

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



Grado en Ingeniería Informática

TRABAJO FIN DE GRADO

Módulo para detección de gas traza geoespacial

Autor: Álvaro Sosa Herrera

Tutor: Stefan Palzer

junio 2020

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con la autorización de los titulares de la propiedad intelectual.

La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (*arts. 270 y sgts. del Código Penal*).

DERECHOS RESERVADOS

© por UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Francisco Tomás y Valiente, nº 11

Madrid, 28049

Spain

Álvaro Sosa Herrera

Módulo para detección de gas traza geoespacial

Álvaro Sosa Herrera

*A todos los que habéis creído en mí.
Por todas las veces que parecía que no se iba a poder, al final se pudo.*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres José Sosa Cabeza y Emilia Herrera Jimenez por brindarme la oportunidad de finalizar mis estudios. Por sus desvelos y por su tesón. Ha sido gracias a su inquebrantable fe e infinita paciencia que me he convertido en el hombre que soy a día de hoy. A mis hermanos Beatriz y José y a mis cuñados Jesús y Andrea por sus valiosas lecciones y su amor.

A todos mis compañeros de laboratorio cuyos consejos y ayudas han hecho posible este proyecto. A Álvaro Ortiz por ser uno de los mayores maestros que he tenido nunca. A Gabriel Rodriguez por ser los ojos inteligentes y positivos que han hecho de los peores momentos alegría. A mi compañero de andanza, Álvaro Caseiro, hombro en el que llorar y amigo ante todas las cosas. Y por último pero no menos importante a mi tutor Stefan Palzer por confiar en mi y permitirme llevar a termino este trabajo.

A Sergio Martínez por haberme enseñado tanto durante estos años, por su amistad y compañía, por las risas y las lágrimas, por las horas haciendo prácticas y los momentos de paz.

A mis amigos. Que me han visto crecer y me han acompañado en este proyecto y no dudo que en todos los que emprenda en la vida. Nunca perdáis la Esperanza.

RESUMEN

La delicada situación medioambiental de nuestros días ha convertido la monitorización del entorno y de los elementos que producen cambios en el mismo en una importante tarea. Algunos de estos elementos son los conocidos como gases traza, los cuales se tratan de los principales responsables del conocido como efecto invernadero. Entre estos gases encontramos el metano. En la actualidad no existen sistemas de monitorización fiables y económicos con los que tomar medidas a media y gran escala sobre concentraciones de metano a lo largo de multitud de entornos y emplazamientos. Por lo tanto este TFG se enfoca en el diseño y desarrollo de un sistema de medidas de metano de dimensiones reducidas que pueda también servir de soporte en un dron empleando un microcontrolador. Este sistema permitirá caracterizar el comportamiento del metano en multitud de ubicaciones a fin de permitirnos conocer su evolución. Realizándose toda esta funcionalidad sobre un dron.

Para complementar el funcionamiento del sistema este cuenta también con sensores de temperatura, presión, humedad, receptor de señal GPS y unidad de medición inercial. Todos estos sensores son de carácter comercial y se controlan empleando varios protocolos de comunicación entre los destacan el protocolo Inter-Integrated Circuit (I2C), Serial Peripheral Interface (SPI) y Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART). El sensor de metano es de implementación propia y se trata de un sistema NDIR basado en el principio de la fotoacústica. Compuesto de una sección emisora y otra receptora, el sensor emplea una señal digital que tras ser convertida a analógica permite producir luz que pueda recogerse por un detector fotoacústico para convertirse nuevamente en digital y poder ser estudiada. En este último se ha utilizado el protocolo Serial Peripheral Interface para la comunicación y se ha empleado el algoritmo Lock-In con el que desenterrar la señal deseada del ruido de la medida. La sección referente al dron involucra el receptor de señal GPS y la unidad de medición inercial que hará las veces de sensor de viento. La comunicación con estos últimos se realiza empleando Inter-Integrated Circuit y Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. El sistema se gestiona empleando un microcontrolador con el que se coordinan las múltiples operaciones necesarias para la monitorización del gas y el soporte para el dron sobre el que se acopla el sistema. Todos estos componentes se encuentran emplazados en una PCB de diseño propio y de medidas reducidas y peso ligero.

PALABRAS CLAVE

Metano, sensor NDIR, detección fotoacústica, dron, viento, PCB, medida, protocolo de comunicación, emisor, receptor, absorción

ABSTRACT

The delicate environmental situation of our days has made monitoring the environment and the elements that produce changes in it an important task. Some of these elements are known as trace gases, which are the main responsible for the so-called greenhouse effect. Among these gases we find methane. At present, there are no reliable and economical monitoring systems with which to take medium- and large-scale measurements of methane concentrations throughout a multitude of environments and sites. Therefore, this TFG focuses on the design and development of a small-scale methane measurement system that can also serve as a drone support using a microcontroller. This system will allow us to characterize the behavior of methane in many locations in order to know its evolution. All this functionality is performed on a drone.

To complement the operation of the system this also has sensors of temperature, pressure, humidity, GPS signal receiver and inertial measurement unit. All these sensors are of commercial character and are controlled using several protocols of communication between them emphasize the protocol Inter-Integrated Circuit, Serial Peripheral Interface and Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. The methane sensor is a proprietary implementation and is an NDIR system based on the principle of photoacoustics. Composed of a transmitter and a receiver section, the sensor uses a digital signal that after being converted to analogical allows to produce light that can be collected by a photoacoustic detector to become digital again and be studied. In this last one, the Serial Peripheral Interface protocol has been used for communication and the Lock-In algorithm has been employed with which to unearth the desired signal from the measurement noise. The section referring to the drone involves the GPS signal receiver and the inertial measurement unit that will act as a wind sensor. Communication with the latter is done using the Inter-Integrated Circuit and the Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. The system is managed using a microcontroller with which the multiple operations required for gas monitoring and the support for the drone on which the system is mounted are coordinated. All these components are located on a PCB of our own design, which is small in size and light in weight.

KEYWORDS

Methane, NDIR sensor, photoacoustic detection, drone, wind, PCB, measurement, communication protocol, transmitter, receiver, absorption

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Estado del arte	3
3	Sistema	9
3.1	Sensorización	11
3.1.1	Sensor de gas	11
3.1.2	Sensor de Viento	17
3.1.3	Sistemas adicionales	18
3.2	Protocolos de comunicación	20
3.2.1	SPI	20
3.2.2	I2C	21
3.2.3	UART	22
4	Pruebas y resultados	23
4.1	Evaluación de los sensores de temperatura, presión y humedad	23
4.2	Evaluación del receptor de señal GPS	24
4.3	Medida CH4	25
4.4	Evaluación de la unidad de medición inercial	31
4.5	Tamaño y peso del sistema	32
5	Conclusión	33
	Bibliografía	36
	Acrónimos	37
	Apéndices	39
A	Configuración para la medida de gas metano	41
B	Evaluación de la medición de metano.	45
C	Comunicación con el icm-20948.	47

LISTAS

Lista de códigos

C.1	Código de inicio de comunicación con el ICM20948	47
C.2	Código de inicio de comunicación con el ICM20948 parte 2	48
C.3	Código para establecer el ICM como maestro I2C para los sensores que lo conforman	49
C.4	Código para configurar el acelerómetro del ICM20948	49
C.5	Código para configurar el acelerómetro del ICM20948 parte 2	50
C.6	Código para configurar el giroscopio del ICM20948	51
C.7	Código para leer la componente x de la aceleración	52
C.8	Código para leer la componente x del giroscopio	52

Lista de ecuaciones

2.1	Desviación de un sistema	6
2.2	Rigidez de un sistema	6
3.1	Ley de los gases ideales	14
3.2	Producto de 2 cosenos con fase entre ellos y distinta frecuencia	16
3.3	Producto de 2 cosenos con fase entre ellos y misma frecuencia	16

Lista de figuras

1.1	Sistemas de sensorización	1
2.1	Esquema de ejes de un IMU	3
2.2	Esquema de ejes de un GPS	4
2.3	Esquema de funcionamiento de un sensor de presión	6
2.4	Esquemático de un biosensor de metano	7
2.5	Espectro IR de metano	7
2.6	Esquema de funcionamiento de un sensor NDIR	8
3.1	Esquema del sistema completo	10
3.2	Funcionamiento del sensor de gas	11
3.3	Esquema del sensor de metano	12

3.4	Sistema de Amplificación	13
3.5	Fuente de corriente controlada por voltaje.	14
3.6	Esquema de ADC de aproximaciones sucesivas	15
3.7	Producto de cosenos	16
3.8	Bloques ICM	17
3.9	Bloques BME	18
3.10	Bloques GPS	19
3.11	TimingLTC2321-14	20
3.12	Esquema SPI	20
3.13	Esquema IC	21
3.14	Secuencia I2C	21
3.15	Esquema de funcionamiento del protocolo UART	22
4.1	Medidas BME laboratorio	23
4.2	Secuencia resultados GPS	24
4.3	Tabla campos GPS	24
4.4	Medidas señal GPS	25
4.5	Señal sin amplificar y amplificada	26
4.6	Comparativa señales	26
4.7	FFT de la señal	27
4.8	Medida de Metano	28
4.9	Medida en presencia de humedad	29
4.10	Corrección polinomial de la temperatura	29
4.11	Calibración de la medida	30
4.12	Estudio impacto IMU	31
4.13	Sistema terminado	32
A.1	Configuración de la prueba de medida de CH4	41
A.2	Asignación de los ppm en cada ciclo de la prueba	42
A.3	Configuración última de la medida de metano	43
B.1	Evolución de la medida de gas metano	45

INTRODUCCIÓN

El **Metano** (CH_4) juega un papel importante en la química atmosférica tratándose de uno de los gases de efecto invernadero liberados por actividad humana con mas influencia en el calentamiento global [1]. Con capacidad para influir sobre el clima y el incremento paulatino de su presencia en la atmósfera terrestre, su control y monitorización consiste una importante tarea a día de hoy a nivel medioambiental. Su naturaleza inflamable y asfixiante debido a su capacidad para desplazar el oxígeno lo convierten en un riesgo para la seguridad humana en entornos en los que su presencia sea crítica, como la industria o la minería [2]. Las fuentes de este gas son tanto de carácter natural, presente en pantanos y por acción animal, como antropogénico, debido a acciones como la explotación de combustibles fósiles o cultivos [3]. Así, su influencia sobre múltiples entornos y las consecuencias de su excesiva acumulación hacen necesario el registro de sus emisiones a media y gran escala. Un sistema de medidas de CH_4 portátil y con capacidad de actuación sobre multitud de escenarios se ha convertido en fundamental a día de hoy.

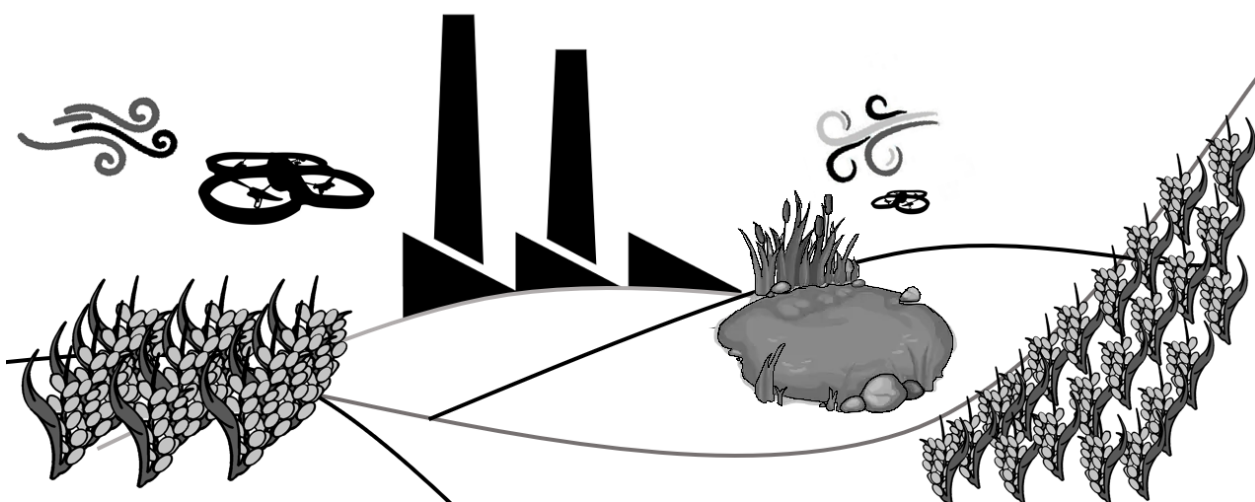


Figura 1.1: La medida y detección de los elementos que nos rodean nos permiten generar ajustes y cambiar patrones con el fin de mejorar las vidas de las personas.

A parte de las ya mencionadas medidas, a la hora de monitorizar un gas necesario conocer también su comportamiento. Dicho comportamiento se define mediante una serie de magnitudes que es necesario estudiar a fin de conocer las condiciones exactas en las que las medidas se tomaron. Entre estas medidas destacan la presión, la temperatura, la humedad y el viento. En la actualidad no existen sistemas que agrupen todas estas características en uno solo y puedan acoplarse sobre un sistema móvil. Por ello en este **trabajo fin de grado (TFG)** se ha desarrollado un sistema alternativo en el que aunar todas estas funcionalidades sobre una placa ligera y eficaz compuesta de elementos baratos que puede acoplarse en un dron. Dentro de este sistema, por lo tanto, se ha integrado un sensor de temperatura, presión y humedad a parte de una unidad de medición inercial, o **Inercial Measure Unity (IMU)** que hará las veces de sensor de viento y un receptor de señal gps o **global positioning system (GPS)** a fin de conocer las coordenadas y ubicación del dron en el momento de las medidas. Finalmente las medidas de concentración de **CH₄** se obtienen mediante el empleo de un sensor de gas de implementación propia. Todos los elementos anteriormente mencionados se gestionan empleando un microcontrolador para posteriormente enviar dichos datos a una aplicación para que los gestione.

Este **TFG** se organiza empleando una estructura de capítulos, a fin de explicar tanto la actualidad de los campos sobre los que trata como de su implementación y sucesivas adhesiones de cara al futuro. En el capítulo 2 del estado del arte se encuentran las prácticas vigentes acerca de sensores de **CH₄** a parte de los distintos dispositivos que conforman el sistema, vease sensores de temperatura, presión, humedad, detector de señal **GPS** y unidades de medición inercial.

El capítulo 3 se enfoca en explicar el funcionamiento de los sensores empleados en el sistema. El sensor de temperatura, humedad y presión, manejado mediante el protocolo **Serial Peripheral Interface (SPI)**, la unidad de medición inercial controlada mediante el protocolo **Inter-Integrated Circuit (I2C)** y el receptor de señal **GPS** cuya comunicación se establece mediante **Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)**. En este capítulo también se detalla el desarrollo del sensor de **CH₄**, con los componentes que lo conforman, desde el **Convertor digital-analógico (DAC)**, la **fuerza de corriente controlada por voltaje (VCCS)**, el emisor y el receptor.

El capítulo 4 de resultados cuenta con una serie de pruebas sobre los elementos que componen el sistema. Finalizando con las conclusiones en el capítulo 5 donde se mira el trabajo realizado en retrospectiva a fin de mostrar la evolución del mismo.

ESTADO DEL ARTE

Un elemento fundamental en el funcionamiento de los drones a día de hoy consiste en el control y monitorización de una serie de parámetros relacionados con el vuelo y equilibrio del mismo, para ello existen las unidades de medición inercial o **IMU**. Una unidad de medición inercial es un sistema cerrado empleado para detectar cambios tanto en la velocidad como en la velocidad angular. Como un sistema cerrado puede emplearse para detectar alteraciones en el movimiento, tanto propio como de los elementos sobre los que se acople, vease drones o aeronaves. Un **IMU** convencional detecta aceleración y ratio de giro y mide estos cambios a través del tiempo para encontrar el cambio total respecto de la posición inicial, de esta forma un **IMU** no se trata de un sistema de navegación inercial ya que no conoce su propia posición. Estos **IMUS** convencionales generalmente están asociados con tamaños enormes y altos costes, tanto económicos como financieros, además de una vida limitada [4].

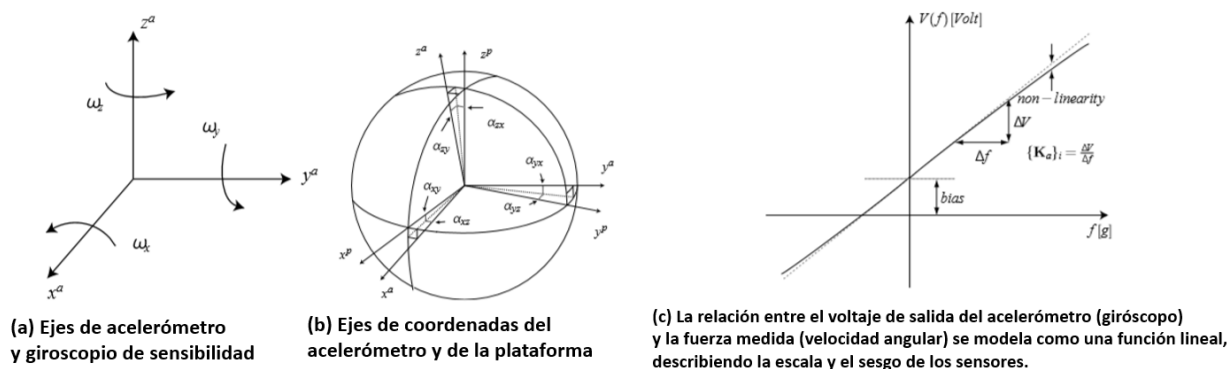


Figura 2.1: Esquema en el que se representan los ejes que contemplan los acelerómetros y giroscopios contenido en los **IMUS**. A parte podemos observar la relación voltaje - fuerza medida en una función lineal [5].

Los **sistemas microelectromecánicos (MEMS)** consisten a día de hoy una importante técnica electromecánica destinada a la implementación de dispositivos electromecánicos. Actualmente la tecnología **MEMS** ha desarrollado micro **IMUs**, de reducido precio que comprimen las prestaciones de los originales en chips de silicona. Las aproximaciones actuales más a la hora de desarrollar unidades de

medición inercial tipo MEMS subyacen en 3 ramas. En primer lugar y la más común consiste en ensamblar sensores simples de un solo eje sobre una **printed circuit board (PCB)** ensamblados en una configuración tridimensional. Estos sensores simples que rechazan las entradas por ejes benefician el desempeño de los IMUS sobre los sensores multieje. Este enfoque cuenta además con el respaldo de la ya consolidada técnica de las placas de circuito impreso o **PCB**. Sin embargo cuestiones relacionadas en la reducción limitada del tamaño y el ensamblaje de los sistemas reducen la eficacia de la misma. Otra vertiente consiste en la creación de un **IMU** mediante la acumulación de chips. Estos se fabrican independientemente para posteriormente ensamblarse juntos en un solo chip. En comparación del primer método permiten una reducción de tamaño mayor. Ambos métodos sufren, sin embargo, limitaciones similares. Sensibles a la temperatura excesiva, el impacto y la vibración su esperanza de vida es limitada. La tercera alternativa se basa en aunar todo dentro del mismo paquete al momento del diseño y fabricación, esto permite alcanzar de base un nivel lo suficientemente reducido como para alcanzar el tamaño de un chip pero aún así este sistema también cuenta con desventajas como la disparidad de diseño que se debe realizar sobre los diseños al uso de giroscopios y acelerómetros comunes los cuales no suelen emplear un paquete de estas características. [6]

La ubicación y las distancias recorridas por un dron permiten obtener un mejor entendimiento acerca de los datos obtenidos en una medida concreta. Aunque en sus inicios el sistema GPS se desarrollase con motivos militares [7] a día de hoy ha demostrado un valor incalculable en múltiples sistemas civiles. Cada aplicación requiere un rendimiento específico pero los sistemas comúnmente se componen de elementos comunes independientemente de la finalidad comercial que posteriormente tengan.

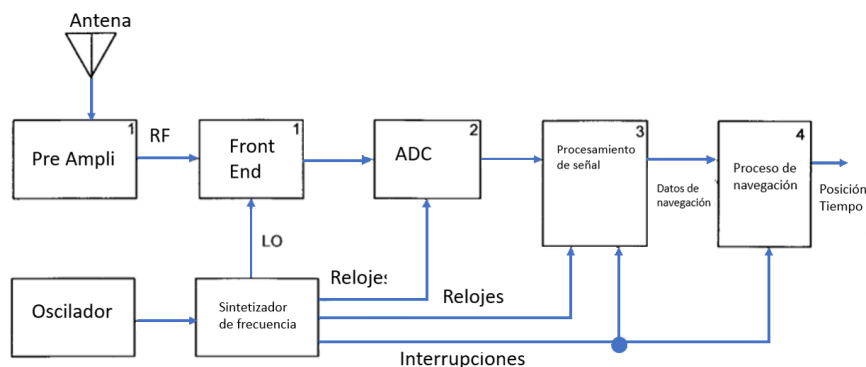


Figura 2.2: Diagrama de bloque del receptor GPS genérico. 1) Antena/Frontera: los diseños de una sola frecuencia pasan la señal L1 (1575,42-MHz) solamente; los diseños de doble frecuencia pasan las señales L1 y L2 (1227,6-MHz). 2) Convertidor analógico-digital (A/D): en los receptores actuales pueden encontrarse varios tipos, como los de un solo bit (es decir, de limitación dura), multibit y de umbral adaptable. 3) Procesamiento de señales de hardware/software: los diseños monocanal procesan secuencialmente cada satélite que se rastrea; los diseños multicanal multiplexan la salida A/D en canales paralelos, con cada canal rastreando satélites separados. 4) Procesamiento de la navegación: la integración de los datos del GPS y de los sensores externos puede producirse fuera del receptor del GPS Imagen adaptada del artículo "Gps receiver architecture measurement" [8].

La señal transmitida por el satélite se filtra a un ancho de banda de 30MHz. Para el procesamiento de la señal base banda desde la señal digital es conseguido empleando una combinación de hardware y procesadores digitales de señal para crear la medida y proporcionar retroalimentación acerca del rastreo [8]. El tratamiento analógico de la señal implica el filtrado, amplificación y descenso de la señal. Esto se consigue a menudo empleando servicios de **onda acústica de superficie (SAW)** [9]. Mientras que la amplificación se realiza empleando uno o varios bit A/D el descenso de la señal puede darse en uno o varios pasos. La conversión analógico digital cuenta con posibles arquitecturas, tanto la de un bit como multibit se encuentran actualmente en uso. La mayoría de dispositivos de bajo coste emplean 1 bit de muestreo en banda estrecha, es decir 2 MHz, mientras que los de alta gama pueden llegar a emplear 3 bits en anchos de banda de hasta 20MHz. La antena es de tipo righthand circular y se encuentra polarizada para encontrar la señal entrante. El modelo suele ser hemisferico en la mayoría de las aplicaciones permitiendo un mejor rastreo de los satelites. Dentro de la variedad existente las más comunes consisten en modelos de perfil bajo con un parche de microstrip. Otros tipos incluyen hélices y variantes como la cuadrafilar.

La temperatura se trata de una magnitud fundamental a la hora de monitorizar el comportamiento de un gas existiendo una amplia variedad de técnicas para monitorizar la misma. Estas emplean diversos fenómenos como la termoelectricidad, variación de la resistencia en función de la temperatura [10] y otras como la fluorescencia [11]. Sobre las técnicas ya mencionadas pueden emplearse otras que interactuen con el medio directamente, estas técnicas se pueden clasificar en tres categorías, invasivas, semiinvasivas y no invasivas. En la invasivas el dispositivo de medición se encuentra directamente en contacto con el medio, como por ejemplo un termopar en una corriente de gas. En las semiinvasivas este realiza las mediciones a través de un medio directamente relacionado con el entorno como ejemplo recubrimientos superficiales cuyo color cambia con la temperatura. En las no invasivas la medición se realiza de manera completamente remota como en las termografías infrarrojas [12] .

Otra magnitud a tener en cuenta midiendo gases se trata de la presión. Actualmente los **MEMS** se han implantado con fuerza y dominan el mercado de los sensores de presión. Los sensores microelectromecánicos se tratan fundamentalmente de versiones miniaturizadas de los sensores de presión empleados tradicionalmente, cuya característica principal consistía en convertir la presión en movimiento de un elemento mecánico. La funcionalidad de estos sistemas consiste en diafragmas deformables. En estos sensores la presión se determina en función de la desviación sufrida por los diafragmas ya mencionados. La presión de referencia consiste en una cámara sellada o una presión puerto para o bien medir presiones absolutas o manométricas [13].

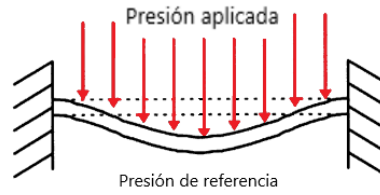


Figura 2.3: Una sección transversal esquemática de un diafragma para un sensor de presión. Las líneas de puntos representan el diafragma sin desviar. Imagen adaptada del artículo "Micromachined pressure sensors: review and recent developments" [13].

Así, siguiendo la figura anterior puede establecerse una relación directa entre la desviación del sistema y la presión ejercida a través de las siguientes fórmulas:

$$iw(t) = \frac{Pa^4}{64D} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (2.1)$$

Donde w , r , a y P son la desviación, la distancia radial desde el centro del diafragma, el radio del diafragma y la presión aplicada respectivamente. D por su parte se trata de la rigidez dada por:

$$iD = \frac{Eh^3}{64D} [12(1 - \nu^2)] \quad (2.2)$$

Donde E , h y ν son el modulo de Young, anchura y el radio de Poisson del diafragma [13].

La última magnitud monitorizada ha sido la humedad. Los sensores de humedad se encargan de convertir los cambios resultantes en la humedad ambiente en una medida eléctrica para ser procesada posteriormente por un circuito electrónico [14]. A día de hoy las técnicas más difundidas a la hora de desarrollar sensores de estas características se agrupan en 6 grupos. Ópticos, los cuales monitorizan la refracción del material empleado en el sensor para extrapolar de ahí la humedad. Gravimétricos, en los cuales se generan unas ondas que cruzarán el sensor a velocidades distintas en función de la concentración de humedad sobre este. Capacitivos, que acaparan la mayoría del mercado y que emplean dos electrodos sensibles a los cambios en la humedad. Resistivos que obtienen medidas en función de los cambios en la resistividad del elemento sensor en función de la humedad. Piezoresistivos, que cuentan con una estructura cubierta de una capa de material perteneciente a la familia de los polímeros, y de la cual conociendo su índice de absorción del agua consigue medidas de humedad. Y para terminar magnetoelásticos que monitorizan los cambios en la frecuencia del flujo magnético emitido en función de la humedad exterior [15].

En el mercado actual existen multitud de métodos de sensorizar CH_4 , con sus consecuentes puntos a favor y en contra. Los sensores electroquímicos, en los que se engloban la detección amperométrica y los biosensores electromecánicos necesitan de correcciones a fin de evitar interferencias del oxígeno.

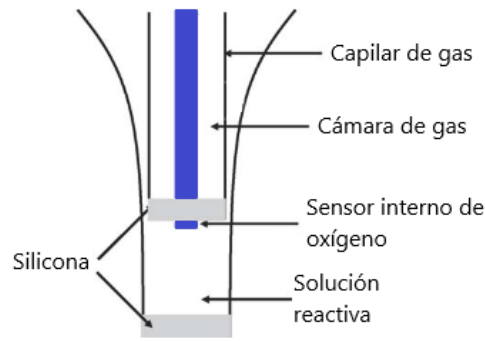


Figura 2.4: Diseño esquemático de un biosensor de metano. Donde pueden apreciarse las distintas secciones que lo conforman [16].

Los detectores de estado sólido, otro subconjunto de sensores, necesitan solventar problemas de estabilización y selectividad del gas. La piezoelectricidad constituye otra técnica pero cuya naturaleza optimiza la detección de otros gases como por ejemplo de hidrógeno. Infrarojos y Raman forman parte de la detección espectroscópica, los **laser de infrarrojo cercano (IR)** proporcionan buenas medidas en entornos de laboratorio pero problemas como la deriva hacen que las medidas en campo abierto no sean tan óptimas [16].

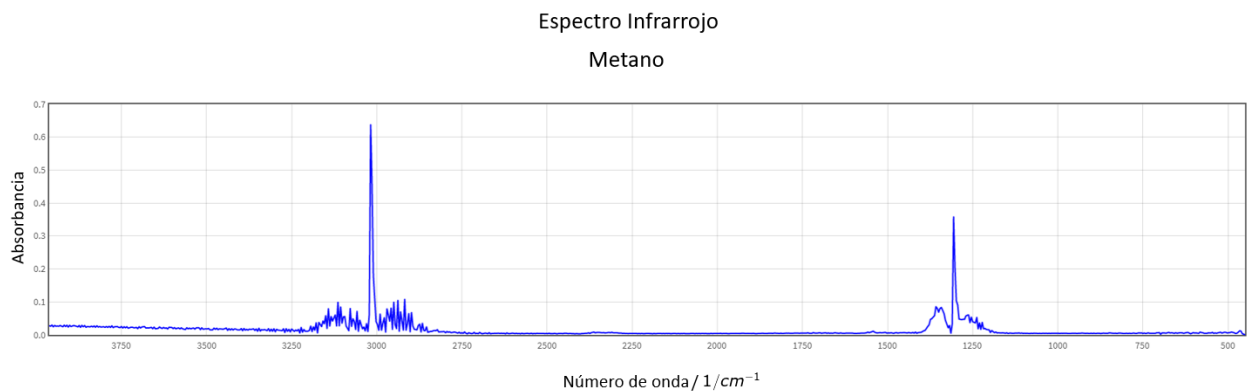


Figura 2.5: Espectro de absorción infrarrojo del metano puro [17]. La absorbancia se trata del fragmento de luz incidente que logra atravesar una muestra manteniendo una longitud de onda concreta.

El pellistor es un tipo de sensor de gas combustible calorimétrico que emplea un elemento catalítico para observar variaciones en la temperatura en función de los gases a los que se expone el mismo. El control de la temperatura y la fragilidad del dispositivo constituyen uno de los mayores problemas para estos sensores.

Los sensores ópticos constituyen otro grupo dentro de las técnicas actuales. La pérdida de intensidad lumínica en el receptor debido a la absorción de la luz a lo largo del camino óptico permite obtener concentraciones de gases. Basados en el espectro de absorción del CH_4 , los sensores de infrarrojos no dispersivos o **non dispersive infrared spectroscopy (NDIR)** [18] proporcionan medidas de este gas

de manera sencilla y económica. Estos se componen de dos elementos, un emisor térmico que sirve como fuente de luz y un receptor con un filtro encargado de discriminar todas las señales residuales que pudiesen interferir. Las bajas temperaturas y potencias ópticas de los LED infrarrojos constituyen una alternativa ideal para hacer las veces de emisores térmicos, mientras que en la sección de los receptores los MEMS son ampliamente empleados. Estos se encapsulan junto con el gas objetivo de manera que la concentración de luz que se reciba en la capsula agitan las moléculas del gas encerrado a fin de generar vibraciones que el microfono pueda registrar y que posteriormente nos permitirán obtener medidas.

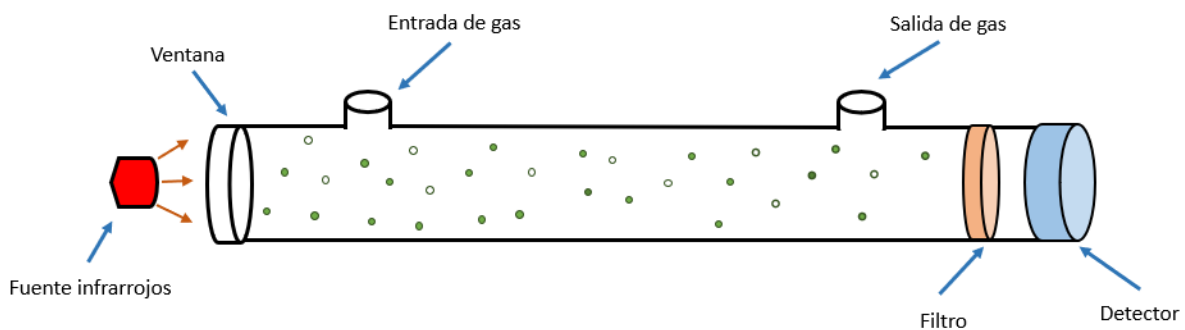


Figura 2.6: Esquema de funcionamiento de un sensor NDIR comercial. La luz viaja a través del canal para posteriormente cuantificar su energía en el detector. Figura inspirada en el trabajo "Miniature Low-Cost Carbon Dioxide" [19]

La actualidad de los sensores de CH_4 no contempla ningún sistema con capacidad de aunar la funcionalidad de todos los sistemas anteriormente mencionados a fin de obtener medidas de gas a través de una plataforma barata, eficiente y ligera que pueda acoplarse sobre un dron.

SISTEMA

A fin de conseguir un sistema con capacidad para proporcionar medidas de CH_4 y proporcionar tareas de soporte sobre un dron de manera económica y eficaz en un espacio se ha diseñado este TFG . En primera instancia la temperatura la presión y la humedad son 3 magnitudes que afectan el comportamiento de los gases que se encuentran en la atmosfera, por ello para la correcta monitorización de un gas es fundamental contar con una manera para controlarlas y conocer el estado de estas en el momento en que las medidas del gas se llevan a cabo, la presión puede emplearse además para calcular la altura a la que se encuentra el sistema en el momento de la medida de forma precisa. La integración sobre un dron conlleva también una serie de dificultades que deben afrontarse, entre ellas su localización y la posición, orientación y fuerzas que sobre este se ejercen. Para terminar el propio sistema de medición del gas el cual necesita ser ligero, económico y fiable.

De todas estas circunstancias se extrae la necesidad de un sistema capaz de albergar toda la funcionalidad anteriormente mencionada en un espacio reducido y con tamaño lo más compacto posible. Para ello se ha implementando una PCB , de diseño propio ideada para poder disponer todos los sensores y elementos necesarios para monitorizar las variables anteriormente mencionadas.

La temperatura, la presión y la humedad se controlan mediante el empleo de un sensor comercial capaz de proporcionar medidas de las 3 en conjunto. Posteriormente las magnitudes relacionadas con la ubicación y vuelo del dron se controlan empleando un GPS con el que conocer las coordenadas y la altura del mismo y una IMU con la cual obtener la posición en la que se encuentra, la aceleración a la que este está sometido, los giros que este sufre y la orientación del mismo. Para terminar, el método empleado para las mediciones de CH_4 ha consistido en la implementación de un sensor de implementación propia mediante el empleo de un LED y un detector fotoacústico, los cuales haciendo las veces de emisor y receptor respectivamente nos permitirán conocer las concentraciones de gas en el momento de vuelo del dron.

Al final del capítulo se encuentra también una sección dedicada a los protocolos de comunicación empleados en el sistema para obtener los distintos datos generados en función de las necesidades de cada sensor.

A continuación se enumeran los sensores comerciales empleados en este TFG y la función que desempeñan en el conjunto final; el sensor para monitorizar temperatura, presión y humedad (BME280, Bosch) ¹, la unidad de medición inercial (ICM-20948, TDK) ² el GPS (NEO-6, U-Blox) ³ y el conversor analógico digital (LTC2321-14, Linear Technology) ⁴ terminando con un sensor de CH₄ de implementación propia. Siendo todos administrados mediante un microcontrolador programable (CY8C5488AXI-LP120, Cypress Semiconductor) ⁵ empleando distintos protocolos de comunicación, los cuales han sido *SPI*, *UART* e *I2C*. Todos los datos generados por los distintos sensores son recogidos en el microcontrolador para ser posteriormente enviados a un equipo desde el que interpretarlos. Los componentes se han acoplado de la forma más compacta posible para poder incorporarse posteriormente en un dron. Los 12 voltios de alimentación del sistema se encargan de suministrar energía a todos los componentes de la placa. La figura 3.1 muestra el esquema completo del sistema.

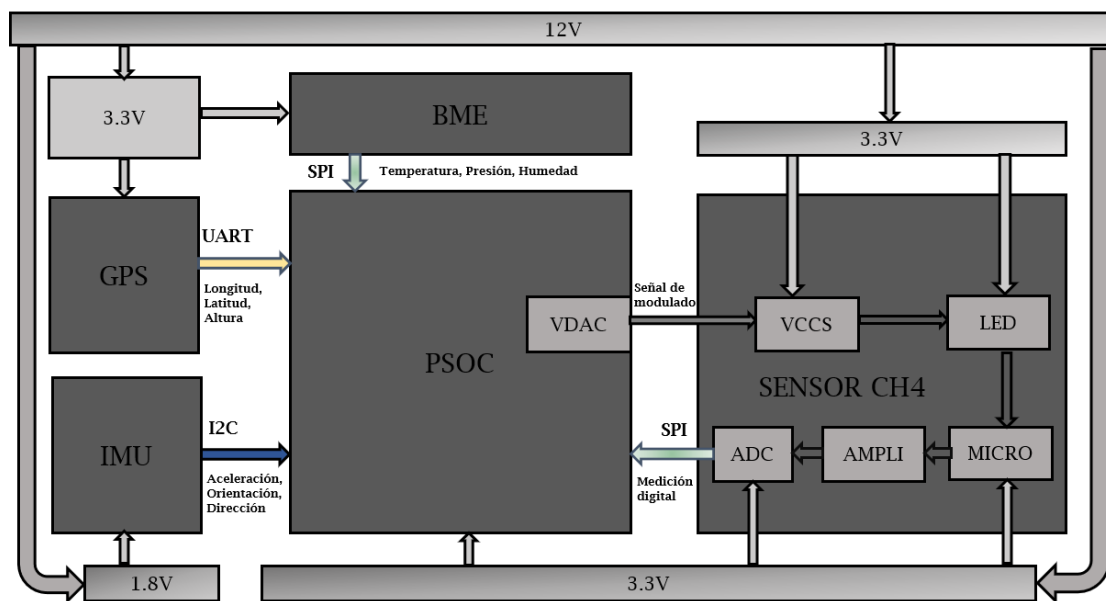


Figura 3.1: El sistema se alimenta con 12V los cuales mediante reguladores se emplean para alimentar todo el circuito. El ADC y el sensor de temperatura, humedad y presión se comunican mediante SPI mientras que el GPS y el IMU emplean UART e I2C respectivamente. El sensor de gas cuenta con fuente de corriente controlada por voltaje VCCS, un elemento emisor o LED, un detector fotoacústico o MICRO, un sistema de amplificación AMPLI y un conversor analógico digital ADC

¹ Bosch, Datasheet BME280, web:<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> [Fecha de acceso: 6-04-2020]

² TDK, Datasheet ICM-20948, web:<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2016/06/DS-000189-ICM-20948-v1.3.pdf> [Fecha de acceso: 6-04-2020]

³ U-Blox, Datasheet NEO-6 series, web:<https://www.waveshare.com/w/upload/2/2c/NEO-6-DataSheet.pdf> [Fecha de acceso: 6-04-2020]

⁴ Linear Technology, Datasheet LTC2321-14, web:<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/232114fc.pdf> [Fecha de acceso: 6-04-2020]

⁵ Cypress Semiconductor, Datasheet CY8C5488AXI-LP120, web:<https://www.cypress.com/file/45926/download> [Fecha de acceso: 6-04-2020]

3.1. Sensorización

Esta sección detalla la parte del sistema enfocada en el sensor de gas, para ello se ha elaborado un esquema explicativo con el que ofrecer una visión general del funcionamiento del mismo. De este se deben entender fundamentalmente la idea de la existencia de un emisor y un receptor que se apoyan de elementos intermedios para obtener las medidas adecuadamente.

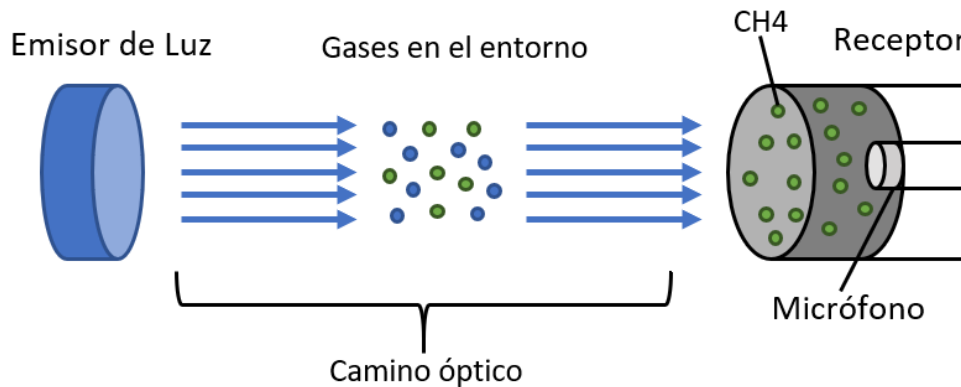


Figura 3.2: Esquema en el que se ilustra el proceso que tiene lugar en el sensor NDIR del sistema. En este el emisor fotoacústico producirá luz que se verá absorbida por los gases en el entorno del camino óptico. En función de la cantidad absorbida en el camino al receptor llegará una concentración que agitará las partículas del interior del sensor, esta agitación producirá un calor y una vibración que pueda ser captada por el elemento receptor que la transformará en voltaje que posteriormente saldrá del receptor para ser procesada a fin de proporcionar la concentración del gas.

3.1.1. Sensor de gas

Las condiciones de trabajo del metano conllevan una serie de precauciones a tener en cuenta a la hora de trabajar con el tratándose de un gas inflamable cuya ignición puede resultar peligrosa para seres humanos y equipos. Antes estos términos el sensor implementado permite obtener medidas sin poner en riesgo la integridad del sistema con un tamaño que permite su acople sobre un dron. La figura 3.3 muestra los componentes que conforman el sensor.

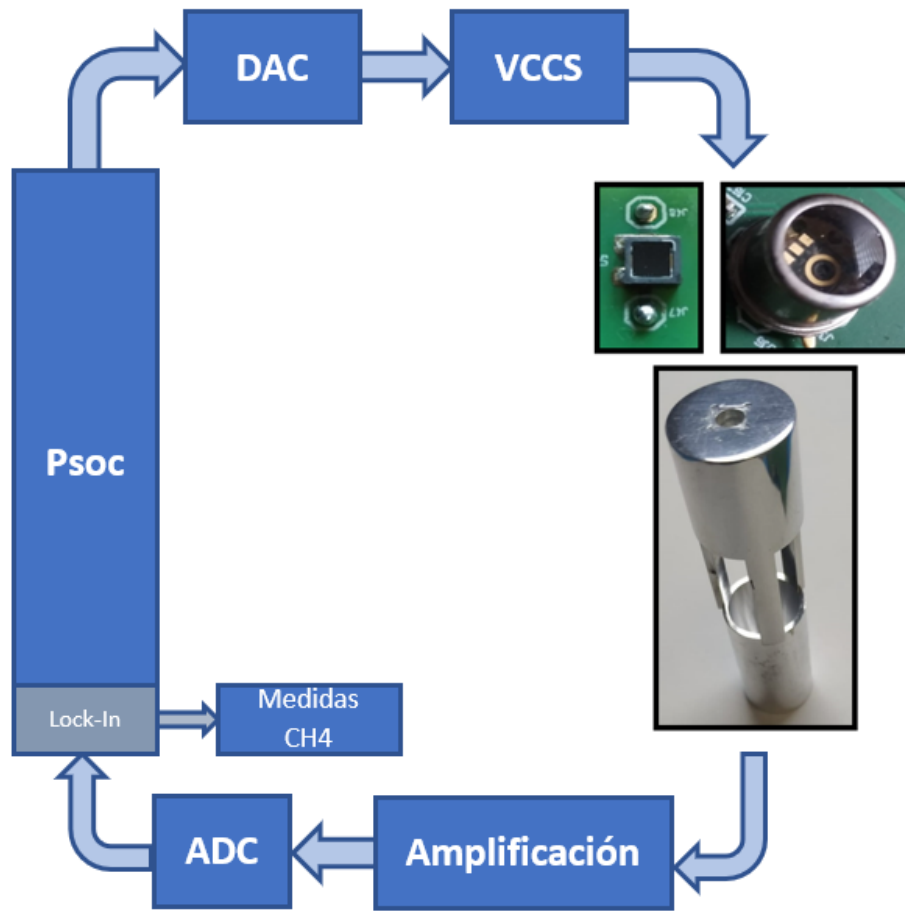


Figura 3.3: El Psoc se encarga de administrar el VDAC integrado del que dispone para modular la señal del emisor, en este caso el LED previo paso por la VCCS. El receptor consiste en este caso de un detector fotoacústico y un sistema de amplificación los cuales se encargan respectivamente de levantar la onda y pasarla de analógico a digital para posteriormente reenviarla al Psoc de nuevo

El sensor empleado es tipo NDIR y su funcionamiento se encuentra basado en el principio de la fotoacústica, con el cual en el momento en el que sensor se encuentre en un ambiente con metano en el entorno la cantidad de fotones captada por el receptor será menor debido a la capacidad de absorción del gas, por lo que el aumento de temperatura dentro de la capsula será menor, siendo consecuentemente menor la presión que genera el movimiento de las partículas de gas dentro de ella y reduciéndose así el voltaje generado. Con este metodo si conocemos también la frecuencia y la longitud de onda con la que modulamos el LED y que reconstruimos con el **Convertor analógico digital (ADC)** podemos conocer la concentración de CH_4 en el entorno. El peso del detector en su totalidad ronda los 20 gramos y su altura se encuentra en torno a los 6 centímetros.

La señal generada por el micrófono se trata de una señal analógica la cual se mueve en un rango demasiado bajo para ser captada por el LTC2321-14, de manera que tiene que levantarse hasta el rango mínimo de este el cual es de 0V como mínimo y 3.3V como máximo. Fuera de estos rangos el LTC2321-14 no puede operar las señales y por lo tanto no podría convertir esta a digital para su posterior interpretación. Para esto el sistema cuenta con una etapa de pre-amplificación de la señal y otra de amplificación como tal. Los 3 componentes destacables de sendos circuitos han sido el pre-amplificador (THAT 1510, THAT Corporation) ⁶ y los dos amplificadores de la etapa final del circuito (TS462 TS464, TS) ⁷ los cuales se encargan de retornar en la salida del circuito una señal de entre 0 y 3.3V no diferencial que finalmente si se encuentran en un rango que puede ser manejado por el ADC.

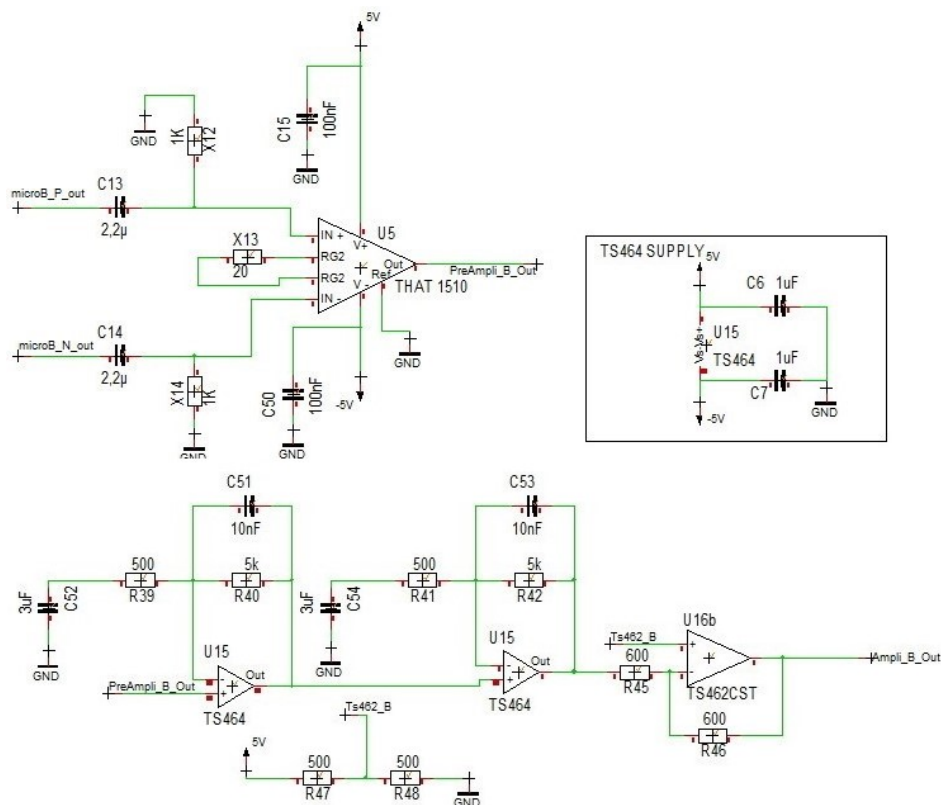


Figura 3.4: Esquemático del circuito que conforma el sistema de amplificación de la onda generada por el micrófono con sus alimentaciones. En primera instancia la señal diferencial entra en la etapa de pre-amplificación donde pasa a tener solo una componente. La nueva señal entra en la etapa de deamplificación donde un divisor de tensión se encarga de levantarla para poder entrar desde aquí al ADC

Posteriormente la salida de la amplificación entrará en el ADC LTC2321-14 cuya salida proporciona datos los cuales es necesario analizar para comprender la amplitud de onda recibida, sabiendo de esta forma la concentración de CH_4 en el entorno. Para ello se ha empleado el algoritmo Lock-in.

⁶ THAT Corporation, Datasheet THAT1510, web: <http://www.thatcorp.com/datashts/THAT15101512Datasheet.pdf> [Fecha de acceso: 10-04-2020]

⁷ TS, Datasheet TS462, TS464, web: <https://www.mouser.es/datasheet/2/389/cd00001507-1795694.pdf> [Fecha de acceso: 10-04-2020]

Led

El LED empleado para este sistema ha sido el L13771-0330C(Hamamatsu)⁸ el cual es controlado a través del VDAC8⁹ integrado en el microcontrolador PSOC. El espectro del metano está compuesto por dos fuertes bandas, o grupos de líneas de absorción, centradas en 3.3 μm y 7.6 μm [2]. La longitud de onda con la que trabaja el LED es 3.3 μm encontrándose por tanto en el rango de absorción de luz adecuado. Este además se encuentra fuera de otros rangos que pudieran interferir en la medida como por ejemplo el rango del agua, evitando el problema de la interferencia por humedad. El LED opera empleando una **VCCS**. La señal digital generada por el microcontrolador modula la intensidad de luz que este emite. La figura 3.4 adjunta el esquemático de la VCCS.

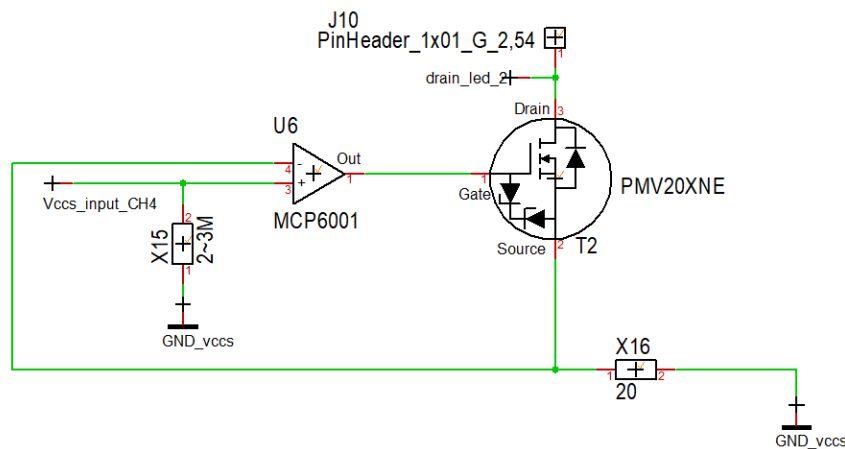


Figura 3.5: Esquemático en detalle de los componentes y sus conexiones que conforman la VCCS

Micrófono

Para el receptor de la señal se emplea un ICS-40619¹⁰, micrófono analógico perteneciente a la familia de los **MEMS** el cual se encuentra encapsulado herméticamente con CH_4 . Cuando la luz atraviesa la cámara calienta el interior agitando las moléculas de CH_4 , variando temperatura y presión. Por la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT \quad (3.1)$$

con P igual a presión, V igual a volumen, n concentración de gas, T temperatura y R la constante universal de los gases ideales podemos detectar sonido según la variación de presión detectada en el interior, proporcionl a la señal que esté emitiendo el LED. Esta señal se envía al LTC2321-14

⁸Hamamatsu, Datasheet L13771-0330C, web: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/l13771_series_led1073e.pdf [Fecha de acceso : 13-04-2020]

⁹Cypress, Datasheet VDAC8, web: <https://www.cypress.com/file/131566/download> [Fecha de acceso: 13-04-2020]

¹⁰InveSense, ICS-40619, web: https://product.tdk.com/info/en/documents/catalog_datasheet/mems - mic/ICS - 40619 - Datasheet.pdf [Fecha de acceso : 13 - 04 - 2020]

Convertor analógico digital

En este sistema se encuentran tanto señales analógicas como digitales, las cuales son diferentes entre si. En primer lugar una señal analógica consiste en una variable eléctrica que evoluciona con el tiempo. Estas variables pueden representarse en forma de corriente, tensión o una carga eléctrica, variando de forma continua entre un límite inferior y uno superior. Por otro lado las señales digitales se tratan de señales también eléctricas pero que presentan dos niveles diferenciados que se alternan en el tiempo transmitiendo información previo código establecido, siendo estos dos niveles 1 o 0 [20].

Los **ADC** y los **DAC** son la respuesta a esta necesidad. La señal generada por el micrófono es de carácter analógico, pero para ser recogida e interpretada se necesita transformarla a digital, en este punto es donde interviene el LTC 2321-14, el **ADC** empleado en este sistema. Este se trata de un **ADC** tipo SAR de 14 bits más signo y entrada diferencial con arquitectura de dos canales capaz de trabajar hasta a 2Msps con un rango de 3.3V trabajando entre 0/3.3V. Cuenta con un pequeño paquete QFN de 4mm × 5mm buscando la menor ocupación de espacio posible.

Este se encuentra a la salida de la amplificación del sistema y recoge por uno de sus canales la onda la cual oscila alrededor de 1V para pasarle la conversión de la misma al microcontrolador empleado en la placa. Se trata de un **ADC** de aproximaciones sucesivas por lo que a pesar de que existen alternativas más rápidas como por ejemplo los **ADC** flash que emplean más comparadores a fin de obtener mayor velocidad para la funcionalidad y tamaño necesarios en este sistema uno con estas características es suficiente. Su funcionamiento se detalla en la figura siguiente.

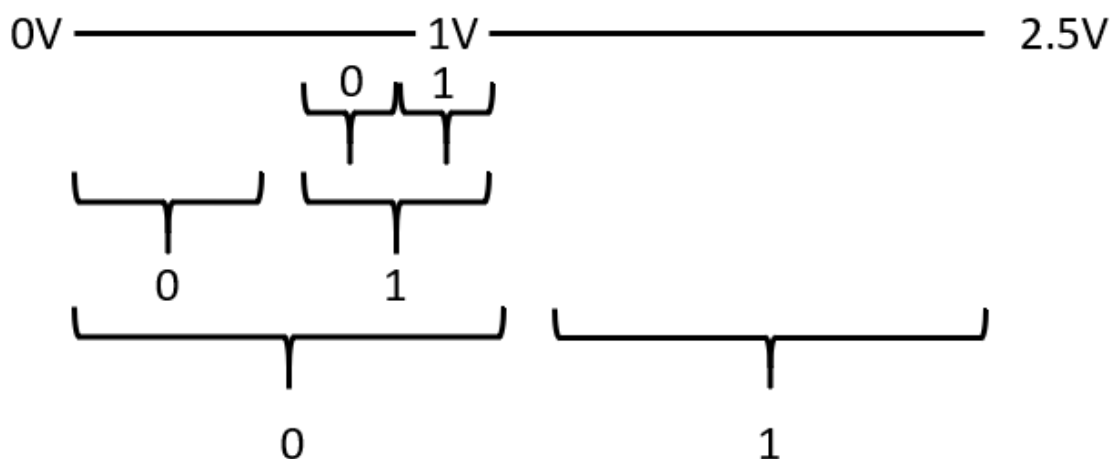


Figura 3.6: Diagrama de funcionamiento para un adc de aproximaciones sucesivas. En este, la señal a convertir ha de encontrarse entre el rango de trabajo del adc, para la conversión este compara la señal con la mitad del rango, asignando un 0 si es menor o 1 si es mayor. Repitiendo este sistema se puede inferir una señal digital a través de una entrada analógica.

Algoritmo Lock-In

El algoritmo Lock-In es un filtro digital de señales que permite obtener la componente a la frecuencia deseada para una señal cualquiera. Está basado en el producto de la señal por una función trigonométrica de la frecuencia que deseamos hallar, y la integración de este producto. Este algoritmo es sensible a la fase de la señal que medimos, y es por este motivo que la anchura del filtro es muy estrecha. Es por esto que es un algoritmo muy útil para poder medir una señal de frecuencia constante enterrada en ruido.

En primer lugar la formula general del producto de 2 cosenos con fase entre ellos y distinta frecuencia se describe mediante la expresión:

$$V_i(t)V_R(t) = \frac{V_0}{2}[\cos((\omega - \Omega)t + \Theta) - \cos((\omega + \Omega)t + \Theta)] \quad (3.2)$$

Donde Ω representa frec1, ω representa frec2, V_0 la amplitud, Θ el desfase y V_R y V_i la entrada de referencia y nuestra señal deseada respectivamente. Para el caso concreto en el que $\Omega = \omega$ encontramos la formula reducida a:

$$V_i(t)V_R(t) = \frac{V_0}{2}[\cos(\Theta) - \cos(2\Omega t + \Theta)] \quad (3.3)$$

En la figura 3.8 podemos ver cómo para la función de arriba (producto de cosenos de distinta frecuencia), la integral a tiempos largos está acotada, mientras que para la función de abajo (cosenos de igual frecuencia), la integral a tiempos largos aumenta a medida que crece el intervalo de integración, puesto que para cada periodo de la señal, hay más área a un lado del eje X que al otro. La demostración matemática se puede realizar dando la transformada de Fourier de la señal a la que queremos aplicar el filtro.

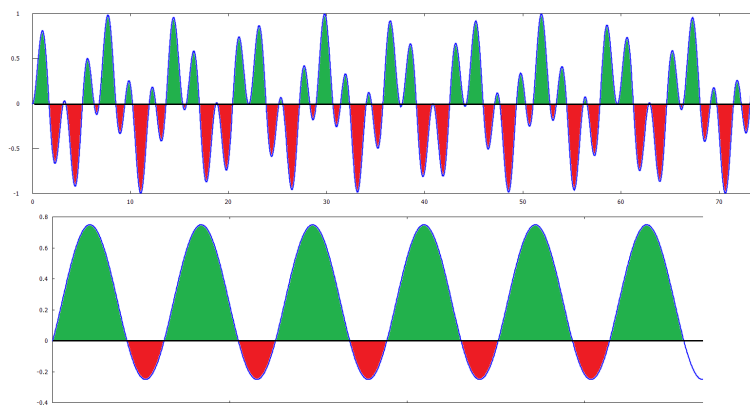


Figura 3.7: En la figura pueden observarse las gráficas que representan las multiplicaciones de dos cosenos, para distintas frecuencias en primer lugar y para la misma en el segundo [21].

3.1.2. Sensor de Viento

IMU

La unidad de medición inercial empleada en este sistema ha sido el ya mencionado ICM-20948 el cual se trata de un **modulo multichip (MCM)** que cuenta con dos matrices integradas. Dentro de la primera encontramos un giroscopio y un acelerometro de 3 ejes además de un **Digital Motion Processor (DMP)**. La segunda contiene el magnetometro de 3 ejes AK09916 ¹¹. Todos estos elementos se encuentran integrados dentro de un paquete QFN de 3mm x 3mm x 1mm configurando así un rastreador de movimiento de 9 ejes de proporciones minimas el cual resulta ideal para integrarse sobre un dron destinado a la sensorización ambiental [22].

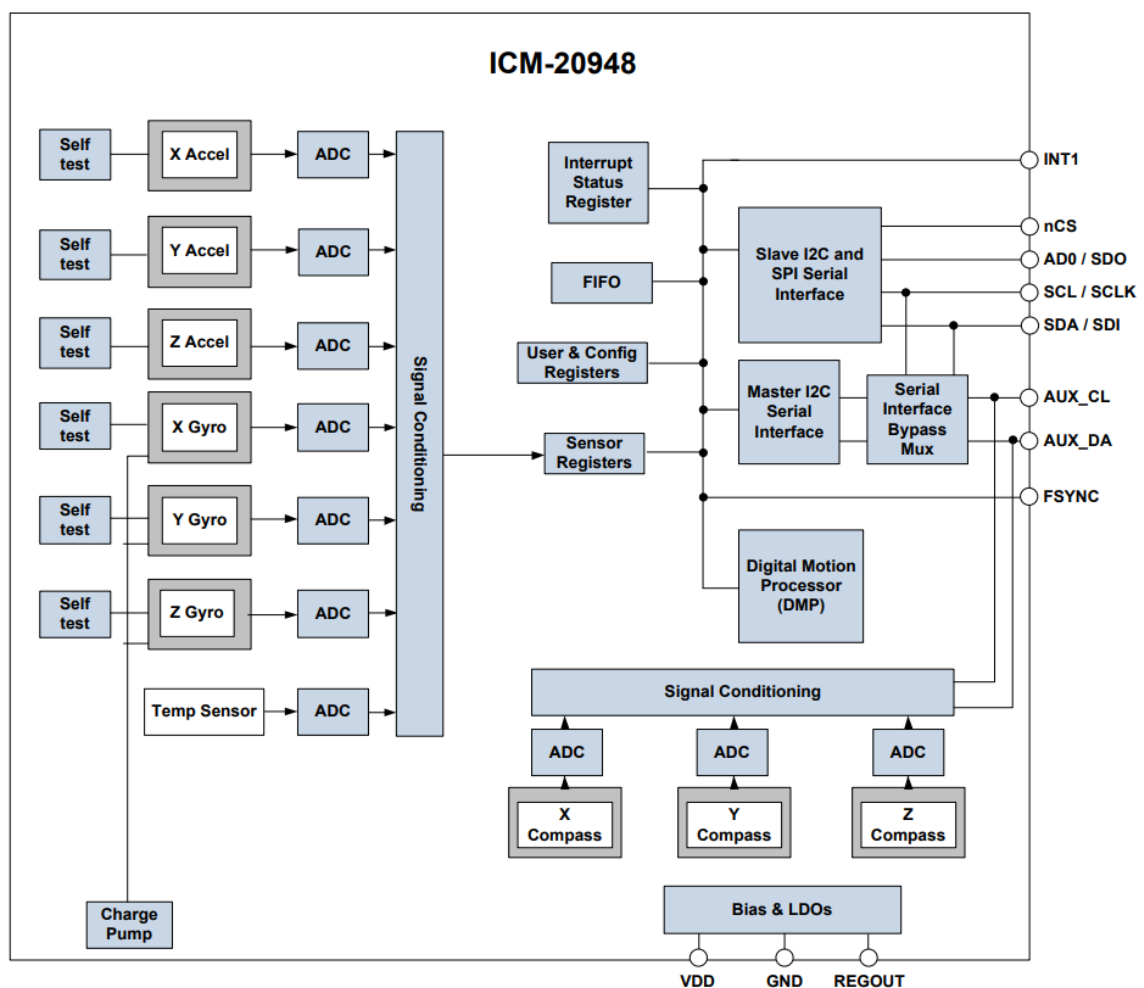


Figura 3.8: Diagrama de bloques con los componentes que conforman el ICM20948 [22].

En el sistema la utilidad de esta unidad consiste en proporcionar información para configurar el vuelo del dron. Estos datos en crudo deberán ser procesados antes de usarse.

¹¹ Asahi Kasei Microdevices Corporation, Datasheet AK09916, web:<https://www.y-ic.es/datasheet/78/SMSDW.020-2OZ.pdf> [Fecha de acceso: 8-04-2020]

3.1.3. Sistemas adicionales

Sensores de temperatura, humedad y presión

La temperatura, la presión y la humedad se tratan de 3 magnitudes que afectan el comportamiento de los gases, de ahí la necesidad de monitorizarlos. El sensor empleado para esto es el BME280, un sensor combinado digital de 3 sensores de temperatura, presión y humedad cuyas miniaturizadas medidas de 2.5x2.5x0.93 mm unido a su consumo reducido permiten su integración en un equipo ligero como sería el integrado sobre un dron [23]. A continuación la figura 3.11 detalla los bloques que conforman el BME280

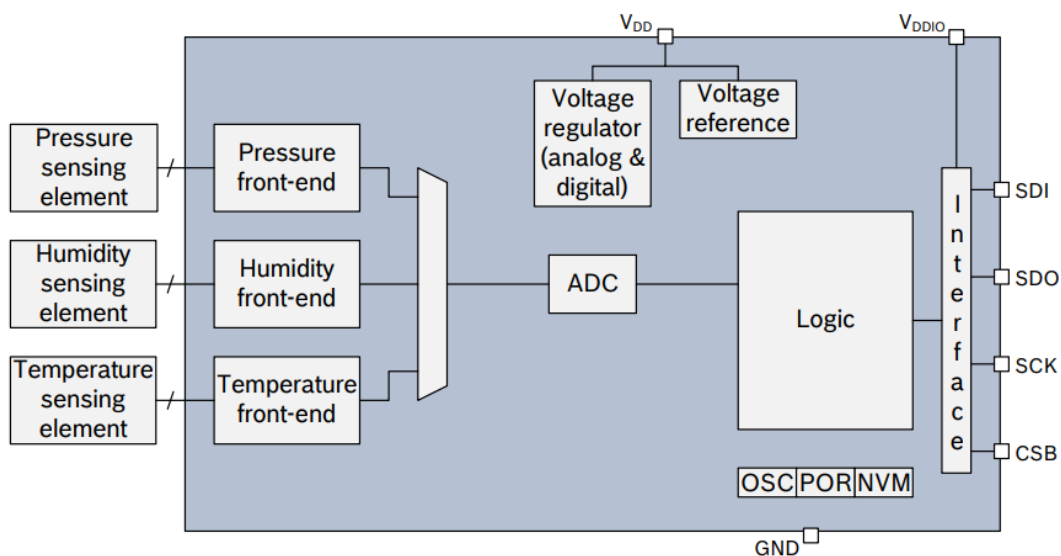


Figura 3.9: Diagrama de bloques con los componentes que conforman el BME280 donde pueden observarse los 3 sensores internos que envían los datos recibidos al ADC del propio chip que convierte los elementos del exterior en señales lógicas que posteriormente se enviarán desde el sensor [23].

De nuevo el protocolo de comunicación con el BME280 ha sido, al igual que con el LTC2321-14, SPI .

GPS

El sistema de posicionamiento global comúnmente conocido como GPS se encuentra constituido por una constelación de 24 satélites operacionales en **orbitas de tipo medio (MEO)** los cuales envían señales que son recibidas por los aparatos electrónicos conocidos como receptores GPS, lo que nos permite conocer nuestra ubicación en tres dimensiones, longitud, latitud y altura [24]. En este TFG el receptor GPS empleado se trata del NEO-6, un dispositivo cuyo bajo coste y prestaciones [25] permite su integración en un sistema económico y sometido a condiciones desfavorables. En la figura 3.12 se muestra el diagrama de bloques de dicho sensor.

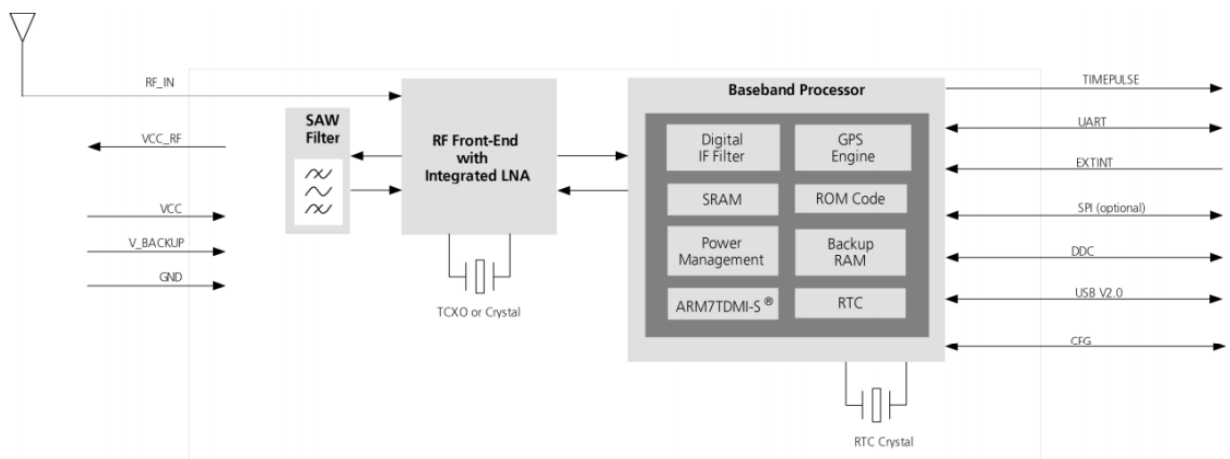


Figura 3.10: Diagrama de bloques con los componentes que conforman el NEO-6 [25]. En el podemos observar las distintas secciones que componen el sensor. Siendo la línea de comunicación UART la más importante de cara a la transmisión en este sistema.

3.2. Protocolos de comunicación

3.2.1. SPI

El protocolo de comunicación empleado con el LTC2321-14 y el BME280 será SPI , un protocolo sincrónico con arquitectura maestro-esclavo. SPI cuenta con 3 buses: **Master Input System Output (MISO)** , **Master Output System Input (MOSI)** , una señal de reloj **SCLK** además de la señal de selección de esclavo **Slave Select (SS)** . El sistema maestro-esclavo se vale de las líneas MISO y MOSI para la transmisión tratándose del maestro el microcontrolador en este caso y el esclavo el LTC2321-14. Las vías de comunicación son por tanto unidireccionales y la comunicación se produce sin interrupciones en los datos a diferencia de los protocolos anteriormente mencionados. Las figuras 3.7 muestra el diagrama de comunicación con el LTC2321-14.

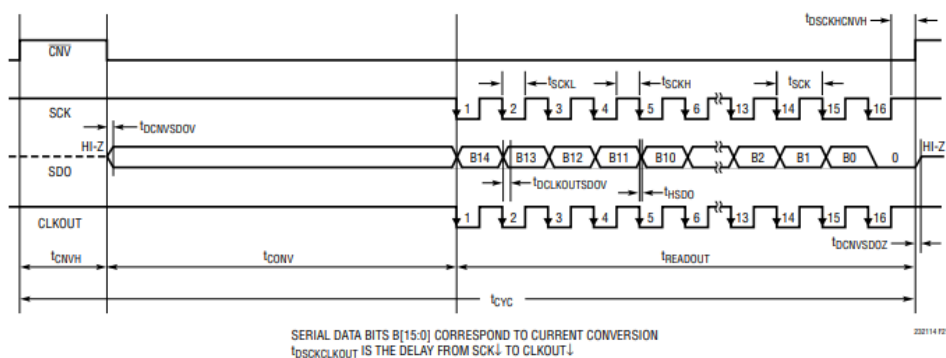


Figura 3.11: Diagrama de tiempos en la comunicación con el ADC LTC2321-14 empleando el protocolo SPI [26]. En el puede observarse como tras bajar el bit de la línea de conversión el sistema tarda unos instantes en empezar a transmitir, la transmisión en cada dato concuerda con el flanco de bajada del reloj.

A continuación se incluye también una topología básica de funcionamiento del protocolo SPI:

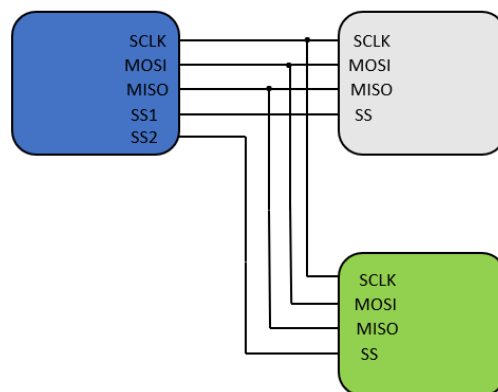


Figura 3.12: Diagrama con el esquema de funcionamiento del protocolo SPI para un maestro, en azul, y dos esclavos, gris y verde

3.2.2. I2C

La comunicación con el ICM20948 se ha establecido empleando el protocolo I2C adaptando una librería de código libre al lenguaje C desde el lenguaje C# [27]. Este protocolo permite conectar múltiples esclavos con un maestro además de permitir a varios maestros controlar uno o varios esclavos. Esta comunicación es siempre iniciada por el maestro el cual solicita los datos que requiera del esclavo o esclavos con los que se esté comunicando. En I2C se emplean dos líneas de señal las cuales necesitan resistencias de pull-up a vdd a fin de adecuarse a los niveles lógicos en los que se desarrolla el intercambio. Estas señales son la de reloj **Serial Clock (CLK)** y la señal de datos **Serial Data (SDA)** estableciéndose por tanto la comunicación en un canal bidireccional. I2C se trata de un protocolo síncrono que emplea la señal **CLK** para este fin. La figura 3.3 muestra una aplicación I2C típica.

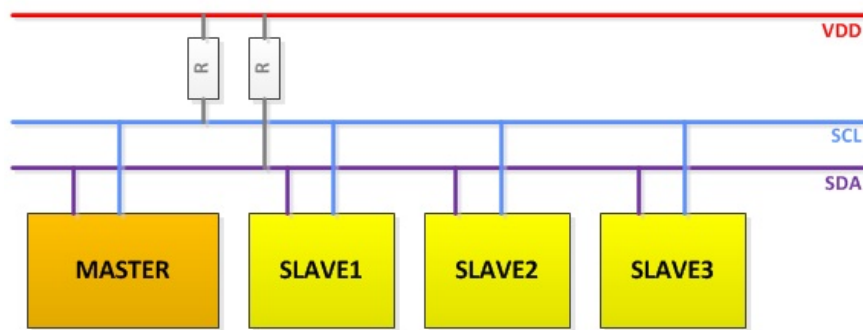


Figura 3.13: Esquemático I2C con un maestro y 3 esclavos con detalle de las líneas de comunicación y sus resistencias pull-up

En I2C la comunicación se establece mediante mensajes, que se fragmentan en paquetes de datos. En primer lugar se genera una señal de inicio del maestro hacia el esclavo. Cada mensaje cuenta con un paquete en el que se encuentra la dirección del esclavo, otro con un bit en el que se indica la condición de lectura o escritura para especificar si el maestro está mandando o recibiendo y además uno o varios paquetes con datos. Los paquetes de datos son siempre de tamaño 8 bits y entre los paquetes de datos existen bits de ACK o NACK en función de si la comunicación progresa adecuadamente o no. Al momento de finalizar la comunicación el maestro envía una señal de stop al esclavo, que deja de transmitir. El ICM20948 posee registros internos en distintos bancos a través de los cuales enviar los datos, por lo que para poder leer un dato concreto debe especificarse en que registro se debe solicitar. Un ejemplo de comunicación del ICM20948 puede observarse en la figura 3.4.

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			ACK		NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		DATA		

Figura 3.14: Ejemplo de comunicación con el ICM20948 empleando el protocolo I2C en una lectura de varios bits en un registro concreto.

3.2.3. UART

El protocolo de comunicación establecido para transmitir con el NEO-6 ha sido **UART** . En una comunicación **UART** los dos dispositivos se comunican directamente empleando dos señales, RX y TX de transmisión y recepción respectivamente. De esta manera la comunicación se secciona en paquetes los cuales cuentan con un bit de inicio, una serie de bits con los datos, un bit de paridad para controlar el cambio de algún bit en la transmisión y unos bits de stop. En este caso el microcontrolador será el receptor y el NEO-6 el emisor. **UART** se trata de un protocolo asíncrono, ya que no cuenta con ninguna señal de reloj, en el momento en el que el receptor detecta un bit de inicio este comienza a leer de su línea RX todo lo que el emisor tenga que enviar hasta que la comunicación termina.

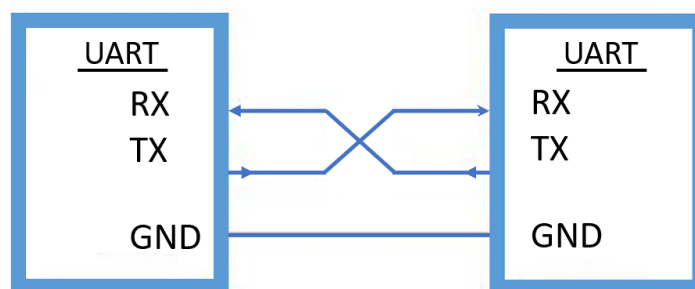


Figura 3.15: Topología básica del funcionamiento del protocolo de comunicación UART. En esta pueden observarse las líneas que lo conforman, siendo necesarios dos dispositivos para la comunicación la línea RX de recepción es la encargada de recibir los datos en su bus provenientes de la línea de transmisión del dispositivo con el que se está comunicando.

PRUEBAS Y RESULTADOS

La funcionalidad de todos los elementos del sensor comprometen los resultados finales de este. Por ello se han probado todos los componentes expuestos a fin de garantizar el correcto funcionamiento de los mismos. Las siguientes páginas ilustran el comportamiento de todas las partes del sistema tanto de manera individual como conjunta en los casos en los que sea significativo hacerlo de esta manera.

4.1. Evaluación de los sensores de temperatura, presión y humedad

Las magnitudes de temperatura, presión y humedad son controladas por medio del BME280. Para comprobar el correcto funcionamiento del mismo se ha dispuesto evaluar su comportamiento en un entorno controlado en el que se pueden controlar las condiciones que este mide con facilidad, en este caso el laboratorio de física aplicada situado en un sotano del módulo 14 de la facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid, donde se ha desarrollado buena parte del sistema.

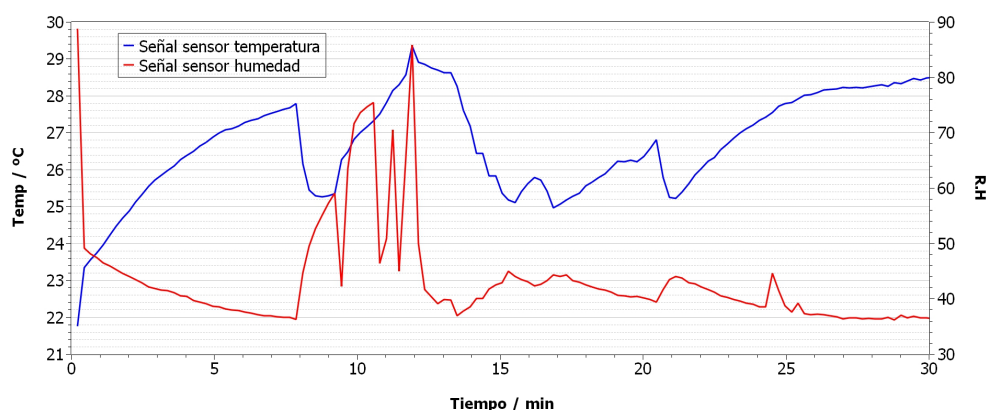


Figura 4.1: Prueba de temperatura y humedad del BME280 durante 30 minutos muestras en un entorno controlado con variaciones de condiciones conocidas. Los picos se relacionan con puntos en los que el sistema ha sido sometido a condiciones puntuales tanto de frío como de calor. En ella puede apreciarse la tendencia del sistema a acumular calor residual progresivamente.

La anterior figura ilustra una prueba realizada en la que se enfrentan temperatura y humedad. En esta se mantuvo el sistema en reposo durante unos minutos, donde puede comprobarse que el calor residual de la placa caliente el sensor progresivamente alcanzando los 28°C aproximadamente. Por su parte la medida de humedad desciende progresivamente. Tras esto el sensor se coloca unos instantes en una ventana, lo cual dispara la medida de humedad mientras se reduce drásticamente la temperatura. El pico de temperatura y humedad es debido a un golpe de calor aplicado repentinamente sobre el sensor. Tras esto el sensor se depositó de nuevo en un entorno cerrado y sin agentes externos, momento en el que puede comprobarse de nuevo la tendencia a acumular calor del sistema y el descenso progresivo de humedad.

4.2. Evaluación del receptor de señal GPS

La señal GPS permite ubicar el sistema en todo momento con el fin de permitirnos trazar un mapa de comportamiento de gases. Los datos que se obtienen del receptor de señal GPS Neo-6 se encuentran en formato GPRMC, una de las secuencias disponibles del protocolo **National Marine Electronics Association (NMEA)**. La forma de esta secuencia es la que puede verse en la figura 4.2.

```
$GPRMC,225446,A,4916.45,N,12311.12,W,000.5,054.7,191194,020.3,E*68
```

Figura 4.2: Secuencia estandar retornada por el receptor de señal GPS Neo-6. Los valores separados por comas se tratan de la información enviada por el sensor en función de la señal GPS recibida.

Representando cada campo,

hhmmss.ss	Hora UTC
A	Estado de recepción (A = Ok, V = error/warning)
llll.ll,a	Latitud (a = N o S)
yyyy.yy,a	Longitud (a = E o W)
x.x	Velocidad en nudos
x.x	Curso en grados
ddmmyy	Fecha UT
x.x,a	Variación magnética en grados (a = E o W)
*hh	Checksum

Figura 4.3: Tabla ilustrando cada uno de los campos de la secuencia del Neo-6. Siguiendo el formato de la figura 4.2.

De esta manera se han tomado medidas en dos escenarios distintos. En el primero no hay cobertura ni posibilidad de recibir señal GPS de ningún tipo mientras que el segundo se trata de una localización amplia con buena señal de recepción GPS. La figura 4.4 ilustra la salida del receptor para ambos casos.

\$GPRMC,V,,,,,,,,,N*53	\$GPRMC,095628.00,A,4032.76986,N,00341.71851,W,0.633,,050620,,,A*6a
\$GPVTG,,,,,,,,,N*30	\$GPVTG,,T,,M,0.633,N,1.172,K,A*20
\$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48	\$GPGGA,095628.00,4032.76986,N,00341.71851,W,1,05,2.29,776.8,M,50.2,M,,*44
\$GPGSA,A,1,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30	\$GPGSA,A,3,29,25,31,18,14,,,,,,,,,4.96,2.29,4.40*02
\$GPGSV,1,1,00*79	\$GPGSV,2,1,07,12,13,089,15,14,27,238,28,16,01,280,,18,31,157,28*74 \$GPGSV,2,2,07,25,41,081,34,29,69,042,39,31,65,292,32*43
\$GPGLL,,,,,V,N*64	\$GPGLL,4032.76986,N,00341.71851,W,095628.00,A,A*74
0	0
2545; 93243684; 32552; 405164; -36960;	2517; 93243598; 32493; 405460; -36951;

Figura 4.4: Por recuadros se asocia la salida del Neo6 en una zona sin señal de GPS, a la izquierda y otra salida correcta en la derecha. En rojo las salidas finales del sensor Neo6 para ambos casos. Este se encuentra configurado para que en caso de no detectarse señal correctamente se pongan las coordenadas de la Universidad Autónoma de Madrid. Los datos tomados en una zona con señal GPS fuerte se registraron en la puerta de la facultad de ciencias de la misma universidad siendo esta la explicación del parecido de ambos. En azul puede apreciarse también la salida de los sensores de temperatura, presión y humedad resultando por tanto esta última una medida de estas tres magnitudes con las coordenadas donde se han tomado.

4.3. Medida CH4

Esta sección abarca todo el proceso de la medición de metano. Comenzando desde la modulación de la onda del elemento emisor hasta la medida final del gas. La prueba y las condiciones en que se tomaron se detallan y explican también en esta sección.

En primera instancia se refleja la necesidad de contar con un sistema de amplificación para la señal analógica del módulo. A pesar de tratarse de la misma onda, la señal previo paso a la amplificación, canal 1 en amarillo, apenas puede representarse con 0.02 V por división resultando imposible de trabajar con ella.

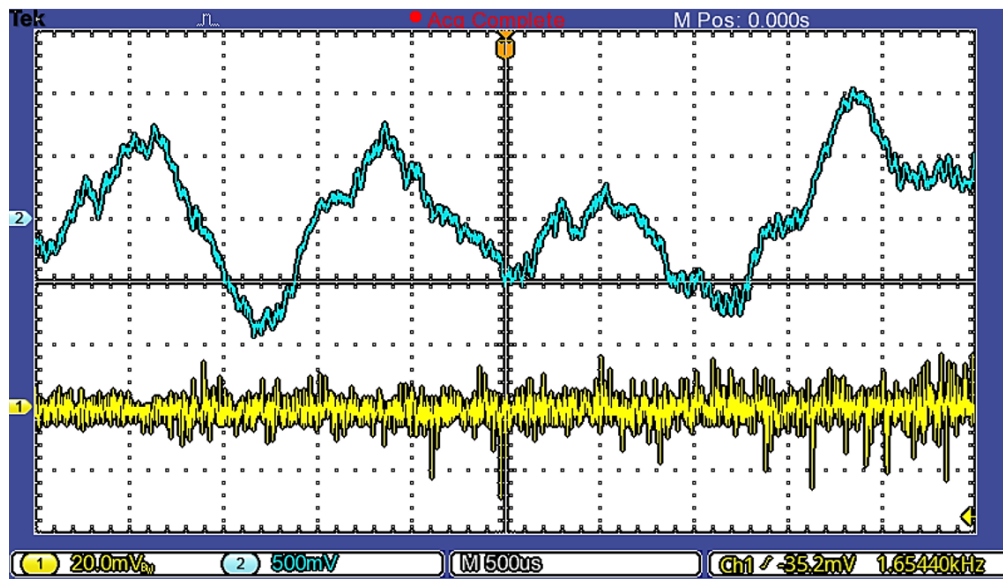


Figura 4.5: Comparativa de osciloscopio entre la señal generada por el micrófono previa a ser amplificada y misma señal ya amplificada. Puede observarse como esta se aumenta en un factor 25 encontrándose representada por 0.02 V por división en un principio hasta los 0.5V por división de la señal ya amplificada

En la figura 4.6 se muestra una comparativa de la señal modulada en origen por el PSOC con la señal generada por el detector fotoacústico. En amarillo la señal digital generada a través del DAC del microcontrolador y en azul la señal tras la última etapa de amplificación, a la entrada del ADC LTC2321-14. La primera gráfica se trata de la señal sin tratar mientras que en la segunda se ha realizado una media de 64 muestras a fin de obtener un mayor suavizado. Puede observarse como las formas de ambas son proporcionales. Para ambas señales tras amplificar puede apreciarse ruido producto del proceso sufrido y su paso de un entorno digital a uno analógico. Los voltios por división son 0.2 V en el canal 1 y de 0.5 V en el 2 mientras que la división del eje temporal es 500 nanosegundos por división.

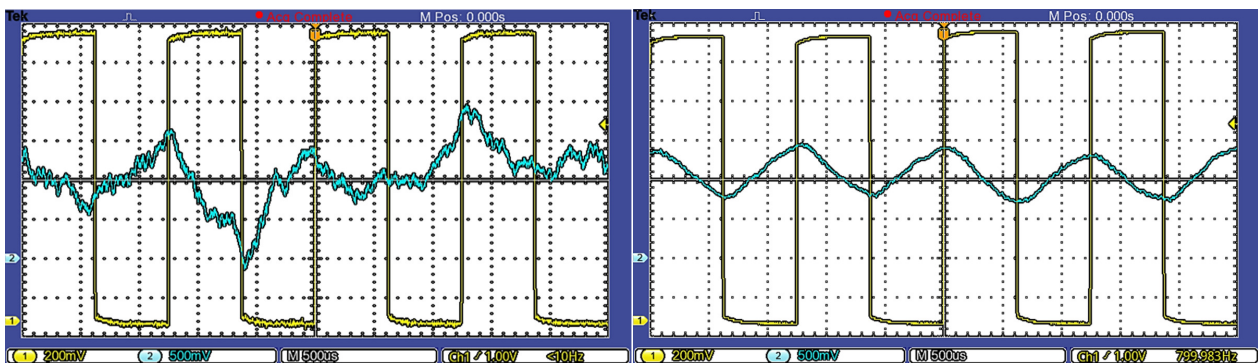


Figura 4.6: Resultados obtenidos mediante el osciloscopio en los que se comparan las señales de modulación con la obtenida tras realizar la amplificación. En la primera figura se compara la señal generada por el DAC con la recibida en crudo por el ADC LTC2321-14. Para la segunda se ha realizado una media de 64 divisiones para suavizar la misma.

También se ha observado la transformada rápida de Fourier para la señal ya amplificada. Con 125Hz por división la figura 4.6 muestra un pico en los 800Hz, frecuencia con la que se está modulando el LED, de donde podemos extraer que la fotoacustica está ejerciendo su labor correctamente.

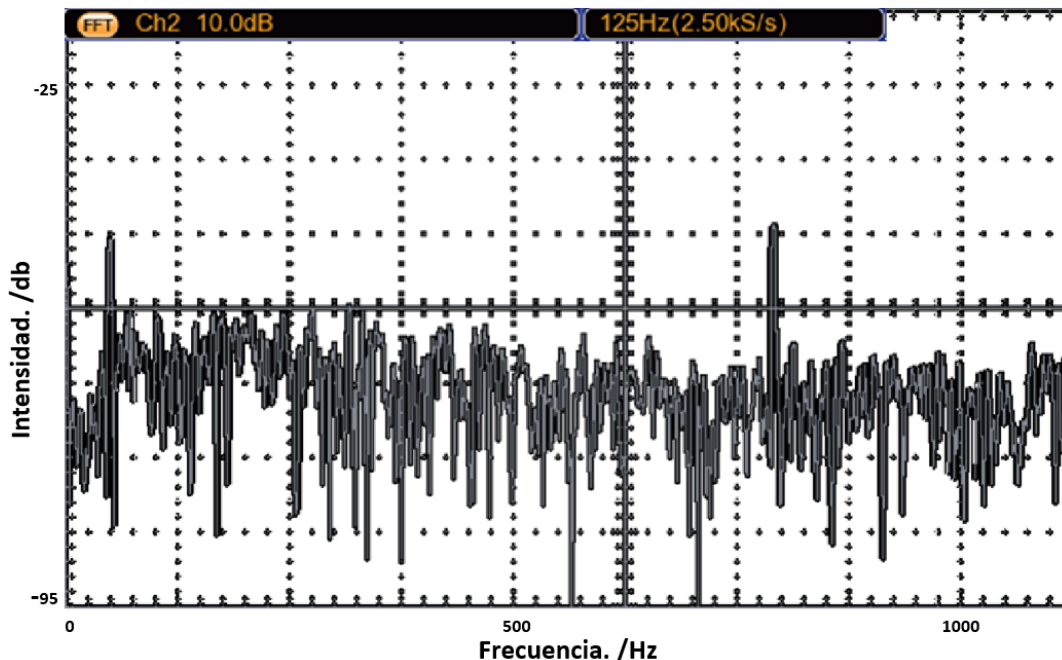


Figura 4.7: FFT para la señal producida por el detector fotoacústico tras su paso por la amplificación del sistema. La señal modulada por el DAC del PSOC se modula a una frecuencia de 800Hz, valor que se refleja en el segundo pico de la gráfica. El otro pico encontrado en 50Hz con la tiene que ver con la naturaleza de la red eléctrica española que alimenta el sistema en el momento de la medida.

La figura 4.8 adjunta la respuesta del sensor de CH₄ a una distintas concentraciones de metano desde 100 Parts Per Million (ppm) hasta 1000 ppm . La prueba sometida al sensor ha durado 19 horas y se ha realizado en una caja aislada de 4 litros de volumen empleando nitrógeno seco como gas de fondo para gas metano como gas objetivo. Esta prueba se ha realizado en humedad cero durante la mayor parte de la misma. La prueba se compone de 10 pasos de 100 ppm en un unico ciclo de trabajo coincidiendo los primeros puntos con los primeros ciclos. En cada ciclo puede observarse como la señal del sensor disminuye a medida que se concentra en la caja una mayor cantidad de Metano, es a partir del 4 paso donde se puede comenzar a observar claramente la influencia del gas y la relación que tiene el comportamiento de la medida frente a la temperatura del entorno. Este paso coincide con una concentración de 400 ppm por cada 1000 ppm esto es un 40 por ciento del volumen total de la caja en la que se ha realizado la prueba, de este punto en adelante tras cada ciclo el sistema tiene un tiempo de descanso de 45 minutos. Tras los cuales se incrementa en 100 ppm la sucesiva prueba encontrando saltos considerables en las concentraciones a partir de este punto. La señal oscila entre los valores 2000 y 1850. Al final de la prueba puede observarse como el nivel de la señal vuelve a aumentar. El suavizado de la señal se ha realizado empleando una Savitzky-Golay.

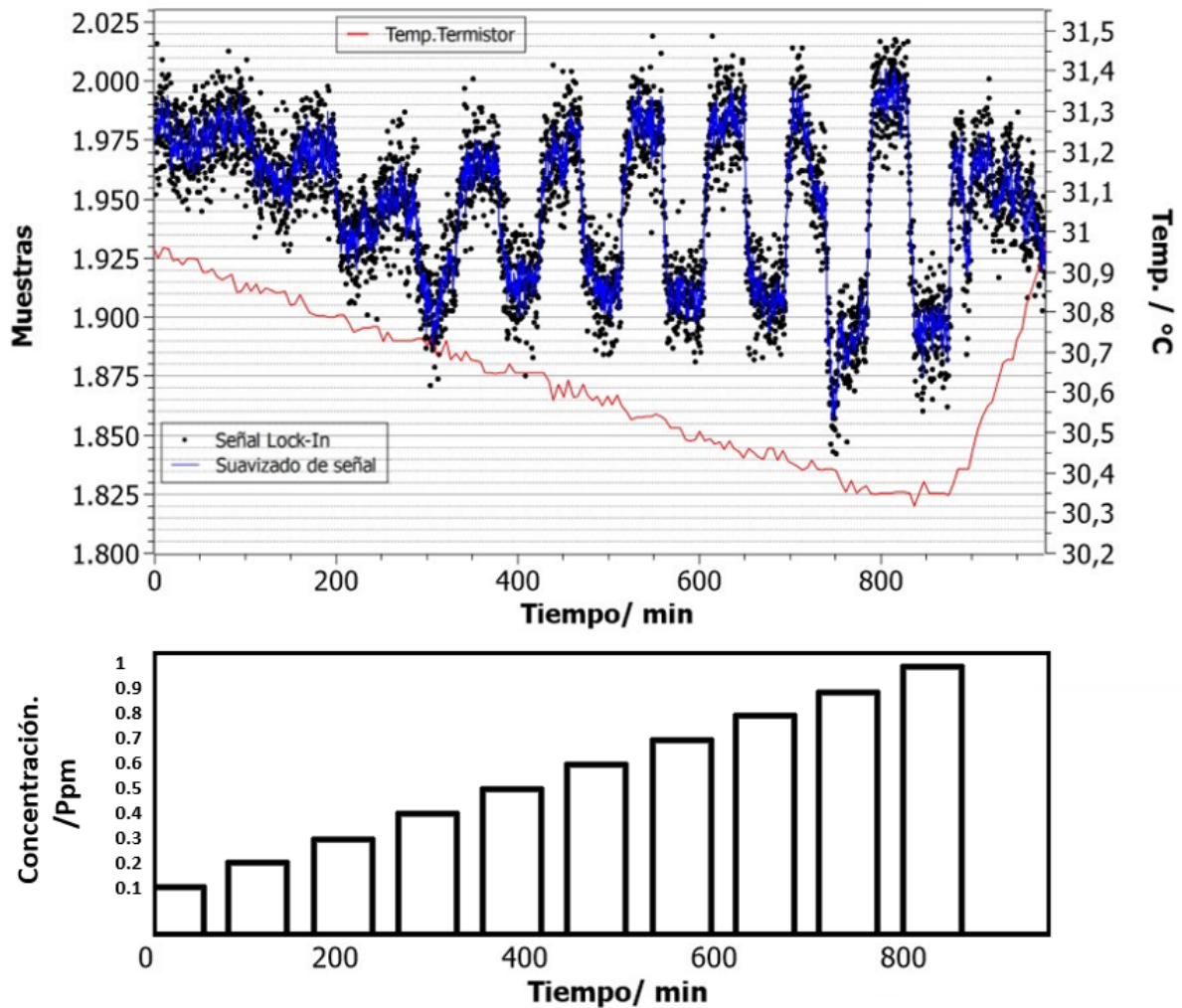


Figura 4.8: Datos recogidos en una prueba con gas metano de 10 ciclos de incrementos de 100ppm por ciclo a una concentración de 1000ppm. En la misma puede observarse como disminuye la señal a medida en determinados sectores. Estos coinciden con los momentos en los que la caja se llena con mayor concentración de gas metano. Este absorbe una mayor cantidad de luz haciendo disminuir la señal del sensor. A mayores concentraciones de gas más baja la señal del mismo. Con esta tendencia también puede observarse el comportamiento de la temperatura la cual comienza a descender progresivamente desde los 31°C hasta los 30°C que se pueden observar en la figura debido al menor movimiento de las partículas en el sensor. La tabla inferior hace referencia a la cantidad de concentración metano en ppm con el tiempo.

La figura 4.9 adjunta el resultado de la relación entre la humedad y la salida de la medida, como puede observarse la señal no se comporta de ninguna manera concreta tras comenzar a aumentar la humedad en el entorno clarificando que el sistema apenas es sensible a la humedad en el entorno. Los valores de la señal se encuentran oscilando entre 1900 y 1970 no encontrándose ningún punto repentinamente distinto con el respecto aumento de la temperatura la cual comienza en 0 para aumentar hasta el 80 por ciento durante aproximadamente 130 minutos de la prueba.

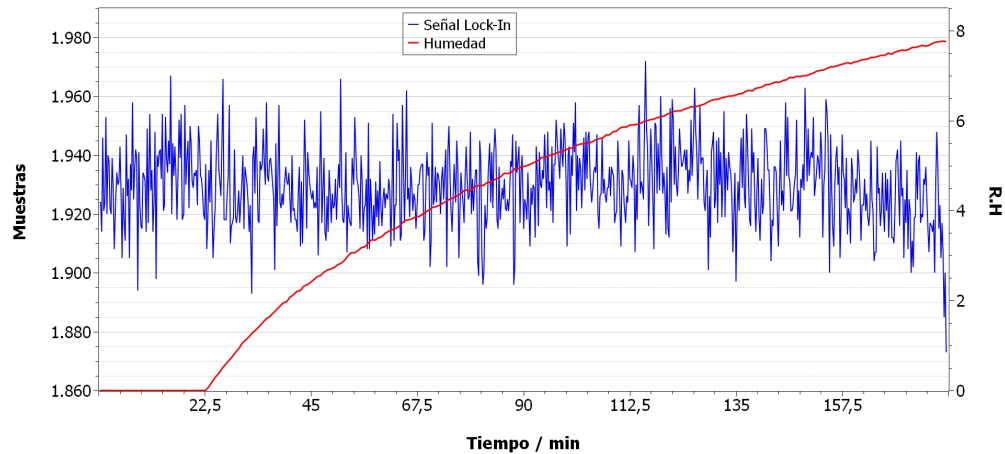


Figura 4.9: Prueba resultado de aumentar la concentración de humedad durante el funcionamiento del sistema. El aumento progresivo de la humedad que aumenta desde un 0 a un 80 por ciento en el ambiente no afecta de ninguna manera a la señal en crudo del sensor. De esta forma se puede concluir en que la señal permanece inalterada en función de la humedad del entorno.

Para obtener la relación entre la temperatura y los resultados obtenidos por el Lock-In la figura 4.10 representa el ajuste empleando una polinomial de grado dos, en rojo.

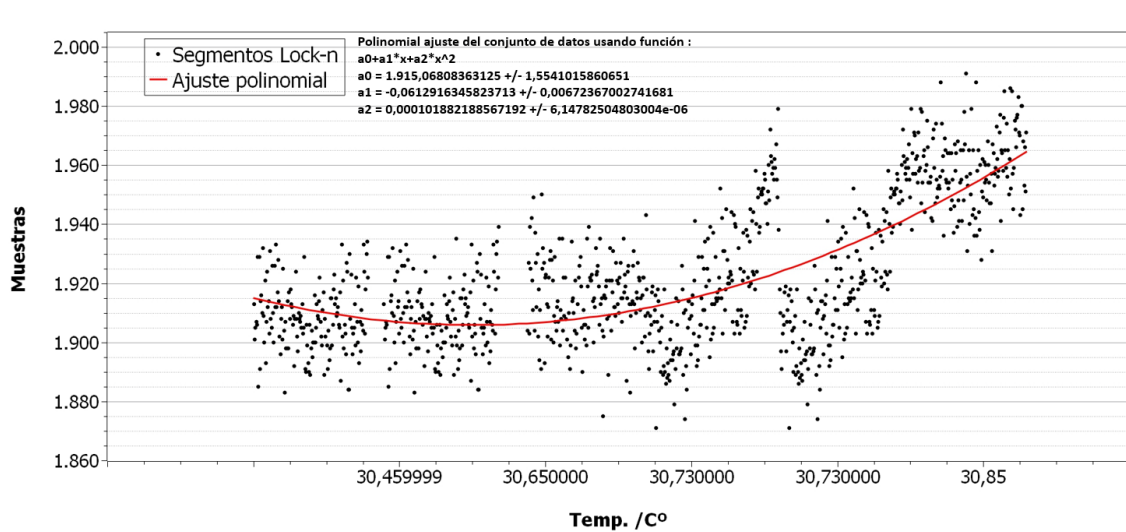


Figura 4.10: Relación entre los segmentos más significativos de las medidas del algoritmo Lock-In con los segmentos de temperatura en dichos momentos a lo largo de la medida. En ella puede observarse la tendencia de estos valores a aumentar cuanto mayor sea la temperatura reflejándose un incremento entre 1920 y 1980 aproximadamente con la subida de $0,4^\circ$ de temperatura.

Una vez se ha clarificado la influencia de la humedad sobre el sistema y ejemplificado la relación con la temperatura se ha procedido a realizar una calibración entre los segmentos con concentración de CH_4 y los segmentos sin esta.

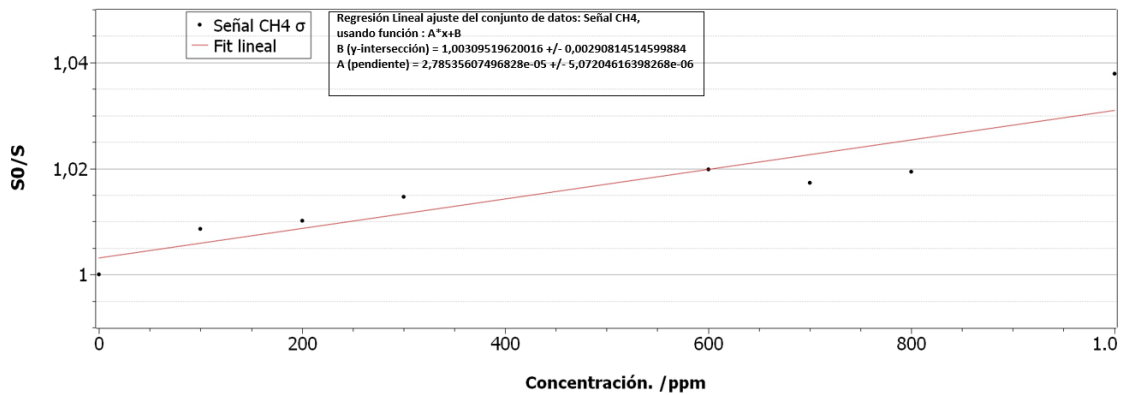


Figura 4.11: Curva de calibración del sensor. Necesaria para obtener valores en ppm en función de la señal del sensor. En rojo el ajuste lineal empleado para la normalizar de los datos correspondientes a las secciones con concentración de metano y los segmentos sin esta. Se adjunta la fórmula con la recta de la misma. Puede observarse la tendencia a crecer de la misma en función de la concentración de CH_4 en el entorno. El sensor, por lo largo del camino óptico tenderá a saturar en mayores concentraciones de gas en el entorno.

4.4. Evaluación de la unidad de medición inercial

Una IMU retorna los valores registrados para las coordenadas X,Y, Z en función de la posición, o las fuerzas que se ejercen sobre el mismo. Puesto que el sistema carece de un algoritmo con el que interpretar dichos datos en crudo se ha sometido al mismo a una fuerza a fin de generar una aceleración y se ha realizado una aproximación de los cambios en crudo registrados por el sensor.

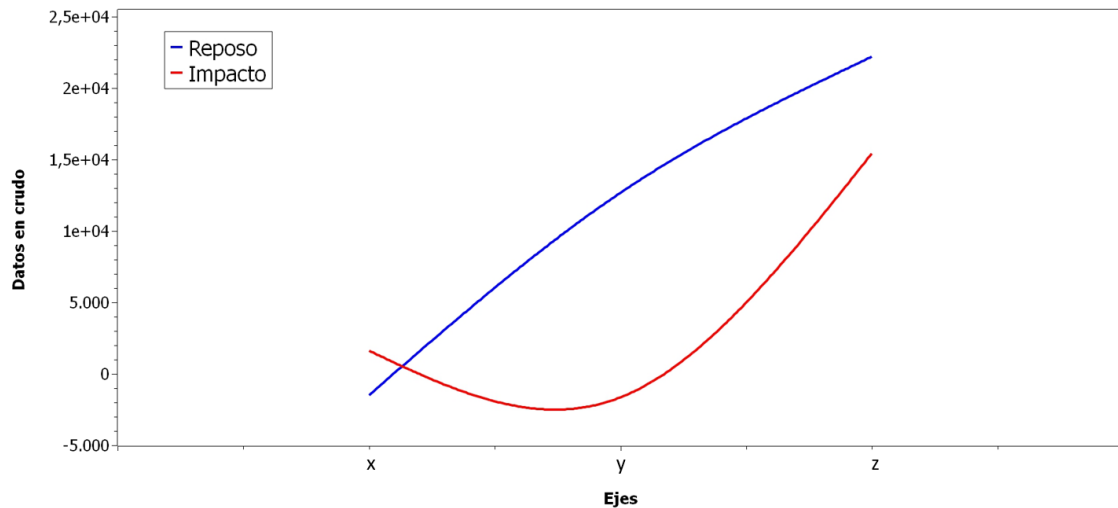


Figura 4.12: En la figura se presenta la variación de valores presentados para la media de la aceleración en los ejes x, y, z de 10 medidas en reposo con 10 medidas para la misma magnitud mientras el sensor se encuentra siendo sometido a un movimiento.

Estos datos son aproximaciones experimentales y solo se utilizan como referencia para demostrar la correcta comunicación con la IMU integrada en el sistema.

4.5. Tamaño y peso del sistema

El sistema terminado cuenta con un peso final de 50.0125 gramos con el sensor de gas acoplado y con unas dimensiones de 7.6 centímetros de alto x 8.4 centímetros de ancho x 13.5 centímetros de largo. El peso de la placa por separado es de tan solo 31.854 gramos. Los cables que alimentan el elemento emisor son de 15 centímetros. La unión entre la placa y la sección fotoacústica se ha realizado empleando pegamento termofusible.

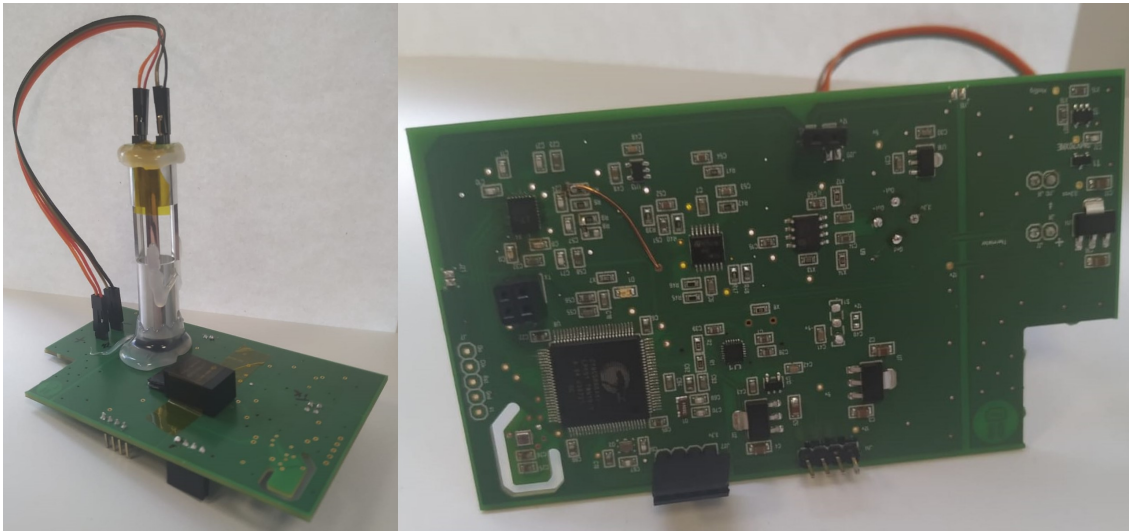


Figura 4.13: Sistema con el sensor de CH₄ acoplado y todos los sensores comerciales implementados visto desde el frente y en vertical.

CONCLUSIÓN

En este TFG se ha desarrollado un sistema de detección de CH_4 ligero, económico y de dimensiones reducidas con capacidad para acoplarse y apoyar un dron empleando diversos protocolos de comunicación para 4 sensores comerciales empleando un microcontrolador. El sensor de temperatura, presión y humedad BME280, el receptor de señal GPS NEO6, la unidad de medición inercial ICM20948 y el ADC LTC2321-14. La comunicación con el BME280 y el LTC2321-14 se ha establecido mediante SPI mientras que para comunicarse con el ICM20948 y el NEO6 se han empleado I2C y UART respectivamente. El sensor empleado ha sido un modelo NDIR basado en detección fotoacústica y el principio de absorción de los gases de Beer-Lambert. Todo ello emplazado en una PCB de diseño propio. La señal de modulación del elemento emisor se transmite a una frecuencia de 800Hz, la cual tras ser captada por el elemento receptor del sensor necesita ser tratada mediante el empleo del algoritmo Lock-In el cual nos permite desenterrarla del ruido al que se encuentra sometida. La transformada rápida de Fourier ha sido empleada a fin de corroborar que dicha señal estaba siendo correctamente emitida por el receptor fotoacústico. La misma señal ha tenido que ser sometida a un proceso de amplificación de levantamiento para poder ser procesada con el LTC2321-14 puesto que en primera instancia en la salida del receptor fotoacústica esta es una debil señal del orden de 20mV. Tras procesarse la señal y asegurarse de que la detección fotoacústica funciona correctamente el sistema ha sido sometido a distintas pruebas en las que se ha comprobado el correcto funcionamiento de todos los componentes que lo conforman. Desde nivel hardware que implica la correcta conectividad de los pines, ausencia de cortocircuitos o problemas eléctricos. Hasta el nivel software en el que la carga fundamental del trabajo ha recaído sobre el control de todos los protocolos de comunicación y correcta recepción y trabajo de los datos. El sensor de gas ha sido sometido a una prueba de 19 horas en las que se ha podido registrar variación de la señal del mismo en relación a la concentración de CH_4 en el entorno. Esta medida ha demostrado ser inalterada en función de la humedad añadida sobre la misma.

En vistas al futuro, el sistema implementará un algoritmo de tratamiento de los datos transmitidos en la unidad de medición inercial como el algoritmo de Madgwick [28] con el que normalizar los datos obtenidos para poder ser interpretados por los seres humanos y no tener que realizar asociaciones basadas en datos en crudo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Calle, "Determinación de gases de efecto invernadero y gases traza mediante Teledetección," *World Meteorological Organization*, pp. 1–69, 2007.
- [2] A. M. Cubillas de Cos, O. M. Conde Portilla, C. Jáuregui Misas, A. Cobo García, and J. M. López Higuera, "Detección de gas metano mediante espectroscopia de absorción óptica y algorítmica multilínea ILS," *4ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'05, 2005, Elche*, p. 375-379, vol. 1354, no. 2001, pp. 375–379, 2005.
- [3] S. E. Mikaloff Fletcher, P. P. Tans, L. M. Bruhwiler, J. B. Miller, and M. Heimann, "CH₄ sources estimated from atmospheric observations of CH₄ and its ¹³C/¹²C isotopic ratios: 1. Inverse modeling of source processes," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 18, no. 4, pp. 1–17, 2004.
- [4] R. U. S. A. Data, P. Examiner, M. Hellner, and D. D. Kantor, "(12) United States Patent," vol. 2, no. 12, 2009.
- [5] V. V. Avrutov, A. N. Sapegin, Z. S. Stefanishin, and V. V. Tsisarzh, "Calibration of an Inertial Measurement Unit," *International Applied Mechanics*, vol. 53, no. 2, pp. 228–236, 2017.
- [6] Bauer, "(12) United States Patent," vol. 2, no. 12, 2011.
- [7] S. Kumar and K. B. Moore, "The Evolution of Global Positioning System (GPS) Technology," *Journal of Science Education and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 59–80, 2002.
- [8] M. S. Braasch, A. J. V. A. N. Dierendonck, and S. Member, "GPS Receiver Architectures and Measurements," vol. 87, no. 1, 1999.
- [9] C. Barth, I. R. Linscott, and U. S. Inan, "A Double notch RF filter architecture for SAW-less GPS receivers," *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 1804–1807, 2011.
- [10] B. W. Karr and M. N. Us, *resistive temperature sensors*, vol. 2. 2015.
- [11] H. Berthou, "Optical-fiber temperature sensor based on upconversion-excited fluorescence," vol. 15, no. 19, pp. 1100–1102, 1990.
- [12] P. R. Childs, J. R. Greenwood, and C. A. Long, "Review of temperature measurement," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 8, pp. 2959–2978, 2000.
- [13] W. P. Eaton and J. H. Smith, "Micromachined pressure sensors: Review and recent developments," *Smart Materials and Structures*, vol. 6, no. 5, pp. 530–539, 1997.
- [14] A. Fenner, "/ int V," vol. 2, no. 12, 2008.
- [15] C. Y. Lee and G. B. Lee, "Humidity sensors: A review," *Sensor Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 1–15, 2005.
- [16] N. S. Lawrence, "Analytical detection methodologies for methane and related hydrocarbons," *Talanta*, vol. 69, no. 2 SPEC. ISS., pp. 385–392, 2006.
- [17] "National institute of standars and technology." <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Type=IR-SPEC&Index=1>.

- [18] P. Aparicio, "Sistema miniaturizado de mediciones de dióxido de carbono," 2019.
- [19] L. Scholz, A. Ortiz Perez, B. Bierer, P. Eaksen, J. Wöllenstein, and S. Palzer, "Miniature low-cost carbon dioxide sensor for mobile devices," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 9, pp. 2889–2895, 2017.
- [20] R. S. Castro Rios, "Estudio E Implementación De Un Convertidor Analógico Digital Y Digital Analógico Sigma Delta," no. October, p. 223, 2015.
- [21] G. Rodr, "Amplificador Lock-In," vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2019.
- [22] G. Description, "ICM-20948 datasheet: World ' s Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking ™ Device," pp. 1–89, 2017.
- [23] G. Halliday, E. H. Bigio, N. J. Cairns, M. Neumann, I. R. MacKenzie, and D. M. Mann, "BME280 datasheet," *Acta Neuropathologica*, vol. 124, no. 3, pp. 373–382, 2012.
- [24] Vicente Ortega y M. Ángeles Moya catedraisdefe.etsit.upm.es, "Los orígenes del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) - Wiki-Catedraisdefe," 2013.
- [25] Ublox, "NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet NEO-6-Data Sheet This document applies to the following products: Name Type number ROM/FLASH version PCN reference," tech. rep., 2011.
- [26] N. M. Codes, M. Range, N.-c. Latency, H. Speed, D. Acquisition, R. D. Acquisition, O. Networking, and M. M. Control, "Typical Application," pp. 1–29, 2016.
- [27] C. Cline, "ICM20948/ICM20948.c at master · CoryCline/ICM20948 · GitHub," 2018.
- [28] S. O. Madgwick, A. J. Harrison, and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2011.

ACRÓNIMOS

- ADC** Conversor analógico digital.
- CLK** Serial Clock.
- CH₄** Metano.
- DAC** Conversor digital-analógico.
- DMP** Digital Motion Processor.
- ESG** Enviromental Sensing Group.
- GPS** global positioning system.
- I2C** Inter-Integrated Circuit.
- IMU** Inercial Measure Unity.
- IR** laser de infrarojo cercano.
- MCM** modulo multichip.
- MEMS** sistemas microelectromecanicos.
- MEO** orbitas de tipo medio.
- MFS** Mass Flow Sensors.
- MISO** Master Input System Output.
- MOSI** Master Output System Input.
- NDIR** non dispersive infrared spectroscopy.
- NMEA** National Marine Electronics Asociation.
- PCB** printed circuit board.
- ppm** Parts Per Million.
- SAW** onda acústica de superficie.
- SDA** Serial Data.
- SPI** Serial Peripheral Interface.
- SS** Slave Select.
- TFG** trabajo fin de grado.
- UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.
- VCCS** fuente de corriente controlada por voltaje.

APÉNDICES

CONFIGURACIÓN PARA LA MEDIDA DE GAS METANO

La prueba se realizó empleando los Mass Flow Sensors (MFS) del laboratorio del Environmental Sensing Group (ESG) de la Universidad Autónoma de Madrid para controlar las condiciones exactas de la prueba.

The screenshot shows the 'ESG Gas Controller' software interface. At the top, there are navigation buttons: 'Go to Page AGC', 'Go to Page GB', 'Go to Page GF', 'Go to Page CG', 'Extras', 'Save', 'Load', and 'Debug Console'. Below these are tabs for 'Test Settings', 'FG Settings', 'BG Settings', and 'Global view'. The main configuration area is divided into sections:

- Stage Settings:** 'Number of stages' is set to 1.
- Max Liters per Minute:** 'Max L/m' is set to 2.
- Cycles Settings:**
 - 'Number of cycles' is set to 23.
 - 'Time of cycle' is set to 0 h and 45 min.
 - 'Rest time between each cycle (DISABLED)' is set to 0 h and 0 min.
 - 'End Rest time' is set to 1 h and 0 min.
 - 'Data Input' is set to 'Parts Per Millon (PPM)' (selected), with 'Percentage (%)' and 'Liters per min (L/m)' as other options.

A red bar at the bottom of the window contains the text 'STOP'.

Figura A.1: Captura del programa de configuración de medidas empleado en la prueba en el que asigna el número de ciclos y el número de litros maximos por minuto también a uno y el número de ciclos de la prueba con su respectivo tiempo y descanso entre ciclos. Todo en partes por millón.

En la figura A.2 encontramos la configuración de las ppm de la prueba para cada ciclo.

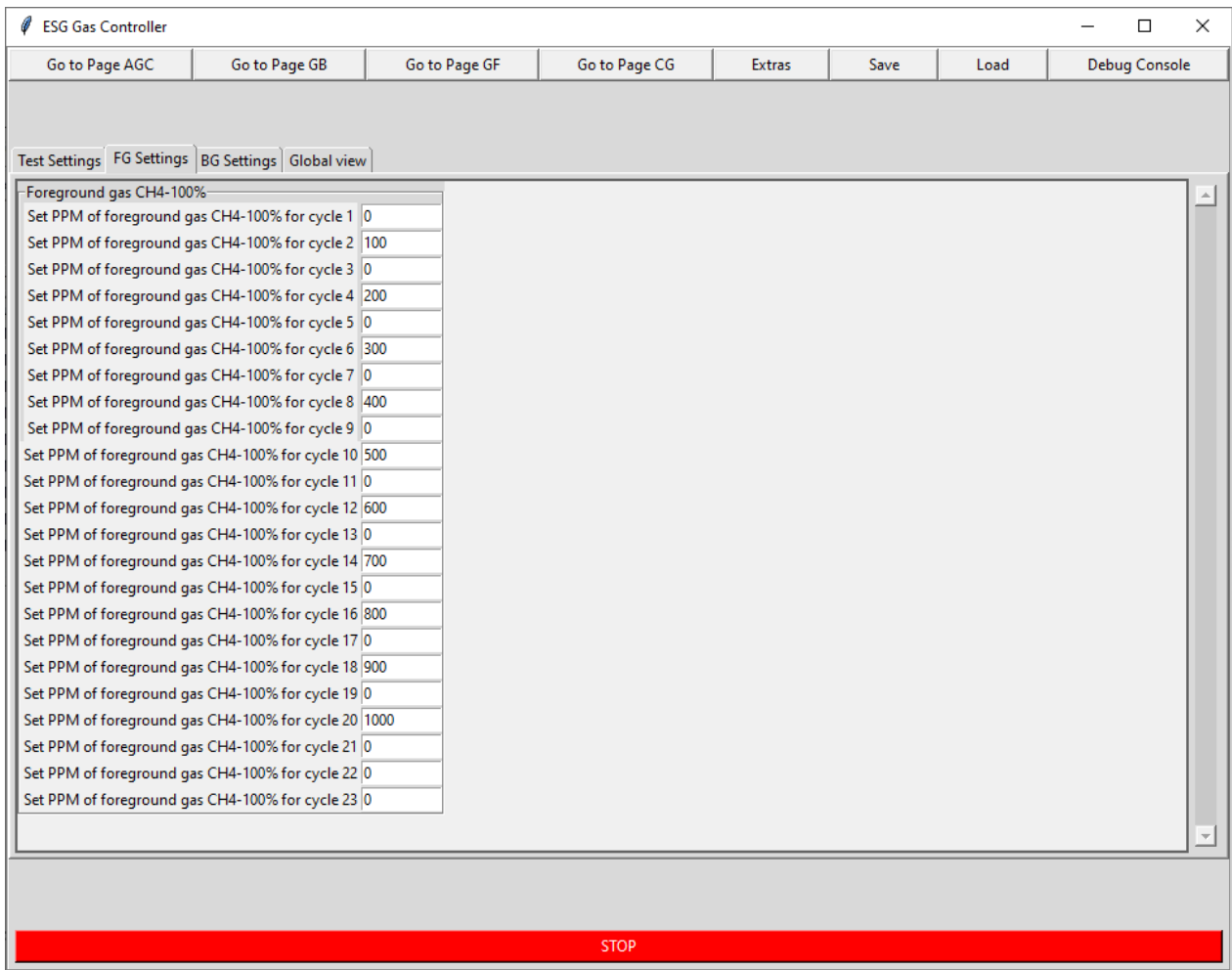


Figura A.2: Asignación de los ppm en cada ciclo de la medición de Metano

Vista final de la configuración de la prueba y del comportamiento que tendrán los gases empleados en la misma a lo largo de las 19 horas de duración de la misma.

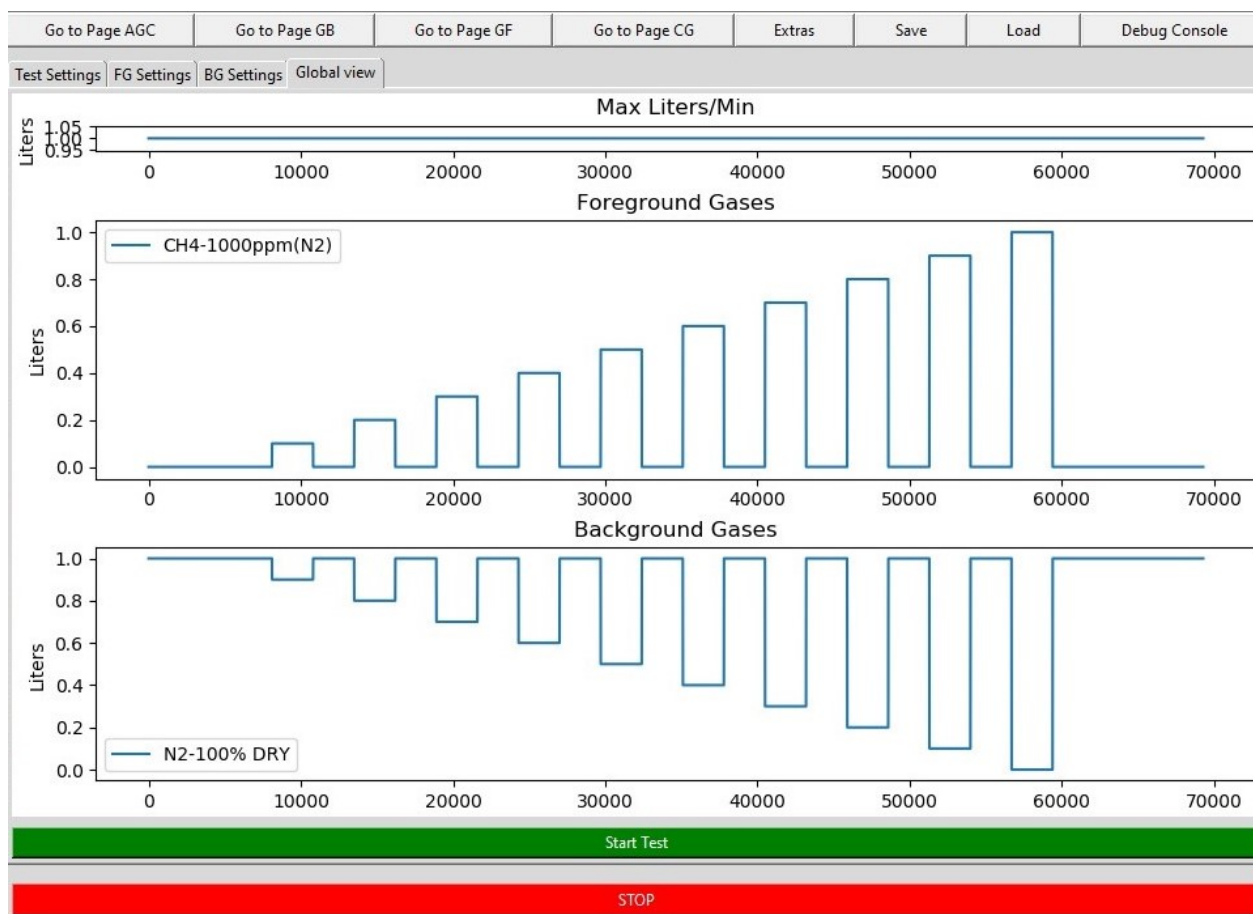


Figura A.3: Imagen en la que se representa la relación gas objetivo - gas de fondo en la medición de gas metano.

EVALUACIÓN DE LA MEDICIÓN DE METANO.

A continuación se adjuntan 3 gráficas en las que pueden observarse la evolución de la prueba tras terminar la misma. La primera se refiere al flujo de la prueba, de 1 litro constante. La segunda establece la relación enfrentada para los gases participantes en la prueba. La última se trata de la lectura de cada uno de los massflow, para expulsar los litros necesarios en función del voltaje.

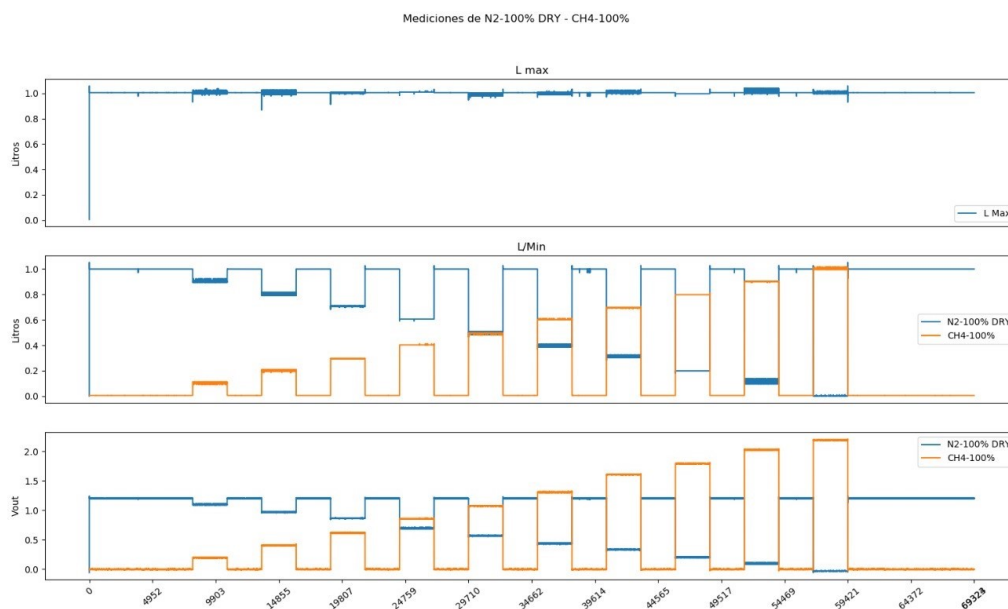


Figura B.1: Figura en la que se pueden apreciar el flujo de gas monitorizado a lo largo de la prueba. La relación voltaje gas y el enfrentamiento entre los gases empleados en la prueba.

COMUNICACIÓN CON EL ICM-20948.

Para comunicarse con el ICM-20948 se ha adaptado una librería en lenguaje C# de la misma [27]. Este código se centra en la lectura de registros y establecimiento de la conexión con el sensor siguiendo el protocolo del fabricante.

Código C.1: Función para iniciar la comunicación con el ICM20948

```
460 int begin(uint8 slaveAddress){
461     UART_DEBUG_PutString("\r\n_PWR_MGMT_al_empezar_el_begin:_");
462     whoAreU(slaveAddress, USER_BANK_0, 0x06);
463     if (changeUserBank_force(slaveAddress, USER_BANK_0) < 0) {
464         return -1;
465     }
466
467     if (selectAutoClockSource(slaveAddress) < 0) {
468         return -2;
469     }
470
471     UART_DEBUG_PutString("\r\n_Estado_del_registro_0x06h_del_banco_0:_");
472     whoAreU(slaveAddress, USER_BANK_0, 0x06u);
473
474     // enable I2C master mode
475     if(enableI2cMaster(slaveAddress) < 0){
476         return -3;
477     }
478
479     UART_DEBUG_PutString("\r\n_Estado_del_registro_0x01h_del_banco_3:_");
480     whoAreU(slaveAddress, USER_BANK_3, 0x01u);
481
482     reset(slaveAddress);
483     CyDelay(250);
484
485     if (powerDownMag(slaveAddress) < 0) {
486         return -4;
487     }
488
489     if (selectAutoClockSource(slaveAddress) < 0) {
490         return -6;
491     }
```

Código C.2: Código de inicio de comunicación con el ICM20948 parte 2

```
500     if(enableAccelGyro(slaveAdress, UB0_PWR_MGMNT_2,
501         UB0_PWR_MGMNT_2_SEN_ENABLE) == 1){
502         UART_DEBUG_PutString("\r\n_Giroscopio_y_acelerometro_habilitados");
503     } else {
504         UART_DEBUG_PutString("\r\n_Error_al_habilitar_el_giroscopio_y_acelerometro");
505         return -7;
506     }
507     changeUserBank_force(slaveAdress, USER_BANK_0);
508     writeRegister(slaveAdress, 0x05, 0x00);
509     UART_DEBUG_PutString("\r\n_Lp_config_DESPUES_de_habilitar:_");
510     whoAreU(slaveAdress, USER_BANK_0, 0x05);
511
512     if(configAccel(slaveAdress, ACCEL_RANGE_2G, ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_246HZ) != 1){
513         return -8;
514     }
515
516     if(configGyro(slaveAdress, UB2_GYRO_CONFIG_1_FS_SEL_250DPS,
517         GYRO_DLPF_BANDWIDTH_6HZ) != 1){
518         return -9;
519     }
520     UART_DEBUG_PutString("\r\n_PWR_MGMT_al_acabar_el_begin:_");
521     whoAreU(slaveAdress, USER_BANK_0, 0x06);
522
523     if (setAccelSrd(slaveAdress,0) < 0) {
524         return -12;
525     }
526     return 1;
527 }
```

Código C.3: Establecimiento del ICM20948 como maestro

```
389 int enableI2cMaster(uint8 slaveAdress) {
390     if (changeUserBank_force(slaveAdress, USER_BANK_0) < 0) {
391         return -1;
392     }
393     if (writeRegister(slaveAdress, UB0_USER_CTRL, UB0_USER_CTRL_I2C_MST_EN) < 0) {
394         return -2;
395     }
396     if (changeUserBank_force(slaveAdress, USER_BANK_3) < 0) {
397         return -3;
398     }
399     if(writeRegister(slaveAdress, UB3_I2C_MST_CTRL, UB3_I2C_MST_CTRL_CLK_400KHZ) < 0){
400         return -4;
401     }
402
403     return 1;
404 }
```

Código C.4: Asignaciones necesarias para hacer funcionar el acelerometro

```
218 int configAccel(uint8 slaveAdress, enum AccelRange range, enum AccelDlpfBandwidth bandwidth){
219
220     if (changeUserBank_force(slaveAdress, USER_BANK_2) < 0) {
221         UART_DEBUG_PutString("\r\n-----_ChangeUserBank_force_error");
222         return -2;
223     }
224
225     uint8_t accelRangeRegValue = 0x00;
226     float accelScale = 0.0f;
227     switch(range) {
228         case ACCEL_RANGE_2G: {
229             accelRangeRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_FS_SEL_2G;
230             accelScale = G *2.0f/accRawScaling; // setting the accel scale to 2G
231             break;
232         }
233         case ACCEL_RANGE_4G: {
234             accelRangeRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_FS_SEL_4G;
235             accelScale = G *4.0f/accRawScaling; // setting the accel scale to 4G
236             break;
237         }
238         case ACCEL_RANGE_8G: {
239             accelRangeRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_FS_SEL_8G;
240             accelScale = G *8.0f/accRawScaling; // setting the accel scale to 8G
241             break;
242         }
243         case ACCEL_RANGE_16G: {
244             accelRangeRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_FS_SEL_16G;
245             accelScale = G *16.0f/accRawScaling; // setting the accel scale to 16G
246             break;
247         }
248     }
```

Código C.5: Asignaciones necesarias para hacer funcionar el acelerometro parte 2

```

249     uint8_t dlpfRegValue = 0x00;
250     switch(bandwidth) {
251         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_1209HZ: {
252             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_1209HZ;
253             break;
254         }
255         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_246HZ: {
256             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_246HZ;
257             break;
258         }
259
260         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_111HZ: {
261             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_111HZ;
262             break;
263         }
264         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_50HZ: {
265             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_50HZ;
266             break;
267         }
268         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_24HZ: {
269             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_24HZ;
270             break;
271         }
272         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_12HZ: {
273             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_12HZ;
274             break;
275         }
276         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_6HZ: {
277             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_6HZ;
278             break;
279         }
280         case ACCEL_DLPF_BANDWIDTH_473HZ: {
281             dlpfRegValue = UB2_ACCEL_CONFIG_DLPFCFG_473HZ;
282             break;
283         }
284     }
285     // sprintf(Rx_aux, " 0x%u ", accelRangeRegValue | dlpfRegValue);
286     // UART_DEBUG_PutString("\r\n accelRangeRegValue | dlpfRegValue: ");
287     // UART_DEBUG_PutString(Rx_aux);
288
289     if (writeRegister(slaveAdress, UB2_ACCEL_CONFIG, accelRangeRegValue | dlpfRegValue) < 0) {
290         UART_DEBUG_PutString("\r\n-----_Error_en_el_bandwith");
291         return -3;
292     }
293     return 1;
294 }

```


Código C.6: Asignaciones necesarias para hacer funcionar el giroscopio

```
296 int configGyro(uint8 slaveAdress, enum GyroRange range, enum GyroDlpfBandwidth bandwidth){
297     if (changeUserBank_force(slaveAdress, USER_BANK_2) < 0) {
298         UART_DEBUG_PutString("\r\n-----_ChangeUserBank_force_error_en_giroscopio");
299         return -2;
300     }
301
302     uint8_t gyroConfigRegValue = 0x00;
303     float gyroScale = 0x00;
304     switch(range) {
305     case GYRO_RANGE_250DPS:
306         gyroConfigRegValue = UB2_GYRO_CONFIG_1_FS_SEL_250DPS;
307         gyroScale = 250.0f/gyroRawScaling * _d2r; // setting the gyro scale to 250DPS
308         break;
309     case GYRO_RANGE_500DPS:
310         gyroConfigRegValue = UB2_GYRO_CONFIG_1_FS_SEL_500DPS;
311         gyroScale = 500.0f/gyroRawScaling * _d2r; // setting the gyro scale to 500DPS
312         break;
313     case GYRO_RANGE_1000DPS:
314         gyroConfigRegValue = UB2_GYRO_CONFIG_1_FS_SEL_1000DPS;
315         gyroScale = 1000.0f/gyroRawScaling * _d2r; // setting the gyro scale to 1000DPS
316         break;
317     case GYRO_RANGE_2000DPS:
318         gyroConfigRegValue = UB2_GYRO_CONFIG_1_FS_SEL_2000DPS;
319         gyroScale = 2000.0f/gyroRawScaling * _d2r; // setting the gyro scale to 2000DPS
320         break;
321     }
322
323     uint8_t dlpfRegValue = 0x00;
324     switch(bandwidth) {
325     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_12106HZ: dlpfRegValue =
326         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_12106HZ; break;
327     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_197HZ: dlpfRegValue =
328         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_197HZ; break;
329     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_152HZ: dlpfRegValue =
330         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_152HZ; break;
331     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_120HZ: dlpfRegValue =
332         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_120HZ; break;
333     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_51HZ: dlpfRegValue =
334         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_51HZ; break;
335     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_24HZ: dlpfRegValue =
336         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_24HZ; break;
337     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_12HZ: dlpfRegValue =
338         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_12HZ; break;
339     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_6HZ: dlpfRegValue =
340         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_6HZ; break;
341     case GYRO_DLPF_BANDWIDTH_361HZ: dlpfRegValue =
342         UB2_GYRO_CONFIG_1_DLPFCFG_361HZ; break;
343     }
344     if (writeRegister(slaveAdress, UB2_GYRO_CONFIG_1, gyroConfigRegValue | dlpfRegValue) < 0) {
345         return -1;
346     }
347     return 1;
348 }
```

Código C.7: Lectura de la componente x de la aceleración

```

529 int16_t getAccelX_mss(uint8 slaveAddress){
530     uint8 _axcountsH, _axcountsL;
531     int16_t _axcounts;
532
533     if (changeUserBank_force(slaveAddress, USER_BANK_0) < 0) {
534         return -1;
535     }
536     _axcountsH = readRegisters(slaveAddress, 0x2Fu, 1, _axcountsH);
537
538     _axcountsL = readRegisters(slaveAddress, 0x30u, 1, _axcountsL);
539
540     _axcounts = ((int16_t)(_axcountsH << 8) | (_axcountsL & 0xFF));
541
542     sprintf(Rx_aux, "_0x %d_", _axcounts);
543     UART_DEBUG_PutString("\r\nLectura_x:");
544     UART_DEBUG_PutString(Rx_aux);
545     // _ax = (((float)_axcounts * _accelScale) - _axb)* _axs;
546     return 1;
547 }

```

Código C.8: Lectura de la componente x del giroscopio

```

549 int16_t getGyroX_mss(uint8 slaveAddress){
550     uint8 _axcountsGyroH, _axcountsGyroL;
551     int16_t _axcountsGyro;
552
553     if (changeUserBank_force(slaveAddress, USER_BANK_0) < 0) {
554         return -1;
555     }
556     _axcountsGyroH = readRegisters(slaveAddress, 0x33u, 1, _axcountsGyroH);
557
558     _axcountsGyroL = readRegisters(slaveAddress, 0x34u, 1, _axcountsGyroL);
559
560     _axcountsGyro = ((int16_t)(_axcountsGyroH << 8) | (_axcountsGyroL & 0xFF));
561
562     sprintf(Rx_aux, "_0x %d_", _axcountsGyro);
563     UART_DEBUG_PutString("\r\nLectura_x_del_giroscopio:");
564     UART_DEBUG_PutString(Rx_aux);
565     // _ax = (((float)_axcounts * _accelScale) - _axb)* _axs;
566     return 1;
567 }

```