



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Máster

Caracterización de sensor detector de CO₂
mediante cámara climática con aplicaciones en
redes inalámbricas de sensores.

Autor/es

Daniel García Romeo

Director/es

Santiago Celma Pueyo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2011

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el de la realización y test de circuitos de acondicionamiento de señal para sensores de detección de gases de bajo consumo para su posterior caracterización y comprobación de su funcionamiento y su posible aplicación en redes inalámbricas de sensores para regiones abiertas.

Se propone desarrollar un circuito de bajo consumo y baja tensión de alimentación para el acondicionamiento de la salida de sensores de gases de bajo consumo para mejorar la lectura y obtener medidas de la magnitud correspondiente con adecuada resolución. Para ello, nos centraremos en el uso de sensores de CO₂ de Alphasense, caracterizados por disponer de un rango de sensibilidad elevado, así como consumos de menos de 80 mA a 3 V, que podemos considerar reducidos en comparación con la gran mayoría de sensores de gases disponibles en el mercado. Inicialmente se caracterizará la respuesta del sensor escogido, conectado a la electrónica de acondicionamiento desarrollada, a diferentes concentraciones de CO₂ que se controlarán mediante una válvula electrónica de control de caudal. Se obtendrán los diferentes comportamientos del sistema sensor-acondicionado para diferentes temperaturas, dentro del rango típico de aplicaciones ambientales.

Los principales objetivos serán por tanto la realización de la electrónica necesaria para una correcta adquisición de la variable a medir, en este caso, dióxido de carbono. Se analizarán los requisitos mínimos de la medida, con el fin de minimizar el tiempo de adquisición de medidas, incrementando así el tiempo de vida operativa de las baterías que alimentan la electrónica. Otro objetivo será por consiguiente, el estudio y la caracterización del propio sensor mediante cámara climática para finalmente y como último objetivo verificar su posible implementación en redes inalámbricas de sensores aplicadas a monitorización de variables del entorno en zonas abiertas, como bosques o zonas industriales, sin la necesidad de disponer de una infraestructura establecida ni en comunicaciones ni en suministro de energía.

PALABRAS CLAVE

Circuitos de acondicionamiento, sistemas portátiles, sensores de gases, aplicaciones en ambientes inteligentes, redes inalámbricas de sensores.

1. Introducción	1
2. Estado del arte	3
2.1. <i>Detección de incendios</i>	3
2.1.1 <i>Detectores de CO₂</i>	4
2.1.1.1 <i>Sensor de absorción de infrarrojos</i>	4
2.2. <i>Sensor de CO₂ para monitorización de emisiones difusas</i>	4
3. Selección del sensor	5
4. Diseño de la interfaz electrónica	8
4.1. <i>Implementación hardware</i>	8
4.1.1 <i>Bloque de alimentación</i>	9
4.1.2 <i>Adaptación del modulo NDIR</i>	9
4.1.3 <i>Circuito de amplificación y filtrado</i>	10
4.1.4 <i>Conexión del microcontrolador</i>	12
4.1.5 <i>Implementación del prototipo</i>	13
4.2. <i>Implementación software</i>	14
4.1.1 <i>Programación del microcontrolador</i>	14
4.1.2 <i>Programación del Matlab</i>	15
5. Montaje	16
6. Comparativa con dispositivo comercial Alphasense	18
6.1. <i>Estudio de consumo</i>	19
7. Caracterización del sensor	20
7.1. <i>Metodología</i>	20
7.2. <i>Caracterización a temperatura ambiente</i>	21
7.3. <i>Caracterización en el rango operativo de temperaturas</i>	22
8. Impacto del dispositivo en una red inalámbrica de sensores	25
9. Conclusiones y perspectiva de futuro	27
9.1. <i>Conclusiones</i>	27
9.2. <i>Perspectiva de futuro</i>	28
10. Referencias	29
11. Tablas y figuras	30

ANEXOS

Anexo.I. Obtención de la concentración de gas

Anexo.II. Ampliación de información sobre los resultados experimentales

Anexo.III. Relación de instrumentación

Anexo.IV. Ampliación de información sobre la tecnología de detección de gas sobre protección contra incendios

1. INTRODUCCIÓN

En la realización de este proyecto final correspondiente al Máster Oficial de Ingeniería Electrónica se ha procedido a la caracterización de sensores de gases unido al desarrollo de los circuitos electrónicos necesarios para el acondicionamiento de las señales provenientes del propio sensor, en vistas a una posible aplicación de estos en redes de sensores inalámbricas para regiones abiertas.

El trabajo ha sido realizado dentro del Grupo de Diseño Electrónico (GDE), perteneciente al Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A) de la Universidad de Zaragoza como parte de su investigación en el desarrollo de redes inalámbricas de sensores para su uso en la prevención de incendios forestales.

El estudio se centra en el uso de sensores detectores de dióxido de carbono (CO_2), concretamente sensores que usan el principio de no dispersión infrarroja para la obtención de la medida, de la empresa ALPHASENSE, los cuales se caracterizan por su rango de sensibilidad elevado y su consumo reducido (menor de 80 mA) con tensiones de alimentación en torno a 3V.

Para la realización de tal estudio, se ha configurado un set-up, con el cual podemos aplicar concentraciones de CO_2 controladas mediante una válvula electrónica de control de caudal, y así observar la respuesta tanto del sensor escogido como de su electrónica de acondicionado. Además, se ha procedido a la observación de la respuesta del sistema sensor-acondicionador en el rango típico de temperaturas de las aplicaciones ambientales para valorar su adaptabilidad a redes inalámbricas de sensores situadas al aire libre.

Por tanto los objetivos a cumplir en la realización de este proyecto han sido los siguientes:

- Estudio y caracterización del sensor seleccionado mediante cámara climática en el rango de temperaturas típico de aplicaciones ambientales.
- Estudio, diseño y realización de la electrónica necesaria para una correcta adquisición de la variable a medir.
- Estudio de los requisitos mínimos de la medida con el fin de minimizar el tiempo de adquisición de medidas, incrementando así la vida operativa de las baterías que puedan alimentar la electrónica.
- Verificación de su posible implementación en redes inalámbricas aplicadas a monitorización de variables del entorno en zonas abiertas sin la necesidad de disponer de una infraestructura establecida ni en comunicaciones ni en suministro de energía.

El principal motivo para la realización de este estudio sobre detectores de dióxido de carbono es doble: por un lado, la intención de comprobar su viabilidad como detectores de incendios de manera que pudieran proveer una rápida alarma sobre la situación actual del fuego y que a su vez resultará precisa para unas medidas más eficaces en su extinción; por otro, la posibilidad de medir emisiones difusas de CO_2 , principal gas responsable del efecto invernadero. Se entienden por emisiones difusas aquellas que no tienen un origen concentrado, como la chimenea de una fábrica, sino que son producto de las actividades humanas cotidianas (tráfico de vehículos, emisiones domésticas, explotaciones animales, etc.)

El lector encontrará en este documento: el estado del arte, donde se realiza un breve resumen de los actuales diseños y configuraciones para el uso de sensores como el que se presenta en este documento en otros grupos de investigación. Seguidamente se procede a la presentación del sensor y sus características junto con la electrónica diseñada para el acondicionamiento y adquisición de sus señales. Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos para el conjunto sensor-acondicionador en las diferentes situaciones de estudio junto con las posibles implicaciones que supondría la inclusión de estos dispositivos en las redes de sensores inalámbricas desarrolladas en el propio grupo para el cual se realiza este trabajo y finalmente se concluye en vistas a los resultados obtenidos dando respuesta a los objetivos marcados previamente en este apartado. Además, se incluyen posibles líneas de trabajo futuras y mejoras a realizar.

2. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años hemos sido testigos de los avances en tecnologías móviles que unido a la realización de sensores cada vez más pequeños han provocado que el uso de sensores de bajo coste y consumo sea una realidad en ámbitos muy diversos, como monitorización medioambiental, redes militares de sensores, aplicaciones para salud, redes para detección de elementos químicos o biológicos, etc. [1]

En concreto, para la monitorización medio ambiental, la detección de CO₂ se ha convertido en un tema importante en la detección temprana y prevención de incendios forestales, así como para el control de las emisiones difusas de este gas, principal causa del efecto invernadero. [2] [3]

2.1 Detección de incendios

En cuanto a los detectores de incendios actuales, podemos decir que existen una gran variedad de estos y que quizá sería buen comienzo enumerarlos para dar una idea de dónde se sitúa el sensor utilizado en este trabajo. La clasificación es la siguiente:

- **Detectores de incendio no automáticos:** Los pulsadores manuales son detectores de incendio no automáticos que tienen que ser activados por una persona en caso de incendio.
- **Detectores de incendio semiautomáticos:** Pueden reconocer un incendio, pero la alarma se activa manualmente. Normalmente se trata de sistemas de cámaras equipados con el software apropiado que son capaces de detectar cambios en las imágenes grabadas, por ejemplo, la generación de humo o fuegos abiertos. Dado que la fiabilidad de estos sistemas no es suficiente actualmente para activar acciones como la alarma directa de los bomberos o la extinción, estos sistemas son normalmente semiautomáticos. El sistema alerta a las personas de un posible peligro, mientras que la alarma real debe verificarse todavía.[8] [9]
- **Detectores de incendio automáticos:** Captan los fenómenos de incendio como humo, calor, llamas o gas y activan una alarma a través de la central en caso de incendio.
- **Detectores de incendio para aplicaciones especiales:** Para las aplicaciones con un riesgo de incendio superior, donde no puede utilizarse un detector de incendio normal por diferentes motivos, son necesarios detectores especiales. En la minería o la industria pesada, son necesarios sistemas muy robustos que sean capaces de detectar de manera fiable incendios en condiciones medioambientales extremas. Por ejemplo, las chispas en los conductos de transporte utilizados en la industria textil deben detectarse e iniciarse inmediatamente medidas apropiadas, ya que de lo contrario las consecuencias podrían ser devastadoras. Los detectores de incendio normales reaccionan demasiado lento para dichas aplicaciones mientras que aquí son necesarios sistemas que reaccionen en pocos milisegundos.

Obviamente, el sensor usado en este estudio pertenece a los detectores de incendios automáticos ya que en su finalidad estaría captar la cantidad de dióxido de carbono y en caso de ser necesario, se activaría una alarma de la manera que el sistema lo tuviera configurado. Una vez establecido esto, podemos dar una breve descripción de cómo y por qué se usan detectores de CO₂ para la detección de incendios.

2.1.1 Detectores de CO₂

Los detectores de CO₂ resultan eficaces en fuegos abiertos ya que un incendio de este tipo quema una carga considerable por unidad de tiempo, lo cual está asociado a un notable aumento de la temperatura y una alta producción de CO₂.

El CO₂ es un gas muy duradero, motivo por el cual la detección química es bastante difícil. Para detectar CO₂, en la actualidad se usan principalmente sensores optoacústicos y de absorción de infrarrojos. [16] Ambos métodos son extremadamente apropiados para la detección de gases y vapores combustibles y tienen las mejores propiedades respecto a otras opciones comerciales como el pellistor o la célula electroquímica. (*Información ampliada en Anexo IV*). En nuestro caso, el sensor usado en este estudio usa el principio absorción infrarroja como así se explica a continuación.

2.1.1.1 Sensor de absorción de infrarrojos

Los sensores de gases por absorción de infrarrojos se basan en el principio de que la luz con la misma frecuencia de oscilación natural que la del gas a detectar es absorbida por el propio gas. Esto significa que, en presencia de gas, el fotosensor ya no detecta la luz en la misma intensidad. Esta atenuación de señal permite la medida exacta de la concentración de gas.

El sensor de absorción no mide directamente una señal proporcional a la concentración de gas, sino el decremento sufrido por la señal primaria. Por ello, y como explicaremos más adelante, el sensor usado en este estudio toma dos medidas, un valor de referencia y el valor activo que corresponde con el valor decrecido respecto al valor referencia. Dado que este método mide una reducción muy pequeña de una señal relativamente grande, es más susceptible a los efectos de deriva a largo plazo.

2.2 Sensores de CO₂ para monitorización de emisiones difusas

Actualmente existen un gran número de dispositivos para la medida de la concentración de CO₂ en ambientes cerrados. La principal característica de estos dispositivos radica en su rango de medida, situándose ésta entre el 0.5% y el 5% de concentración máxima de gas, debido a que concentraciones altas en este rango no son adecuadas para las personas. Por supuesto, también esto es objeto de investigación en numerosos grupos con el objetivo de incluir esto en sistemas de monitorización complejos [10] [11]. En este trabajo se ha configurado la interfaz electrónica para un rango de concentraciones entre 0 y 20% algo superior al mencionado anteriormente, con el fin de permitir monitorizar la concentración de gas en regiones abiertas, aunque no se alcancen estos niveles salvo cuando se produzca combustión.

Por lo tanto se trata de un sistema que cumple ambos objetivos, monitorización de concentraciones difusas y detección de combustiones en ambientes exteriores. Los diferentes rangos y las aplicaciones del sensor en cada caso pueden verse en la hoja de características del propio sensor [5], quedando establecidas de la siguiente manera: 0-5000 ppm para IAQ (*Indoor Air Quality*), de 0-5% para seguridad, 0-20% para combustión, y finalmente 0-100% para control de procesos industriales.

3. SELECCIÓN DE SENSOR

Para la realización de este trabajo, como ya hemos comentado anteriormente, se ha procedido al estudio de un sensor de infrarrojos de la compañía Alphasense, productora de diversos tipos de sensores para detección de gases en ambientes industriales. El motivo de uso de sensores de este tipo es que poseen un bajo consumo y pueden ser alimentados con tensiones pequeñas en comparación con otros métodos de detección de gases [4].

El sensor en concreto, *IRC-A1 Carbon Dioxide Infrared Sensor* (fig. 1), usa el principio de no dispersión por infrarrojos (sensor NDIR, *Non-Dispersive InfraRed*) para la detección de dióxido de carbono.



Fig. 1. IRC-A1 NDIR

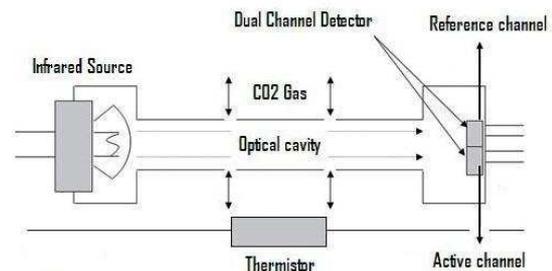


Fig. 2 Estructura sensor de CO₂ de tipo NDIR

Cada sensor consiste en una fuente de infrarrojos, una cavidad óptica, un detector de doble canal de infrarrojos y un termistor interno, este último debido a que el sensor también proporciona la medida de temperatura para la cual detecta el gas. La estructura de este sensor puede verse en la figura 2.

El principio de detección es sencillo, el gas se difunde en la cavidad óptica, la luz de la fuente de infrarrojos pasa a través de ésta, donde interactúa con el gas antes de llegar al detector. Como algunos gases absorben radiación infrarroja a una determinada longitud de onda (bandas de absorción), seleccionando adecuadamente la longitud de onda sensible de emisor y receptor, es posible determinar, a partir de la reducción de la intensidad de luz recibida por el fotodetector la presencia del gas correspondiente, así como su concentración.

Los sensores NDIR disponen de un canal doble de detección, compuesto por un canal activo y otro de referencia. El canal de referencia detecta toda la luz que llega desde el emisor infrarrojo hasta el receptor. Por su parte, el canal activo detecta la luz con menos intensidad debido a la absorción por parte del gas de parte de esta luz con la misma frecuencia de oscilación natural que el gas. Esta configuración lleva a que el cálculo de la concentración del gas presente se produzca por comparación de ambas señales provenientes del sensor

Obviamente, la intensidad de la luz por el canal de referencia no se ve afectada por la presencia del gas a estudiar por lo que el uso de un canal de referencia permite compensar posibles variaciones en la intensidad de la luz, de forma similar a como actúa la conexión de dos sensores idénticos en un puente de Wheatstone.

Los detectores usados por estos sensores son altamente sensibles a la temperatura ambiente por lo que es necesaria una continua monitorización de la temperatura y consecuentemente una compensación de la salida. Para ello el sensor incorpora un termistor interno que nos proporciona la medida de la temperatura interna del sensor.

El sensor, como se puede ver en la figura 1, posee 7 pines, que corresponden a: 3 para las señales activa, referencia y temperatura, y los otros 4 para alimentaciones y masas. Dispuestos como se presenta en la figura 3.

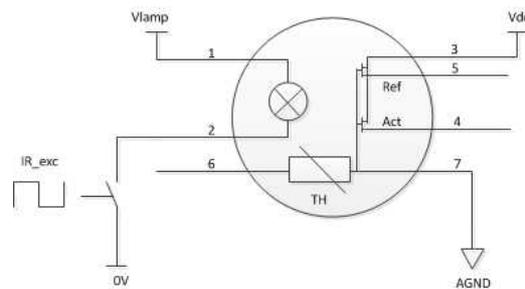


Fig. 3. Esquema interno Módulo NDIR

En cuanto a la alimentación necesaria, ya hemos mencionado que estos sensores pueden ser alimentados a bajas tensiones, en nuestro caso a 3V. Como se ve en la figura 3, tanto la alimentación de lámpara (*Vlamp*) como la alimentación del resto del circuito (*Vdd*) corresponde a este voltaje de 3 V. Sin embargo, el funcionamiento de la lámpara es conmutado mediante el uso de una onda con una frecuencia de entre 2 y 2.5 Hz. Como se explica posteriormente, en este trabajo usamos una señal de frecuencia 2.5 Hz y un ciclo de trabajo del 50% proporcionada por el microcontrolador instalado en la interfaz electrónica.

En relación a las características eléctricas del sensor y las señales proporcionadas, el proveedor asegura que la resistencia nominal de la fuente es aproximadamente de 10 Ohms a temperatura ambiente, lo cual nos lleva a un consumo de 50-60 mA para una alimentación de 5 V. La corriente media será la mitad al conmutar la fuente a un ciclo de trabajo del 50%.

Asimismo, siguiendo los datos proporcionados por el fabricante, la señal original de los canales activo y de referencia proporcionada por el sensor está compuesta por un offset de continua entre 0.7 y 1 V para una alimentación de 5 V con un pequeño rizado de entre 20 y 50 mV de pico a pico superpuesto en la señal de respuesta [12][13], siendo esta amplitud pico a pico la que nos proporcione la información requerida para el cálculo de la concentración de gas.

Una vez obtengamos medidas de la corriente consumida por el sensor y de las señales producidas por el mismo estudiaremos la posibilidad de reducir este consumo y mejorar la adquisición de las variables desarrollando una interfaz electrónica adecuada para este propósito, ya que como hemos mencionado anteriormente necesitamos verificar la posibilidad de implementación del sistema en un nodo de una red inalámbrica de sensores, cuyo suministro de energía será por definición muy reducido.

El sensor posee cuatro rangos de trabajo como se ha mencionado anteriormente, cada uno de ellos enfocado a un uso industrial específico. La tabla 1 muestra las características y usos para cada uno de estos rangos.

	Indoor Air Quality	Safety	Combustion	Process Control
Range	0-5000 ppm	0-5%	0-20%	0-100%
Zero Resolution	1 ppm	1 ppm	1 ppm	1 ppm
FS Resolution	15 ppm	100 ppm	500 ppm	0.5 %

Tabla 1. Rangos de trabajo de IRC-A1 Alphasense

Tiene especial interés el rango entre 0-20% usado para combustiones por lo que la interfaz electrónica ha sido diseñada para cumplir estas características.

4. DISEÑO DE LA INTERFAZ ELECTRÓNICA

En este apartado se muestran las características de diseño de la interfaz electrónica requerida por el sensor, así como la naturaleza de todas las señales implicadas en la obtención de las variables necesarias para el cálculo de la concentración de gas.

La sección está dividida en dos grandes partes diferenciadas, por un lado las implicaciones de hardware para el diseño de la interfaz, donde se muestran los diferentes bloques con sus respectivas etapas y cuya principal función es la de acondicionar las señales provenientes del sensor en unas mucho más manejables por el conversor analógico-digital del propio microcontrolador integrado en la misma.

Por otro lado, las implementaciones software, tanto para el propio microcontrolador en la interfaz como para el sistema empleado en el cálculo de la concentración. En este caso, ha sido implementado en el programa Matlab, como método de comprobación, pero el mismo código generado es perfectamente extrapolable a ser usado tanto en el propio microcontrolador de la interfaz o en el sistema inteligente usado en un nodo sensor de una red inalámbrica.

4.1 Implementación hardware

El objetivo de la interfaz electrónica es el de transformar las señales directas producidas por el sensor IRC-A1, que como se ha descrito anteriormente están compuestas por un offset de continua de entre 0.7 y 1 V junto con pequeño rizado de entre 20-50 mV de pico a pico superpuesto. Además, la interfaz será la encargada de proporcionar la alimentación del sensor, así como de la comunicación de los datos obtenidos hacia el nodo instalado en la red de sensores inalámbrica.

El diagrama de bloques de este dispositivo puede verse en la figura 4 donde se aprecian perfectamente cada una de las partes que componen la interfaz. Por un lado, un circuito de filtrado y amplificación de las señales producidas por el sensor, el sistema de alimentación de la electrónica incluida en el dispositivo y el microcontrolador encargado de gobernar el sistema y producir la comunicación exterior de los datos obtenidos.

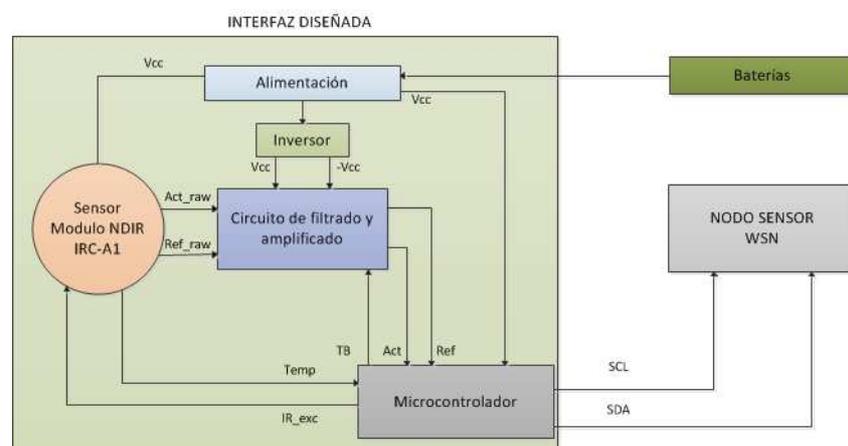


Fig. 4. Diagrama de bloques de la interfaz electrónica

4.1.1 Bloque de Alimentación

Debido a los requisitos de bajo consumo en nodos con sensores que operan gracias a baterías o pilas, la interfaz electrónica ha sido diseñada para una alimentación de 3 V. Esta tensión sirve de alimentación tanto para el sensor como para el resto de circuitos integrados en ella.

Por otro lado, debido a la simetría en las ondas proporcionadas por el sensor se hace necesario usar un inversor de tensión para la alimentación de algunas etapas pertenecientes al bloque de filtrado y amplificación que será explicado posteriormente. Esta tensión negativa se consigue gracias al integrado TPS60403 de Texas Instruments.

4.1.2 Adaptación del MÓDULO NDIR

La figura 4 ilustra la inclusión del módulo sensor NDIR en la interfaz electrónica diseñada. Se observa la alimentación a la tensión nominal del sistema del sensor.

La señal *IR_exc* (figuras 4 y 5) es proporcionada por el microcontrolador y corresponde a una señal cuadrada de frecuencia 2.5 Hz y de ciclo de trabajo del 50% que es usada para la conmutación del funcionamiento de la lámpara mediante un transistor FET. Por su parte, las señales de salida del sensor *Act* y *Ref* son conectadas al circuito de filtrado y amplificación mediante sendas resistencias conectadas a masa, y serán acondicionadas convenientemente en dicha etapa.

Finalmente, la salida del termistor (*pin 6*, figura 5) nos proporciona la temperatura interna del sensor y nos servirá por tanto para su monitorización y su posterior compensación para evitar desviaciones debidas a temperatura. El termistor consiste en una NTC que presenta una resistencia de 3 k Ω para una temperatura de 25°C. Esta resistencia se encuentra internamente conectada a masa por lo que se hace necesario la inclusión de una resistencia que la conecta a una tensión fija. Para ello se ha elegido una resistencia R4 de 3 k Ω que nos define el divisor resistivo por el cual queda unida la tensión de la resistencia NTC al microcontrolador.

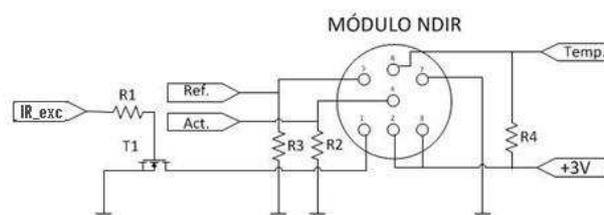


Fig. 5. Esquema circuital del módulo NDIR

4.1.3 Circuito de amplificación y filtrado

Las señales de los canales activo y referencia deben ser filtradas y amplificadas para que el microcontrolador pueda procesarlas adecuadamente. Por tanto, se ha diseñado un circuito de amplificación y filtrado idéntico para ambas señales (fig. 6).

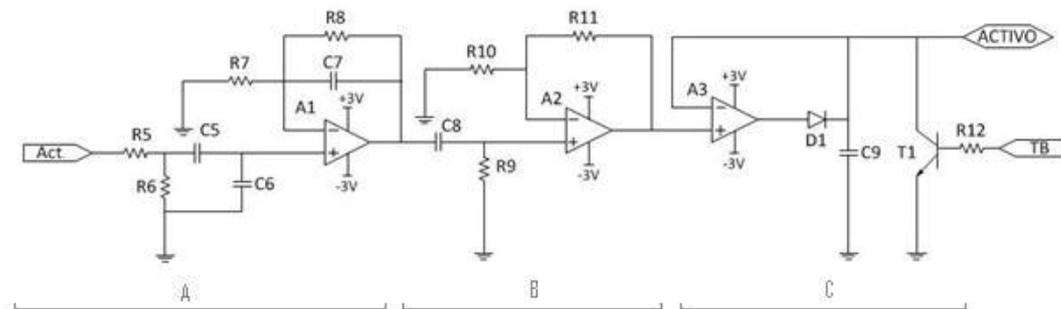


Fig. 6. Circuito de amplificación y filtrado de la señal activa.

Las señales provenientes directamente del sensor están compuestas por un offset de tensión continua entre los 0.7 y 1 V con un pequeño rizado de entre 20 y 50 mV de pico a pico superpuesto en la señal de respuesta. La información necesaria para la estimación de la concentración de gas se encuentra en el valor de tensión pico a pico de esta señal.

En una primera etapa que corresponde con la *parte A* de la figura 6, se produce el filtrado y linealización del rizado propio de la señal directa del sensor. Esto da como resultado una onda prácticamente sinusoidal mucho más “limpia” con un offset de continua pero de una amplitud pico a pico muy pequeña. A esta primera etapa corresponde el integrado A1 y los componentes discretos en torno a él que realizan el filtrado necesario.

En la segunda etapa, (*parte B*, figura 6) se produce a la eliminación del offset de continua con un filtro RC, que corresponden a los componentes C8 de 100nF y R9 de valor 1M lo que nos asegura la eliminación del nivel de continua. La onda resultante puede verse en la figura 8.

Seguidamente se produce la amplificación de la señal por un factor 5 con una simple etapa amplificadora no inversora (*parte C*, fig. 6). Se ha escogido este valor porque cuadra perfectamente con los 3V de alimentación y por tanto con los valores que podría soportar el último amplificador operacional rail-to-rail. Como se puede ver en apartados posteriores, la amplificación por 5 supone un valor de pico máximo de 2,8 V para la medida de referencia y que permanece invariable, lo que nos permite aprovechar al máximo el conversor analógico-digital del microcontrolador. Por su parte, la medida parte de un valor de pico máximo de 2,6 V para una concentración de gas mínima y que se va reduciendo conforme la concentración aumenta. La medida de referencia a la salida de su amplificación puede apreciarse en la figura 9.

R10 y R11 son las resistencias responsables del factor de amplificación de valor 5 y sus valores corresponden a 22 k Ω y 100 k Ω respectivamente.

Finalmente, se ha colocado una etapa para la obtención del valor máximo de la onda a medir, compuesto por los componentes A3, D1 y C9. Esta etapa es necesaria debido a la incapacidad del convertidor analógico-digital del microcontrolador de manejar señales negativas. Por ello, se obtiene el valor de pico máximo positivo de la onda a medir y conociendo su simetría bastará doblar este valor para conocer el valor pico a pico necesario para el cálculo de la concentración de gas.

Obviamente, los procesos de amplificado y captación del valor máximo deberán ser tenidos en cuenta una vez el valor ha sido tomado, por lo que mediante software se procederá a la compensación de estos cambios para poder realizar el cálculo de la concentración con los valores reales del parámetro obtenido.

El condensador C9, responsable de almacenar el valor máximo de tensión que será medido por el microcontrolador, es descargado periódicamente por una señal proveniente de éste usando el transistor T1 como switch. De esta manera, el condensador siempre está actualizado a cada nuevo valor máximo de la onda. La señal de refresco es un tren de pulsos con de 1kHz de frecuencia.

La necesidad de manejar señales simétricas en un sistema de alimentación única ha hecho preciso polarizar los amplificadores operacionales empleando un inversor de tensión que nos proporciona una tensión fija de -3 V. El integrado encargado de esta tarea es el componente TPS60403 de Texas Instruments. El esquema del inversor queda mostrado en la siguiente figura:

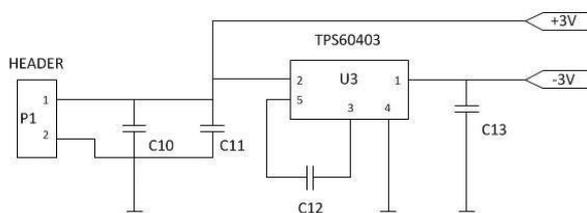


Fig. 7. Circuito inversor para obtención de alimentación simétrica

La amplificación y el filtrado de la onda pueden apreciarse en las siguientes figuras:

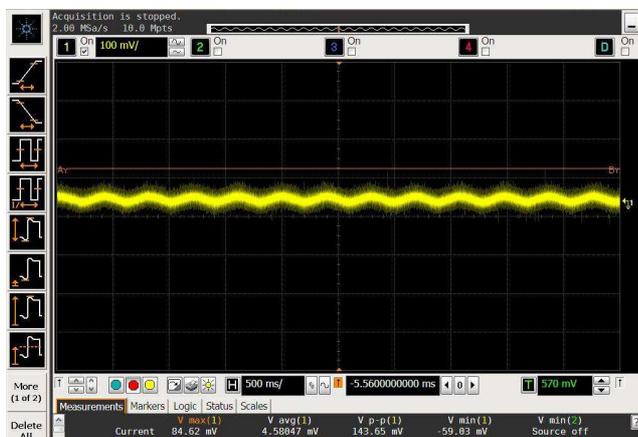


Fig. 8 Señal previa a la amplificación

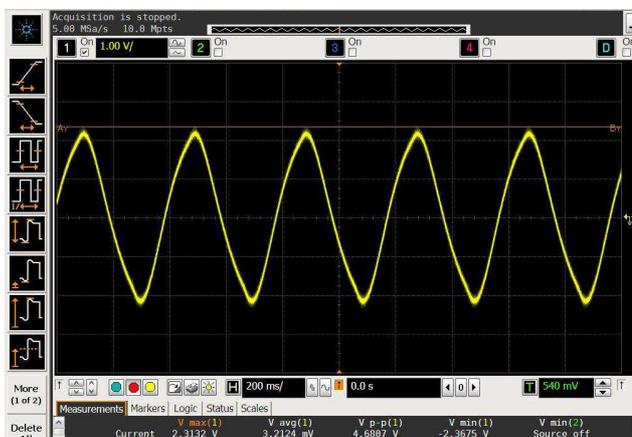


Fig. 9. Señal filtrada y amplificada

4.1.4 Conexión del microcontrolador

Los requisitos que debe cumplir el microcontrolador, así como las características de las señales que recibe y genera han sido mencionadas previamente en los puntos anteriores. Básicamente son las siguientes:

- Señal cuadrada de alimentación de la lámpara IR.
- Señales de reinicio de los condensadores de almacenaje del valor máximo.
- Comunicación serie con el PC, compuesta por una señal de reloj (SCL) y por la señal de datos (SDA).

Como señales de entrada el microcontrolador tendrá las señales analógicas proporcionadas por los circuitos de filtrado y amplificación, provenientes del módulo NDIR así como la señal de temperatura proveniente de la salida del termistor del sensor, y que deberán ser digitalizadas para poder ser transmitidas al microcontrolador del nodo sensor (durante las pruebas de calibración esta comunicación se ha realizado a un ordenador). El diagrama de bloques de la figura 10 muestra las entradas y salidas del microcontrolador de la interfaz diseñada.

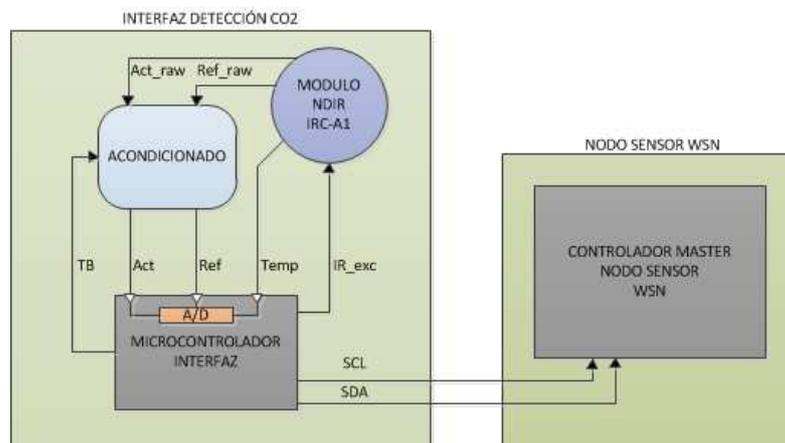


Fig. 10. Diagrama de bloques nodo-interfaz.

El dispositivo elegido para llevar a cabo estas tareas ha sido un pequeño microcontrolador de 8 bits de Freescale, concretamente un MC9RS08KA8, perteneciente a la familia RS08 y que cumple perfectamente con los requisitos requeridos para este trabajo. Los principales motivos para la elección de este dispositivo han sido su sencillez, el conocimiento y experiencia en el uso del mismo. En la figura 11 se observa el conexionado del microcontrolador y en el cual se aprecia la inclusión de un puerto de entrada añadido en la propia placa que nos servirá para poder realizar acciones de depurado en tiempo real con nuestro dispositivo.

Por tanto, una vez explicada la interfaz electrónica elegida podemos presentar el resultado final de la implementación de estos sistemas en una única placa de circuito impreso.

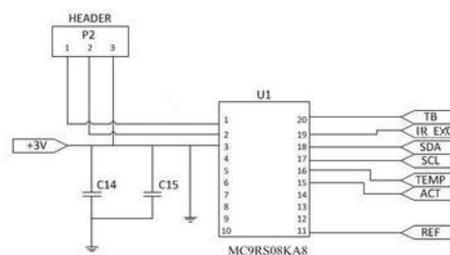


Fig. 11. Conexión del microcontrolador

4.1.5 Implementación del prototipo

El circuito completo diseñado se puede ver en las siguientes figuras:

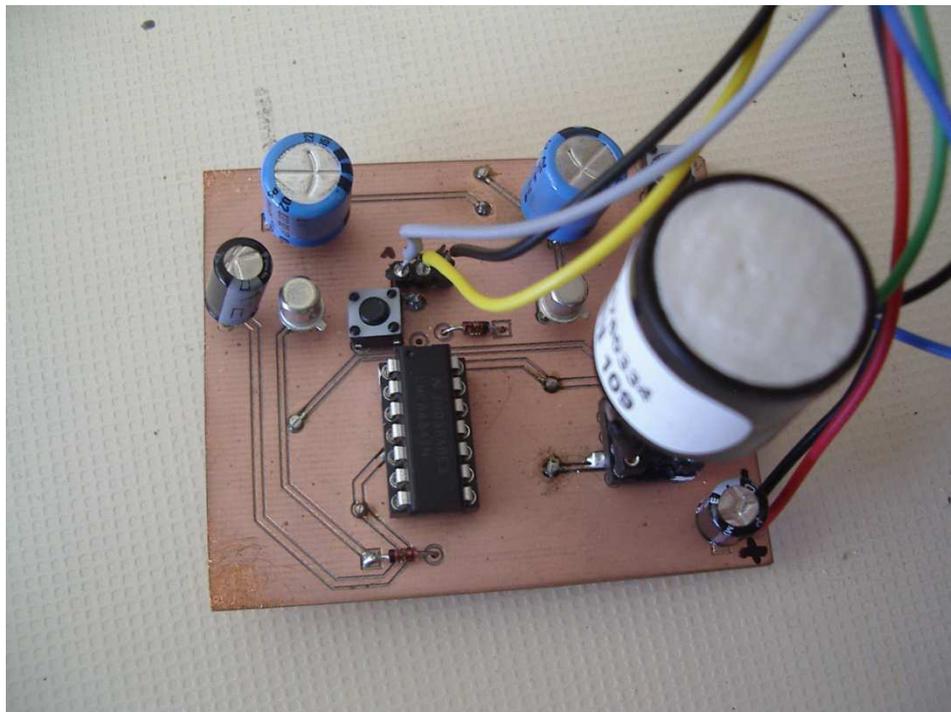


Fig. 12. Vista superior del interfaz electrónico diseñado.

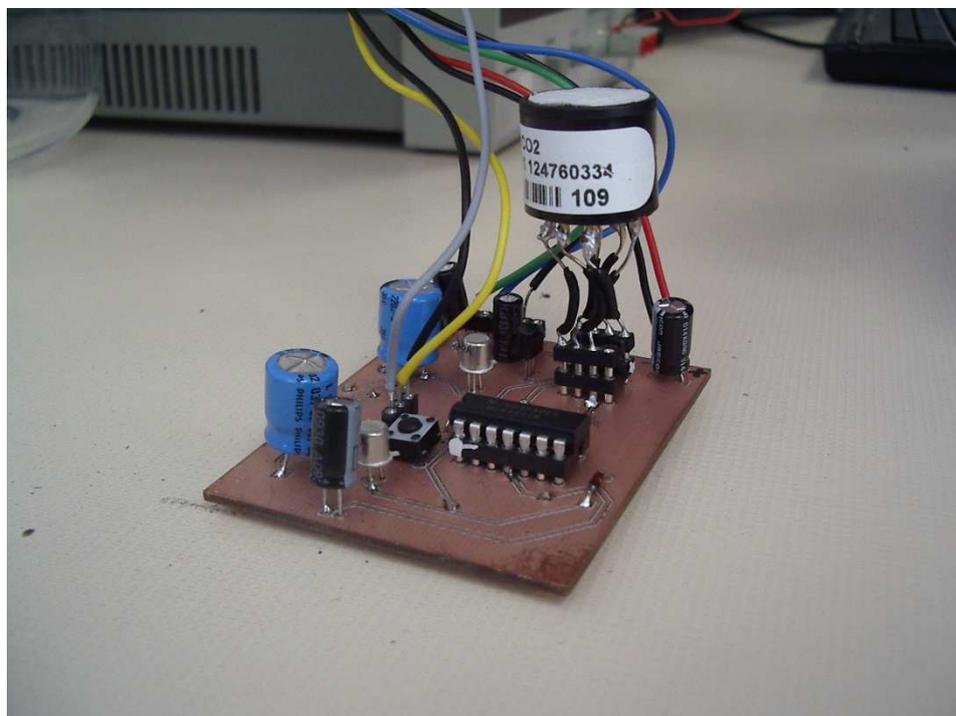


Fig. 13. Vista lateral del interfaz electrónico diseñado.

4.2 Implementación software

4.2.1 Programación del microcontrolador

En este apartado se explica el software desarrollado para la realización de este proyecto. Como se ha visto en el apartado anterior se requiere la programación de un microcontrolador para la generación de una serie de señales y para la comunicación serie.

En cuanto a la generación de señales, para la excitación de la fuente de infrarrojo se necesita una onda cuadrada con un ciclo de trabajo del 50% y una frecuencia de 2.5 Hz. Por otro lado, para llevar a cabo el reinicio de los condensadores de captura de los valores máximos de las variables se ha optado por una onda de una frecuencia de 1 kHz.

La comunicación serie está destinada a conectar el interfaz diseñado en este proyecto con el sistema procesador instalado en un nodo sensor de una red inalámbrica de sensores, pero para su test previo se ha usado una comunicación serie con un ordenador mediante una tarjeta de adquisición de datos. Debido a esto ha sido desarrollado un pequeño algoritmo en el programa Matlab de modo que al recibir los valores de las variables medidas puede realizar el cálculo de la concentración de gas. Obviamente, el programa desarrollado es perfectamente extrapolable a ser implementado en el procesador instalado en un nodo sensor o incluso podría ser instalada en el propio microcontrolador de la interfaz electrónica si así fuera requerido.

Para llevar a cabo esta comunicación serie se ha desarrollado un pequeño protocolo que se presenta en la figura 14. Como es habitual para estos protocolos se usan 2 líneas, una primera de reloj, y una segunda para el envío de datos.

La comunicación se estructura en 20 pasos (bits), donde los 3 primeros nos sirven de cabecera, los 3 siguientes son nulos, el séptimo y el octavo son para la cabecera, que corresponde al tipo de variable que estamos mandando, es decir, 00 para la *temperatura*, 10 para el *activo* y 01 para la *referencia*. Seguidamente, se envían los 8 bits del dato y 4 bits más configurados como '1' lógico para el cierre del envío.

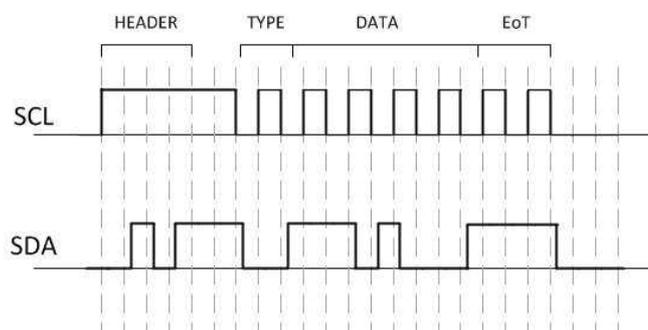


Fig. 14. Protocolo de comunicación serie

4.2.1 Implementación en Matlab

Para determinar el cálculo de la concentración de CO₂ a partir de las medidas provenientes de la interfaz conectada al sensor se ha desarrollado en Matlab un pequeño algoritmo que incluye las ecuaciones correspondientes. Estas ecuaciones, pueden ser implementadas en cualquier otro sistema, ya sea el nodo sensor de una red inalámbrica de sensores o el propio microcontrolador de la interfaz.

Como se ha explicado en el apartado anterior, el sistema inteligente de la interfaz envía las variables activo, referencia y temperatura. Una vez recibidas, el programa realiza el cálculo para la obtención de la concentración de gas, siguiendo los pasos mencionados en el Anexo I sobre el método para la obtención de la concentración.

Interfaz gráfica

Se ha desarrollado una interfaz gráfica, que nos permite la monitorización de la concentración de gas junto con la lectura de otras medidas importantes como el valor actual de referencia, activo y temperatura. Esto es altamente útil en lo referido a calibración ya que nos da la oportunidad de elegir la mejor configuración posible.

El modelo gráfico puede verse a continuación en la figura 15, donde podemos apreciar que existe la opción de cambiar la calibración en función de las lecturas de temperatura y concentración estimada junto con la lectura de los valores de referencia y activo en el mismo momento.

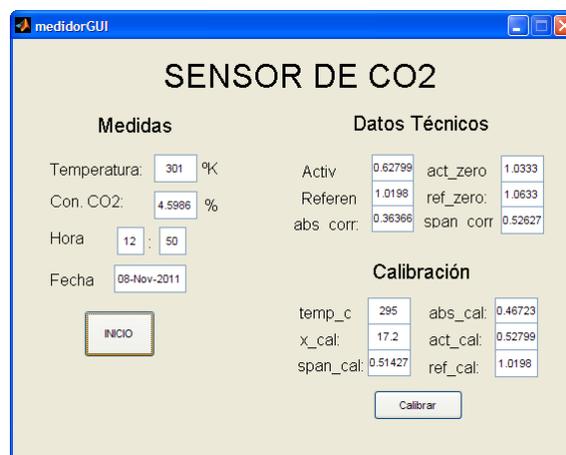


Fig. 15. Interfaz gráfica

Adicionalmente se ha implementado también un algoritmo que automatiza la toma de valores.

En busca de una reducción del tiempo de trabajo y una mejora de la eficiencia del sistema se ha desarrollado un algoritmo que procede al cálculo automático de la concentración de CO₂. Este sistema obtiene 10 medidas consecutivas, que son promediadas para evitar así posibles desviaciones y obtener un valor más preciso.

5. MONTAJE

En este apartado se trata el montaje de los diferentes dispositivos para la realización de las pruebas de medida del sensor. El montaje ha sido realizado en los laboratorios del GDE en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza.

El montaje consta de un recipiente hermético de cristal en cuya tapa han sido realizados varios orificios para la entrada y salida de cables y tuberías. El recipiente tiene una capacidad de 2 l, lo que equivale a 2000 cm³. La tapa viene sellada con dos aros de goma que realizan el cierre hermético del mismo.

En la tapa hay 4 orificios, en uno de ellos se ha incorporado una llave de paso de vidrio que nos permite la apertura y el cierre de la salida de gas del bote. Esta llave está conectada a una bomba de vacío que realiza el vaciado interior del bote, ya que para la calibración del sensor es necesaria la toma de medidas con el sensor en condiciones de cero gas, como se menciona en el Anexo 1.

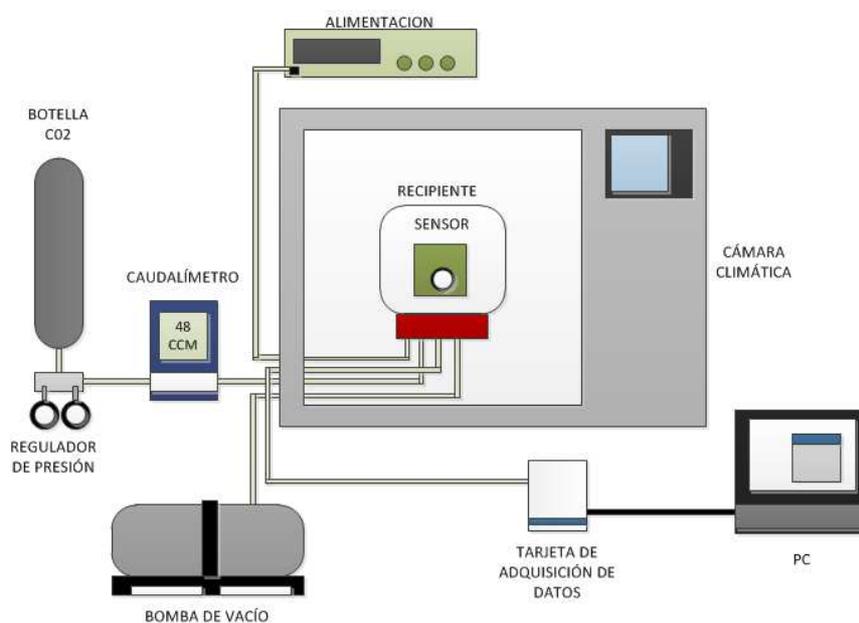


Fig. 16. Diagrama de bloques del montaje

El agujero simétrico a este proviene de un caudalímetro digital que sirve de control de la cantidad de gas que es enviado al bote. A la entrada de este caudalímetro se coloca la botella de CO₂ que nos sirve de fuente de gas. Para hacer posible el flujo de gas por el sistema es necesario hacer descender la presión de salida del CO₂ de la botella, por lo que se ha añadido un regulador de presión encargado de conseguir una presión soportada por el caudalímetro.

El caudalímetro elegido pertenece a la empresa Alicat Scientific concretamente a la serie MCS y permite el paso fijo de un caudal establecido seleccionado entre 0.5 SCCM (*centímetros cúbicos por minuto*) y 50 SCCM [14].

Los otros orificios han sido realizados para la entrada de cables de alimentación y los consecuentes cables conectados entre la placa y la tarjeta de adquisición de datos. La figura 16 muestra el diagrama de bloques de los elementos que toman parte en el montaje del sistema de medición.

Obviamente, el test realizado consiste en la introducción controlada de gas en el bote, donde se encuentra la placa con el sensor. Las lecturas del sensor son enviadas vía una tarjeta de adquisición de datos National Instruments Ni USB-6212 al ordenador que lleva a cabo el cálculo de la concentración.

Para las pruebas en el rango de temperaturas se ha introducido el recipiente en una cámara térmica

Aralab Fitoterm 22, donde como se detalla posteriormente se ha sometido al dispositivo a test a temperaturas de -10°C , 10°C , 30°C , 50°C .

Las figuras 17 ilustran el montaje completo de las partes mencionadas anteriormente.

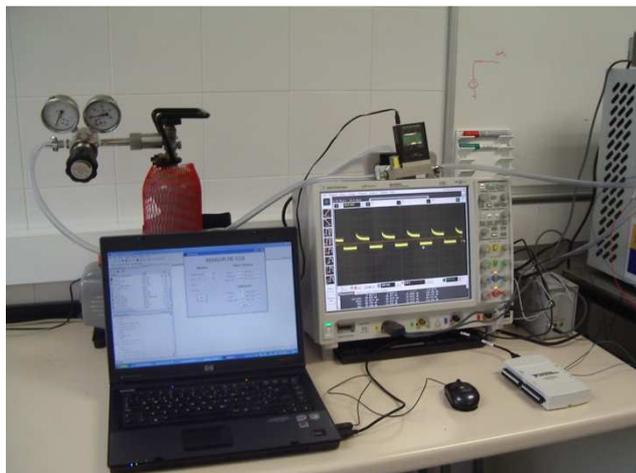


Fig. 17.A. Imagen montaje de laboratorio

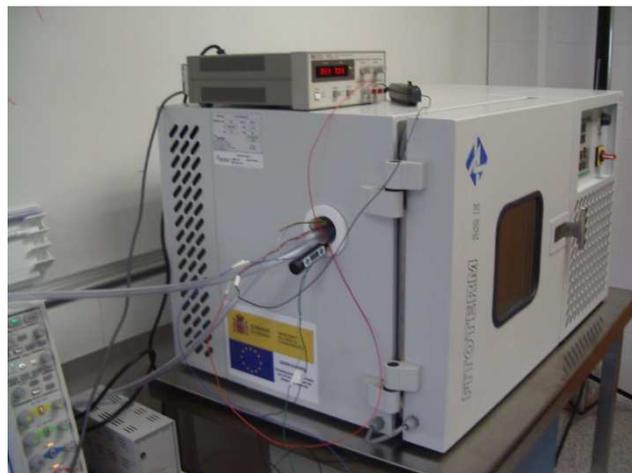


Fig. 17.B. Imagen montaje de laboratorio



Fig. 17.C. Imagen montaje de laboratorio

6. COMPARATIVA CON DISPOSITIVO COMERCIAL ALPHASENSE

En este apartado se procede a la comparación entre la interfaz electrónica diseñada para este trabajo con el dispositivo comercial ofrecido por la empresa desarrolladora de los sensores de estudio. El objetivo de este punto es comprobar la mejora en las prestaciones con los dispositivos similares ofrecidos en el mercado, como por el ejemplo el dispositivo IRC-TM NDIR CO₂ Transmitter Board. [15].



Fig. 18. NDIR CO₂ Transmitter Board Alphasense

El dispositivo del que disponemos posee una calibración para ser usado en el rango de 0 a 5% de concentración de gas, por lo que de modo excepcional se ha realizado la comparación en el mismo ámbito de trabajo para el rango establecido por este dispositivo.

Para la realización de esta comparación se han introducido varias cantidades de CO₂ de manera progresiva durante cortos períodos de tiempo y observado la reacción de ambos dispositivos ante este suceso. La figura 19 ilustra la desviación existente entre ambos dispositivos. El resultado es un pequeño offset entre la medida realizada por el dispositivo presentado en este trabajo y por el proveniente del fabricante, aunque no es completamente determinante para la detección de este tipo de gas. Las medidas fueron tomadas cada 15 minutos.

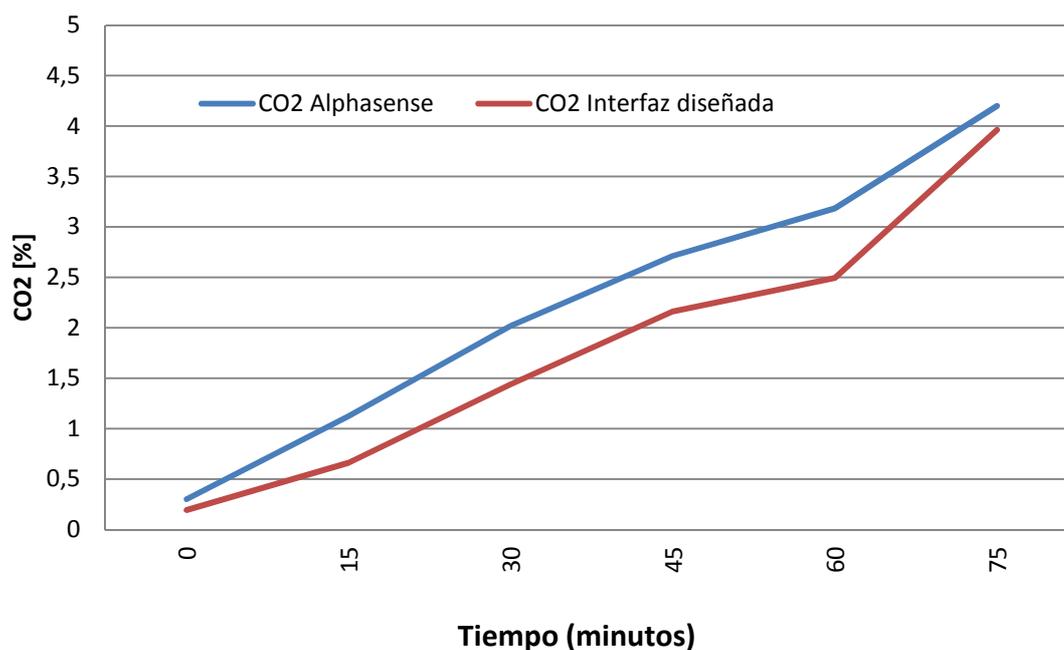


Fig. 19. Medidas de concentraciones con el dispositivo comercial y el presentado en este trabajo.

6.1. Estudio de consumo

El consumo es uno de puntos importantes sobre los que se debe trabajar para lograr la implementación de este dispositivo en sistemas alimentados por baterías, por ello, es capital conseguir un bajo consumo manteniendo las prestaciones. Las figuras 20 ilustran la diferencia entre los consumos de ambos dispositivos, la figura 20.A se muestra el consumo de la interfaz diseñada configurada la escala para 20mA por cuadro, mientras que la figura 20.B muestra el consumo por dispositivo comercial de Alphasense con una escala de 50 mA por cuadro. Ambas imágenes reflejan claramente la importante reducción en el consumo que realiza la interfaz desarrollada en este trabajo.

La primera diferencia entre ambas interfaces puede verse en la alimentación requerida. Mientras que el dispositivo de Alphasense necesita de entre unos 7 a 40 V para funcionar correctamente, aunque para la realización de esta prueba se ha alimentado con 16 V, el dispositivo desarrollado en este trabajo se alimenta a 3V, lo que supone una reducción considerable respecto a lo ofrecido por el fabricante. En cuanto al consumo, la interfaz dada por Alphasense muestra un valor medio de corriente de unos 45 mA, llegando a alcanzar picos de 150 mA, mientras que nuestro dispositivo alcanza un consumo medio de 25 mA con picos máximos que apenas rozan los 80 mA.

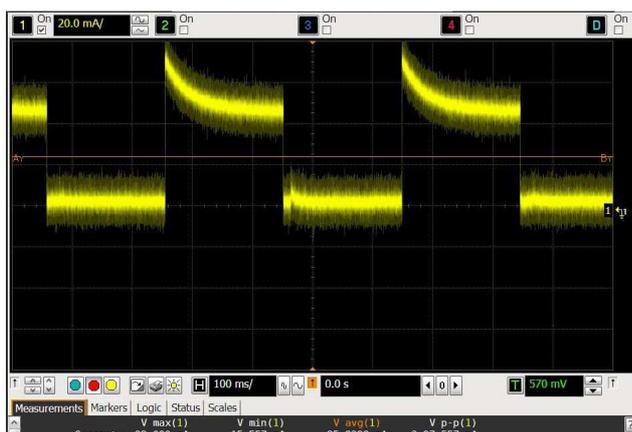


Fig. 20.A. Consumo interfaz diseñada

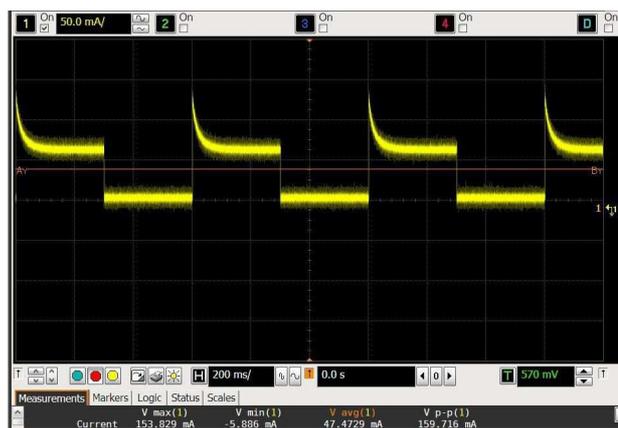


Fig. 20.B. Consumo interfaz Alphasense

Las imágenes mostradas anteriormente muestran el consumo de ambos dispositivos tomados con una sonda de corriente Agilent N2783A conectada a un osciloscopio Agilent Infinium MSO9404A, ambos dispositivos junto con la instrumentación utilizada en este trabajo aparecen enumerados en el Anexo III.

Podemos concluir que la interfaz electrónica presentada en este trabajo muestra un consumo menor, dando unas prestaciones muy similares a las ofrecidas por un dispositivo comercial actual, como es el IRC-TM.

7. CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

En esta sección se explica el método seguido para la caracterización del sensor, desde la situación inicial con la consiguiente puesta a punto de los dispositivos empleados hasta la obtención del estudio para todo el rango de temperatura a la que el dispositivo podría llegar a trabajar. La sección se divide en tres bloques: un primer bloque donde se explica el funcionamiento del montaje completo y el método utilizado para la obtención de los resultados posteriores.

En segundo lugar, se exponen los resultados obtenidos para temperatura ambiente por la interfaz gráfica, con respecto al cálculo teórico de la concentración puntual en el recipiente. Finalmente, siguiendo el mismo procedimiento se procede a la muestra de los resultados obtenidos para el rango de temperatura a las que el dispositivo está preparado para trabajar.

7.1 Metodología

Como los dispositivos utilizados ya han sido mencionados en el montaje de los elementos usados para este estudio, se explica a continuación la metodología usada para la obtención de la caracterización del sensor.

Gracias a una bomba de vacío conectada al recipiente en el que se realiza el estudio podemos realizar en su interior el vaciado de gases, lo que nos permite la obtención de los parámetros requeridos para la calibración. Como se explica en el Anexo I, estos valores son ACT_0 y REF_0 .

Tras la medición experimental de estas variables, obtenemos los siguientes valores:

ACT_0	1.0333 V
REF_0	1.0633 V

Tabla 2. Valores ZERO (Ver Anexo I)

Debido a que el elemento sensor no ha sido reemplazado, estos valores se mantendrán fijos durante todos los test realizados. Una vez obtenidos los valores en ausencia de gas, se introduce una concentración conocida que servirá de calibración para el sensor. De acuerdo con las hojas de características del sensor [5] [12] [13], para el rango de trabajo seleccionado, de 0-20%, se debe aplicar una concentración de aproximadamente un 16 %. Tras las pruebas realizadas con los sensores disponibles se ha optado por una calibración en torno a 17% como se presenta en el siguiente punto de esta sección, ya que el dispositivo mejores resultados con esta cantidad. La información sobre las diferentes calibraciones realizadas se encuentra en el Anexo II.

Para conseguir esta concentración, se configura el caudalímetro con una consigna de paso de 48 SCCM. Conociendo que el bote posee 2000 cm³, un 20 % se conseguirá con la introducción de 400 cm³. Por lo tanto, controlando el tiempo de apertura del regulador de presión podremos estimar la concentración de gas introducida en el recipiente.

Una vez ha sido introducida en el recipiente la concentración de CO₂ de calibración se mide la temperatura gracias a un termómetro externo, ya que la temperatura dada por el sensor en funcionamiento puede ser ligeramente superior a la real. Este valor junto con el de la concentración real de gas nos sirven para realizar la calibración del sensor.

Calibrado el sensor, y siendo los valores de su calibración almacenados por el software, se repite el proceso de vaciado del recipiente y se comienza con la introducción paulatina de gas y la correspondiente toma de medidas. Para la toma de medidas, se determinan aproximadamente las concentraciones de CO₂ dentro del recipiente en función del tiempo y apertura de la válvula del caudalímetro para una posterior comparación con las lecturas proporcionadas por el interfaz. Estas concentraciones se muestran a continuación.

Tiempo apertura (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Concentración aproximada (%)	0	2.4	4.8	7.2	9.6	12	14.4	16.8	19.2	21.6

Tabla.3. Puntos de medida para caracterización del sensor

El software empleado obtiene 10 valores para cada concentración establecida, realizando después el mediado de estos valores para obtener la concentración final obtenida.

7.2 Caracterización a temperatura ambiente

Para la caracterización a temperatura ambiente del sensor, se ha procedido a la realización de diversas calibraciones con diferentes concentraciones de calibración en la búsqueda de la mejor configuración posible de la interfaz electrónica.

Experimentalmente ha resultado ser mejor la calibración con una concentración de calibración de entorno a un 17% cuyos resultados se muestran en la figura 23. La tabla 4, muestra los valores de calibración.

Consigna caudalímetro	48 SCCM
ACT₀	1.0333
REF₀	1.0633
CO₂ Calibración estimada	17.28 %
Temperatura de calibración	295.3 ° K

Tabla.4 Valores de calibración

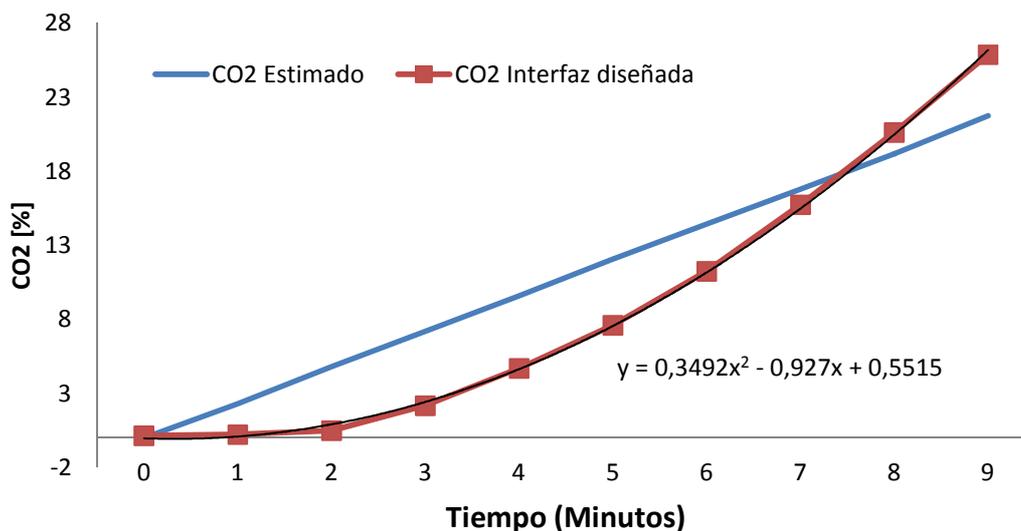


Fig. 21. Respuesta del sensor en comparación con la concentración estimada

7.3 Caracterización en el rango operativo de temperaturas.

En este punto se abordan los resultados obtenidos en todo el rango de temperaturas admitidas por el sensor para su funcionamiento. Para conseguir alcanzar estas temperaturas, se ha introducido el dispositivo en una cámara climática Aralab Fitoterm 22E. Se han elegido cuatro temperaturas de estudio: -10°C , 10°C , 30°C , 50°C . La metodología usada es completamente similar a la expuesta en el primer punto de esta sección y como valores de calibración se han mantenido los obtenidos en el segundo punto de esta misma sección.

Los resultados obtenidos para cada temperatura se muestran en las siguientes figuras;

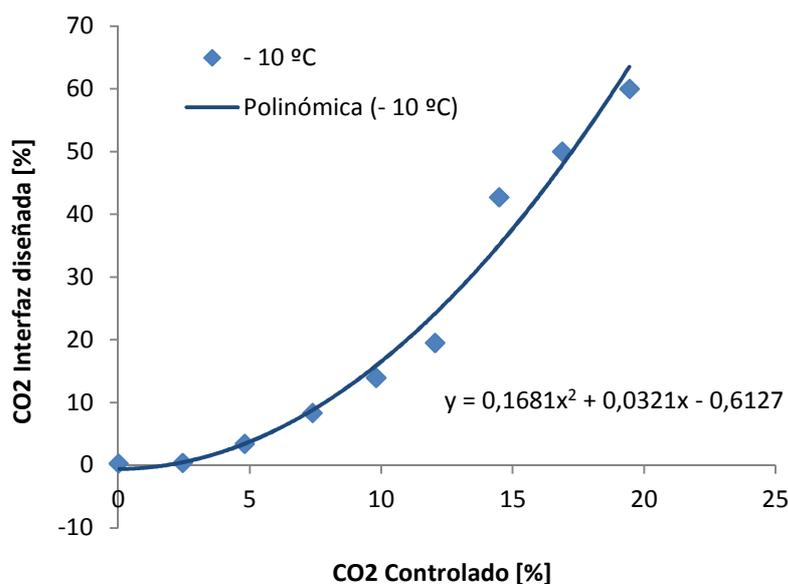


Fig. 22.A. Curva para temperatura de -10°C

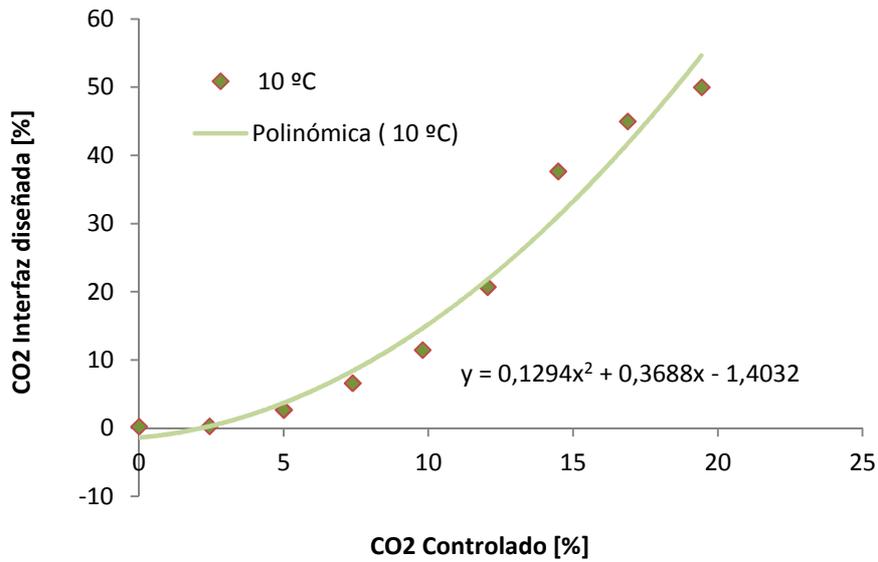


Fig. 22.B. Curva para temperatura de 10°C

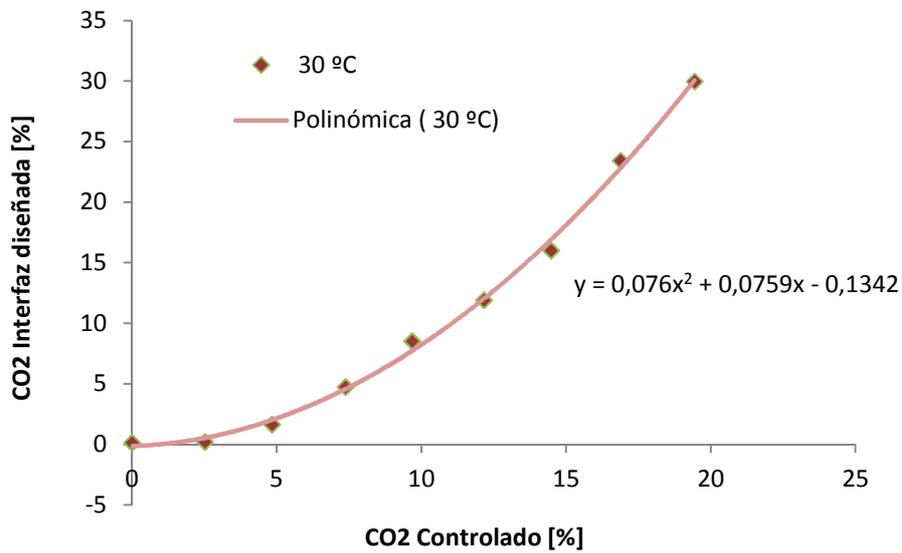


Fig. 22.C. Curva para temperatura de 30°C

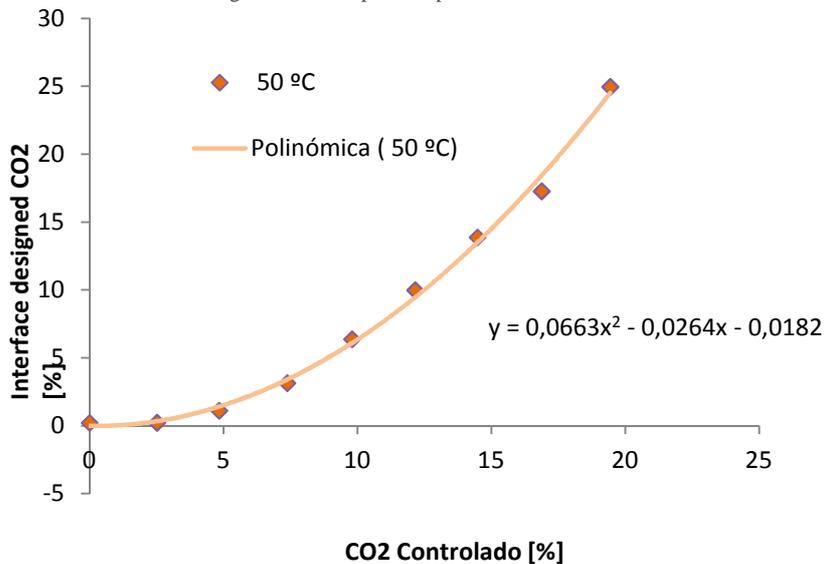


Fig. 22.D. Curva para temperatura de 50°C

A la luz de estas gráficas vemos que las tendencias tienen un carácter similar a pesar de incrementarse considerablemente la pendiente conforme disminuye la temperatura de trabajo. Es obvio por tanto, que la desviación aumenta conforme la temperatura disminuye aunque incluso en estos la curva obtenida podría ser modelada para obtener mejores resultados. En la figura 23 podemos apreciar las curvas de las distintas temperaturas sobre la misma gráfica donde se aprecia esta característica del sistema.

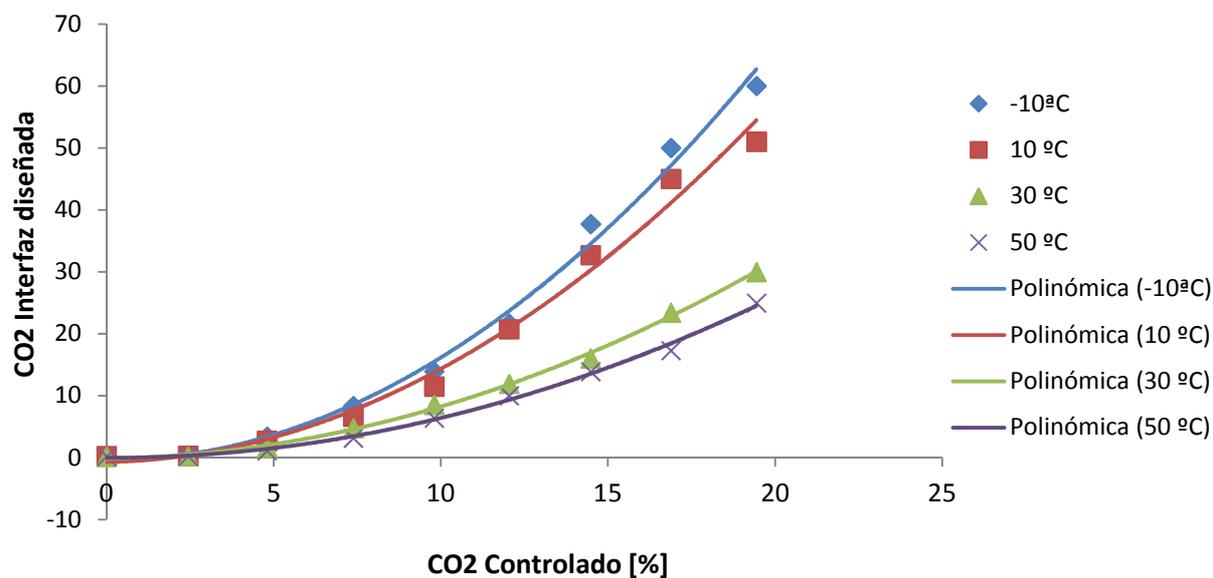


Fig. 23. Comparación curvas en rango de temperatura

8. IMPACTO DEL DISPOSITIVO EN UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

Como ya se ha descrito en los objetivos de este trabajo, unos de los principales problemas a dilucidar con este estudio es la viabilidad de la inclusión del módulo diseñado como elemento sensor dentro de los nodos de una red de sensores inalámbrica. Estimando un ciclo de trabajo aproximado de un 0.1 % habitual para este tipo de sistemas inalámbricos la red únicamente es encendida durante un corto periodo de tiempo cada 15 minutos. En este caso, de estos 900 segundos la red necesita de 1.3 segundos para la realización de las operaciones que tiene estipuladas. Por lo tanto podemos estimar el tiempo de vida de las baterías que alimentan el sistema con los siguientes cálculos:

La red es alimentada por dos pilas de 1.5 V y 1500 mAh. El consumo de la red en modo ON es de 55 mA, mientras que el de modo SLEEP es de 2 μA. Por lo tanto:

$$\left(55 \text{ mA} \frac{1,3 \text{ seg.}}{900 \text{ seg.}} + 2 \mu\text{A} \frac{898,3 \text{ seg.}}{900 \text{ seg.}}\right) \times 3\text{V} = 0,244 \text{ mW} \quad (1)$$

Calculando el número de horas de vida obtenemos:

$$\frac{4500 \text{ mW} \times h}{0,244322 \text{ mW}} = 18418,3 \text{ horas} \quad (2)$$

Es decir,

$$\frac{18418,31 \text{ horas}}{24 \frac{\text{horas}}{\text{día}}} = 767 \text{ días} \quad (3)$$

La inclusión de nuestra interfaz en este sistema supondría añadir un consumo de 25 mA durante el tiempo que dura la medida y la transmisión de los datos. Haciendo una estimación gruesa, podemos concluir que este proceso dura en torno a un segundo, por lo que deberemos añadir este consumo al modo ON de funcionamiento, asimismo, deberemos incluir el gasto mientras el dispositivo está en modo sleep.

El resultado es el siguiente:

$$\left(55 \text{ mA} \frac{0,8 \text{ seg.}}{900 \text{ seg.}} + 80 \text{ mA} \frac{0,5 \text{ seg.}}{900 \text{ seg.}} + 2 \mu\text{A} \frac{898,7 \text{ seg.}}{900 \text{ seg.}} + 2 \mu\text{A} \frac{899,5 \text{ seg.}}{900 \text{ seg.}}\right) \times 3\text{V} = 0,292 \text{ mW} \quad (4)$$

$$\frac{4500 \text{ mW} \times h}{0,29198800 \text{ mW}} = 15411,6 \text{ horas} \quad (5)$$

$$\frac{15413,7196 \text{ horas}}{24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}}} = 642 \text{ dias} \quad (6)$$

Observamos que la vida de las baterías con la inclusión de nuestro sistema es de 642 días. Lo que supone una vida de las baterías de un 83% respecto al consumo sin la interfaz diseñada.

Cabe mencionar que estos resultados son teóricos y que por tanto podrían ser fácilmente mejorables llevando a cabo una optimización de ambos dispositivos y de su trabajo conjunto, lo que resultaría en una mejor implementación de la interfaz electrónica propuesta en este documento en una red de sensores inalámbricos.

9. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA DE FUTURO

En esta sección se muestran las conclusiones obtenidas a la luz de los resultados mostrados en las secciones precedentes dando respuesta a los objetivos marcados para el desarrollo de este trabajo. Además se detallan posibles mejoras y avances que podrían realizarse en una segunda etapa de este proyecto.

9.1 Conclusiones

Durante el trabajo presentado en este documento se ha tratado el estudio completo de las características intrínsecas del sensor escogido a partir del cual se ha desarrollado y diseñado completamente la electrónica necesaria para obtener una correcta adquisición de la variable a medir, en este caso, la concentración de CO₂. Tras esto, queda a la vista que la interfaz obtiene la variable deseada cumpliendo los requisitos de diseño establecidos por la alimentación.

Esto queda reflejado en la figura 20, que muestra la desviación existente entre la concentración estimada de gas y la detectada por el dispositivo. Se puede aproximar el comportamiento de la interfaz modelando la curva de comportamiento mostrada en dicha figura para obtener una aproximación más exacta de la cantidad de CO₂ detectada.

El tiempo necesario para obtener una medida de la concentración de gas se ha estimado en torno a 0.8 segundos, si bien esta estimación corresponde con el prototipo utilizado usando la comunicación hacia un ordenador. Obviamente, esta medida podría reducirse si la comunicación se produjera entre el nodo sensor y la interfaz electrónica, ya que ambos deberán ser ensamblados reduciendo el número de pasos intermedios e incrementado la capacidad de transmisión del sistema. Por tanto, se puede establecer que el tiempo de comunicación actual es máximo y que, en cualquier caso, será reducido, por lo que los resultados obtenidos podrán ser mejorados al implementar el dispositivo expuesto en este documento en una red de sensores inalámbricos. Esto significaría un aumento de la vida de las baterías con respecto a lo presentado anteriormente.

En este trabajo también ha sido presentado el estudio del comportamiento del sensor para diferentes temperaturas dentro del rango estimado de trabajo. El comportamiento del sensor es similar para todo el rango de temperaturas, salvo porque la pendiente de la curva que dibujan los resultados se hace más pronunciada conforme la temperatura disminuye. Es decir, a medida que la temperatura baja, el sensor ve reducida su sensibilidad, aunque puede ser debido al comportamiento del propio gas a temperaturas bajas.

Para cada temperatura se ha obtenido una curva de comportamiento que relaciona directamente la concentración medida con la estimada por lo que nos habilita completamente para conocer la concentración exacta a partir de los datos obtenidos por la interfaz electrónica en dependencia con la temperatura registrada en cada momento.

En el apartado 8 de este documento se ha estudiado la influencia que tiene la inclusión del dispositivo presentado en este trabajo en un nodo sensor perteneciente a una red de sensores inalámbrica en lo relativo a la vida de las baterías utilizadas por este dispositivo. El resultado es que la vida de las baterías utilizadas sería entorno a un 83% respecto a la utilización del nodo sensor sin el sensor de CO₂. Además, el posible acoplado de ambos dispositivos en el mismo sistema mejoraría la comunicación entre ambos y esta podría ser optimizada aumentando con ello la vida operativa de las baterías.

Este dato nos lleva a la conclusión de que desde el punto de vista del consumo es totalmente viable la inclusión de la interfaz presentada en este documento en una red inalámbrica de sensores. Otro punto a favor es la baja necesidad de conexiones con el nodo sensor, ya que únicamente es necesaria una conexión a la alimentación y líneas de comunicación serie. Esto abre el abanico de posibles conexiones entre ambas, lo que demuestra un gran grado de modularidad entre ambos dispositivos multiplicando así las opciones y ventajas.

Por tanto, todas estas lecturas hacen ver que el dispositivo es perfectamente compatible con los nodos sensores disponibles y que además dotarían al sistema con la capacidad de monitorizar dióxido de carbono en los ambientes en los que así se desee, siendo esto una nueva ayuda en la prevención temprana de fuegos así como un sistema fiable para la monitorización de las emisiones difusas de CO₂ que pueden darse en otros ambientes, cuya principal consecuencia es el aumento del efecto invernadero.

9.2. Perspectiva de futuro

En cuanto a las posibilidades de futuro, ya ha sido mencionado que el siguiente paso debería ser la optimización de las características conjuntas del dispositivo nodo-interfaz. Es decir, una vez acoplada la interfaz a un nodo sensor se estudiaría las diferentes opciones para su programación conjunta.

Algunos puntos a resolver podrían tratar sobre qué sistema inteligente realiza el cálculo de la concentración, o lo que es lo mismo, dónde se implementa el software explicado en los correspondientes apartados de este documento. La opción más lógica sería que la propia interfaz realizara los cálculos pertinentes enviando únicamente al nodo sensor la cantidad actual de concentración de gas. Esto implicaría una reducción del tiempo de comunicación entre ambos sistemas lo que podría suponer una reducción del tiempo de funcionamiento de la interfaz electrónica presentada en este trabajo. La consecuencia directa de esta optimización sería una reducción considerable del consumo realizado por este dispositivo que repercutiría directamente en un aumento de la duración de las baterías que alimentan el sistema.

Otro punto a trabajar en el futuro, es el del acoplamiento entre ambos sistemas. Sería muy interesante que la interfaz electrónica de medida de gas, pudiera ser instalable físicamente de una manera directa sencilla, como por ejemplo mediante conexión mini USB. Esto implicaría la realización de un diseño totalmente intercambiable entre nodos sensores similares y aportaría la ventaja de poseer un producto completamente modular.

10. REFERENCIAS

- [1] B. Krishnamachari, Networking Wireless Sensor, Cambridge. University Press, New York, 2005..
- [2] A.Bayo, D. Antolín, N. Medrano, B. Calvo, S.Celma, "Early Detection and Monitoring of Forest Fire with a Wireless Sensor Network System." Proc. Eurosensors XXIV, September 2010.
- [3] Jaime Lloret, Miguel García, Diana Bri, Sandra Sendra "A Wireless Sensor Network deployment for Rural and Forest Fire Detection and Verification." Sensors 2009.September 2009.
- [4] Yanfeng Wang, Masakatsu Nakayama, Mikiko Yagi, Makoto Nishikawa, Masaichi Fuhnaga, Kenzo Watanabe."A NDIR CO2 Monitor with Smart Interface fro Global Networking." IMTC 2004.
- [5] Alphasense, IRC-A1 Carbon Dioxide Infrared Sensor. Datasheet. June 2009.
- [6] Jonqwon Kwon, Gwanghoon Ahn, Gyusik Kim, Chun Kim, Hiesik Kim."A study on NDIR-based CO2 Sensor to apply Remote Air Quality Monitoring System." ICROS-SICE International Joint Conference 2009.
- [7] A.Bayo, D. Antolín, N. Medrano, B. Calvo, S.Celma, "Development of a Wireless Sensor Network System for Early Forest Fire Detection." ITG-Fachbechrit 224 – RFID Systech, June 2010
- [8] F.Gómez-Rodríguez, B.C Arrue, A. Ollero "Smoke Monitoring and Measurement Using Image Processing" Robotics, Computer Vision and Intelligent Control Group, University of Seville.
- [9] Steven Verstockt, Peter Lambert, Rik Van de Walle, Bart Merci, Bart Sette "State of art in vision-based fire and smoke detection"
- [10] Song Chen, Tomuo Yamaguchi, Kenzo Watanabe "A Simple, Low-Cost Non-Dispersive Infrared CO2 Monitor" Sicon/02, November 2002
- [11] Yanfeng Wang, Masakatsu Nakayama, Mikiko Yagi, Makoto Nishikawa, Masaichi Fukunaga, Kenzo Watanabe "A NDIR CO2 Monitor with Smart Interface for Global Networking" IMTC 2004.
- [12] Alphasense Aplcation Note AAN 201-05 "NDIR Gas Concentration Overview"
- [13] Alphasense Aplcation Note AAN 202-03 "Electronic Interface and Signal Extraction"
- [14] Technical Data for Micro-Flow and Ultra-Low-Flow MC Mass-Flow-Controllers.
<http://alicatscientific.com/documents/specifications/MC05SCCM-50SCCMSpecs.pdf>
- [15] Alphasense, IRC-TM NDIR CO2 Transmitter board. Datasheet. June 2009.
- [16] Guía Técnica de Protección contra Incendios. Siemens, Building Technologies. 2005.

11. TABLAS Y FIGURAS

Se presentan a continuación la relación de figuras y tablas dispuestas en el documento.

Fig.1. IRC-A1 NDIR.

Fig.2. Estructura sensor de CO₂.

Fig.3. Esquema interno Modulo NDIR.

Fig.4. Diagrama de bloques de la interfaz diseñada.

Fig.5. Esquema circuital del módulo NDIR.

Fig.6. Circuito de amplificación y filtrado de la señal activa.

Fig.7. Circuito inversor para obtención de alimentación simétrica.

Fig.8. Señal previa a la amplificación.

Fig.9. Señal filtrada y amplificada.

Fig.10. Diagrama de bloques nodo-interfaz.

Fig.11. Conexionado del microcontrolador

Fig.12. Vista superior del interfaz electrónico diseñado.

Fig.13. Vista lateral del interfaz electrónico diseñado.

Fig.14. Protocolo de comunicación serie.

Fig.15. Interfaz gráfica.

Fig.16. Diagrama de bloques del montaje.

Fig.17. A. Imagen montaje de laboratorio.

Fig.17. B. Imagen montaje de laboratorio.

Fig.17. C. Imagen montaje de laboratorio.

Fig.18. NDIR CO₂ Transmitter Board Alphasense.

Fig.19. Medidas de concentraciones con el dispositivo comercial y el presentado en este trabajo.

Fig. 20. A. Consumo interfaz diseñada.

Fig. 20. B. Consumo interfaz Alphasense.

Fig. 21. Respuesta del sensor en comparación con la concentración estimada.

Fig. 22. A. Curva para temperatura de -10°C.

Fig. 22. B. Curva para temperatura de 10°C.

Fig. 22. C. Curva para temperatura de 30°C.

Fig. 22. D. Curva para temperatura de 50°C.

Fig. 23. Comparación curvas en rango de temperatura.

Tabla.1. Rangos de trabajo de IRC-A1 Alphasense.

Tabla.2. Valores ZERO.

Tabla.3. Puntos de medida para caracterización del sensor.

Tabla.4 Valores de calibración.

ANEXO I. OBTENCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE GAS

En este anexo se procede a la explicación de los pasos y variables requeridos para la obtención de la concentración de gas. Conviene diferenciar entre dos partes, una primera de calibración y una segunda de obtención de concentración.

Calibración del sensor

Para la calibración del sensor son necesarios dos parámetros: los parámetros ZERO y SPAN.

El parámetro ZERO define la relación existente entre las medidas activas y referencia en total ausencia de gas. Se trata de un parámetro específico del sensor por lo que deberá ser determinado siempre que el sensor sea instalado o reinstalado en un instrumento.

$$ZERO = \frac{ACT_0}{REF_0} \quad (a.1)$$

Donde ACT_0 y REF_0 son las señales en ausencia de gas.

Para esta medida, será necesario un periodo de calentamiento para el sensor, el cual, deberá ser alimentado y dejado en reposo por un tiempo de entre 10-30 minutos, tomando tras este tiempo las medidas necesarias. Además la temperatura también debe ser recordada.

Por su parte, el parámetro SPAN, es la proporción de radiación que afecta al elemento activo del detector y que tiene la capacidad de ser absorbido por el gas de estudio. La ecuación se muestra a continuación:

$$SPAN = \frac{ABS_x}{1 - \exp(-bx^c)} \quad (a.2)$$

Donde b y c son coeficientes de linealización que varían en función del rango de estudio al que se quiere someter el sensor y que son mostrados en la Tabla I. Mientras x se refiere a la concentración elegida para llevar a cabo la calibración.

Por otro lado, el término ABS_x se refiere a la absorbencia medida para la concentración de calibración.

Obtención de la calibración

Previo al cálculo de la concentración es necesaria la obtención del parámetro ABS que ya ha sido introducido. Este parámetro relaciona las medidas actuales de referencia y activo con las obtenidas en ausencia de gas, de la siguiente manera.

$$ABS = 1 - \left(\frac{ACT}{REF \times ZERO} \right) \quad (a.3)$$

Una vez obtenidos todos estos valores, se puede proceder a la obtención de la concentración del gas de estudio, en nuestro caso CO_2 . La ecuación que nos proporciona la medida es la siguiente:

$$CO_2 = \left[\frac{\ln \left(1 - \frac{ABS}{SPAN} \right)}{-b} \right]^{\left(\frac{1}{c} \right)} \quad (a.4)$$

Donde los valores ABS y SPAN, son los obtenidos para la concentración de gas actual. Sin embargo, para una mejor obtención de la concentración se procede a la compensación de ambos valores, ABS y SPAN.

Se corrige la variable ABS con su desviación en temperatura con la siguiente ecuación:

$$(1 - ABS_T) = (1 - ABS) \left(1 + \alpha(T - T_{cal}) \right) \quad (a.5)$$

Donde α es el coeficiente de corrección de la absorbencia, T_{cal} es la temperatura de calibración, ABS , absorbencia no corregida y ABS_T , la absorbencia corregida, cuyo valor necesitaremos en el cálculo de CO_2 .

Para la corrección de la variable SPAN se usa la siguiente ecuación:

$$SPAN_T = SPAN_{cal} + \beta_\alpha (T - T_{cal}) \quad (a.6)$$

Donde β_α es el coeficiente de corrección de la variable SPAN, T_{cal} es la temperatura de calibración, $SPAN_{cal}$ es la determinada durante al calibración y $SPAN_T$ la corregida.

Por tanto la concentración de CO_2 se obtiene de la siguiente manera:

$$CO_2 = \left[\frac{T}{T_{cal}} \right] \left\{ \left[\frac{\ln \left(1 - \frac{ABS_T}{SPAN_T} \right)}{-b} \right] \right\}^{\left(\frac{1}{c} \right)} \quad (a.7)$$

La concentración vendrá dada en porcentaje de volumen.

Los coeficientes a usar en estas ecuaciones vienen mostrados en la siguiente tabla:

Sensor	Gas	Range (SPAN Conc.)	Linearisation Coefficients		Temp. Comp. Coefficients		
			b	c	β_0	α	β_A
IRC-A1-IAQ	CO ₂	0 to 5000 ppm (4000 ppm)	4.30×10^{-4}	0.89	N/A	0.0007	0.0005
IRC-A1-Safety	CO ₂	0 to 5 % Vol (4 % Vol)	0.520	0.680	0.0021	0.0007	0.0014
IRC-A1-Combustion	CO ₂	0 to 20 % Vol (16 % Vol)	0.528	0.531	0.0024	0.0007	0.0020
IRC-A1-Industrial	CO ₂	0 to 100 % Vol (100 % Vol)	0.698	0.302	n.d	n.d	n.d
IRC-AT-IAQ	CO ₂	0 to 5000 ppm (4000 ppm)	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
IRC-AT-Safety	CO ₂	0 to 5 % Vol (4 % Vol)	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
IRC-AT-Combustion	CO ₂	0 to 20 % Vol (16 % Vol)	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tabla I. Coeficientes de linealización y compensación

ANEXO II. AMPLIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este anexo se exponen los resultados obtenidos para diferentes calibraciones con el fin de argumentar la decisión de la elección de la calibración presentada en este trabajo. El fabricante, en las hojas de características del sensor, recomienda una calibración para una concentración de torno a 16 %.

Durante el desarrollo de estas pruebas se ha calibrado el sensor a varias concentraciones y se ha realizado el test de comportamiento en el rango de funcionamiento (0 – 20%) para cada una de ellas. Las calibraciones realizadas corresponden a valores entre el 16% y el 20 % como máximo rango de trabajo. Los valores de estas calibraciones son: 16 %,17 %,18 %, 19 %.

En las siguientes gráficas podemos ver los resultados obtenidos:

Consigna caudalímetro	48 SCCM
ACT0	1.0333
REF0	1.0633
CO2 Calibración estimada	16.18 %
Temperatura de calibración	296.3 ° K

Tabla 1.A Parámetros de calibración

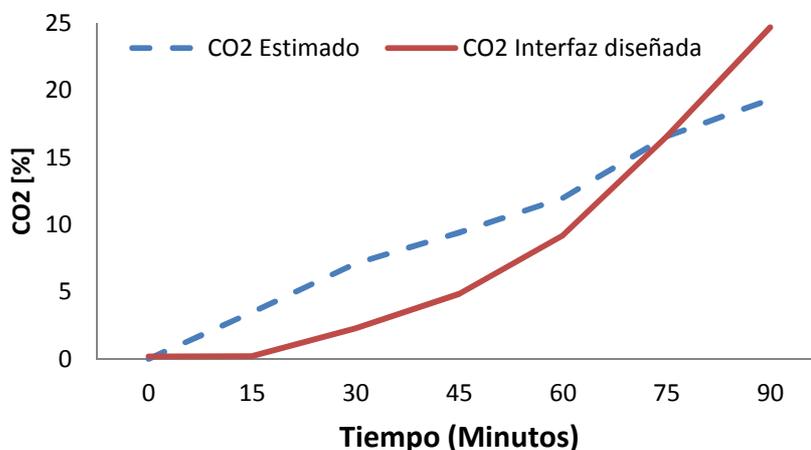


Fig. 1.A. Anexo II. Resultados 16%

Consigna caudalímetro	48 SCCM
ACT0	1.0333
REF0	1.0633
CO2 Calibración estimada	17.28 %
Temperatura de calibración	295.3 ° K

Tabla 1.B Parámetros de calibración

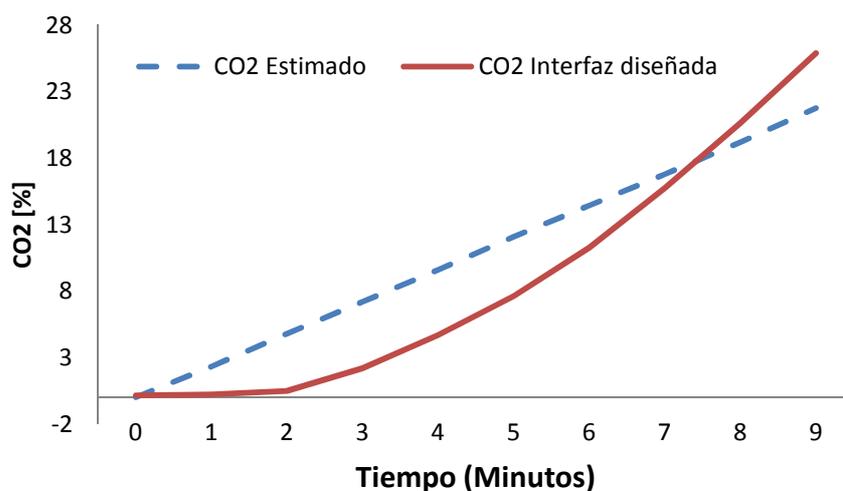


Fig. 1.B. Anexo II. Resultados 17%

Consigna caudalímetro	48 SCCM
ACT0	1.0333
REF0	1.0633
CO2 Calibración estimada	17.88 %
Temperatura de calibración	296 ° K

Tabla 1.C Parámetros de calibración

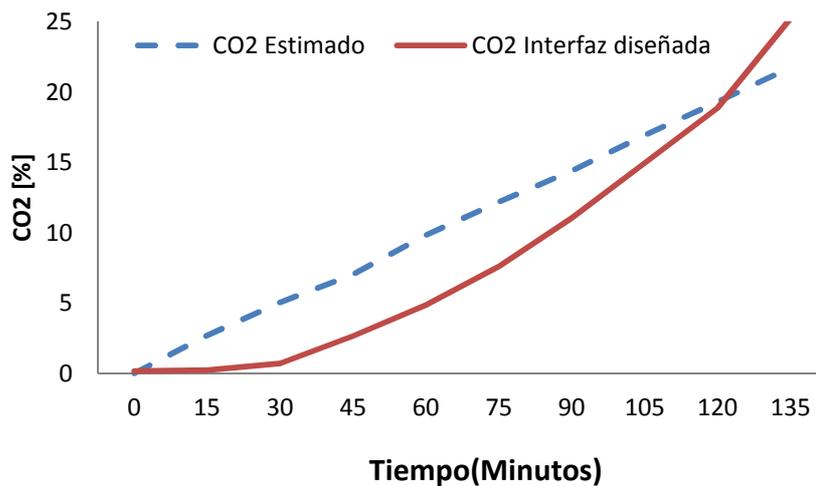


Fig. 1.C. Anexo II. Resultados 18%

Consigna caudalímetro	48 SCCM
ACT0	1.0333
REF0	1.0633
CO2 Calibración estimada	18.96 %
Temperatura de calibración	296 ° K

Tabla 1.D Parámetros de calibración

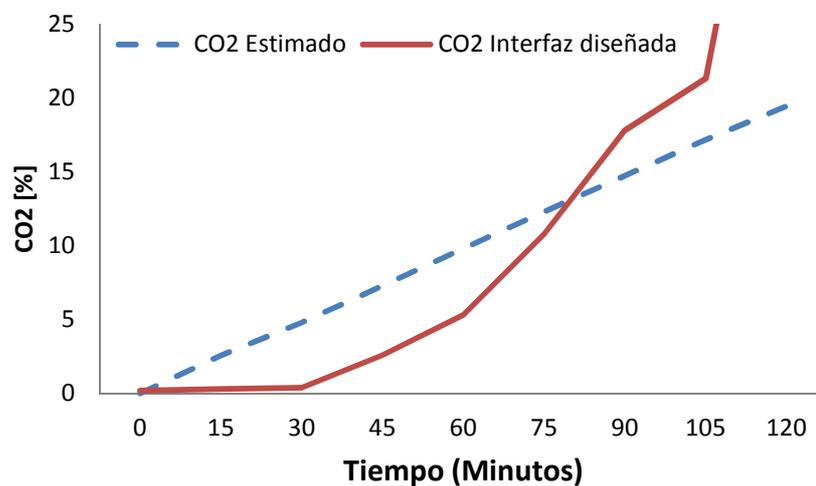


Fig. 1.D. Anexo II. Resultados 19%

Salvo para la calibración de 19%, no existe diferencias muy grandes entre los resultados obtenidos para las otras calibraciones. A pesar de esto, de las calibraciones mostradas, la que corresponde a un 17,28% muestra mejores resultados para el rango de trabajo deseado, por lo que ha sido la elegida para realizar el estudio en el rango de temperaturas de trabajo del sensor.

ANEXO III.RELACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN

En este anexo se presenta la relación de equipos de instrumentación usados en este .

Relación de Instrumentación
Osciloscopio Tektronix 210
Osciloscopio Agilent Technologies modelo Infinium MSO9404A
Fuente de alimentación HP E3611A
Sonda de corriente Agilent 52783A
Tarjeta de adquisición de datos National Instruments Ni USB-6212
Caudalímetro Alicat Scientific 16 Series Mass and Volumetric Precision Gas Flow Converter
Bomba de vacío Vacuum solutions Model 2F
Regulador de presión INOX 316, regulable 0-3.5 bares
Cámara térmica Aralab Fitoterm 22E
Termómetro IR TENMA 72-823
Termómetro digital bolígrafo Velleman

Tabla II. Relación de Instrumentación

ANEXO IV.AMPLIACIÓN INFORMACIÓN TECNOLOGÍA DE DETECCIÓN DE GASES PARA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS.

Extraído de la Guía de Protección contra Incendios de Siemens, 2005. Referencia 16.

Uso de la tecnología de detección de gas

La tecnología de detección de gas debe usarse donde puedan desarrollarse de forma desapercibida concentraciones peligrosas de gas. En el caso de amenazas temporales, los sistemas de detección de gas portátiles pueden ayudar a garantizar la seguridad. Sin embargo, en caso de un riesgo permanente, las instalaciones fijas son económicamente favorables.

Pueden producirse concentraciones peligrosas cuando, en caso de fuga, el contenido de una botella de gas es suficiente para llegar al límite de explosión inferior en la sala. Con concentraciones incluso menores, el gas sigue siendo combustible, por lo que puede quemarse y consecuentemente producir una conflagración. El “Concepto de protección contra incendios” (véase Capítulo 2), en cualquier caso, debe tener en cuenta estos riesgos, considerando todo el escenario del peligro.

Si se garantiza un suministro permanente de aire fresco, incluso en caso de peligro (p. ej., ventilación redundante), puede aumentar el volumen de gas tolerable.

Las áreas en las que pueden producirse gases y vapores combustibles se asignan frecuentemente a las denominadas zonas ex (zonas de protección contra explosión). El tipo de zona ex determina la naturaleza del riesgo. Tenga también en cuenta “División de zonas de las áreas de explosión” en el Apéndice.

Principios de medida

Durante las últimas décadas, la tecnología de detección de gas se ha mejorado y perfeccionado constantemente. Gracias a este esfuerzo, en la actualidad, existen tecnologías de detección muy fiables dentro de sus límites de aplicación.

Limitaremos nuestras explicaciones a los principios más importantes en cuanto a ingeniería de seguridad, que detectan de forma automática los gases o vapores combustibles.

IV.1. Sensor semiconductor

Los sensores semiconductores constan de cuerpos cerámicos de aprox. 5mm de longitud, por ejemplo, revestidos con óxido de cinc. La resistencia eléctrica del revestimiento cambia bajo la influencia del gas a detectar. Para que este efecto sea posible, el cuerpo cerámico debe calentarse por medio de una bobina de calentamiento incorporada, que da como resultado temperaturas de 300 a 400°C.

Para las aplicaciones ex, la temperatura de la superficie del cuerpo semiconductor requiere una barrera contra las llamas, normalmente en forma de un disco metálico sinterizado.

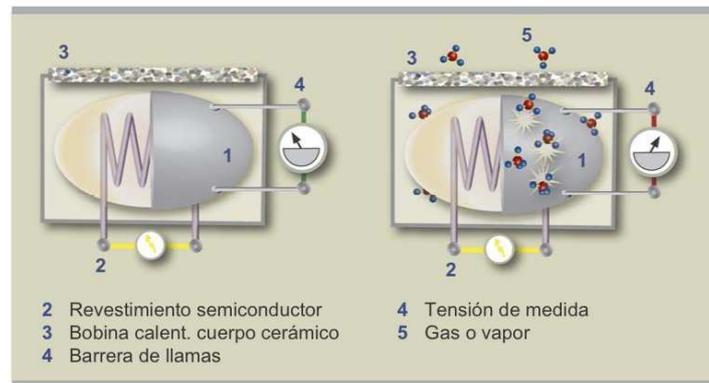


Fig.1 Anexo IV. Esquema sensor semiconductor

Este principio reacciona en una amplia gama de gases, determinando la sensibilidad cruzada a partir del comportamiento del revestimiento frente a los gases detectables. El sensor semiconductor también responde a la humedad del aire y a las fluctuaciones de temperatura. La señal de medida cambia más o menos logarítmicamente respecto a la concentración de gas.

El área de aplicación del sensor semiconductor está limitada, en base a estas propiedades. En la mayoría de los casos, la concentración de gas no puede determinarse con la suficiente precisión y las falsas alarmas no pueden eliminarse totalmente debido a la sensibilidad cruzada con otros gases.

IV.2. Sensor de temperatura de reacción (Pellistor)

El pellistor consta de una bolita cerámica (un cuerpo cerámico en forma de perla), de un tamaño de aprox. 2mm, revestida con un catalizador, normalmente de platino. Cuando la temperatura de la superficie aumenta de 500 a 600°C, por medio del calentamiento de la bobina incorporada en la bolita, la presencia de gases combustibles significativamente por debajo de su límite de explosión inferior hace que la superficie del pellistor comience a oxidarse. Esta oxidación aumenta la temperatura de la superficie de la bolita debido a la temperatura de reacción y de este modo también la temperatura de la bobina de calentamiento.

A medida que aumenta la temperatura de la bobina de calentamiento del cuerpo del catalizador, aumenta también su resistencia eléctrica. Este cambio puede medirse por medio de una segunda bolita cerámica de referencia no revestida y neutra en lo que respecta a los gases combustibles, pero que por lo demás es idéntica en construcción y también se calienta. En la mayoría de casos, para esta medida se usa un simple circuito eléctrico (puente Wheatstone).

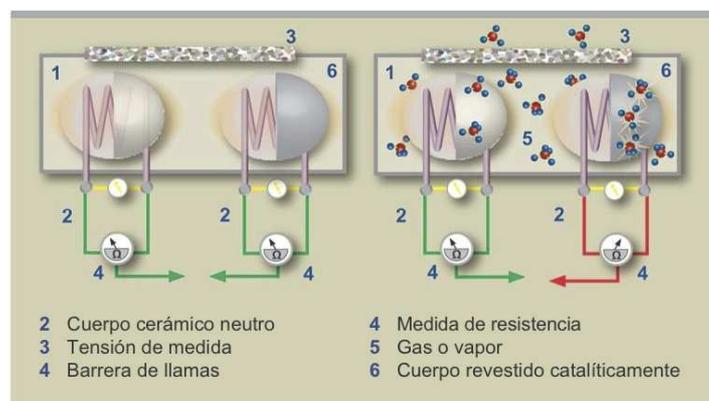


Fig. 2. Anexo IV. Esquema pellistor

La ventaja del pellistor, principalmente su alta precisión de medida y la posibilidad de determinar exactamente la concentración de gas, se ve contrarrestada por la desventaja del envenenamiento e inhibición del catalizador (perturbación de señales temporal), causado por los venenos del catalizador, como el silicio y los inhibidores, como el gas clórico.

En un entorno explosivo, se requiere una barrera contra las llamas (disco sinterizado, rejilla, etc.).

IV.3. Célula electroquímica

La célula electroquímica puede describirse como una batería incompleta, cuyo electrolito se completa con el gas que entra a través de una membrana semipermeable. Sólo habrá corriente entre ambos electrodos a través del electrolito si existe gas, siendo el flujo de corriente proporcional a su concentración.

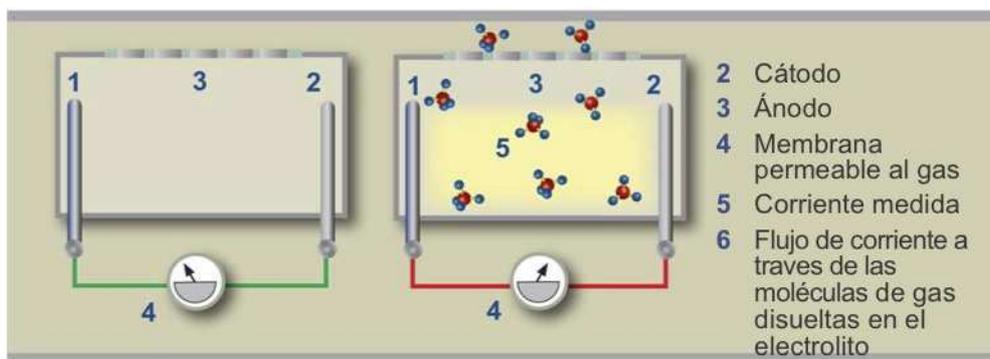


Fig. 3. Anexo IV. Esquema célula electroquímica.

La célula electroquímica es muy sensible. Sin embargo, esto puede tener un efecto negativo si la célula se expone con demasiada frecuencia a altas concentraciones de gas, posiblemente incluso reduciendo la vida de la célula.

La vida de servicio del sensor se determina básicamente por su temperatura ambiente y humedad. Los gastos en nuevos sensores y su sustitución tienen un impacto significativo en los costes de mantenimiento.

IV.4. Sensor optoacústico

El sensor optoacústico usa la característica de las moléculas de gas para oscilar a una frecuencia específica. Cuando un gas se ilumina con luz pulsada a una longitud de onda específica, se produce una fluctuación de presión en la cámara cerrada que es sincrónica a los pulsos de luz. Esto se detecta muy fácilmente como un sonido por medio de un micrófono.

La señal generada por el sensor puede linealizarse, lo que permite determinar con precisión las concentraciones de gas.

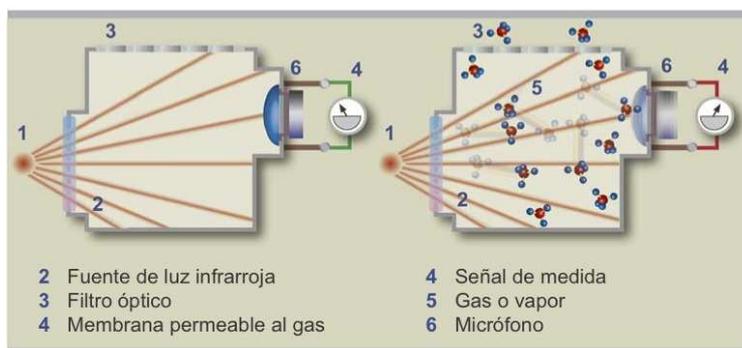


Fig. 4. Anexo IV. Esquema sensor optoacústico.

El micrófono, así como otros componentes son dispositivos simples y estables, que raramente fallan. Por lo tanto, este sensor tiene una vida de servicio significativamente larga.

IV.5. Sensor de absorción de infrarrojos

La luz con la misma frecuencia de oscilación natural que la del gas a detectar es absorbida por el gas. Esto significa que, en presencia de gas, el fotosensor ya no detecta la luz en la misma intensidad. Esta atenuación de señal permite la medida exacta de la concentración de gas.

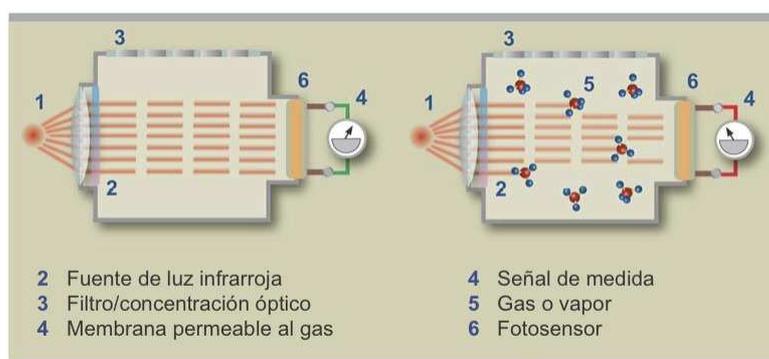


Fig. 5. Anexo IV. Esquema sensor de absorción de infrarrojos.

El sensor de absorción no mide directamente una señal proporcional a la concentración de gas, sino el decremento sufrido por la señal primaria. Dado que este método mide una reducción muy pequeña de una señal relativamente grande, es más susceptible a los efectos de deriva a largo plazo.

IV.6. Comparación de los métodos de detección

Tipo de sensor		Semi--conductor	Pelistor	Célula electroquímica	Sensor opto acústico	Sensor absorción infrarrojos
		Propiedad				
Criterios de calidad	Rango de detección	ppm - %LEL	%LEL	ppm	%LEL	%LEL
	Selectividad / sensibilidad cruzada	--	++	+	++	++
	Estabilidad (deriva)	+	-	+	++	++
	Ruido de fondo (umbral de medida inferior)	1% mr	1% mr	5% mr	1% mr	1% mr
	Precisión de medida	--	+	++	++	++
	Tiempo de respuesta t_{90} [seg.]	10	15 - 30	10 - 60	<30	<10
	Dependencia de temperatura	--	+	--	++	++
	Impacto de humedad	--	+	+	+	+
	Características	Logarítmico	Lineal	Lineal	Linearizado	Linearizado
	Envenenamiento del sensor	+	--	-	++	++
	Inhibidores del sensor	-	--	-	++	++
	Vida de servicio del sensor [años]	1 - 5	1 - 3	<1 - 3	5 - 10	5 - 10
	Costes	Precio de coste	++	+	-	-
Costes de mantenimiento		+	-	--	++	++

mr : Rango de medida
 t_{90} : Tiempo hasta que el detector mide el 90% de la concentración de gas real
 ++ : Muy bueno
 + : Bueno
 - : Deficiente
 -- : Muy deficiente

Fig. 6. Anexo IV. Tabla comparativa de métodos de detección

Resumiendo esta tabla, puede establecerse que los sensores semiconductores sólo pueden usarse cuando la atmósfera ambiente sea constante y cuando no se requieran detalles de la concentración. Las falsas alarmas no pueden descartarse totalmente.

El envenenamiento y los inhibidores del sensor ponen en una situación de riesgo al pellistor como detector clásico de gases combustibles. No obstante, si pueden excluirse esas sustancias nocivas, no existe ningún otro obstáculo para usar un pellistor.

La célula electroquímica es bastante cara, especialmente en lo que respecta al mantenimiento. Sin embargo, es la primera opción debido a su selectividad cuando debe detectarse un gas concreto en concentraciones muy pequeñas.

Debido a su principio de funcionamiento, el uso del sensor optoacústico es más elegante que el sensor de absorción de infrarrojos. Ambos métodos son extremadamente apropiados para detectar gases y vapores combustibles y tienen las mejores propiedades de todas las opciones consideradas. Sin embargo, conviene resaltar que los detectores de gas convencionales de estos tipos sólo responden a la parte de hidrocarburos del gas, lo que significa que, por ejemplo, el hidrógeno puro no se detecta. El precio de compra todavía bastante alto de estos sensores queda compensado por la larga duración y los bajos costes de mantenimiento.

Cuando no pueden eliminarse totalmente los contaminantes o los inhibidores, debe favorecerse el principio optoacústico o de absorción de infrarrojos. Después de todo, es mucho peor disponer de detectores que no funcionan a no tener nada en absoluto.