

Con el siguiente anexo se expone el código elaborado en la plataforma Arduino para la calibración de los sensores, cálculo de las concentraciones en ppm, cálculo de la temperatura, presión y humedad, visualización en la pantalla LCD y para la transmisión de datos a la página web de Thinkspeak a través del procesador ESP8266.

```
//introducción de librerías//
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Arduino.h>
#include <BME280I2C.h>
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_SHT31.h"
//inicialización sensores//
const int PIN_MQ8 = A0;
const int PIN_MQ7 = A1;
const int PIN_FIGARO = A2;
const int PIN_MQ135 = A3;
const int PIN_MQ4 = A7;
const int PIN_LED = 13;
//inicializaciones constantes de concentración//
float CONPPM_Mq4 = 0;
float CONPPM_Mq7 = 0;
float CONPPM_Mq8 = 0;
float CONPPM_Mq135 = 0;
float CONPPM_TGS2600 = 0;
//inicialización datos temperatura, humedad y presión//
float Temp_SHT31 = 0;
float Temp_BME280 = 0;
float Hum = 0;
float Pres = 0;
```

//inicialización constantes calibración teórica//

float Ro_Mq4 = 0.581;

float Ro_Mq7 = 5.857;

float Ro_Mq8 = 0.218;

float Ro_Mq135 = 261.179;

float Ro_TGS2600 = 9.706;

float YrefMq4 = 0.255;

float YrefMq7 = 0.220;

float YrefMq8 = 0.932;

float YrefMq135 = 0.371;

float YrefTGS2600 = 0.000;

float XrefMq4 = 2.301;

float XrefMq7 = 1.699;

float XrefMq8 = 2.301;

float XrefMq135 = 1.000;

float XrefTGS2600 = 0;

float PenMq4 = -0.360;

float PenMq7 = -0.665;

float PenMq8 = -1.445;

float PenMq135 = -0.360;

float PenTGS2600 = -0.077;

//inicialización contadores//

int Cont = 0;

int Bienvenida = 1;

```
//inicialización pantalla LCD//
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31();
BME280I2C bme;
byte degree[8] = {
    0b00011,
    0b00011,
    0b00000,
    0b00000,
    0b00000,
    0b00000,
    0b00000,
    0b00000
};
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial)
        delay(10);
    testSht31();
    Wire.begin();
    testBmp280();
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    Serial1.begin (9600);
    while (!Serial1)
        delay(10);
}
```

```
void loop() {  
  // Lectura de sensores //  
  readMqSensors();  
  readFigaro();  
  readSht31();  
  readBme280();  
  readESP8266 ();  
  Serial.println();  
  //Ejecución ciclo de la pantalla LCD//  
  if (Bienvenida == 1) {  
    Pantalla_0();  
    Bienvenida = 0;  
  }  
  else if (Cont == 1) {  
    Pantalla_1();  
  }  
  else if (Cont == 2) {  
    Pantalla_2();  
  }  
  else if (Cont == 3) {  
    Pantalla_3();  
  }  
  
  Cont += 1;  
  if (Cont > 3) {  
    Cont = 0;  
  }  
  delay(5000);  
}
```

```
void testSht31() {
  Serial.println("SHT31 test");
  if (!sht31.begin(0x44)) {
    Serial.println("Couldn't find SHT31");
    while (1) delay(1);
  }
}

void testBmp280() {
  while(!bme.begin()) {
    Serial.println("Could not find BME280 sensor!");
    delay(1000);
  }
  switch(bme.chipModel()) {
    case BME280::ChipModel_BME280:
      Serial.println("Found BME280 sensor! Success.");
      break;
    case BME280::ChipModel_BMP280:
      Serial.println("Found BMP280 sensor! No Humidity available.");
      break;
    default:
      Serial.println("Found UNKNOWN sensor! Error!");
  }
}

//cálculo de las concentraciones en ppm//
void readMqSensors() {
  float VoltsMq4 = analogRead(PIN_MQ4) * 5.0 / 1024;
  float Rs_Mq4 = 2.0*(5.0 -VoltsMq4)/VoltsMq4;
  float Rat_Mq4 = Rs_Mq4/Ro_Mq4;
  CONPPM_Mq4 = pow(10,(((log(Rat_Mq4)- YrefMq4)/PenMq4) + XrefMq4));
  float VoltsMq7 = analogRead(PIN_MQ7) * 5.0 / 1024;
  float Rs_Mq7 = 10.0*(5.0 -VoltsMq7)/VoltsMq7;
  float Rat_Mq7 = Rs_Mq7/Ro_Mq7;
  CONPPM_Mq7 = pow(10,(((log(Rat_Mq7)- YrefMq7)/PenMq7) + XrefMq7));
  float VoltsMq8 = analogRead(PIN_MQ8) * 5.0 / 1024;
  float Rs_Mq8 = 2.0*(5.0 -VoltsMq8)/VoltsMq8;
  float Rat_Mq8 = Rs_Mq8/Ro_Mq8;
```

```

CONPPM_Mq8 = pow(10,(((log(Rat_Mq8)- YrefMq8)/PenMq8) + XrefMq8));
float VoltsMq135 = analogRead(PIN_MQ135) * 5.0 / 1024;
float Rs_Mq135 = 47.0*(5.0 -VoltsMq135)/VoltsMq135;
float Rat_Mq135 = Rs_Mq135/Ro_Mq135;
CONPPM_Mq135 = pow(10,(((log(Rat_Mq135)- YrefMq135)/PenMq135) + XrefMq135));
//Sacar por la pantalla de Arduino el valor del voltaje y la concentración //
printMqValues(VoltsMq8, VoltsMq135, VoltsMq4, VoltsMq7, CONPPM_Mq4, CONPPM_Mq7,
CONPPM_Mq8, CONPPM_Mq135);
}

void printMqValues(float VoltsMq8, float VoltsMq135, float VoltsMq4, float VoltsMq7, float
CONPPM_Mq4, float CONPPM_Mq7, float CONPPM_Mq8, float CONPPM_Mq135 ) {
    Serial.println ("Valor en voltios de Sensor MQ-4 (Metano): " + String(VoltsMq4,5));
    Serial.println ("Valor en voltios de Sensor MQ-7 (CO): " + String(VoltsMq7,5));
    Serial.println ("Valor en voltios de Sensor MQ-8 (H2): " + String(VoltsMq8,5));
    Serial.println ("Valor en voltios de Sensor MQ-135 (CO2): " + String(VoltsMq135,5));
    Serial.println ("CH4: " + String(CONPPM_Mq4,5)+" PPM");
    Serial.println ("CO: " + String(CONPPM_Mq7,5)+" PPM");
    Serial.println ("H2: " + String(CONPPM_Mq8,5)+" PPM");
    Serial.println ("CO2: " + String(CONPPM_Mq135,5)+" PPM");
}

void readSht31() {
    float Temperature = sht31.readTemperature();
    float Humidity = sht31.readHumidity();
    if (!isnan(Temperature)) {
        Serial.println("SHT31");
        Serial.println("Temp *C = " + String(Temperature));
        Serial.println("Hum = " + String(Humidity));
    } else {
        Serial.println("Failed to read");
        lcd.print("Temperature Error");
    }
    Temp_SHT31 = Temperature;
    Hum = Humidity;
}

```

```
void readBme280() {
  float Temperature(NAN), Humidity(NAN), Pressure(NAN);
  BME280::TempUnit tempUnit(BME280::TempUnit_Celsius);
  BME280::PresUnit presUnit(BME280::PresUnit_Pa);
  bme.read(Pressure, Temperature, Humidity, tempUnit, presUnit);
  Serial.println("BME280");
  Serial.println("Temp *C = " + String(Temperature));
  Serial.println("Presion = " + String(Pressure/101325,5));
  Temp_BME280 = Temperature;
  Pres = Pressure/101325;
}

void readFigaro() {
  float Temp = (Temp_SHT31 + Temp_BME280)/2;
  float sensorValue = analogRead(PIN_FIGARO) * 5.0/1023;
  float Rs_TGS2600 = ((5.0*5.0)/sensorValue) - 5.0;
  float Rat_TGS2600 = Rs_TGS2600/Ro_TGS2600;
  float Rat_corr_TGS2600 = Rat_TGS2600 *(0.024+(0.0072*Hum)+(0.0246*Temp));
  CONPPM_TGS2600 = pow(10,(((log(Rat_corr_TGS2600)- YrefTGS2600)/PenTGS2600) +
XrefTGS2600));
  // turn the PIN_LED on
  digitalWrite(PIN_LED, HIGH);
  // stop the program for <sensorValue> milliseconds:
  delay(sensorValue);
  // turn the PIN_LED off:
  digitalWrite(PIN_LED, LOW);
  // stop the program for for <sensorValue> milliseconds:
  delay(sensorValue);
  Serial.println("Valor en voltios de sensor TGS2600 (CH4):" + String(sensorValue,5));
  Serial.println ("CH4_TGS2600: " + String(CONPPM_TGS2600,5)+" PPM");
}
```



```
//Visualización de la pantalla LCD//
void Pantalla_0(){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("HOLA BUENOS DIAS");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("CIENCIA EN ACCION");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("ANALIZANDO EL AIRE");
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("BIENVENIDO AL SIST");
}
void Pantalla_1(){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("MED.SENSORES(1/2)");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("CH4: " + String(CONPPM_Mq4,5)+" PPM");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("CO: " + String(CONPPM_Mq7,5)+" PPM");
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("H2: " + String(CONPPM_Mq8,5)+" PPM");
}
void Pantalla_2(){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("MED.SENSORES(2/2)");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("CO2: " + String(CONPPM_Mq135,5)+" PPM");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("CH4_TGS: " + String(CONPPM_TGS2600,5)+" PPM");
```

```
}  
void Pantalla_3(){  
  float Temp = (Temp_SHT31 + Temp_BME280)/2;  
  lcd.clear();  
  lcd.setCursor(0,0);  
  lcd.print("TEMP, HUM.REL Y PRES");  
  lcd.setCursor(0,1);  
  lcd.print("TEMP: " + String(Temp,2)+" C");  
  lcd.setCursor(0,2);  
  lcd.print("HUM.REL: " + String(Hum,2)+" %");  
  lcd.setCursor(0,3);  
  lcd.print("PRES: " + String(Pres,4)+" atm");  
}  
//Envío de datos al procesador ESP8266 //  
void readESP8266 (){  
  float Temp = (Temp_SHT31 + Temp_BME280)/2;  
  Serial1.println (String(CONPPM_Mq4,5) + ";" + String(CONPPM_Mq7,5) + ";" +  
String(CONPPM_Mq8,5) + ";" + String(CONPPM_Mq135,5) + ";" +  
String(CONPPM_TGS2600,5) + ";" + String(Temp,2) + ";" + String(Hum,2) + ";" + String(Pres,4)  
+ ";");  
}
```