

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ingeniería Electrónica**

**Diseño e implementación de un analizador de gases para automóviles**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Alberto Garín Campos**

**Cartago, noviembre de 2017**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

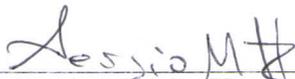
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

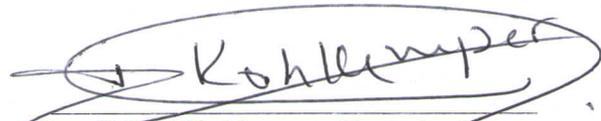
**Defensa de Proyecto de Graduación  
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
Grado Académico de Licenciatura  
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado “Diseño e implementación de un analizador de gases para automóviles”, realizado por Sr. Alberto Garín Campos y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

  
Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector

  
Ing. Daniel Kohkemper Granados

Profesor lector

  
Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor asesor

Cartago, 15 de diciembre de 2017

## DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Declaro que el presente Proyecto de graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Alberto Garín Campos

Alberto Garín Campos

Cédula: 3-0474-0337

## **Resumen**

El presente informe detalla el diseño y la implementación de un analizador de gases para vehículos. Esta idea de producto surgió en la empresa E2R para competir con las alternativas existentes, las cuales tienen un costo elevado. De esta manera, se busca llegar a un mercado de personas que no están dispuestas a pagar altas sumas o no pueden costearse un dispositivo de este tipo.

En este proyecto se realizó una investigación sobre los diferentes tipos de sensores que se utilizan en aparatos para medir los gases de escape de los automóviles, y con base en esta información, se realizó el diseño de los circuitos electrónicos necesarios para medir la concentración de estos gases. Esta información puede ser visualizada en una computadora, y sirve para determinar el estado de los motores de los vehículos.

**Palabras claves:** gases, sensores, circuitos de acondicionamiento

## **Abstract**

The following report details the design and implementation of a gas analyzer for motor vehicles. This product idea was conceived in the company E2R to compete with the existing alternatives, which have a high cost. In this way, they want to reach a market of people who are reluctant to pay high amounts of money or can't afford a device of this type.

In this project, an investigation was made about the different types of sensors that are used in those devices made for the measurement of the vehicles exhaust gases. and based on this information, it was possible to do the design of the necessary electronic circuits for the measurement of the gases concentration. This information can be visualized in a computer, and it's useful to determine the state of the vehicles motors.

**Keywords:** gases, sensors, conditioning circuits

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a mi familia y a mis amigos, quienes me han apoyado y ayudado en todos estos años que estado en la universidad.

## **Agradecimiento**

A mi familia por su apoyo incondicional

A mis amigos y compañeros por todos estos años que hemos compartido

A los profesores que se han preocupado por mi aprendizaje y crecimiento como estudiante y futuro ingeniero

A la empresa E2R y al Ing. Carlos Cordero por la oportunidad de realizar el proyecto de graduación en su empresa

## INDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Entorno del proyecto .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Generalidades del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Síntesis del problema .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Enfoque de la solución .....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 2: Meta y objetivos .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Meta .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Objetivo general .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Objetivos específicos .....</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 3: Marco teórico .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1. Tipos de sensores para gases .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1.1. Sensores electroquímicos .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1.2. Sensores de infrarrojo no dispersivo .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2. Protocolos de comunicación serial .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.1. I2C .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.2. SPI .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 4: Procedimiento metodológico .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1. Obtención de información sobre el problema .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2. Evaluación de las soluciones .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2.1. Diseño general .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2.2. Selección de los componentes y herramientas .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2.2.1. Sensores .....</b>	<b>17</b>

4.2.2.2. Microcontrolador .....	20
4.2.2.3. Componentes como ADC, amplificadores, memorias	23
4.2.2.4. Herramienta de diseño de PCBs .....	24
<b>Capítulo 5: Descripción detallada de la solución .....</b>	<b>25</b>
5.1. Circuitos de acondicionamiento .....	25
5.2. Convertidores de señal analógica a señal digital (ADC) y memorias ....	34
5.3. Reguladores y cargador de batería .....	37
5.4. Circuitos impresos (PCB) .....	40
5.5. Programación del microcontrolador .....	42
<b>Capítulo 6: Análisis de resultados .....</b>	<b>49</b>
6.1. Circuitos impresos y sensores .....	49
6.2. Pruebas de los circuitos de acondicionamiento, convertidores analógico- digital y memorias .....	51
<b>Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>61</b>
7.1. Conclusiones .....	61
7.2. Recomendaciones .....	61
<b>Bibliografía .....</b>	<b>62</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1. Diagrama para un sensor electroquímico de tres electrodos .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 3.2. Diagrama típico de una curva de corriente-tensión para un sensor electroquímico .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 3.3. Diagrama de un sensor de infrarrojo no dispersivo (NDIR) .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 3.4. Transferencia de datos mediante el protocolo I2C .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 3.5. Diagrama de tiempos para una transferencia de información mediante el protocolo SPI .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 4.1. Diagrama de bloques para un analizador de gases .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 4.2. Sensor de monóxido de carbono CO-CE de Alphasense .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 4.3. Sensor de dióxido de carbono IRC-AT de Alphasense .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4.4. Sensor de monóxido de nitrógeno NO-AE de Alphasense .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4.5. Sensor de oxígeno O2-C2 de Alphasense .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4.6. Vistas superior e inferior del Onion Omega2 .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4.7. Disposición de pines del Onion Omega2 .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4.8. Línea de comandos del Onion Omega2 .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4.9. Interfaz web del Onion Omega2 .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4.10. Ejemplo de uso del programa Altium Designer .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 5.1. Circuito de acondicionamiento para el sensor de monóxido de carbono .</b>	<b>26</b>
<b>Figura 5.2. Circuito de acondicionamiento para el sensor de monóxido de carbono .</b>	<b>28</b>
<b>Figura 5.3. Circuito de acondicionamiento para el sensor de monóxido de nitrógeno</b>	<b>29</b>
<b>Figura 5.4. Circuito de acondicionamiento para el sensor de oxígeno .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 5.5. Circuito de acondicionamiento recomendado para sensores NDIR de dióxido de carbono .....</b>	<b>31</b>

<b>Figura 5.6. Circuito de acondicionamiento alternativo, empleando el LMP91051 ....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 5.7. Curvas de salida del LMP91051 para las señales activa y de referencia ..</b>	<b>32</b>
<b>Figura 5.8. Circuito completo para el sensor de monóxido de carbono .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 5.9. Circuito completo para el sensor de monóxido de nitrógeno .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 5.10. Circuito completo para el sensor de dióxido de carbono .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 5.11. Circuito completo para el sensor de oxígeno .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 5.12. Circuito cargador para batería de ion litio de doble celda .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 5.13. Circuito regulador de tensión con salida de 3.3 V .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 5.14. Circuito inversor de tensión con salida de -3.3 V .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 5.15. Circuito impreso correspondiente al sensor de monóxido de carbono ...</b>	<b>41</b>
<b>Figura 5.16. Circuito impreso correspondiente al sensor de monóxido de nitrógeno</b>	<b>41</b>
<b>Figura 5.17. Circuito impreso correspondiente al sensor de oxígeno .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 5.18. Circuito impreso correspondiente al sensor de dióxido de carbono .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 5.19. Bibliotecas utilizadas, direcciones de dispositivos I2C y SPI y palabras de configuración, entre otras variables necesarias .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 5.20. Funciones para leer valores de tensión del ADC y controlar el canal de salida del LMP91051 .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 5.21. Función para inicializar la comunicación SPI .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 5.22. Función principal (primera parte) .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 5.23. Función principal (segunda parte) .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 6.1. Circuito impreso para el sensor de oxígeno .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 6.2. Circuito impreso para el sensor de monóxido de nitrógeno .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 6.3. Circuito impreso para el sensor de monóxido de carbono .....</b>	<b>50</b>

<b>Figura 6.4. Circuito impreso para el sensor de dióxido de carbono .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 6.5. Sensor de oxígeno .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 6.6. Sensor de monóxido de carbono .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 6.7. Circuito de prueba para los amplificadores de los sensores de monóxido de carbono y monóxido de nitrógeno .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 6.8. Resultados de la lectura del ADC .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 6.9. Secuencia de escritura para la memoria EEPROM CAT24C32 .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 6.10. Secuencia de lectura para la memoria EEPROM CAT24C32 .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 6.11. Prueba de lectura y escritura de las memorias EEPROM .....</b>	<b>59</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1. Comparación de características entre diferentes analizadores de gases para automóviles .....</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 4.2. Principales características del Onion Omega2 .....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 5.1. Valores de resistencia del termistor en el sensor IRC-AT a diferentes temperaturas .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 5.2. Bytes de configuración para seleccionar cada uno de los cuatro canales del ADC .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 5.3. Ganancias configurables para el LMP91051 .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 6.1. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de CO .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 6.2. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de NO .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 6.3. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de O<sub>2</sub> .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 6.4. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 6.5. Costos de algunos de los componentes utilizados en el proyecto .....</b>	<b>60</b>

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1. Entorno del proyecto

El presente proyecto se realizó para la empresa E2R (Electronic to Reality). Esta empresa surge hace aproximadamente 1 año como una iniciativa conjunta de los ingenieros Carlos Cordero y Royden Flores, con el objetivo de desarrollar equipos electrónicos que puedan ser comercializados en un mercado mundial. Han desarrollado prototipos de sistemas en áreas como el internet de las cosas (IoT), comunicaciones máquina a máquina, el *Big Data* y el concepto de *Software* como servicio (SaaS), para aplicaciones como la agricultura, los vehículos y la automatización. Esta empresa aprovecha el talento joven y las capacidades de estudiantes y graduados de carreras afines a la electrónica, y apoya proyectos para cursos de grado o tesis de graduación.

Este proyecto se centra en el diseño de un prototipo para un analizador de gases de escape para automóviles, con el cual se pretende entrar a competir con las propuestas existentes. Estos dispositivos analizadores cuentan con sensores para diferentes gases, los cuales se utilizan para determinar la concentración de estos compuestos en los gases de escape. Se utilizan principalmente en talleres mecánicos para detectar posibles fallas en los vehículos o verificar que estos se ajusten a los límites de emisiones contaminantes establecidos en las normativas de cada país.

Entre los principales gases de combustión que son detectados por estos analizadores se encuentran:

- Monóxido de carbono: un gas incoloro, inodoro y altamente tóxico, pues se combina fácilmente con la hemoglobina y por tanto impide que la sangre pueda entregar suficiente oxígeno a los tejidos, lo cual puede llegar a causar dolores de cabeza, problemas respiratorios e incluso la muerte. Se produce debido a una combustión incompleta en el motor.
- Dióxido de carbono: es un gas de efecto invernadero, del cual una buena parte de sus emisiones a la atmósfera proviene de los vehículos de motor.

- Oxígeno: la presencia de oxígeno en la salida indica que una parte de este no fue quemada, ya que idealmente debería ser consumido por completo, lo cual sugiere que existe una mezcla pobre de aire y combustible.
- Óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>): se producen en los motores debido al proceso de combustión a partir del nitrógeno que se encuentra en el aire. Son sustancias muy contaminantes y producen smog y lluvia ácida en muchas ciudades. Pueden llegar a causar problemas respiratorios.

Para poder medir las concentraciones de estos gases se emplean principalmente dos tipos de sensores: los electroquímicos y los de tipo infrarrojo no dispersivo o NDIR (*non-dispersive infrared detector*). En el caso de los sensores electroquímicos, estos cuentan con una vida útil limitada, por lo que la mayoría de los analizadores que los emplean deben estar diseñados para que los sensores puedan ser reemplazados fácilmente. Por otra parte, un sensor electroquímico por lo general responde con una corriente proporcional a la concentración del gas un poco diferente a la de otro sensor del mismo modelo, por lo que los analizadores incluyen la funcionalidad de calibrar los sensores cada vez que se reemplazan. La información obtenida a través de los sensores es procesada digitalmente y se muestra por lo general a través de una pantalla LCD o bien es transmitida a una computadora a través de conexiones en serie o inalámbricas.

## 1.2. Generalidades del problema

Dado que el producto a desarrollar debe competir con las alternativas disponibles en el mercado, el principal reto es diseñar un prototipo completamente funcional, que cuente con un mínimo de características, y que posteriormente pueda ser producido en masa.

Se acordó que el dispositivo a desarrollar debe contar con ciertas características, las cuales son:

- Capacidad de medición para diferentes tipos de gases, por ejemplo: CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y óxidos de nitrógeno.
- Debe poder bombear el gas que será analizado a una velocidad constante y entregarlo a los sensores
- Alimentación por medio de una batería recargable.

- El sistema completo debe ser portátil y de tamaño reducido
- Debe mostrar al usuario los resultados de las mediciones y poderse comunicarse con una computadora para descargar estos datos
- Los sensores deben ser reemplazables y deben poderse calibrar. El sistema debe indicar cuándo debería cambiarse un determinado sensor.

Por otra parte, se estableció que el costo de fabricación de cada unidad sea menor a \$50, por lo que el diseño debe contemplar la reducción de costos. Esto debido a que prácticamente todas las propuestas de la competencia tienen un costo elevado que ronda los cientos o miles de dólares, por lo que esta es una característica con la que se puede diferenciar nuestro producto. Además, se pretende agregar la funcionalidad de subir los datos de medición a una base de datos en línea, pero esta labor será realizada por otro ingeniero, por lo que para este proyecto basta con que las mediciones sean realizadas correctamente por el sistema y estén listas para ser enviadas a un computador u otro dispositivo electrónico.

### 1.3. Síntesis del problema

¿Cómo desarrollar un analizador de gases para automóviles económico y que pueda competir con las alternativas existentes en el mercado?

### 1.4. Enfoque de la solución

Para llevar a cabo el desarrollo del sistema planteado, se realizó una investigación para encontrar un fabricante de sensores para gases, que cuenten con las características necesarias para ser empleados en este proyecto, como lo son el rango de medición, el tiempo de estabilización, vida útil, tamaño, costo, entre otras.

Una vez seleccionados los sensores a utilizar, se procedió a diseñar los circuitos necesarios para la obtención de la concentración de cada gas. Es necesario que esta información sea digitalizada, dado que se pretende enviarla a una base de datos. También, debe poderse mostrar al usuario los resultados de las mediciones en tiempo real. Por esta razón, es necesario utilizar un microcontrolador para establecer la comunicación con una computadora o dispositivo similar. En la empresa se recomienda emplear el Onion Omega2, ya que es un dispositivo de bajo costo, permite la comunicación mediante varios protocolos en serie y se cuenta con experiencia en su uso.

Además, se desarrolló un método para la calibración para los diferentes tipos de sensores, con el propósito de asegurar que las mediciones sean lo más precisas posible, y se implementará la funcionalidad de medir la vida útil restante de cada sensor, con el propósito de avisar al usuario cuándo es momento de reemplazarlos.

Posteriormente, se procedió con el diseño de la etapa para el suministro de energía al sistema, que cumpla con los requerimientos de tensión y corriente para cada componente empleado. Un requisito establecido por la empresa es que el sistema debe alimentarse mediante una batería recargable, por lo que fue necesario diseñar los circuitos adecuados para la recargarla y medir el nivel de energía restante.

Para el diseño de los circuitos impresos, la empresa recomienda el uso de la herramienta Altium Designer, ya que cuentan con experiencia en la misma.

## **Capítulo 2. Meta y objetivos**

### 2.1. Meta

Desarrollar un prototipo para un analizador de gases para automóviles, que pueda ser producido en masa a un bajo costo y tener buena aceptación comercial

*Indicadores: costo de producción bajo, funcionamiento sin errores*

### 2.2. Objetivo general

Crear un prototipo funcional, de bajo costo, de un analizador de gases para automóviles

*Indicadores: el prototipo final debe cumplir con la lista de características establecidas en la definición del problema*

### 2.3. Objetivos específicos

- Implementar las etapas de acondicionamiento de señal y conversión analógico-digital para cada uno de los sensores

*Indicadores: cada etapa entrega las mediciones de concentración en un rango de tensión amplio para ser digitalizadas y enviadas al microcontrolador*

- Crear el programa para el microcontrolador, el cual se encargará de la lectura de las mediciones y la calibración de los sensores

*Indicadores: obtención correcta de los datos del ADC, conversión de la información obtenida a las unidades deseadas, los datos de calibración para cada sensor se almacenan y leen correctamente de la memoria del microcontrolador*

- Diseñar la etapa de alimentación del sistema

*Indicadores: la potencia entregada debe ser suficiente para alimentar todas las partes del sistema, los valores de tensión entregados son los requeridos para cada componente, la batería se puede recargar al máximo de su capacidad*

- Construir la placa de circuito impreso para la colocación de los sensores, los circuitos de acondicionamiento de señal y otros componentes.

*Indicadores: no debe haber errores de conexión que impidan el funcionamiento de los diferentes circuitos, el PCB no debe introducir señales de ruido que afecten significativamente el funcionamiento del sistema.*

## Capítulo 3. Marco teórico

### 3.1. Tipos de sensores para gases

#### 3.1.1. Sensores electroquímicos

Estos sensores son capaces de medir las concentraciones de una gran variedad de gases, como lo son el oxígeno, monóxido de carbono, óxidos de nitrógenos, sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, amoníaco, entre otros. Cuando se encuentran en contacto con el gas al cual son sensibles, en su interior se lleva a cabo una reacción química, la cual produce una corriente eléctrica proporcional a la concentración del gas. El tamaño, geometría y los componentes que los conforman dependen del uso que se les pretenda dar y al gas cuya concentración son capaces de medir. Las descripciones y figuras presentadas en esta sección se basan en [1].

La mayoría de los sensores comerciales se componen de las siguientes partes:

- Membrana permeable al gas (o membrana hidrofóbica): usada para cubrir el electrodo sobre el cual ocurre la reacción o para controlar la cantidad de moléculas de gas que ingresan al sensor. También puede cumplir la función de filtros partículas no deseadas o evitar que el electrolito se derrame o se seque rápidamente.
- Electrodo(s) (dos o tres, dependiendo del sensor): sobre los cuales ocurre una reacción de oxidación-reducción al entrar en contacto con el gas de interés. Por lo general se fabrican con ciertos materiales que favorezcan las reacciones químicas deseadas. En el caso de los sensores con tres electrodos, estos reciben el nombre de: electrodo de trabajo, el cual entra en contacto directo con el gas; electrodo auxiliar, que permite establecer un circuito cerrado por donde circulan los iones producidos; y electrodo de referencia, el cual se utiliza en ciertos tipos de sensores para mantener un potencial constante en el electrodo de trabajo. En cuanto a los sensores de dos electrodos (por ejemplo, los diseñados para medir oxígeno), estos no cuentan con el electrodo de referencia.
- Electrolito: es un líquido que facilita la reacción química en el sensor y el transporte de los iones producidos desde el electrodo de trabajo hacia el electrodo auxiliar, con lo cual se hace posible la generación de la corriente eléctrica que permitirá conocer la concentración del gas

- Filtro: algunas veces se utiliza un filtro para impedir el paso de gases no deseados. Comúnmente, en ciertos sensores se utilizan filtros de carbón activado, que son capaces de filtrar la mayoría de las especies químicas, con excepción del monóxido de carbono y compuestos de hidrógeno. Un filtro adecuado puede aumentar la selectividad del sensor al gas para el cual se diseñó.

En la figura 3.1 se puede apreciar un diagrama para un sensor electroquímico típico de tres electrodos:

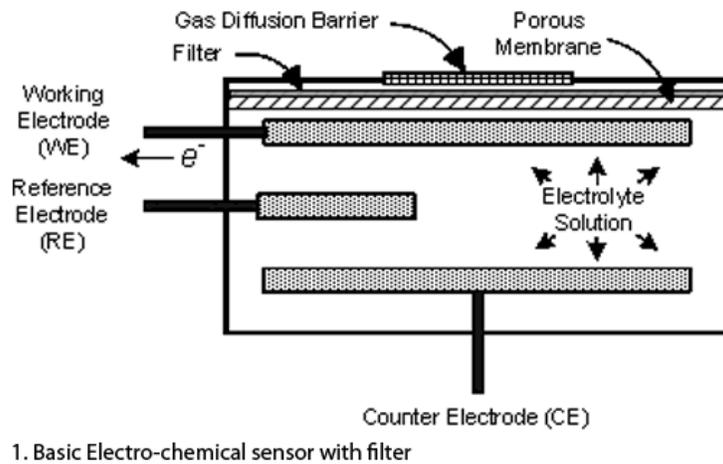


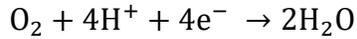
Figura 3.1. Diagrama para un sensor electroquímico de tres electrodos

Por ejemplo, para el caso de un sensor de monóxido de carbono (CO), cuando este gas entra en contacto con el electrodo de trabajo, se oxida formando dióxido de carbono e iones de hidrógeno:

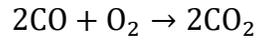


Por su parte, en el electrodo auxiliar ocurre una reacción contraria a la que sucede en el electrodo de trabajo. En todos los sensores electroquímicos, si el electrodo de trabajo oxida el gas en cuestión, el electrodo auxiliar debe reducir alguna molécula diferente para que de esta manera pueda generarse una corriente eléctrica.

Continuando con el ejemplo del sensor de CO, en el electrodo auxiliar se reduce oxígeno para generar agua:



Finalmente, las dos reacciones se pueden resumir en esta ecuación:



En el caso de otros sensores, las reacciones químicas involucradas, el material de los electrodos y el electrolito usado pueden variar.

Muchos sensores electroquímicos presentan un electrodo adicional conocido como electrodo de referencia. Su función es mantener constante el potencial en el electrodo de trabajo para asegurarse que opera en región correcta de la curva de corriente-tensión (figura 3.2). Esta región, ubicada en el centro de la gráfica, muestra que, para cierto rango de tensión, la corriente en el sensor no depende del valor de tensión y solamente aumenta o disminuye en función de la concentración del gas del interés. Es importante asegurarse que el sensor opera en esta región para que esté presente un buen comportamiento lineal y se disminuya la sensibilidad a otros gases.

La mayoría de los sensores operan correctamente cuando se aplica una tensión entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia equivalente a 0 V, ya que la región donde la corriente no depende de la tensión corresponde a este nivel de tensión. Sin embargo, otros sensores, como los de monóxido de nitrógeno (NO), requieren una tensión diferente de 0 V entre los electrodos mencionados para asegurar un correcto funcionamiento.

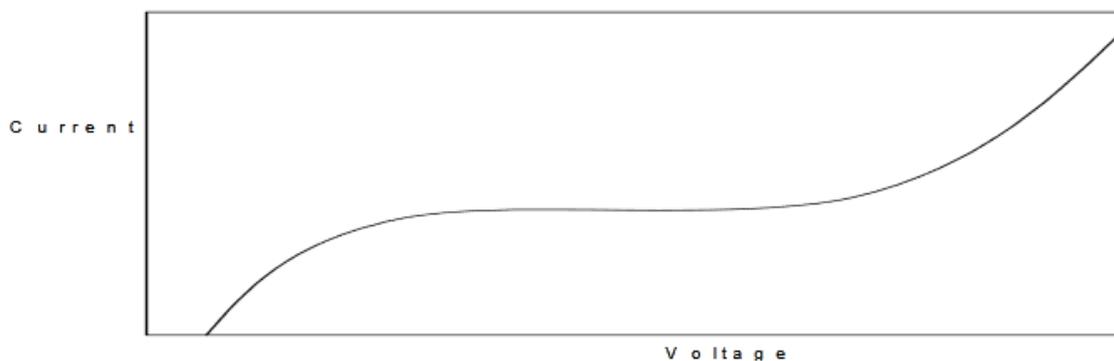


Figura 3.2. Diagrama típico de una curva de corriente-tensión para un sensor electroquímico

### 3.1.2. Sensores de infrarrojo no dispersivo

Estos sensores consisten en una fuente de rayos infrarrojos, una cavidad óptica, un detector de canal doble y un termistor interno. Cuando el gas en cuestión entra en la cavidad óptica, la luz infrarroja proveniente de la fuente interactúa con las moléculas del gas. Ciertos gases absorben radiación infrarroja a ciertas longitudes de onda. [2]

El canal doble se compone de un canal activo y un canal de referencia. El canal activo presenta un filtro óptico que solo deja pasar aquellas longitudes de onda correspondientes al espectro de absorción del gas. Entre mayor sea la concentración del gas en la cavidad óptica, menor será la intensidad de la luz que incide sobre este canal. El canal de referencia, por su parte, deja pasar aquellas longitudes de onda que no son absorbidas por el gas. La intensidad de la luz que incide sobre este canal no debería variar con la concentración del gas.

El termistor interno se utiliza para medir la temperatura en el sensor y compensar el valor de salida, dado que estos sensores tienen una alta sensibilidad a la temperatura ambiente.

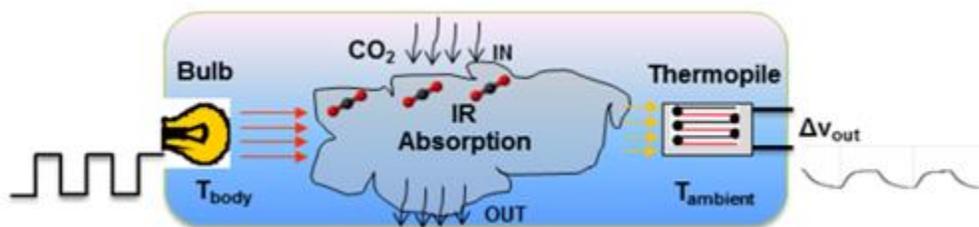


Figura 3.3. Diagrama de un sensor de infrarrojo no dispersivo (NDIR)

En cuanto a la determinación de la concentración del gas, se utilizan varias fórmulas. La primera es la razón entre los valores de tensión en los canales activo y de referencia cuando el sensor no se encuentra en presencia del gas. Esta razón se conoce como ZERO y se expresa de la siguiente manera:

$$\text{ZERO} = \frac{\text{ACT}_0}{\text{REF}_0}$$

El segundo parámetro se conoce como SPAN, que es la proporción de la radiación que llega al canal activo y puede ser absorbida por el gas. Se determina de la siguiente manera:

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

Donde x es la concentración del gas que se utilizó al calibrar el sensor, b y c son coeficientes de linealización y  $ABS_x$  es la absorbancia a la concentración de calibración. Este valor se puede calcular para cualquier valor de tensión en los canales activo y referencia empleando la siguiente fórmula:

$$ABS = 1 - \frac{ACT}{REF \times ZERO}$$

Una vez que se han determinado estos valores, la concentración del gas se puede calcular con esta fórmula:

$$x = \left[ \frac{\ln\left(1 - \frac{ABS}{SPAN}\right)}{-b} \right]^{\frac{1}{c}}$$

En cuanto a la compensación por temperatura es necesario corregir los valores de SPAN y absorbancia. Si el sensor se va a emplear para medir concentraciones altas (por ejemplo, mayores a 10% de volumen de  $CO_2$ ), solo es necesario corregir el SPAN, lo cual se logra aplicando la siguiente fórmula:

$$SPAN_T = SPAN_{cal} + \beta_0(T - T_{cal})$$

Donde  $SPAN_T$  es el valor de SPAN a la temperatura T,  $SPAN_{cal}$  es el valor de SPAN determinado durante la calibración,  $\beta_0$  es un coeficiente de corrección y  $T_{cal}$  es la temperatura a la cual se realizó la calibración.

Por otra parte, si se desea asegurar un buen nivel de precisión a la hora de medir concentraciones bajas, entonces será necesario corregir tanto el SPAN como el valor de la absorbancia, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$(1 - ABS_T) = (1 - ABS)(1 + \alpha(T - T_{cal}))$$

Donde  $ABS_T$  es la absorbancia corregida a la temperatura T, ABS es la absorbancia sin corregir,  $\alpha$  es un coeficiente de corrección y  $T_{cal}$  es la temperatura de calibración.

En cuanto al SPAN, se emplea la misma fórmula usada para concentraciones altas, con la única diferencia que el coeficiente de corrección tendrá un valor distinto.

Finalmente, el valor de la concentración compensado por temperatura se calcula con la siguiente fórmula:

$$x_T = \left[ \frac{T}{T_{cal}} \right] \left\{ \left[ \frac{\ln\left(1 - \frac{ABS_T}{SPAN_T}\right)}{-b} \right]^{\frac{1}{c}} \right\}$$

### 3.2. Protocolos de comunicación en serie

En este proyecto se emplean dos interfaces de comunicación en serie para poder leer y escribir información entre los diferentes circuitos integrados que se utilizaron. Estas interfaces o protocolos son I2C y SPI, cuyos nombres provienen de sus siglas en inglés de *Inter-Integrated Circuit* y *Serial Peripheral Interface*.

#### 3.2.1. I2C

Para poder comunicar uno o varios dispositivos con este protocolo, es necesario utilizar únicamente dos terminales: CLK o SCLK (*serial clock* o reloj serial) y SDA (*serial data* o línea de datos). Ambas terminales requieren resistencias de *pull-up*, ya que funcionan con compuertas lógicas de colector o drenador abierto, por lo que no son capaces de proporcionar un nivel de tensión alto por si solas.

Los buses de I2C pueden funcionar a velocidades de transferencia que van desde los 100 kbps (modo estándar) hasta 5 Mbps (modo ultra-rápido).

Cada dispositivo conectado a un bus I2C es reconocido por una dirección única de 7 o 10 bits, y puede funcionar tanto como transmisor o como receptor, gracias a que la línea SDA es bidireccional. Con esto es posible conectar varios dispositivos en el mismo bus sin que haya interferencias en la comunicación entre ellos, y es posible ahorrar pines en dispositivos maestros como los microcontroladores.

Para iniciar una transferencia de información, el dispositivo maestro genera una señal de reloj por medio del pin CLK y envía una condición de inicio, que consiste simplemente en una transición de la línea SDA de un valor lógico alto a uno bajo mientras CLK se encuentra en un nivel alto.

Posteriormente, el maestro envía, bit por bit, la dirección del dispositivo esclavo, seguida de un bit de lectura-escritura, cuyo valor lógico es 1 para una petición de lectura y 0 para una petición de escritura. Si el esclavo tiene la dirección es cuestión, el esclavo envía una condición reconocimiento (*acknowledge*) llevando la línea SDA a un nivel bajo o una condición de no reconocimiento (*not acknowledge*) dejando SDA en estado de alta impedancia (nivel alto debido a la resistencia de *pull-up*).

Una vez que el esclavo reconoce la petición de lectura o escritura, se realizan las transferencias de información, un byte a la vez. Una vez que la transferencia ha sido completada, el maestro genera una condición de parada, la cual consiste en una transición de 0 a 1 en la línea SDA después de una transición de 0 a 1 en la línea CLK. [3]

En la figura 3.4 se muestra un diagrama de tiempos para una transferencia de datos en el ADC LTC2489 por medio de esta interfaz serie:

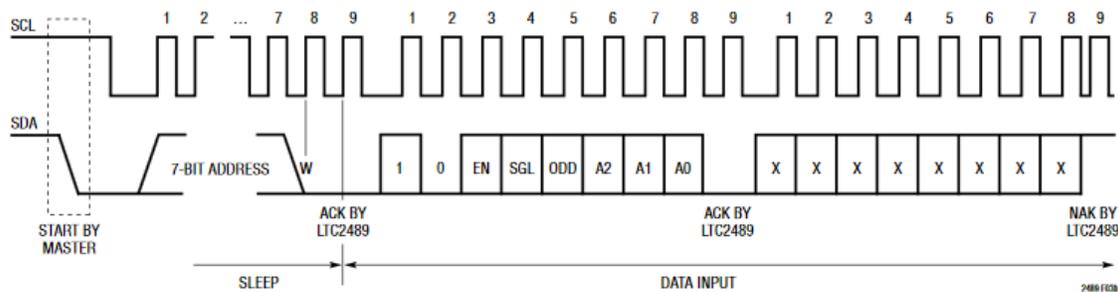


Figura 3.4. Transferencia de datos mediante el protocolo I2C

### 3.2.2. SPI

Los dispositivos que utilizan este protocolo emplean los pines o líneas:

- SCK: línea utilizada por el dispositivo maestro para generar la señal de reloj que es empleada para sincronizar las transferencias de datos

- MOSI: línea que es empleada por el dispositivo maestro para transmitir información al esclavo
- MISO: línea que es empleado por el dispositivo esclavo para transmitir información al maestro
- Una o varias líneas de selección de esclavo (SS o CS), que son utilizadas para habilitar el esclavo en cuestión y deshabilitar aquellos esclavos con los cuales el maestro no necesita comunicarse inmediatamente, con el propósito de evitar interferencias en la comunicación.

Las transferencias de bits en las líneas MOSI y MISO se realizan en los flancos positivos de la señal de reloj. Dado que la línea de reloj es utilizada únicamente por el maestro, es necesario conocer de antemano si el esclavo envía información al maestro en respuesta a una escritura realizada por el maestro. Por lo general, los dispositivos indican en sus hojas de datos si este es el caso. [4]

En la figura 3.5 se muestra un diagrama de tiempos para una transferencia SPI, en la cual tanto el maestro como el esclavo se envían información. Nótese que la señal de reloj se mantiene en alto cuando no hay transferencias de información, y que no hay condiciones de inicio o parada como sucede con el protocolo I2C. Cuando la línea de selección de esclavo (SS) se encuentra en bajo, se habilita la comunicación con el esclavo.

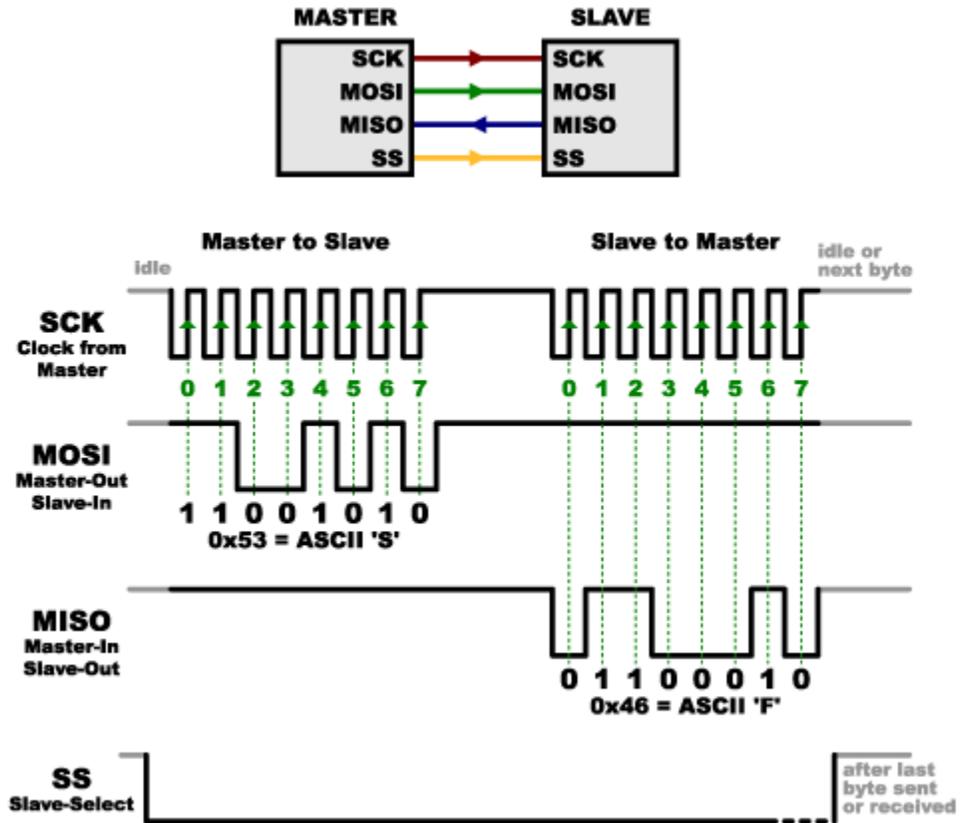


Figura 3.5. Diagrama de tiempos para una transferencia de información mediante el protocolo SPI

## Capítulo 4. Procedimiento metodológico

### 4.1. Obtención de información sobre el problema

Se realizó una comparación de diferentes analizadores de gases comerciales que es posible encontrar en tiendas como Amazon o Ebay. Esta investigación sirvió para determinar cuáles son los tipos de sensores más utilizados en estos aparatos y cuáles son los rangos de medición para los diferentes gases.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados de esta investigación, con la cual fue posible reunir información en cuanto a los gases que son capaces de medir, precio, tipo de batería y vida útil de los sensores. Se puede observar que los sensores más utilizados son los de oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, y en menor medida, hidrocarburos como el propano o el hexano y los óxidos de nitrógeno.

Nombre	Precio	Tipo de batería	O2	CO2	CO	HC	NO	NO2	Vida de los sensores
Fieldpiece SOX3	\$339	Batería de 9 V	0-25%	Si (no indican el rango)	-	-	-	-	-
Testo 320	\$1495	Litio	0-21%	Si (no indican el rango)	0-4000 ppm	-	-	-	24 meses
BTU-1500-1	\$1599	Litio	0-25%	0-99% (calculado)	0-8000 ppm	-	-	-	-
Bridge Analyzers 4-gas 9004	\$2699	NimH	0-25%	0-20%	0-10%	Hexano y propano: 0-9999 ppm; metano: 0-5%	-	-	12-18 meses (O2)
Bosch BEA 750	-	-	0-22%	0-18%	0-10%	0-9999 ppm	0-5000 ppm	-	-
AGS-688	-	-	0-25%	0-19,99%	0-9,99%	-	0-5000 ppm	-	-
Auto5-1 Handheld 5 gas analyzer	-	-	0-25%	0-16%	0-10%	hexano: 0-3000 ppm	0-5000 ppm	-	-

FGA4000XDS	-	-	0-25%	0-20%	0-10%	0-10000 ppm	0-5000 ppm	-	O2: 12 meses; Nox: 12 meses
Novagas Model 7466	-	Recargable	0-25%	0-20%	0-10%	propano o hexano: 0-20000 ppm	2000 ppm	800 ppm	-
Bacharach ECA-450	\$2550	-	0-20,9%	Si (no indican el rango)	0-4000 ppm (rango bajo)/ 4000-80000 ppm (rango alto)	-	0-3500 ppm	0-500 ppm	-
Enerac 500-1	\$995	AA	0-25%	Si (no indican el rango)	0-2000 ppm	-	0-2000 ppm	0-1000 ppm	2 años (todos)

Tabla 4.1. Comparación de características entre diferentes analizadores de gases para automóviles

## 4.2. Evaluación de las soluciones

### 4.2.1. Diseño general

En general, un analizador de gases cuenta con ciertas partes, las cuales se muestran en el siguiente diagrama de bloques:

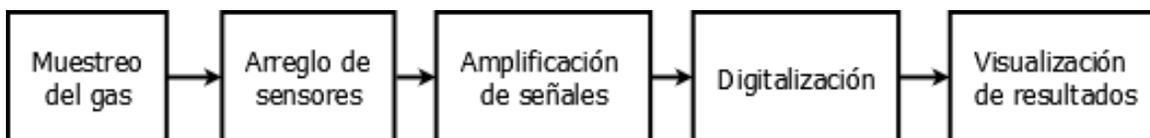


Figura 4.1. Diagrama de bloques para un analizador de gases

La etapa de muestreo del gas se encarga de extraer una muestra del gas y hacerla pasar a través de los sensores. Muchos analizadores comerciales usan una pequeña bomba con una sonda para extraer el gas.

El arreglo de sensores contiene uno o varios sensores, colocados de tal forma que el flujo de gas de la etapa anterior pase a través de ellos. Estos sensores generan señales de tensión o corriente que pueden utilizarse luego para determinar la concentración del gas muestreado.

La etapa de amplificación de señales es necesaria para muchos tipos de sensores, dado que las señales generadas tienen una amplitud demasiado baja como para ser medidas.

Si se desea visualizar la información en una pantalla u otro dispositivo, es necesario digitalizar las señales de los sensores y realizar ciertos cálculos y conversiones sobre la información leída para traducirla a unidades más adecuadas (partes por millón o porcentaje de volumen).

#### 4.2.2. Selección de componentes y herramientas

##### 4.2.2.1. Sensores

En cuanto a los sensores para gas, existen varias alternativas de fabricantes, como lo son Figaro Engineering Inc., Alphasense o Euro-Gas Management Services Ltd. Se eligió utilizar los sensores de Alphasense debido a las siguientes razones:

- Mayor variedad de sensores, con rangos de medición en ppm o % vol. comparables a los que presentan los sensores empleados en los analizadores comerciales. Por ejemplo, los sensores de CO con mayor rango de Figaro Inc. no se comparan a sus equivalentes de Alphasense (1000 ppm vs 10000 ppm). Además, al parecer no hay diferencia en cuanto a los sensores para oxígeno.
- Gran cantidad de material sobre los sensores, en forma de notas de aplicación, donde se describe el funcionamiento de los sensores, las fórmulas necesarias para calibrar los sensores y determinar la concentración de los gases, precauciones de uso y recomendaciones a la hora de diseñar los circuitos de acondicionamiento de señal.
- Estos sensores se pueden conseguir a través del mercado chino, en tiendas online como alibaba.com. Esto fue una recomendación de la empresa, ya que les facilitaba a ellos poder comprarlos y traerlos al país.

Dentro del catálogo de sensores de Alphasense, se seleccionó aquellos que tuvieran los mayores rangos de concentración o estuviesen diseñados para soportar determinadas condiciones (como gases de combustión). Los sensores seleccionados son:

- CO-CE: sensor electroquímico para monóxido de carbono, con rango de medición de hasta 10000 ppm y filtro diseñado para un buen número de gases no deseados (Figura 4.2)
- IRC-AT: sensor NDIR para CO<sub>2</sub>, con un rango de medición de 0 a 100% y tiempo medio entre fallos mayor a 5 años (Figura 4.3)
- NO-AE: sensor electroquímico para monóxido de nitrógeno, con un rango de medición de hasta 5000 ppm y más de 2 años de vida útil (Figura 4.4)
- O2-C2: sensor electroquímico para oxígeno, con un rango de medición de hasta 21% de volumen y vida útil mayor a 2 años (Figura 4.5)

Estos sensores necesitan una etapa de amplificación de señal, dado que producen tensiones y corrientes en el rango de nanoamperios y microvoltios, respectivamente.



Figura 4.2. Sensor de monóxido de carbono CO-CE de Alphasense

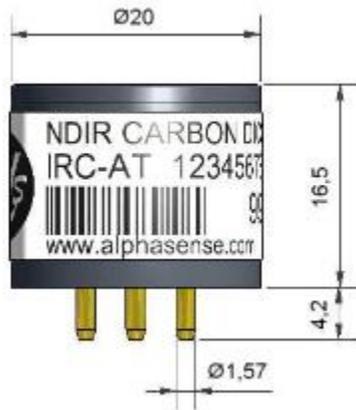


Figura 4.3. Sensor de dióxido de carbono IRC-AT de Alphasense



Figura 4.4. Sensor de monóxido de nitrógeno NO-AE de Alphasense



Figura 4.5. Sensor de oxígeno O2-C2 de Alphasense

#### 4.2.2.2. Microcontrolador

Se decidió utilizar como microcontrolador el Onion Omega 2, el cual es una computadora de bajo poder diseñada para el Internet de las cosas (*Internet of things*), similar a Arduino o Raspberry Pi, pero con varias diferencias. En la figura 4.6 se muestra una imagen de este dispositivo. En la tabla 4.2 se presenta un resumen de características [5]. En la figura 4.7 se muestra la disposición de pines del Onion Omega 2.



Figura 4.6. Vistas superior e inferior del Onion Omega 2

Característica	Valor/descripción
Procesador	MT7688 a 580 MHz
Memoria RAM	64 MB de memoria DDR2
Almacenamiento flash	32 MB (expandible con tarjeta SD)
Wifi	Wifi b/g/n
Pines de entrada-salida	15
PWM	2
Comunicación serie	2 UART, 1 I2C, 1 SPI, 1 I2S

Tabla 4.2. Principales características del Onion Omega2

# Omega 2

## Pinout Diagram



Figura 4.7. Disposición de pines del Onion Omega 2

Por otra parte, esta computadora corre una versión del sistema operativo Linux, y se puede programar o configurar mediante una interfaz de texto (Figura 4.8) o una interfaz *web* (Figura 4.9).

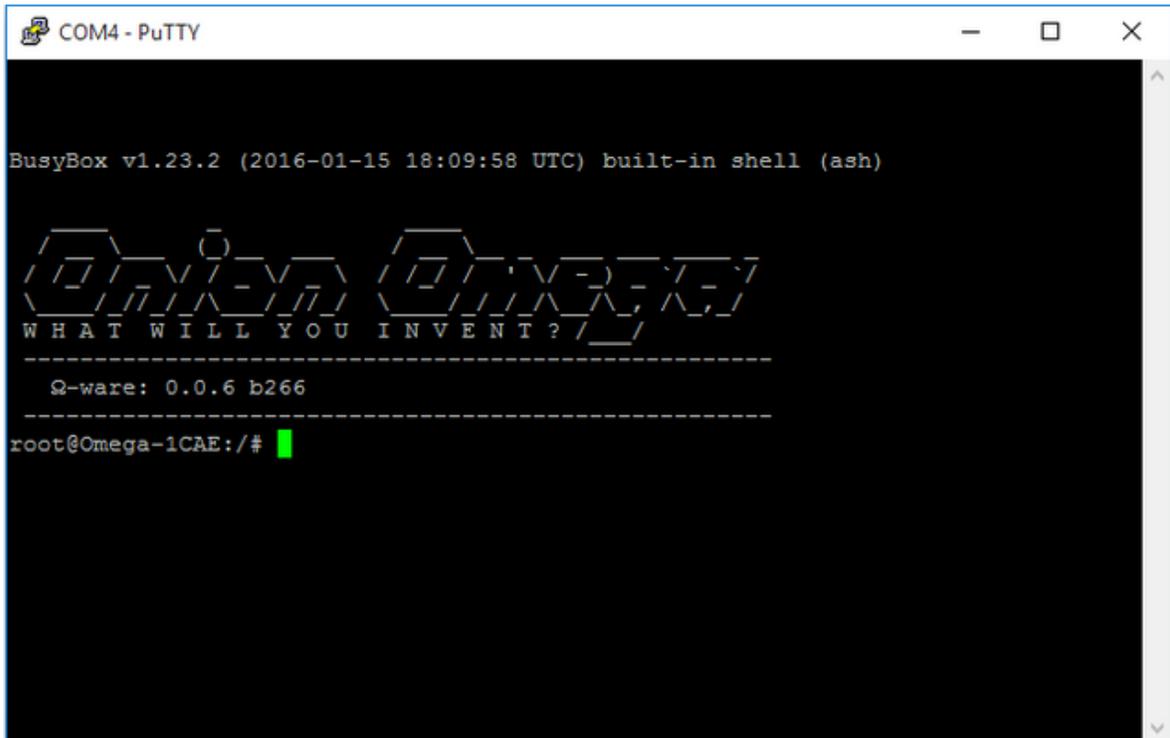


Figura 4.8. Interfaz del Onion Omega 2

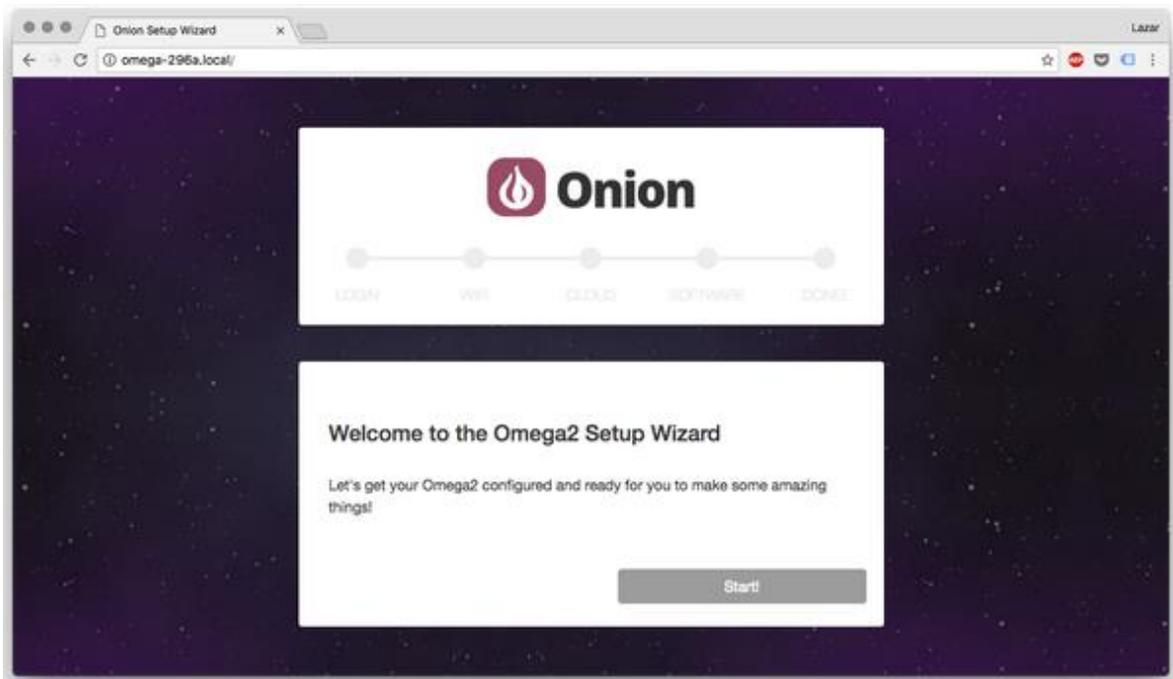


Figura 4.9. Interfaz *web* del Onion Omega 2

Si bien es cierto existen varias alternativas de microcontroladores que se pueden utilizar para este proyecto, se seleccionó el Onion Omega 2 frente a otros dispositivos, como Arduino, Raspberry Pi o algunos PIC como el PIC18F4550, por las siguientes razones:

- Precio: si bien es cierto que hay PIC que cuestan unos pocos dólares, el Omega 2 tiene un precio de \$5, lo cual es lo suficientemente reducido para la cantidad de características que presenta. Los Arduinos o Raspberry Pi suelen ser más costosos que esto.
- Facilidad de uso: el Omega 2 se puede programar o configurar ya sea desde línea de comandos o interfaz web. Gracias a que presenta tanto un puerto USB como un módulo Wifi integrado de fábrica, es posible utilizar en una computadora mediante una conexión serie o por wifi mediante SSH. Para poder disfrutar de estas características en un Arduino o PIC se necesitaría un módulo de Wifi adicional.
- Tanto el Omega 2 como los PIC requieren un módulo para ser programados y recibir energía eléctrica. Los módulos para PIC son generalmente más caros que el módulo del Omega 2, por lo que se pierde la ventaja de precio que tenían sobre el Omega 2.
- Los creadores del Omega 2 proveen una buena cantidad de bibliotecas de código abierto para poder controlar dispositivos I2C, SPI o UART, con las que se evita tener que programarlas en un lenguaje de bajo nivel, como ensamblador.
- El Omega 2 presenta una versión de montaje superficial, que lo hace ideal para colocarlo en un circuito impreso
- Finalmente, muchas personas en la empresa tienen experiencia con este microcontrolador, por lo que se convierten en fuente para resolver dudas o problemas que surjan a la hora de emplear el dispositivo.

#### 4.2.2.3. Componentes como ADC, amplificadores y memorias

Estos componentes se seleccionan de tal manera que tengan un costo reducido, pero a la vez presenten ciertas características que los hagan adecuados para este proyecto.

Dado que se utiliza el microcontrolador Omega 2, es necesario que se puedan comunicar por medio de protocolos I2C o SPI, presentes en el Omega 2.

Además, deben ser de montaje superficial (no tener patillas), para que de esa forma se puedan colocar en el PCB de los módulos de los sensores.

En cuanto a estos componentes y los circuitos para cada sensor, se darán más detalles en la sección de descripción de la solución.

#### 4.2.2.4. Herramienta para diseño de PCB

Por recomendación de la empresa, se utilizó el programa Altium Designer para el diseño de los esquemáticos de los circuitos y los circuitos impresos.

Si bien tiene una curva de aprendizaje mayor a la de otros programas como EAGLE, la ventaja de utilizar este programa es la experiencia con la que se cuenta en la empresa, por lo que es posible conocer e implementar buenas prácticas de diseño en cuanto a PCB.

En la figura 4.10 se muestra una imagen del uso de este programa.

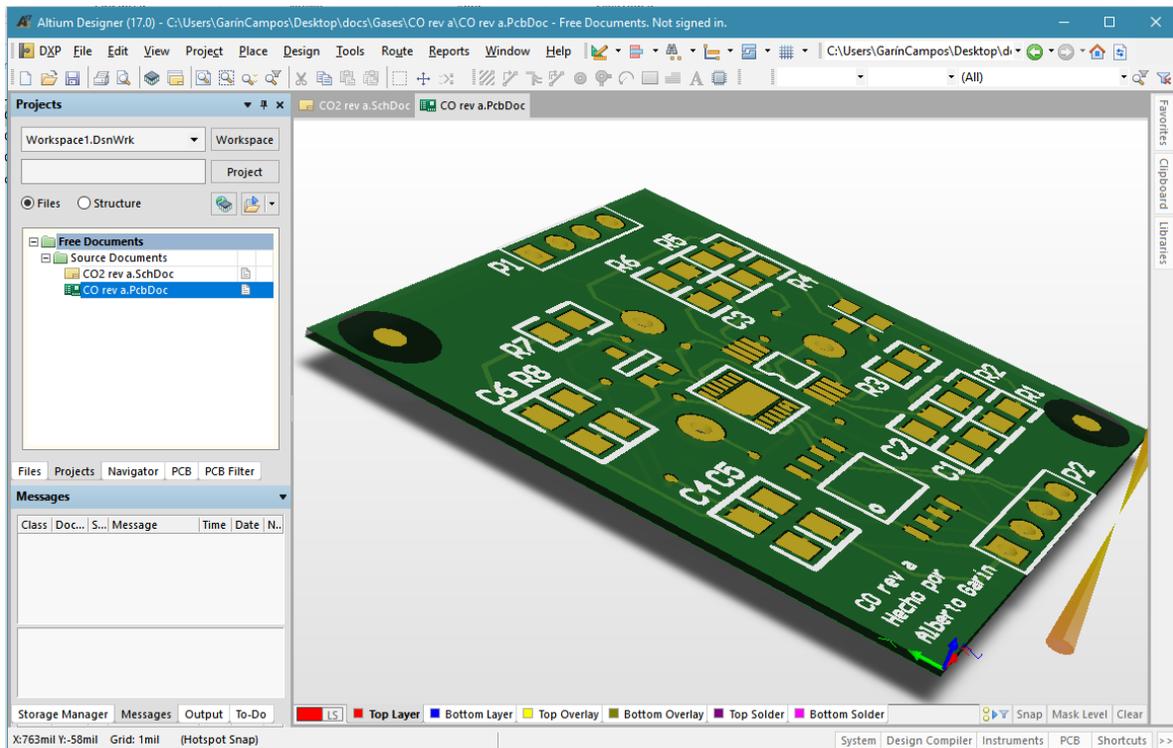


Figura 4.10. Ejemplo de uso del programa Altium Designer

## Capítulo 5. Descripción detallada de la solución

### 5.1. Circuitos de acondicionamiento

En el caso de los sensores electroquímicos de tres electrodos, es necesario que el electrodo auxiliar sea capaz de suplir con suficiente corriente al sensor, para que de esta manera se pueda llevar correctamente a cabo la reacción química en el sensor. Sin embargo, el electrodo auxiliar no puede suplir esta corriente por sí solo, por lo que se vuelve necesario usar algún tipo de componente o circuito que pueda realizar esta función.

En las notas de aplicación de Alphasense se recomienda un circuito de acondicionamiento que permite que el electrodo auxiliar reciba los valores adecuados de tensión y corriente [6]. Este tipo de circuitos se conoce como potencióstato, y se emplea para manejar celdas electroquímicas o en experimentos electroanalíticos. En algunos sensores, como el de CO, el potencial del electrodo auxiliar con respecto al de referencia se encuentra entre -300 y -400 mV, por lo que a la hora de seleccionar los componentes y las fuentes de alimentación es necesario asegurarse que puedan suplir valores negativos de tensión.

En la figura 5.1 se muestra el circuito de acondicionamiento completo para un sensor de monóxido de carbono. Nótese que el amplificador operacional IC2, junto con las resistencias R1-R3 y los condensadores C1-C2, conforman el potencióstato. El circuito con el amplificador IC1 y sus componentes es un amplificador de transconductancia, el cual puede transformar una corriente en tensión y adicionalmente filtrarla y amplificarla.

El transistor Q1 es un FET de canal p utilizado para mantener una diferencia de potencial de 0 V entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia cuando se corta la alimentación. Cuando el circuito entra de nuevo en operación, el valor de tensión en la compuerta causa que actúe como un circuito abierto. Con esto se garantiza que, al usar el sensor, este se encuentre listo de forma inmediata. De lo contrario, sino se emplea este transistor, al sensor le tomará varias horas para poderse estabilizar.

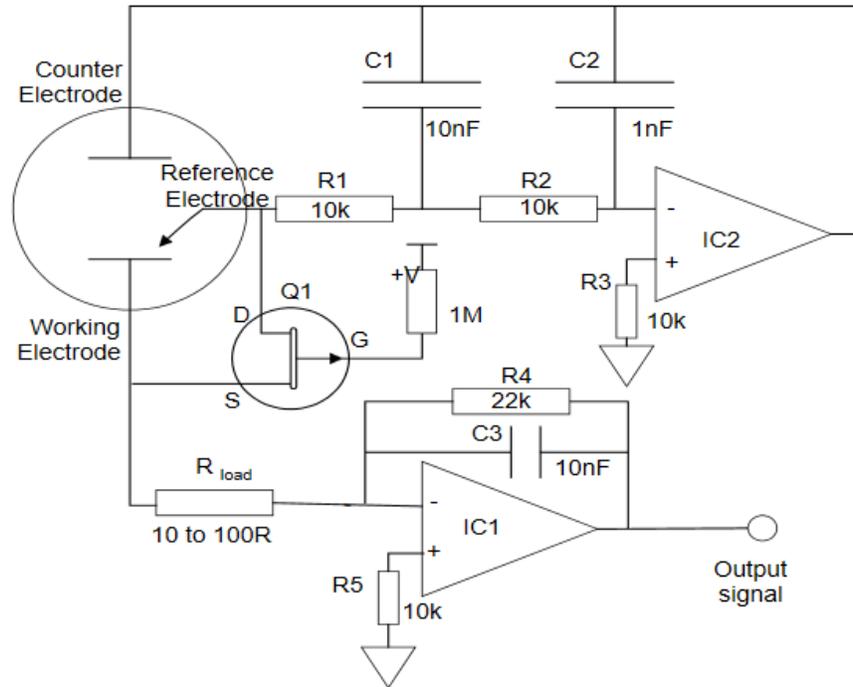


Figura 5.1. Circuito de acondicionamiento para el sensor de monóxido de carbono

En los circuitos para los sensores de CO y NO, se emplea el mismo circuito con los mismos valores de componentes para el potencióstato, ya que son los valores recomendados por el fabricante.

Para todos los circuitos que empleen amplificadores operacionales, se escogió el circuito integrado OPA2196, debido a ciertas ventajas, como el hecho de contener dos amplificadores en un mismo encapsulado (con lo cual se ahorra espacio en el PCB) y tiene una tensión de offset pequeña (en el rango de microvoltios) [7]. Además, su precio ronda los \$2 o \$3 en Digikey.

En el caso del amplificador de transconductancia, los componentes se seleccionan de acuerdo con el rango de medición del sensor y el valor máximo de tensión que se desea a la salida.

En el caso del sensor de monóxido de carbono, su hoja de datos establece que su salida de corriente se encuentra en un rango que va desde 10 hasta 25 nA/ppm [8]. Por otra parte, su rango máximo llega hasta 10000 ppm. Considerando el caso extremo de 25 nA/ppm, el valor de corriente máxima para este sensor es de:

$$I_{\max} = (25 \text{ nA/ppm})(10000 \text{ ppm}) = 250 \text{ } \mu\text{A}$$

Se escoge que el valor de tensión de salida no sea mayor a 1.25 V. La razón es que el ADC que se va utilizar puede convertir valores de entrada que van desde  $-V_{\text{ref}}/2$  hasta  $V_{\text{ref}}/2$ , y la referencia de tensión utilizada es de 2.5 V.

Dado que la corriente es convertida a tensión gracias a la resistencia entre la salida del amplificador operacional y la entrada inversora, el valor de este componente se puede encontrar simplemente aplicando la ley de Ohm:

$$R = \frac{1.25 \text{ V}}{250 \text{ } \mu\text{A}} = 5 \text{ k}\Omega$$

Para asegurarse que el ADC no llegue a saturarse, se puede reducir un poco el valor de resistencia. Por ejemplo, con 4.7 k $\Omega$ , la tensión máxima de salida sería de 1.175 V.

La hoja de datos recomienda un rango de valores para la resistencia de carga, la cual se ubica antes del amplificador de transconductancia. Este rango va desde 10 a 47  $\Omega$  para el sensor de CO. El capacitor de filtrado se escogió usando el valor recomendado. Con un valor de 10 nF, se obtiene una frecuencia de corte de

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 4.7\text{k}\Omega * 10\text{nF}} = 3.3 \text{ kHz}$$

Con lo cual será posible filtrar ruido de alta frecuencia sin distorsionar la señal de salida.

El esquemático para este circuito se muestra en la figura 5.2.

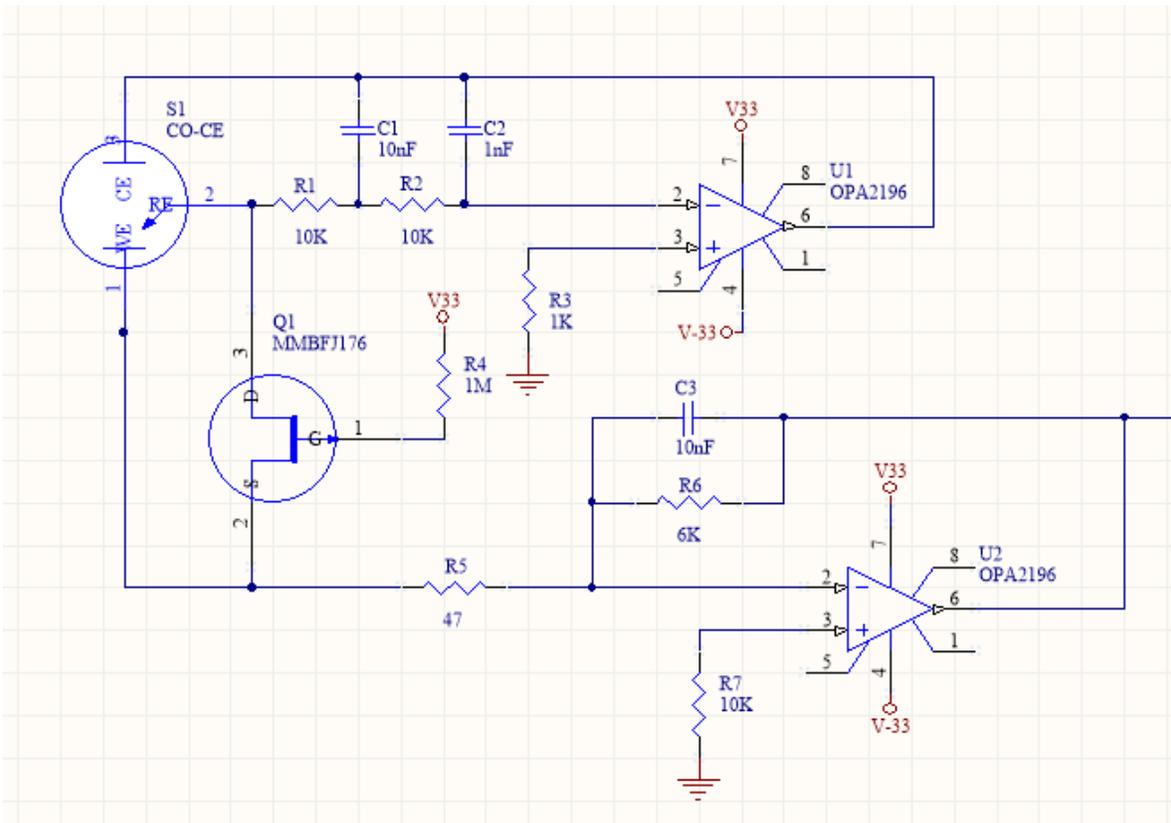


Figura 5.2. Circuito de acondicionamiento para el sensor de monóxido de carbono

Pasando al sensor de monóxido de nitrógeno, el circuito de acondicionamiento es similar al del sensor de monóxido de carbono. La diferencia radica en que ya no se utiliza el transistor FET, y en su lugar se emplea un circuito seguidor de tensión que genera una tensión de 300 mV. Esto es necesario dado que debe existir una tensión de este valor entre el electrodo de referencia y el electrodo. Si esto no se realiza, el sensor no funcionará de forma correcta.

Esta tensión se obtiene a partir de un divisor de tensión con dos resistencias, y una tensión de entrada igual a la de la referencia del ADC (2.5 V). Usando valores de 22 kΩ y 3 kΩ, se obtiene que la tensión de salida es:

$$\frac{2.5 V * 3 k\Omega}{22 k\Omega + 3k\Omega} = 0.3 V$$

Con esto se logra un valor igual al recomendado por el fabricante.

En cuanto a la resistencia de carga, se emplea un valor de 47 Ω, ya que el rango recomendado va desde 10 hasta 47 Ω.

La resistencia para el amplificador de transconductancia se obtiene considerando que la tensión máxima de salida es de 1.25 V, el valor de corriente oscila entre 40 y 80 nA/ppm y el rango de medición máximo es de 5000 ppm [9]:

$$R = \frac{1.25 \text{ V}}{(80 \text{ nA/ppm})(5000 \text{ ppm})} = 3.13 \text{ k}\Omega$$

Redondeando al valor comercial anterior, se obtiene que con una resistencia de 3 kΩ, la tensión de salida máxima es de 1.2 V.

En la figura 5.3 se muestra el esquemático del circuito de acondicionamiento.

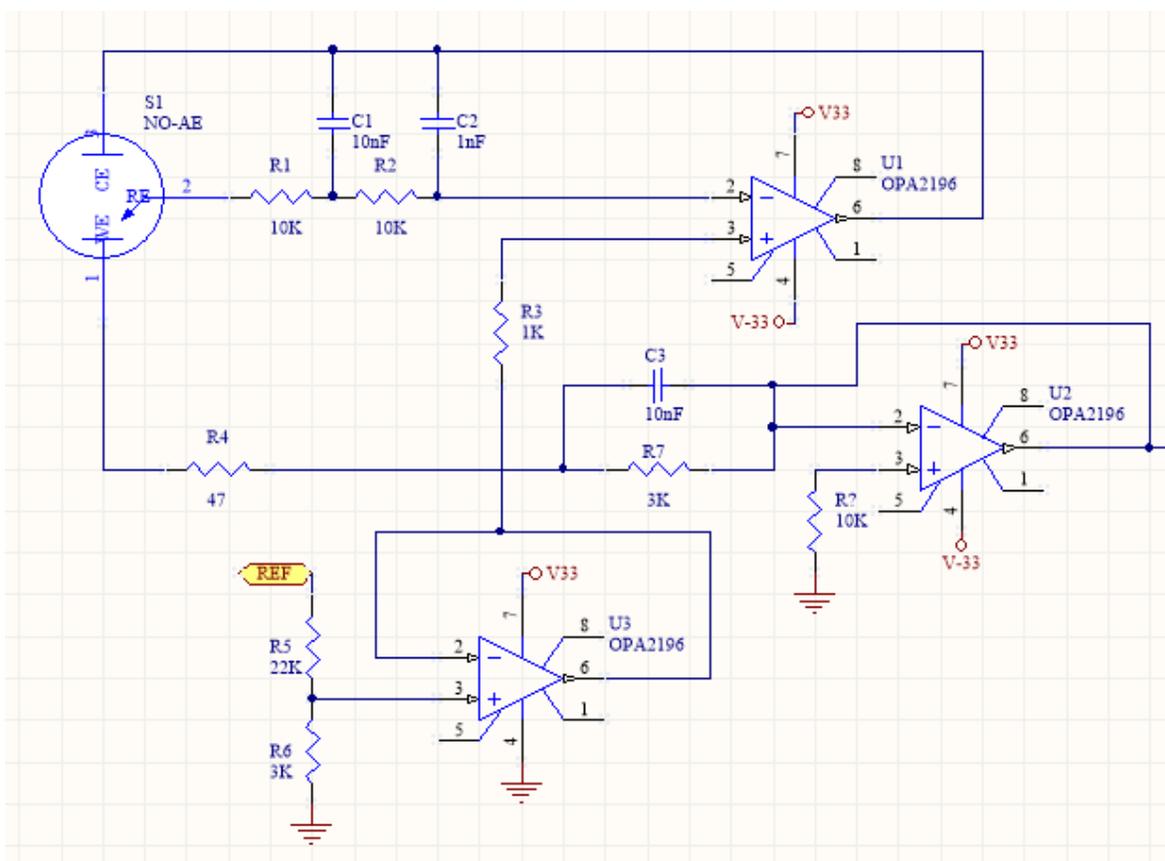


Figura 5.3. Circuito de acondicionamiento para el sensor de monóxido de nitrógeno.

Con respecto al sensor de oxígeno, este presenta únicamente dos electrodos (electrodo de trabajo y electrodo auxiliar). Por esta razón, no es necesario utilizar un potencióstato. Simplemente basta con utilizar un amplificador.

Sin embargo, dado que se debe emplear una resistencia de carga entre las dos terminales del sensor, la mayor parte de la corriente producida circulará a través de la resistencia de carga. Esto generará una pequeña caída de tensión en el sensor, la cual es llevada a un amplificador no inversor de tensión.

De acuerdo con la hoja de datos, a una concentración de 20.9% de oxígeno (la cual es la concentración en la atmósfera y por tanto es el valor máximo esperable en el escape de un automóvil), la corriente en el sensor cambia de 80 a 120  $\mu\text{A}$  [10]. Si se utiliza una resistencia de 100  $\Omega$  (el rango recomendado es de 47 a 100  $\Omega$ ) para maximizar el valor de la caída de tensión, se tendrá que en el sensor habrá una tensión de:

$$100\Omega * 120\mu\text{A} = 12 \text{ mV}$$

Para una tensión de salida de 1.25 V, el valor de ganancia del amplificador debe ser como máximo:

$$A = \frac{1.25\text{V}}{12 \text{ mV}} = 104.2 \text{ V/V}$$

Si emplean dos resistencias con valores de  $R_i = 1 \text{ k}\Omega$  y  $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ , se obtiene una ganancia en el amplificador de:

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 101 \text{ V/V}$$

Con esta ganancia, la tensión de salida máxima será de 1.21 V.

El esquemático para este circuito se muestra en la figura 5.4.

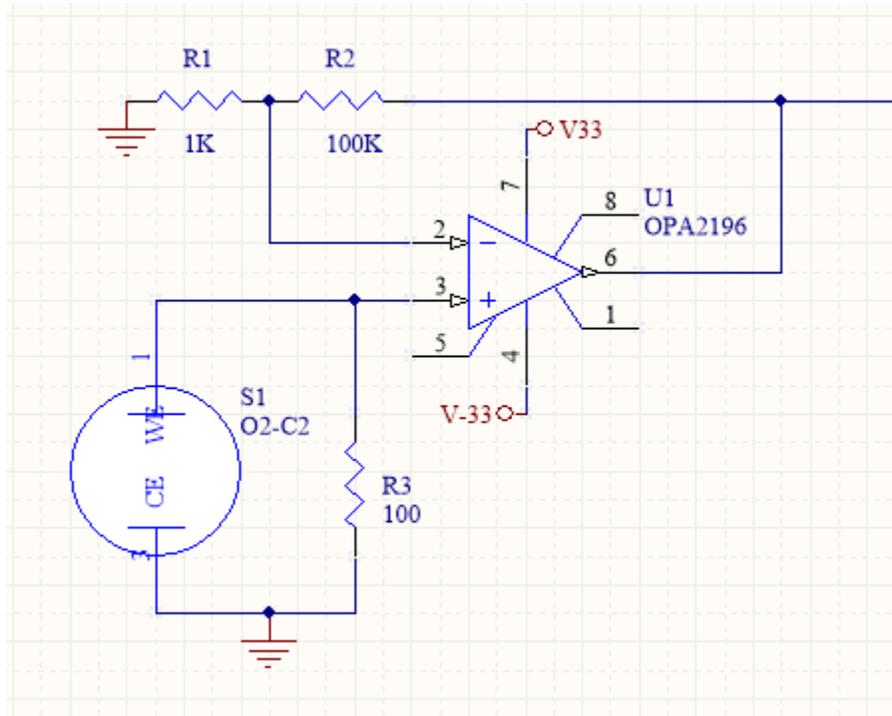


Figura 5.4. Circuito de acondicionamiento para el sensor de oxígeno

Pasando al sensor de CO<sub>2</sub>, su circuito de acondicionamiento será diferente al de los sensores electroquímicos.

Este sensor genera dos señales de salida: señal activa y señal de referencia, cuya razón entre ellos se emplea para calcular la concentración del gas. Estas señales suelen ser débiles, y presentan valores típicos de unos cuantos microvoltios.

Un circuito de acondicionamiento recomendado para este sensor se muestra en la figura 5.5.

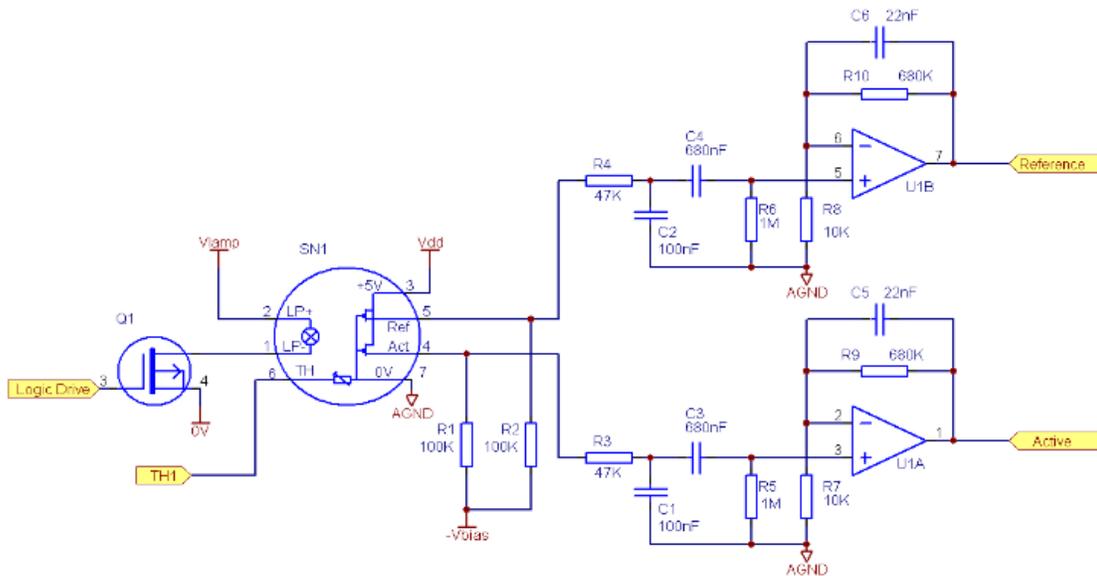


Figura 5.5. Circuito de acondicionamiento recomendado para sensores NDIR de dióxido de carbono

Sin embargo, una desventaja de implementar directamente este circuito es la cantidad de componentes que requiere, con lo cual se requeriría un mayor tamaño de circuito impreso. Una alternativa es utilizar el circuito integrado LMP91051 de Texas Instruments. Este componente contiene todos los amplificadores necesarios para el circuito de acondicionamiento y con ganancia programable mediante el protocolo SPI. Solo es necesario conectar las salidas del sensor a los pines correctos y agregar dos capacitores de filtrado [11].

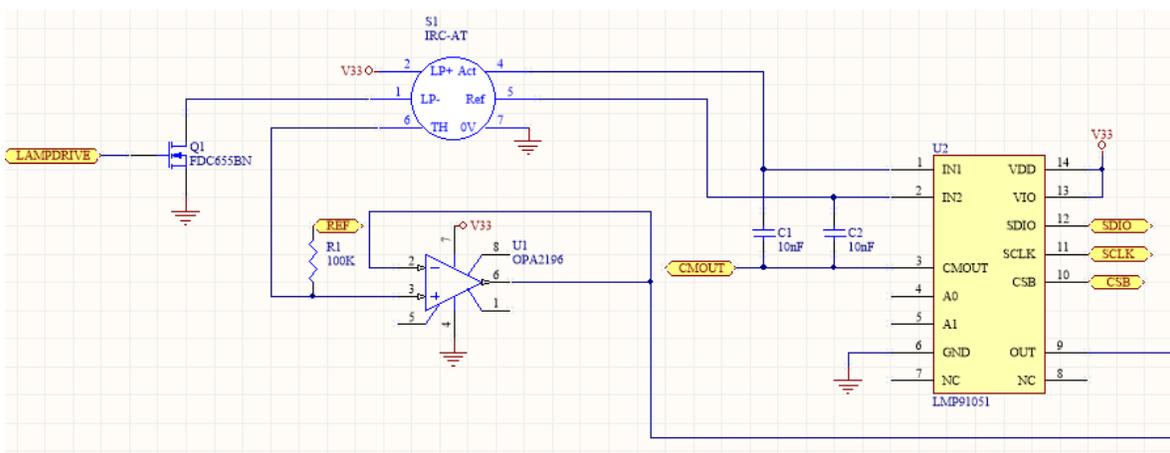


Figura 5.6. Circuito de acondicionamiento alternativo, empleando el LMP91051

Como se puede apreciar en la figura 5.6, es necesario alimentar la fuente de luz infrarroja. Esto se logra generando una onda cuadrada desde el microcontrolador, con una frecuencia entre 2 y 3 Hz, y un ciclo de trabajo del 50%. El transistor MOSFET permite que el microcontrolador alimente directamente al sensor, y que la potencia provenga de la fuente de alimentación.

La onda cuadrada y los capacitores de filtrado hacen que la salida amplificada del LMP91051 tenga la forma de las curvas de carga y descarga de un capacitor. En la figura 5.7 se muestra la forma que tienen estas señales:

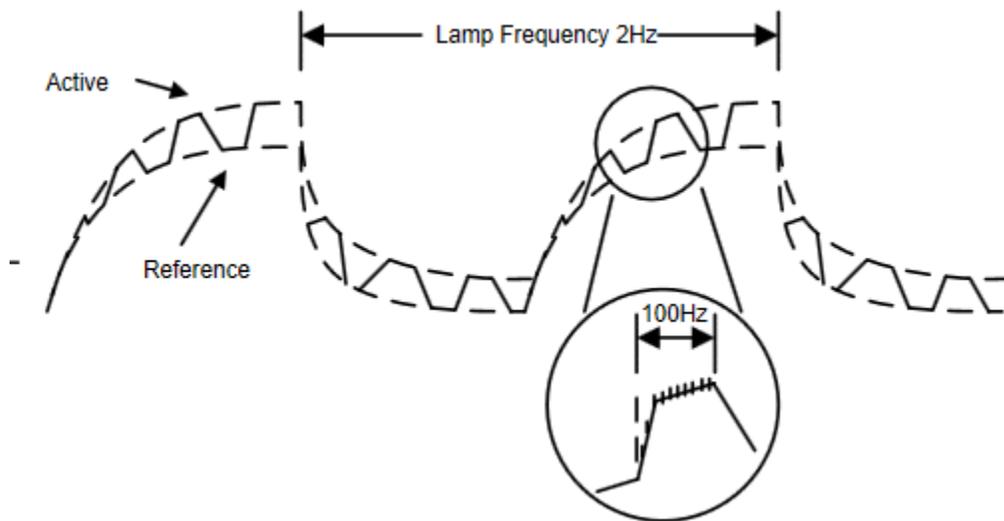


Figura 5.7. Curvas de salida del LMP91051 para las señales activa y de referencia

El LMP91051 solo tiene un pin de salida para las señales activa y de referencia, por lo que a la hora de muestrear esta información usando un ADC, es necesario indicarle cuál de las señales se desea ver en la salida. Esto es posible programarlo usando el protocolo SPI.

En cuanto a la señal de temperatura, el sensor presenta un termistor interno, con el cual es posible medir este valor. Usando un divisor de tensión entre el termistor y una resistencia de 10 k $\Omega$ , es posible encontrar el valor de resistencia a partir del valor de tensión, y encontrar la temperatura usando esta tabla:

Temp (°C)	IRC-A1 R (Ohms)
25	3000
-30	41222
-20	23519
-10	14003
0	8661
10	5541
20	3655
30	2478
40	1723
50	1225
60	889

Tabla 5.1. Valores de resistencia del termistor en el sensor IRC-AT a diferentes temperaturas

## 5.2. Convertidores de señal analógica a señal digital (ADC) y memorias

El ADC seleccionado es el LTC2489 de Linear Technology. Entre las ventajas que tiene este circuito integrado se encuentran las siguientes [12]:

- Capacidad de leer hasta 4 canales referenciados a tierra, o bien 2 señales diferenciales
- Resolución de 16 bits
- Permite el uso de una referencia de tensión externa
- Comunicación mediante protocolo I2C
- Dirección de esclavo de I2C programable (hasta nueve posibilidades distintas)
- Oscilador interno
- Versión para montaje superficial

Es necesario contar con varios canales dado que algunos circuitos de acondicionamiento, como el del sensor de CO<sub>2</sub>, tienen varias salidas que es necesario leer. Para este ADC se utiliza una referencia externa de 2.5 V con la intención de que la tensión de referencia que utiliza el ADC para realizar las conversiones varíe en la menor cantidad posible frente a cambios de temperatura, con lo que las mediciones realizadas son más exactas.



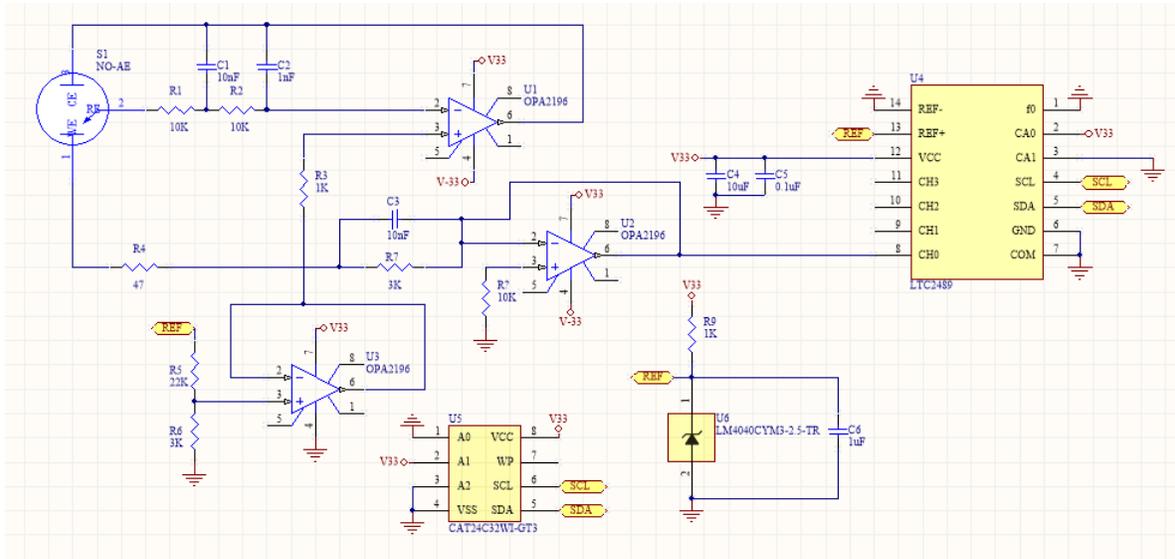


Figura 5.9. Circuito completo para el sensor de monóxido de nitrógeno

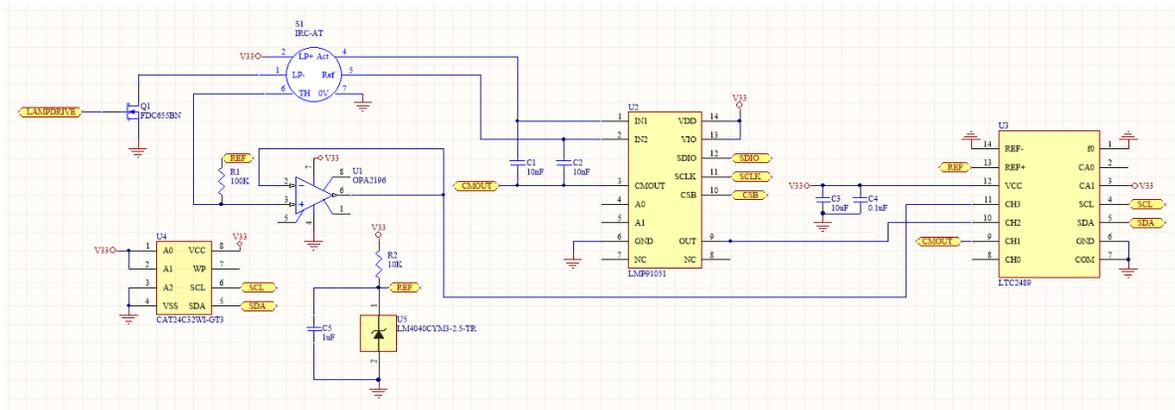


Figura 5.10. Circuito completo para el sensor de dióxido de carbono



fabricante en la hoja de datos del circuito integrado. En cuanto a la resistencia R4, esta es una resistencia de retroalimentación, cuyo valor depende de cuánta corriente máxima se desea entregar a la batería. Su valor se calcula con la fórmula:

$$R_{\text{retroalimentacion}} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{\text{bateria}}}$$

En el caso de este proyecto, se decidió utilizar una corriente de carga de 1 A con el propósito de reducir el consumo de potencia y el calor generado, por lo que el valor de la resistencia de retroalimentación es de 100 mΩ.

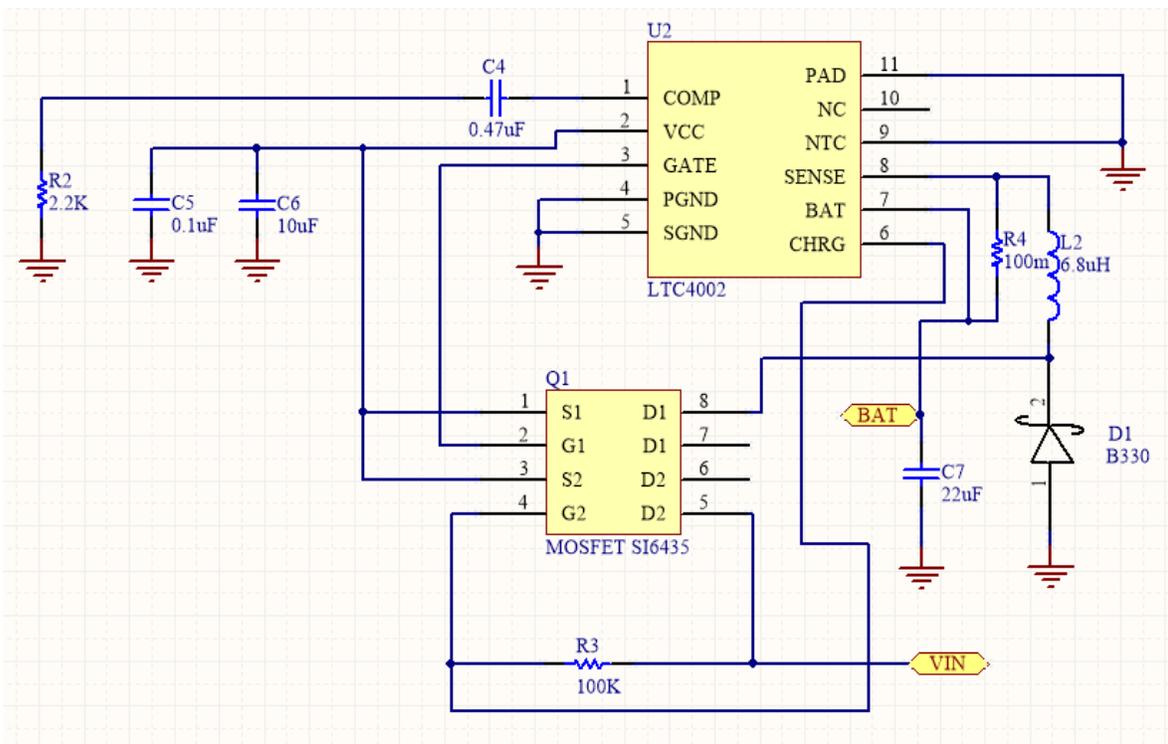


Figura 5.12. Circuito cargador para batería de ion litio de doble celda.

Considerando que los circuitos integrados seleccionados funcionan con una tensión de 3.3 V, es necesario disminuir la tensión de la batería para que estos puedan operar correctamente. Para ello se utiliza el circuito integrado TS30041 [15], el cual es un regulador DC-DC con salida de tensión de 3.3 V, corriente de salida máxima de 1 A y eficiencia de hasta 95%. La hoja de datos de este componente incluye una tabla con valores para las resistencias, capacitores e inductores que se deben conectar, con lo que se facilita la selección de estos componentes.

En la figura 5.13 se muestra el circuito regulador de 3.3 V. Se agregó una referencia de 2.5 V cuya salida se conecta a la entrada EN/SYNC. La razón de esto es que este pin debe recibir una tensión de al menos 2.2 V para habilitar el componente. No se puede utilizar la salida de 3.3 V para habilitarlo, por tanto, se toma la salida de la batería y a partir de esta se obtiene un valor de tensión constante que permita habilitar el regulador.

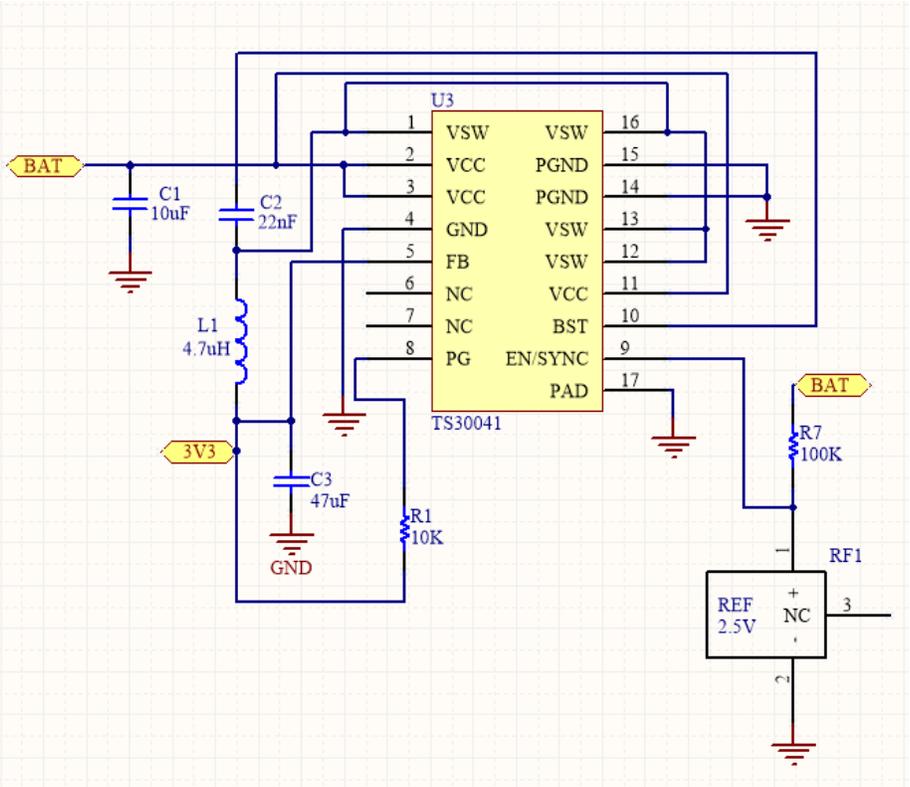


Figura 5.13. Circuito regulador de tensión con salida de 3.3 V

Finalmente, los circuitos de acondicionamiento para los sensores de CO y NO requieren que los amplificadores operacionales utilizados en el potenciómetro sean capaces de entregar salidas con valores de tensión negativos. Por esta razón, es necesario que tengan tanto una fuente de alimentación positiva como una negativa. La fuente positiva la provee el regulador de 3.3 V. Para generar la fuente de -3.3 V, se utiliza el circuito integrado LM2776 [16]. Este componente es un convertidor CD-CD capaz de crear una tensión de salida con un valor de

$-V_{in}$  a partir de una tensión de entrada con un valor de  $V_{in}$ . Por ejemplo, con una entrada de 3.3 V o de 5 V, es posible generar una salida de -3.3 V o -5 V, respectivamente. En la figura 5.14 se muestra el circuito para generar una tensión de -3.3 V.

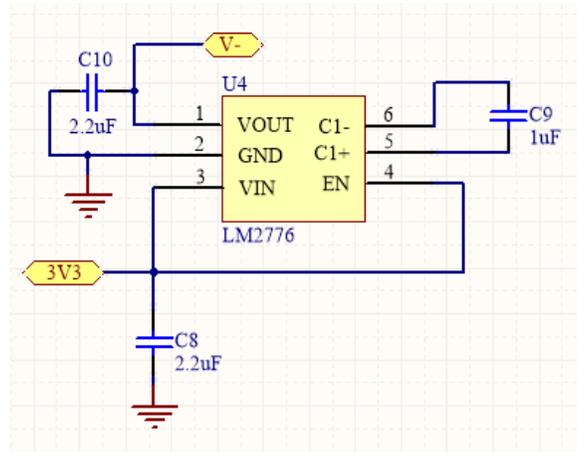


Figura 5.14. Circuito inversor de tensión con salida de -3.3 V

#### 5.4. Circuitos impresos (PCB)

Con el propósito de crear módulos reemplazables para cada sensor, es necesario crear circuitos impresos donde sea posible colocar el sensor y todos los componentes de su circuito de acondicionamiento. Se decidió incluir en cada módulo los circuitos con amplificadores operacionales, el ADC y las memorias. Cada módulo tendrá como entradas y salidas las tensiones de alimentación (3.3 V, -3.3 V en caso de ser necesario y tierra) y las conexiones con los buses de I2C o SPI, entre otras conexiones que sean necesarias, con lo que la comunicación con el Omega 2 será puramente digital. La ventaja de tener el ADC en el mismo módulo en vez de usar un ADC de muchos canales en la caja del dispositivo es evitar el ruido al tener pistas de gran longitud entre las señales analógicas y el convertidor, y esto es algo que es posible realizar ya que los convertidores escogidos tienen un costo reducido.

Los circuitos impresos para cada tipo de sensor fueron diseñados del mismo tamaño (3 cm por 3 cm), lo que facilitaría posteriormente la fabricación de los encapsulados, pues serían del mismo tamaño. Tienen la misma cantidad de pines (8), aunque no se tengan que utilizar todos, y están posicionados de tal manera que solo haya una sola forma correcta de colocarlos. Están diseñados usando dos capas, donde en una de ellas se coloca el sensor y en la otra el resto de componentes.

Para la mayoría de componentes, se tuvo que crear la información de huella correspondiente (*footprint*) utilizando las medidas recomendadas en las hojas de datos. Para el caso de las resistencias y los capacitores, se utilizó el tamaño 0805 (2.0 mm por 1.2 mm). El ancho de las pistas es de 10 milésimas de pulgada. A los circuitos impresos se les agregó el identificador de versión y el nombre del diseñador.

En las figuras 5.15 a 5.18 se muestran los diseños de los circuitos impresos de los circuitos correspondientes a cada sensor. Estas son imágenes que entrega el programa Altium Designer que sirven para determinar cómo se verá el circuito impreso cuando sea fabricado.

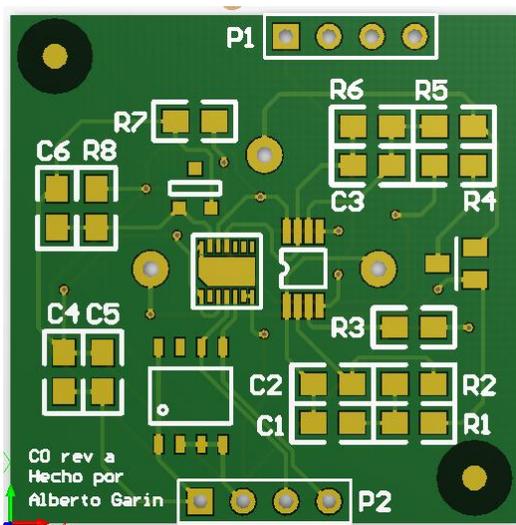


Figura 5.15. Circuito impreso correspondiente al sensor de monóxido de carbono

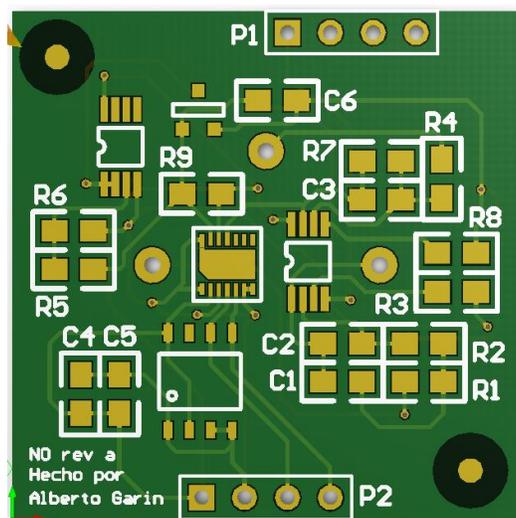


Figura 5.16. Circuito impreso correspondiente al sensor de monóxido de nitrógeno

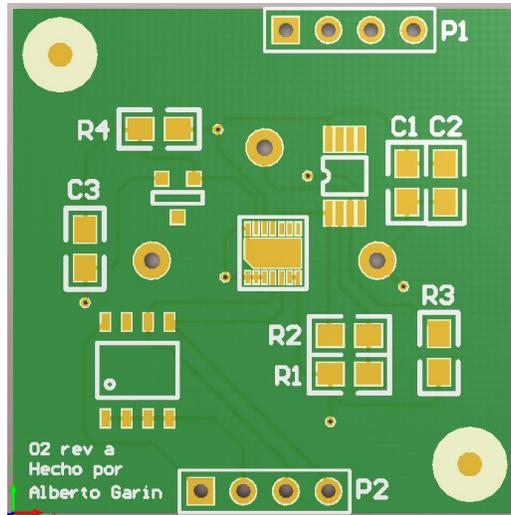


Figura 5.17. Circuito impreso correspondiente al sensor de oxígeno

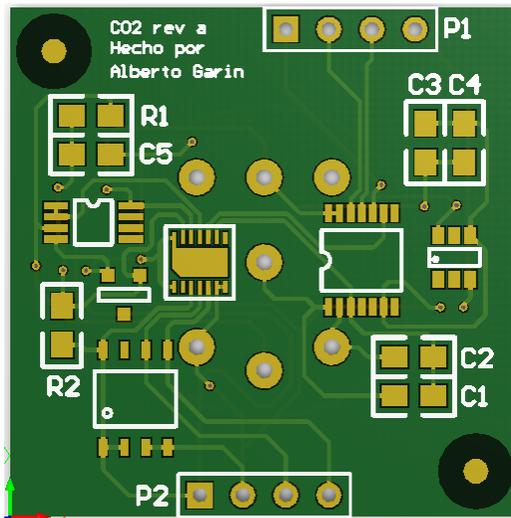


Figura 5.18. Circuito impreso correspondiente al sensor de dióxido de carbono

### 5.5. Programación del microcontrolador

Para lograr obtener las mediciones de cada sensor y convertirlas a unidades de concentración (partes por millón o % vol) es necesario crear un programa que, de forma cíclica, mida la concentración de cada gas y la muestre al usuario.

Los componentes como el ADC y la memoria (y en el caso de sensor del dióxido de carbono, el LMP91051) se pueden controlar mediante los protocolos I2C y SPI. En el caso del ADC, en su hoja de datos se especifica que, para iniciar una conversión, se debe escribir un *byte* de configuración, el cual contiene el tipo de entrada (simple o diferencial) y el canal cuya tensión

de entrada se desea convertir. En la tabla 5.2 se muestran los valores de los *bytes* de configuración para leer cada uno de los 4 canales del ADC. Cada *byte* de configuración empieza con los bits 101, y los cinco bits restantes son únicos para cada canal.

Canal	Byte de configuración
0	10110000
1	10111000
2	10110001
3	10111001

Tabla 5.2. *Bytes* de configuración para seleccionar cada uno de los cuatro canales del ADC

Cuando se leen los datos convertidos, el ADC retorna una palabra de 3 *bytes*. De esos 24 bits, 1 corresponde al signo, 16 al dato y el resto son ceros. Por esta razón, es necesaria una función para extraer los bits que son necesarios y así obtener un número entre 0 y 65536, que luego podrá ser convertido a un valor de tensión entre 0 y 1.25 V.

En el caso de las memorias, se puede leer y escribir datos en estas especificando la dirección de memoria y los datos que se desean escribir.

Pasando al LMP91051, este componente debe recibir una palabra de configuración para poder mostrar a la salida la señal activa o de referencia y configurar la ganancia de los dos amplificadores internos. De esta manera, se puede controlar el multiplexor interno de este componente y la magnitud de la ganancia de salida. En el caso de querer leer la señal activa, se escribe la palabra 01100001 (61 en hexadecimal), y en caso de leer la señal de referencia, se escribe 11100001 (E1 en hexadecimal). Ambas palabras establecen una ganancia de 168 V/V. Si se desea una ganancia diferente, se modifican los últimos 3 bits de la manera mostrada en la tabla 5.3.

Bits	Ganancias
[2:1]	00: 4
	01: 8
	10: 16
	11: 32
0	0: 250
	1: 42

Tabla 5.3. Ganancias configurables para el LMP91051

Para que el Omega 2 pueda comunicarse mediante I2C o SPI, existen varias bibliotecas con funciones para lograr este objetivo. La biblioteca para I2C se llama Onion-I2C y la biblioteca para SPI, Onion-SPI [17] [18]. Las funciones que se utilizan para leer y escribir datos son las siguientes:

- `int i2c_writeBufferRaw(int devNum, int devAddr, uint8_t *buffer, int size)`
- `int i2c_readRaw(int devNum, int devAddr, uint8_t *buffer, int numBytes)`
- `int spiWrite(struct spiParams *params, int addr, uint8_t *wrBuffer, int bytes)`
- `spiParamInit(struct spiParams *params)`

Las funciones para I2C requieren especificar el número de dispositivo (en este caso siempre vale 0), la dirección del dispositivo (dirección de 7 bits), un búfer con los datos que se desean escribir o un búfer sobre el que se van a escribir los datos leídos y número de bytes que se van a leer o escribir. Estas funciones no requieren que se especifique el registro al cual leer o escribir. En el caso de las memorias, si se necesita conocer la dirección del registro, y por tanto se utilizan las dos siguientes funciones:

- `int i2c_writeBuffer(int devNum, int devAddr, int addr, uint8_t *buffer, int size)`
- `int i2c_read(int devNum, int devAddr, int addr, uint8_t *buffer, int numBytes)`

En el caso de SPI, solo se requiere la función para escribir datos y una función para inicializar ciertos parámetros, como los números de pines a utilizar y la velocidad de transmisión. Los datos a escribir son las palabras de configuración que indican el canal del sensor que se desea leer y la ganancia de los amplificadores.

Para convertir los datos de tensión de los sensores electroquímicos a datos de concentración, se usan diferentes factores de conversión para cada tipo de sensor. Si los sensores no están calibrados, se utilizan valores por defecto, basados en los valores promedio de corriente por ppm o corriente a 20.9% (en el caso del sensor de oxígeno). Para el sensor de dióxido de carbono, se usan los valores promedio de SPAN y ZERO promedio de la hoja de datos. Para obtener la temperatura del termistor, primero se obtiene el valor de su resistencia usando una fórmula despejada de un divisor de tensión. Luego, se utiliza otra fórmula obtenida utilizando regresión logarítmica con los datos de la tabla 3, la cual puede calcular la temperatura en función del valor de resistencia del termistor.

En el caso de la lámpara infrarroja del sensor de CO<sub>2</sub>, se usa uno de los pines de entrada-salida para encender y apagar el transistor que la controla. El código espera entre encendido y apagado 0.25 segundos. Por tanto, cada ciclo dura 0.5 segundos, que equivale a una frecuencia de 2 Hz. Para lograr esto, se utiliza la biblioteca “fastgpio”, que permite manejar el estado de los pines de entrada-salida [19]. Se utilizan las dos siguientes funciones, la primera es para establecer el estado del pin (0 como entrada, 1 como salida), y la segunda para establecer su valor en 0 o en 1:

- gpioObj.SetDirection(int pin, int estado)
- gpioObj.Set(int pin, int valor)

En las figuras de la 5.19 a la 5.23 se muestran las diferentes partes del código que se utiliza para controlar y leer los circuitos de cada sensor. Se incluyen como constantes las direcciones de cada dispositivo I2C y los *bytes* de configuración para los ADC. Se creó una función para extraer los 16 bits con el dato convertido del ADC, los cuales se convierten a un valor de tensión en el rango de 0 a 1.25 V. También se incluye otra función para seleccionar el canal del sensor de CO<sub>2</sub> que se desea leer, mediante el uso del protocolo SPI y otra función para configurar este modo de comunicación. Finalmente, en la función principal se configura el modo de algunos pines de entrada-salida y la comunicación SPI, y se ejecuta un ciclo en donde se lee los diferentes valores de salida de cada sensor, los cuales se imprimen en una interfaz de texto, convertidos a unidades de ppm o % de volumen.

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <math.h>
3  #include <onion-i2c.h>
4  #include <onion-spi.h>
5  #include <fastgpioomega2.h>
6  #include <unistd.h>
7
8  const uint8_t DIRECCION_EEPROM_O2 = 0x50; //01010000
9  const uint8_t DIRECCION_EEPROM_CO = 0x51; //01010001
10 const uint8_t DIRECCION_EEPROM_NO = 0x52; //01010010
11 const uint8_t DIRECCION_EEPROM_CO2 = 0x53; //01010011
12
13 const uint8_t DIRECCION_ADC_O2 = 0x14; //00010100
14 const uint8_t DIRECCION_ADC_CO = 0x15; //00010101
15 const uint8_t DIRECCION_ADC_NO = 0x16; //00010110
16 const uint8_t DIRECCION_ADC_CO2 = 0x27; //00100111
17
18 const uint8_t CONFIG_ADC_CANAL_0 = 0xB0; //10110000
19 const uint8_t CONFIG_ADC_CANAL_1 = 0xB8; //10111000
20 const uint8_t CONFIG_ADC_CANAL_2 = 0xB1; //10110001
21 const uint8_t CONFIG_ADC_CANAL_3 = 0xB9; //10111001
22
23 const uint8_t LMP91051_CONFIG_WRITE_COMMAND = 0x00; //00000000
24 const uint8_t LMP91051_DEVICE_CONFIG_IN1 = 0x61; //01100001
25 const uint8_t LMP91051_DEVICE_CONFIG_IN2 = 0xE1; //11100001
26
27 struct spiParams params;
28

```

Figura 5.19. Bibliotecas utilizadas, direcciones de dispositivos I2C y SPI y palabras de configuración, entre otras variables necesarias

```

29 double leerADC(uint8_t direccion, int canal) {
30     while (i2c_writeBufferRaw(0, direccion, *canal, 1) == EXIT_FAILURE);
31
32     uint8_t bufferLectura[3];
33     while (i2c_readRaw(0, direccion, bufferLectura, 3) == EXIT_FAILURE);
34
35     int lecturaADC = (bufferLectura[0] & 0x7F);
36     lecturaADC <<= 10;
37     lecturaADC |= (((int) bufferLectura[1]) << 2);
38     lecturaADC |= (bufferLectura[2] >> 6);
39
40     return lecturaADC * 1.25 / 65536;
41 }
42
43 void cambiarEntradaLMP91051(int entrada) {
44     if (entrada == 1) {
45         spiWrite(&params, LMP91051_CONFIG_WRITE_COMMAND,
46                 &LMP91051_DEVICE_CONFIG_IN1, 1);
47     }
48     else {
49         spiWrite(&params, LMP91051_CONFIG_WRITE_COMMAND,
50                 &LMP91051_DEVICE_CONFIG_IN2, 1);
51     }
52 }

```

Figura 5.20. Funciones para leer valores de tensión del ADC y controlar el canal de salida del LMP91051

```

54 void inicializarSPI() {
55     params.speedInHz = 100000;
56     params.delayInUs = 0;
57     params.bitsPerWord = 0;
58     params.mode = 0;
59
60     params.sckGpio = 7;
61     params.mosiGpio = 8;
62     params.misoGpio = 9;
63     params.csGpio = 6;
64
65     params.busNum = 32766; //segun la documentacion del Omega 2
66     params.deviceId = 1;
67
68     spiParamInit(&params);
69 }

```

Figura 5.21. Función para inicializar la comunicación SPI

```

71 int main(int argc, char **argv) {
72
73     //Crear objeto para interactuar con los pines de entrada-salida
74     FastGpio gpioObj = new FastGpioOmega2();
75
76     //Establecer el pin 11 como salida
77     gpioObj.SetDirection(11, 1);
78
79     //Inicializar SPI
80     inicializarSPI();
81
82     //Factores de conversion de tension a ppm o %vol
83     //(Se deberian leer de las memorias, por el momento se usan
84     // los valores promedio indicados en las hojas de datos)
85     double factor_conversion_O2 = 20.6931; //20.9% -> 1.01 V
86     double factor_conversion_CO = 12158.05; //10000 ppm -> 0.8225 V
87     double factor_conversion_NO = 5555.56; //5000 ppm -> 0.9 V
88
89     //Constantes para la medicion de CO2
90     double b = 1.0459;
91     double c = 0.2932;
92     double zero = 1.5714;
93     double span = 1;
94     double beta0 = ;
95     double t_cal = 298;
96
97     for (;;) {
98
99         //Apagar lampara del sensor de CO2
100        gpioObj.Set(11, 0);
101
102        //Esperar 0.25 segundos (250000 microsegundos)
103        usleep(250000);
104
105        //Lectura de la concentracion de O2
106        double tensionO2 = leerADC(DIRECCION_ADC_O2, 3);
107        double concentracionO2 = tensionO2 * factor_conversion_O2;
108        printf("O2: %.2f%% ", concentracionO2);
109
110        //Lectura de la concentracion de CO
111        double tensionCO = leerADC(DIRECCION_ADC_CO, 3);
112        int concentracionCO = (int) (tensionCO * factor_conversion_CO);
113        printf("CO: %d ppm ", concentracionCO);
114

```

Figura 5.22. Función principal (primera parte)

```

110 //Lectura de la concentracion de CO
111 double tensionCO = leerADC(DIRECCION_ADC_CO, 3);
112 int concentracionCO = (int) (tensionCO * factor_conversion_CO);
113 printf("CO: %d ppm ", concentracionCO);
114
115 //Lectura de la concentracion de NO
116 double tensionNO = leerADC(DIRECCION_ADC_NO, 3);
117 int concentracionNO = tensionNO * factor_conversion_NO;
118 printf("NO: %d ppm ", concentracionNO);
119
120 //Lectura de la concentracion de CO2
121
122 double activo;
123 double referencia;
124
125 cambiarEntradaLMP91051(1);
126 activo = leerADC(DIRECCION_ADC_CO2, 2);
127 cambiarEntradaLMP91051(2);
128 referencia = leerADC(DIRECCION_ADC_CO2, 2);
129
130 //Compensacion por temperatura
131 //Ecuacion de resistencia: R = 10000*Vth/(2.5 - Vth)
132 //Ecuacion de temperatura: T = -26.33*ln(R) + 510.08
133
134 double tensionEnTermistor = leerADC(DIRECCION_ADC_CO2, 3);
135 double resistencia = 10000*tensionEnTermistor/
136 (2.5 - tensionEnTermistor);
137 double temperatura = -26.33*log(resistencia) + 510.08;
138
139 double absorbancia = 1 - (activo/(referencia*zero));
140 double span_t = span + beta0*(temperatura - t_cal);
141
142 double concentracion = (temperatura/t_cal)*
143 pow(log(1 - absorbancia/span_t)/(-b), (1/c));
144 printf("CO2: %d ppm\n", concentracionNO);
145
146 //Encender lampara del sensor de CO2
147 gpioObj.Set(11, 1);
148
149 //Esperar 0.25 segundos (250000 microsegundos)
150 usleep(250000);
151 }
152
153 return 0;
154 }
155

```

Figura 5.23. Función principal (segunda parte)

## Capítulo 6. Análisis de resultados

### 6.1. Circuitos impresos y sensores

De los cinco circuitos impresos que se pensaba fabricar, solo se fabricaron los correspondientes a los cuatro sensores. Por otra parte, la empresa solo pudo conseguir los sensores para oxígeno y monóxido de carbono, por lo que para la realización de las pruebas se hizo necesario simular las salidas de los sensores generando diferentes valores de tensión y corriente. En las figuras 6.1 a 6.6 se muestran fotografías de los circuitos impresos y de los sensores que se pudo conseguir.

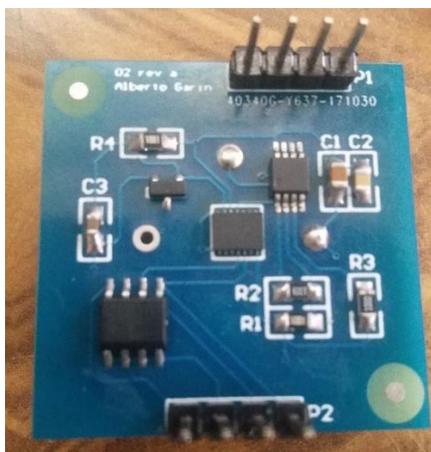


Figura 6.1. Circuito impreso para el sensor de oxígeno

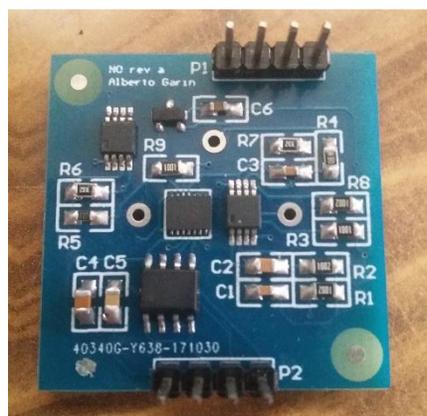


Figura 6.2. Circuito impreso para el sensor de monóxido de nitrógeno

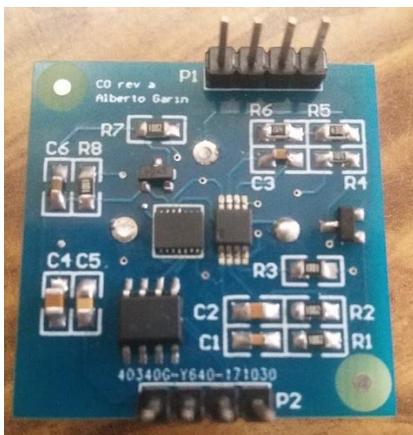


Figura 6.3. Circuito impreso para el sensor de monóxido de carbono



Figura 6.4. Circuito impreso para el sensor de dióxido de carbono



Figura 6.5. Sensor de oxígeno



Figura 6.6. Sensor de monóxido de carbono

## 6.2. Pruebas de los circuitos de acondicionamiento, convertidores analógico-digital y memorias

Dado que no se cuenta con los sensores para dióxido de carbono y monóxido de nitrógeno, y considerando que no es posible probar el sensor de monóxido de carbono, ya que se requiere una fuente de concentración conocida para este gas (y además se trata de un gas tóxico), se diseñaron unos circuitos de prueba para generar diferentes valores de tensión y corriente que permitan comprobar el funcionamiento de la parte analógica de cada circuito impreso.

En el caso de los sensores de monóxido de carbono y monóxido de nitrógeno, estos cuentan con potenciómetros para regular el nivel de corriente que pasa a través de los sensores cuando son expuestos al gas en cuestión, por lo que no es posible probarlos al no contar con el sensor de monóxido de nitrógeno ni con una fuente de monóxido de carbono. Por esta razón, solo fue posible probar los amplificadores de transimpedancia, mediante la generación de diferentes valores de corriente.

Para generar una corriente que circule en una dirección tal que se genere una salida de tensión positiva en el amplificador, se emplea una fuente de tensión negativa junto con una resistencia en serie, como se aprecia en la figura 6.7. Considerando que la tensión en las entradas del amplificador operacional es de aproximadamente 0 V y que la corriente que circula a través de ellas es de 0 mA, una tensión negativa en la entrada causaría una corriente que circule en serie a través de la resistencia de carga para sensor (R3), la resistencia para regular el valor de corriente (R4) y la resistencia del amplificador (R1). De esta manera se genera una caída de tensión en R1, la cual es el valor de salida del

amplificador. Así, se simula el comportamiento de los sensores, los cuales generan pequeñas corrientes en función de la concentración del gas que pasan a través del amplificador para ser convertidas en valores de tensión.

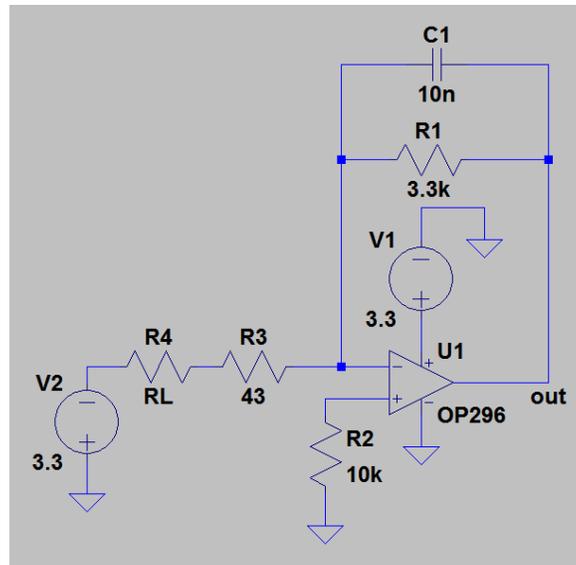


Figura 6.7. Circuito de prueba para los amplificadores de los sensores de monóxido de carbono y monóxido de nitrógeno

Para generar la tensión negativa, se empleó una batería de 9 V junto con un regulador de tensión LM1117, el cual es capaz de entregar una tensión fija de 3.3 V. Se conectó la salida del regulador con tierra, y su terminal negativa con diferentes resistencias para generar así distintos valores de corriente. La corriente generada se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$I = \frac{3.3 \text{ V}}{(43 \Omega) + R_L}$$

La salida del amplificador se calcula con esta fórmula:

$$V_{\text{out}} = (R_1) * I$$

Donde el valor de  $R_1$  es de 3.3 k $\Omega$  para el sensor de monóxido de nitrógeno y 4.7 k $\Omega$  para el sensor de monóxido de carbono. Ambos sensores tienen el mismo valor de resistencia de carga (43  $\Omega$ ).

En la tabla 6.1 se muestran los resultados de las pruebas para el circuito de acondicionamiento del sensor de monóxido de carbono, y en la tabla 6.2 se presenta la misma información para el sensor de monóxido de nitrógeno. Los valores de tensión medidos se toman del convertidor analógico-digital, en un rango que va desde 0 hasta 65536, donde 0 representa 0 V y 65536 representa 1.25 V. Los valores de salida teóricos se calculan usando las dos fórmulas presentadas anteriormente, y son empleados para calcular los porcentajes de error. Se puede apreciar que estos son bajos, siendo que los máximos valores rondan el 2%. Estos errores pueden deberse a la variación en los valores de las resistencias para regular la corriente (ya que estas tienen tolerancias del 5%) o a ruido dentro del circuito. De todas formas, estos porcentajes de error bajos demuestran que los amplificadores funcionan correctamente y pueden utilizarse para medir las salidas de sensores reales.

Resistencia (k $\Omega$ )	Corriente generada ( $\mu$ A)	Lectura del ADC (0-65536)	Tensión de salida teórica (V)	Tensión de salida experimental (V)	% de error
15	219.37	53853	1.0310	1.0272	-0.3763
18	182.90	45558	0.8596	0.8689	1.0862
33	99.87	24989	0.4694	0.4766	1.5422
68	48.50	12023	0.2279	0.2293	0.6038
100	32.99	8127	0.1550	0.1550	0.0149
220	14.99	3648	0.0705	0.0696	-1.2856
390	8.46	2041	0.0398	0.0389	-2.1020

Tabla 6.1. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de CO

Resistencia (kΩ)	Corriente generada (μA)	Lectura del ADC (0- 65536)	Tensión de salida teórica (V)	Tensión de salida experimental (V)	% de error
10	328.59	57152	1.0843	1.0901	0.5303
15	219.37	37651	0.7239	0.7181	-0.7997
18	182.90	31871	0.6036	0.6079	0.7179
33	99.87	17482	0.3296	0.3334	1.1749
68	48.50	8419	0.1600	0.1606	0.3335
100	32.99	5698	0.1089	0.1087	-0.1584
220	14.99	2565	0.0495	0.0489	-1.1453
390	8.46	1440	0.0279	0.0275	-1.6267

Tabla 6.2. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de NO

También se realizaron mediciones con el circuito que genera una tensión de 300 mV para polarizar el sensor de monóxido de nitrógeno. La medición se realizó usando uno de los canales sobrantes del ADC en el circuito impreso. Dado que en la empresa no se contaba con resistencia de 300 Ω, se utilizó una resistencia de 330 Ω, lo cual cambia un poco el valor de salida. El valor teórico de la salida de este circuito es:

$$V = \frac{(2.5 V)(330 \Omega)}{(2200 + 330) \Omega} = 0.326087 V$$

La medición del ADC dio como resultado 0.326099 V. Esto se traduce en un porcentaje de error de 0.00368%, por lo que la tensión generada por este circuito es bastante exacta.

Pasando al circuito de acondicionamiento del sensor de oxígeno, este cuenta solamente con un amplificador de tensión, por lo que para probarlo se colocó en serie con la resistencia de carga de 100 Ω diferentes resistencias y una tensión positiva de 3.3 V, con el propósito de generar tensiones de entrada en el rango de milivoltios, las cuales son amplificadas con una ganancia de 101. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 6.3. De nuevo, se

observa que los resultados tienen porcentajes de error bajos, con lo que se comprueba que el amplificador funciona correctamente.

Resistencia (k $\Omega$ )	Lectura del ADC (0-65536)	Tensión de salida teórica (V)	Tensión de salida experimental (V)	% de error
33	52909	1.0092	1.0069	-0.2195
68	25581	0.4879	0.4894	0.3082
100	17282	0.3296	0.3330	1.0028
220	7775	0.1483	0.1514	2.0701
560	2940	0.0561	0.0595	5.7660

Tabla 6.3. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de O<sub>2</sub>

Dado que se cuenta con el sensor de oxígeno, se realizaron pruebas con este componente conectado al circuito impreso. Se comprobó que su salida al dejarlo expuesto al aire (concentración de 20.9% de O<sub>2</sub>) fue de 1.0711 V. Si consideramos una ganancia de 101 y una resistencia de carga de 100  $\Omega$ , esto equivale a una corriente de 106.05  $\mu$ A, la cual se encuentra en el rango de 80 a 120  $\mu$ A que especifica la hoja de datos para la concentración de O<sub>2</sub> en el aire. Por esta razón, se puede afirmar que el sensor funciona de forma correcta.

En cuanto al circuito para el sensor de CO<sub>2</sub>, para la realización de las pruebas se tuvo que crear una biblioteca de código para comunicarse con el circuito integrado LMP91051, el cual contiene los amplificadores para acondicionar las salidas del sensor. Esto se hizo debido a que la biblioteca Onion SPI no fue capaz de enviar las instrucciones de configuración al circuito integrado. Se utilizó por tanto la biblioteca Fast-Gpio para generar las señales de los pines SCLK, MOSI y CS con base en el diagrama que provee la hoja de datos (figura 6.8). Esta nueva biblioteca funcionó perfectamente, ya que con la primera la salida del ADC se encontraba en el rango de milivoltios sin importar qué valor de entrada se colocase como señal activa o de referencia, y con la nueva biblioteca se obtenía valores más altos con diferentes tensiones de entrada.

Sin embargo, al realizar pruebas con diferentes tensiones de entrada y valores de ganancia de los amplificadores internos, se encontró que los valores medidos por el ADC eran igual al valor máximo del ADC, en otras palabras, el ADC se saturaba, y en una de las mediciones la tensión de salida fue de aproximadamente 1.15 V. Revisando el diseño del circuito impreso y comparándolo con el diseño recomendado por la hoja de datos, se encontró que el pin GND del sensor se encontraba conectado a la tierra del sistema y no a la salida de tensión de modo común del LMP91051. Esto causaba que las entradas estuvieran referenciadas a 1.15 V (que es valor de la tensión de modo común), por lo que, a menos que las entradas fueran ligeramente mayores a 1.15 V, el circuito integrado no iba a ser capaz de amplificar un valor de tensión en el rango de milivoltios. No obstante, al menos fue posible comprobar que el LMP91051 es capaz de recibir los comandos de configuración enviados por el microcontrolador.

El circuito impreso para el sensor de CO<sub>2</sub> cuenta además con un divisor de tensión y un amplificador seguidor para poder medir la temperatura del gas. El sensor seleccionado cuenta con un termistor interno, por lo que al medir la tensión del divisor es posible determinar la temperatura. Se realizaron pruebas con diferentes valores de resistencias para simular el termistor, y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.4. De nuevo, se observa que los porcentajes de error son bastante bajos, por lo que el amplificador seguidor funciona correctamente.

Resistencia del termistor (kΩ)	Lectura del ADC (0-65536)	Tensión de salida teórica (V)	Tensión de salida experimental (V)	% de error
0.51	6198	0.1182	0.1213	2.552
1	11516	0.2197	0.2273	3.354
1.5	16893	0.3222	0.3261	1.189
2.2	23178	0.4421	0.4508	1.937
3.9	36391	0.6941	0.7014	1.046
4.7	41575	0.7930	0.7993	0.793
10	65191	1.2434	1.2500	0.526

Tabla 6.4. Resultados de las pruebas con el circuito de acondicionamiento del sensor de CO<sub>2</sub>

En cuanto a los convertidores analógico-digital, estos funcionan correctamente ya que se utilizaron para hacer las mediciones anteriores. Se comprueba en la figura 6.8 que el formato de los datos recibidos es correcto. El ADC envía 24 bits, donde el primer bit es 1 si el resultado de la medición es positivo y el segundo bit es 1 solo si la tensión de entrada supera el valor máximo medible, en caso contrario es 0. Los siguientes 16 bits son el resultado de la conversión, y los últimos 6 bits son siempre 0. En el caso de haber canales desconectados, el valor convertido es igual a la entrada máxima aceptable, que es igual a la mitad de la tensión de la referencia (con la referencia de 2.5 V, esta tensión es de 1.25 V). Para este circuito integrado, la biblioteca Onion-I2C funcionó correctamente tanto al escribir como leer datos.

```
root@Omega-F007: ~/PRUEBAS
login as: root
root@192.168.100.110's password:

BusyBox v1.26.2 () built-in shell (ash)

  O N I O N
  W H A T W I L L Y O U I N V E N T ?

-----
  O-ware: 0.1.10 b160
-----

root@Omega-F007:~# cd PRUEBAS
root@Omega-F007:~/PRUEBAS# ./pruebas_parte_analog
CANAL 0
Lectura ADC: c0 00 00 65536 1,2500 V

CANAL 1
Lectura ADC: c0 00 00 65536 1,2500 V

CANAL 2
Lectura ADC: c0 00 00 65536 1,2500 V

CANAL 3
Lectura ADC: b6 42 80 55562 1,0598 V
Lectura ADC: b6 43 80 55566 1,0598 V
Lectura ADC: b6 44 40 55569 1,0599 V
Lectura ADC: b6 46 00 55576 1,0600 V
Lectura ADC: b6 46 c0 55579 1,0601 V

root@Omega-F007:~/PRUEBAS#
```

Figura 6.8. Resultados de la lectura del ADC

Pasando a las memorias EEPROM, la biblioteca Onion-I2C no fue capaz de leer datos de la memoria, pues no tienen funciones que permitan enviar una condición de inicio repetido, lo cual es necesario para realizar las lecturas. Por tanto, se creó una biblioteca de forma similar a la creada para comunicación SPI. Una vez que se comprobó su funcionamiento, se adaptó para que fuera capaz de generar las señales de SCL y SDA tal y como las especifica la hoja de datos de la memoria (figuras 6.9 y 6.10). Nótese en la figura 6.10 que el problema que obligó a crear otra biblioteca fue la generación de la condición de inicio repetido después de escribir en la memoria la dirección que se deseaba leer. La biblioteca Onion-I2C siempre genera una condición de parada luego de una escritura, por lo que no sirve para esta memoria. El proceso de escritura, sin embargo, sí podría realizarlo correctamente la biblioteca original.

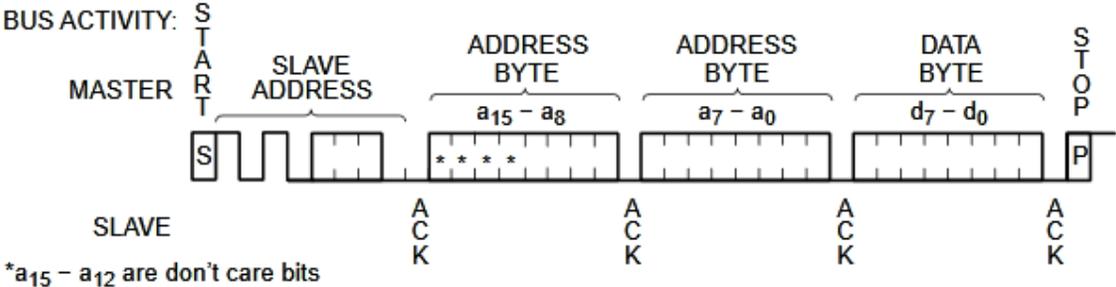


Figura 6.9. Secuencia de escritura para la memoria EEPROM CAT24C32

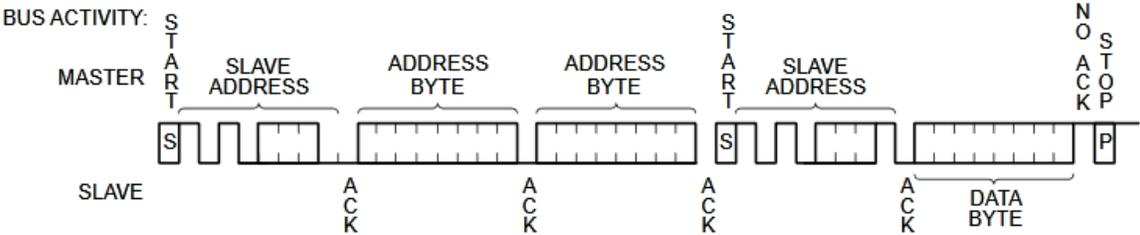


Figura 6.10. Secuencia de lectura para la memoria EEPROM CAT24C32

Para comprobar el proceso de lectura y escritura de datos, primeramente, se realizó una lectura en una dirección aleatoria que no haya sido sobrescrita. La memoria viene de fábrica con todos sus bytes en 0xFF, por lo que el resultado debe ser este valor. Luego, se escribe en la misma dirección un valor distinto a 0xFF, y posteriormente se lee la misma dirección para comprobar que fue escrita correctamente. Durante estas pruebas, se lee el valor del bit ACK, el cual es 0 cuando la transmisión del byte en cuestión es realizada de forma correcta.

En la figura 6.11 se muestra los resultados obtenidos, los cuales fueron iguales en las cuatro memorias. El byte leído es 11111111, lo cual se esperaba pues esa dirección nunca ha sido escrita. Se comprueba que los valores de ACK son 0, por lo que la transmisión completa fue exitosa. Luego, se escribe un byte con el valor de 11000011. La escritura fue correcta ya que los 4 valores de ACK son 1. Finalmente, la lectura en esa misma dirección entrega el byte 11000011, el cual fue el mismo que se escribió. De esta forma, se comprueba que es posible leer y escribir datos de las memorias de forma satisfactoria.



```
root@Omega-F007: ~/PRUEBAS
login as: root
root@192.168.100.110's password:

BusyBox v1.26.2 () built-in shell (ash)

  OMEGA OMEGA
  WHAT WILL YOU INVENT? /_/_/
-----
  Ω-ware: 0.1.10 b160
-----

root@Omega-F007:~# cd PRUEBAS
root@Omega-F007:~/PRUEBAS# ./prueba_lectura_eeprom
Ack 1: 0
Ack 2: 0
Ack 3: 0
Ack 4: 0
Byte leído: 11111111
root@Omega-F007:~/PRUEBAS# ./prueba_escritura_eeprom
Ack 1: 0
Ack 2: 0
Ack 3: 0
Ack 4: 0
root@Omega-F007:~/PRUEBAS# ./prueba_lectura_eeprom
Ack 1: 0
Ack 2: 0
Ack 3: 0
Ack 4: 0
Byte leído: 11000011
root@Omega-F007:~/PRUEBAS#
```

Figura 6.11. Prueba de lectura y escritura de las memorias EEPROM

Finalmente, en cuanto a los costos del prototipo, se elaboró la siguiente tabla con el precio de cada componente usado. Se incluyen los precios de cada parte del circuito de alimentación, pero no se incluyen otros como el costo de los PCB y los sensores, pues sus costos no se

conocen, o componentes como resistencias o condensadores, que son bastante baratos. Esto se hace con el propósito de hacer una estimación del costo final de producción.

Componente	Cantidad	Costo por unidad (\$)	Costo total (\$)
LMP91051	1	4	4
OPA2196	5	2,22	11,1
LTC2489	4	4,51	18,04
CAT24C32	4	0,22	0,88
FJ176	1	0,5	0,5
FDC655	1	0,53	0,53
LM4040	4	0,5	2
LTC4002	1	3,59	3,59
TS30041	1	1,33	1,33
LM2776	1	1,07	1,07
Onion Omega 2 (montaje superficial)	1	5	5
Bateria de litio	1	9,95	9,95
Total		57,99	

Tabla 6.5. Costos de algunos de los componentes utilizados en el proyecto

Como se puede apreciar en la tabla, el costo supera los \$50 que se planteaban como máximo, sin contar otros componentes como los sensores y los circuitos impresos. Se podría reducir costos comprando los componentes en cantidades mayores o seleccionando componentes y circuitos integrados equivalentes más baratos.

## **Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones**

### 7.1. Conclusiones

1. Se implementaron las etapas de acondicionamiento de señal para cada sensor, las cuales funcionan correctamente con base en las pruebas realizadas y fueron construidas en placas de circuito impreso.
2. El programa creado para el microcontrolador es capaz de comunicarse correctamente con los convertidores analógico-digital y las memorias EEPROM.
3. Se diseñó una etapa de alimentación para suministrar los valores de tensión adecuados a cada componente y la potencia requerida al sistema.
4. Se determinó que el costo del producto es mayor a lo estimado, dado que, sin contar los sensores y los circuitos impresos, supera el valor de \$50 que la empresa estimó antes de iniciar el proyecto.

### 7.2. Recomendaciones

1. Verificar de antemano el funcionamiento correcto de las bibliotecas de código que se piensa utilizar para el microcontrolador, para que de esa forma que pueda evitar inconvenientes.
2. Realizar revisiones más detalladas del diseño de circuitos impresos para poder detectar errores que puedan afectar significativamente el funcionamiento del sistema.

## **Bibliografía**

- [1] How Electrochemical Sensors Work. Recuperado de [http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/AAN\\_104.pdf](http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/AAN_104.pdf)
- [2] NDIR: Gas Concentration Calculation Overview. Recuperado de [http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2014/12/AAN\\_201-06.pdf](http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2014/12/AAN_201-06.pdf)
- [3] I2C Bus, Interface and Protocol. Recuperado de <http://i2c.info/>
- [4] Serial Peripheral Interface (SPI). Recuperado de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi>
- [5] Onion Omega2. Recuperado de <https://docs.onion.io/omega2-docs/omega2.html#omega2>
- [6] Designing a potentiostatic circuit. Recuperado de [http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/AAN\\_105-03.pdf](http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/AAN_105-03.pdf)
- [7] Hoja de datos del amplificador operacional OPA2196. Recuperado de <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2489fb.pdf>
- [8] CO-CE Carbon Monoxide Sensor. Recuperado de <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2015/01/COCE.pdf>
- [9] NO-AE Nitric Oxide Sensor. Recuperado de <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/NOAE.pdf>
- [10] O2-C2 Oxygen Sensor. Recuperado de <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2017/01/O2C2.pdf>
- [11] LMP91051 NDIR CO2 Gas Detection System. Recuperado de <http://www.ti.com/lit/an/snaa207/snaa207.pdf>
- [12] Hoja de datos del ADC LTC2489. Recuperado de <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2489fb.pdf>
- [13] Hoja de datos de la memoria CAT24C32. Recuperado de <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/CAT24C32-D.PDF>

[14] Hoja de datos del cargador de batería de ion litio LTC4002. Recuperado de <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4002f.pdf>

[15] Hoja de datos del regulador TS30041. Recuperado de <http://www.semtech.com/images/datasheet/ts3004x.pdf>

[16] Hoja de datos del inversor de tensión LM2776. Recuperado de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf>

[17] I2C C Library. Recuperado de <https://docs.onion.io/omega2-docs/i2c-c-library.html>

[18] SPI C Library. Recuperado de <https://docs.onion.io/omega2-docs/spi-c-library.html>

[19] fast-gpio. Recuperado de <https://github.com/OnionIoT/fast-gpio>