



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática
Maestría en Ciencias de la Computación

Sistema olfativo artificial para la detección de compuestos volátiles tóxicos.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias de la Computación

Presenta:

I.S. Sandra Gabriela Briceño Muro

Dirigido por:

M. en C. Ricardo Chaparro Sánchez

M. en C. Ricardo Chaparro Sánchez
Presidente

Firma

M. en C. Julio Alejandro Romero González
Secretario

Firma

Dra. Ana Marcela Herrera Navarro
Vocal

Firma

Dra. Ma. Teresa García Ramírez
Suplente

Firma

Dr. Alberto Lara Guevara
Suplente

Firma

M.I.S.D. Juan Salvador Hernández Valerio
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Querétaro.
Noviembre, 2018

RESUMEN

Se presenta el desarrollo e innovación de un sistema olfativo artificial, el cual se encuentra en fase de prototipo funcional final. El prototipo se sustenta en la configuración de un sistema de multisensado para detección de gases, conversiones analógico digital y la recuperación y análisis de gases a través de una tarjeta electrónica Raspberry Pi 3. El núcleo de la solución se sustenta en el uso de un circuito integrado de adquisición multicanal aplicando la interface SPI (del inglés *Serial Peripheral Interface*) como elemento de comunicación entre el convertidor y el sistema digital. La tarjeta de procesamiento se acompaña de un sistema de interacción hombre máquina usando una pantalla táctil e interfaces gráficas para la exhibición de los resultados finales. Dichos sistemas en conjunto tienen un potencial de procesamiento que permitirá en trabajos futuros la integración de algoritmos de reconocimiento y predicción potencializados por la plataforma de desarrollo QT. El capítulo 1 describe la fundamentación teórica de los sistemas olfatorios artificiales, se mencionan los antecedentes y los trabajos relacionados. El capítulo 2 contiene el objetivo general y los objetivos particulares del proyecto. El capítulo 3 describe la propuesta para la creación de un sistema olfativo artificial, se describen los transductores utilizados en el sistema, las principales características de los sensores y el sistema electrónico que satisface el problema presentado, además se incluye el sistema de procesamiento con el que son tratadas las señales de los sensores y los ajustes de regresión que se utilizaron para la calibración. El capítulo 4 se describe el proceso de desarrollo de la propuesta, cada uno de los pasos a seguir para replicar el experimento y se presentan los resultados obtenidos. El capítulo 5 se mencionan las conclusiones y las líneas de investigación futuras.

Palabras clave: Convertidor Analógico Digital; Nariz Electrónica; Protocolo SPI; Sensor De Gas; Sistema Olfatorio Artificial, Raspberry Pi.

SUMMARY

The development and innovation of an artificial olfactory system is presented, which is in the final functional prototype phase. The prototype is based on the configuration of the multi sensed system for the detection of gases, digital analog conversions and the recovery and analysis of gases through a Raspberry Pi 3 electronic card. The core of the solution is based on the use of an integrated multi-channel acquisition circuit using the SPI interface (Serial Peripheral Interface) as a communication element between the converter and the digital system. The processing card is accompanied by a human-machine interaction system with touch screen and graphic interfaces for the display of the final results. These systems together have a processing potential that is maintained in future works by the integration of recognition and prediction algorithms enhanced by the QT development platform. Chapter 1 describes the theoretical foundation of artificial systems; the background and related works are mentioned. Chapter 2 contains the general objective and the particular objectives of the project. Chapter 3 describes the proposal for the creation of an artificial olfactory system, it is about the transducers of the system, the main characteristics of the sensors and the regression settings used for the calibration are treated. Chapter 4 describes the process of developing the proposal, each of the steps to follow to replicate the experiment and present the results. Chapter 5 mentions the conclusions and the future research lines.

Key words: Artificial Olfactory System; Digital Analog Converter; E-Nose; Gas Sensor; Raspberry, SPI Protocol

DEDICATORIAS

Maricela Muro y Magdaleno Briceño, mis padres:

Por ser mi mayor ejemplo de trabajo y lucha, por guiarme en lograr mis objetivos, educarme con amor y proporcionarme los medios para continuar mis estudios.

Antonio, Yareli, Rosa y Eduardo, mis hermanos:

Por ayudarme en los cálculos matemáticos, exposiciones y resolver mis dudas cada que los necesite, gracias por compartirme todo su apoyo y amor.

Paul, Samara, Gilberto, Erica y Sarahí, mis bebés de luz:

Por brillar conmigo, por todas las anécdotas que creamos y vivimos juntos, por nuestra amistad, por sus consejos y por estar siempre al pendiente de mí.

Diana, Rolando, Karla y Cesar, mis amigos:

Por la confianza y amor que me brindan, por enriquecer mi alma por los largos debates de ciencia, educación, filosofía, política y esas platicas donde mejoramos México.

Vida, Lena, Ramón, Diana, Jhony, Zayra, mis compañeros de viaje:

Por el cariño recibido por los viajes, las anécdotas, audios y esos instantes que disfrutas mucho la vida.

Claudia, Selene, Miguel, Adriana, Luz y Aldo, mis compañeros:

Por compartir su conocimiento conmigo, compartir experiencias, aventuras y mucho esfuerzo para la realización de este trabajo.

Sofi, Magaly, Wen, Flor y mi Familia Hangar 84, mis motivadores:

Por ayudarme a mantener la cordura y niveles de estrés aceptables, por sus porras y por escuchar mis locuras.

Omar, Pame, Joyce, Adolfo, Daniel, Jesús, Roberto, Carlos, mis mentores:

Por orientarme en el desarrollo de este proyecto con ideas de mejora en el diseño 3D, la implementación de circuitos o durante la redacción de la tesis.

Naye, Silvia, Conny, Fanny, Saul, Zay:

Por apoyarme en los tramites escolares y hacer de mi espacio de trabajo un mejor lugar y muy divertido.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Fondo de Proyectos especiales de Rectoría de la Universidad Autónoma de Querétaro (FOPER) por solventar los recursos económicos necesarios para el desarrollo de este trabajo, de igual manera a la Dirección de Posgrado de la Facultad de Informática por permitirnos utilizar la infraestructura y materiales de los laboratorios.

A mi director de tesis M. en C. Ricardo Chaparro Sánchez por su orientación en el desarrollo de esta investigación, sobre todo por ayudarme en mis crisis existenciales de tesista y compartirme todo el conocimiento de electrónica, investigación y ciencia.

A mi codirector M. en C. Julio Alejandro Romero González por la guía durante la implementación de los circuitos, orientación en la ejecución de experimentos y apoyo durante toda mi estancia de investigación y académica.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por educarme en la verdad y en el honor.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	12
1.1. Fundamentación Teórica	13
1.1.1. Sistema olfativo humano	14
1.1.2. Sistema olfativo artificial	15
1.2. Antecedentes	18
1.3. Trabajos relacionados	20
1.4. Aplicaciones comerciales	21
Capítulo 2 Objetivos	24
2.1 Objetivo general	24
2.2 Objetivos específicos	24
2.3 Finalidad	24
Capítulo 3 Propuesta de solución	25
3.1. Sistema olfativo artificial	26
3.1.1. Transductores	27
3.1.2. Adquisición de datos	27
3.1.3. Sistema de procesamiento	30
3.1.4. Armazón para montaje de sensores	31
3.1.5. Sistema de exhibición	32
3.2. Sistema electrónico	33
3.3. Sensores	33
3.4. Sistema de procesamiento de señales	40
3.4.1. Desarrollo del instrumento de adquisición de datos	40
3.4.2. Recolección de datos	41
3.4.3. Análisis de datos	41
Capítulo 4 Desarrollo y Resultados	53
4.1. Sistema electrónico	54
4.2. Sistema de exhibición	58
4.2.1. QT Creator	58
4.2.2. Monitor de la calidad del aire	59
4.2.3. Pantalla calibración de sensores	62
4.3. Sistema de procesamiento de señales	64
Capítulo 5 Conclusiones	66

5.1. Trabajo futuro.....	67
I.Apéndice: Instalación de Raspbian	71
II.Apéndice: Configuración e instalación de QT Creator	73
III.Apéndice: Obtención de puntos de graficas de sensores.	76
IV.Apéndice: Instalación de WiringPi.....	79
V.Apéndice: Reconocimientos y constancias	80
VI.Apéndice: Publicación de artículo en congreso internacional.	83

Índice de figuras

Figura 1-1. Esquema del contenido de la fundamentación teórica.....	13
Figura 1-2. Sistema Olfativo (Vokshoor et al., 2013).....	14
Figura 1-3. Sentido del olfato humano y sistema olfatorio artificial.....	15
Figura 1-4. Proceso de medición.....	16
Figura 1-5. Proceso de reposo.....	17
Figura 3-1. Descripción del convertidor analógico digital MCP3008 (Microchip, 2008).....	28
Figura 3-2. Configuración SPI Raspberry Pi 3.....	28
Figura 3-3. Conexión física entre GPIO Raspberry Pi 3 y MCP3008 (McGrath, 2016).	29
Figura 3-4. Raspberry Pi 3 modelo B. Fuente: Raspberry Pi (McGrath, 2016).....	30
Figura 3-5. (a) Modelo 3D de armazón para montaje de circuito electrónico, tarjeta de sensores y ventilador, (b) tapa del armazón y (b) modelo 3D de tarjeta para montaje de sensores de gas y un sensor de temperatura y humedad.	31
Figura 3-6. Pantalla táctil Raspberry Pi 7 pulgadas (Element 14, 2009).	32
Figura 3-7. Características de sensibilidad para la Humedad (RFE International, 2006).....	35
Figura 3-8. Características de sensibilidad para la Temperatura (RFE International, 2006).....	36
Figura 3-9. (a) Características de sensibilidad del MQ-2 y (b) del sensor MQ-4 (Electronics, 2006).	36
Figura 3-10. (a) Características de sensibilidad del MQ-7 y (b) del sensor MQ-8 (Electronics, 2006)	37
Figura 3-11. Características de sensibilidad del MQ-9.....	38
Figura 3-12. Características de sensibilidad del MQ-135.....	39
Figura 3-13. Regresión lineal para la humedad relativa	42
Figura 3-14. Regresión exponencial para el cálculo de la temperatura.....	44
Figura 3-15. Selección de datos para CO2 de la curva de sensibilidad del MQ-135	48
Figura 3-16. Voltar ejes de la gráfica.....	48

Figura 3-17 Regresión potencial para el CO2 del sensor MQ-135.....	49
Figura 4-1.Montaje de sensores de gas, convertidor ADC y Raspberry Pi en protoboard.....	54
Figura 4-2. Diagrama esquemático.	55
Figura 4-3. Diseño final de la tarjeta PCB.	56
Figura 4-4. Tarjeta final PCB.....	56
Figura 4-5. Ensamble de los componentes electrónicos en la PCB.	57
Figura 4-6. Diagrama esquemático del interruptor encendido y apagado.	57
Figura 4-7. Ensamble de los componentes electrónicos de interruptor.....	58
Figura 4-8.- Pantalla principal de QT Creator 5.....	59
Figura 4-9. Diagrama de Secuencia de los procesos del monitor de la calidad del aire.	60
Figura 4-10. Monitor de la calidad del aire.	61
Figura 4-11. Pantalla para la calibración de sensores.....	62
Figura 4-12. Diagrama de secuencia de los procesos para recalibración.	63
Figura 4-13. Diagrama de componentes del sistema olfatorio.	64
Figura 4-14. Procesamiento de señales.....	65
Figura I-1. Descarga del Sistema Operativo para Raspberry Pi.....	71
Figura I-2 Pantalla de Etcher.....	71
Figura I-3 Raspberry Pi 3 Modelo B+.	72
Figura I-4. Ejecución de comando en la consola de la Raspberry Pi.	72
Figura I-5. Pantalla de inicio.	72
Figura II-1. Abrir QT Creator desde el menú.	73
Figura II-2. Configuración de opciones de QT.....	74
Figura II-3. Agregar los compiladores de C y C++.	74
Figura II-4. indicar la ruta del compilador.	75
Figura II-5. Iniciar un Proyecto en el IDE QT.....	75
Figura III-1. Pantalla principal de WebPlotDigitizer.	76
Figura III-2. Cargar imagen de la gráfica.....	76
Figura III-3. Seleccionar la opción 2D (X-Y).	77
Figura III-4. Agregar los rangos de los ejes X y Y.	77

Figura III-5. Agregando los datos de la gráfica.....	78
Figura III-6. Dar formato a los datos.....	78
Figura III-7. Guardar el proyecto.	78

Índice de tablas

Tabla 3-1. Configuración de canal 0 del MCP3008	28
Tabla 3-2. Conexión entre pines GPIO Raspberry Pi 3 y MCP3008	29
Tabla 3-3. Descripción de la composición de la matriz de sensores.	35
Tabla 3-4. Puntos de la curva de sensibilidad del sensor HMZ433A - Humedad Relativa %.	42
Tabla 3-5. Calculo de variables para humedad relativa.	43
Tabla 3-6. Puntos de la curva de sensibilidad del sensor HMZ433A - Temperatura.	44
Tabla 3-7. Calculo de variables para temperatura.....	45
Tabla 3-8. Especificaciones del sensor 433A-HMZ.....	46
Tabla 3-9. Puntos de la curva de sensibilidad del sensor MQ-135 - CO2.	49
Tabla 3-10. Calculo de variables para los coeficientes a y b para CO2 del MQ-135.	50
Tabla 3-11. Especificaciones del sensor MQ-2	52
Tabla 3-12. Ajuste de regresión exponencial a los sensores MQ-X.....	52

Capítulo 1 Introducción

Se han construido diferentes dispositivos que permiten realizar tareas de una manera más sencilla, sobre todo tratando de salvaguardar la integridad de los usuarios en todo momento, además se trata de automatizar la realización de dichas tareas. Estos dispositivos tratan de emular los sentidos humanos (auditivo, visual, gustativo, olfativo y táctil) realizando sus funciones de manera similar a los humanos, y son construidos con base a la investigación biológica del cuerpo humano.

Este proyecto se centra en el análisis de los sistemas olfativos artificiales, también conocidos como narices electrónicas, sus antecedentes, sus aplicaciones y la importancia que representa como dispositivo que facilita la detección de compuestos volátiles y clasificación de las mezclas que puedan producirse.

Desde hace varias décadas la investigación de los sistemas olfativos artificiales se ha venido consolidando, de tal manera que el número de áreas en donde se utilizan ha aumentado, llegando a ser una herramienta útil en aplicaciones como: dispositivo médico, en el control de calidad, en la identificación de compuestos químicos, entre otras. Sin embargo, el estudio del sentido olfativo humano aun es estudiado y conforme los avances en esas investigaciones los sistemas olfativos artificiales siguen en mejora continua.

En este proyecto se basa en la utilización de una Raspberry Pi (RPi) para la construcción de un sistema olfativo artificial, constituido por una matriz de sensores químicos de gases y técnicas de reconocimiento de patrones, capaz de clasificar diferentes mezclas de compuestos volátiles tóxicos.

Para comenzar el desarrollo del proyecto se revisaron casos de intoxicaciones de trabajadores, posteriormente se seleccionaron los compuestos volátiles con mayor número de que causan frecuentemente intoxicaciones de trabajadores en espacios cerrados, después se realizó un análisis de los sensores de gas disponibles para la detección de dichos compuestos, se creó una interfaz de hardware para la comunicación entre los sensores y la RPi y se desarrolló una interfaz gráfica para mostrar los datos obtenidos por los sensores, además se estableció una red neuronal capaz de clasificar mezclas de peligrosos estos gases.

1.1. Fundamentación Teórica.

En esta sección se hace una breve mención de los conceptos vinculados con el proyecto, se aprecian en la Figura 1-1. Se comienza describiendo el sistema olfativo humano, el término de transductor, se define el concepto de nariz electrónica, se realiza una comparación entre el sistema olfativo humano y un artificial, además se detalla la estructura de un sistema olfativo artificial y se mencionan sus componentes.

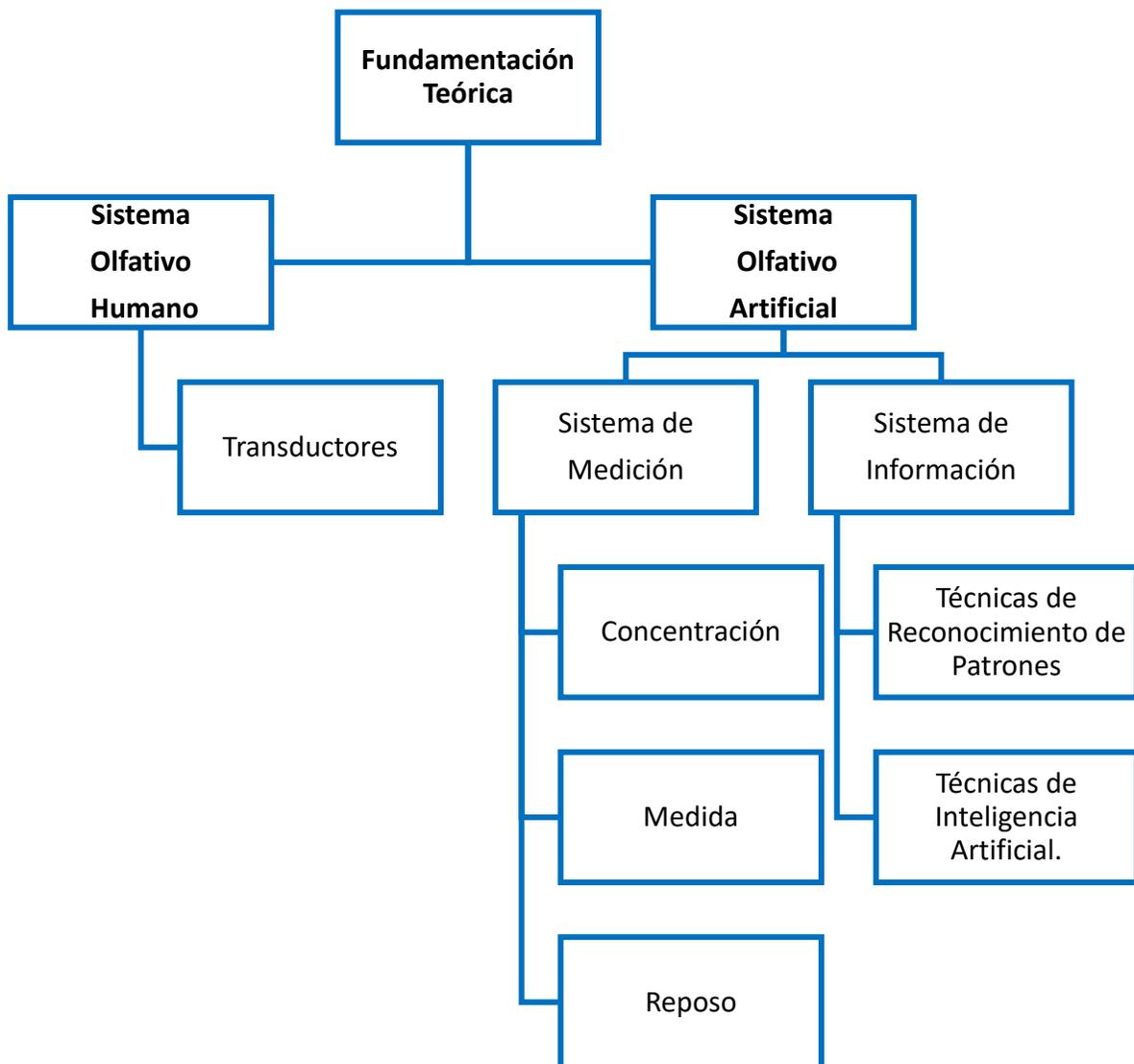


Figura 1-1. Esquema del contenido de la fundamentación teórica.

1.1.1. Sistema olfativo humano

La principal función de este sistema es la localización y procesamiento de compuestos químicos que se encuentran en el ambiente, basado en la acción de entre 10 y 100 millones quimiorreceptores. Las células receptoras están incluidas entre las células epiteliales de sostén y las glándulas olfatorias de Bowman, generan mucosidad, humedecen la superficie y permiten la disolución de los gases permitiendo que los aromas entren en contacto con los receptores (Martínez Fraga, 2012).

El sistema olfativo como se muestra en la Figura 1-2, es capaz de identificar miles de aromas diferentes. Cuando un receptor recibe una sustancia adecuada, ésta manda el impulso al sistema nervioso central por medio de sus neuronas asociadas. Estas cruzan los agujeros del hueso etmoides y que conforma el techo de la cavidad nasal. De esta zona, la información es enviada a los lóbulos frontales del cerebro, donde es analizada (López, 2012).

Es necesario considerar que el olfato posee una gran capacidad de identificación de aromas, pero se satura con mucha facilidad.

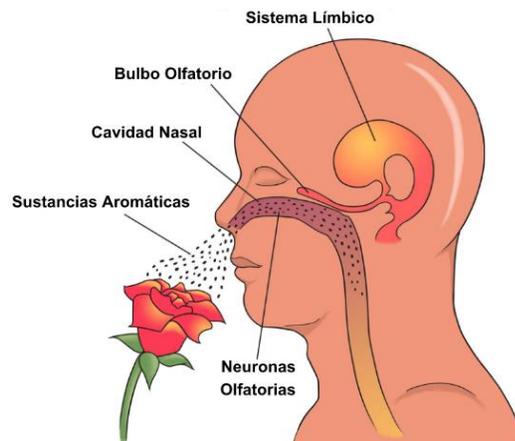


Figura 1-2. Sistema Olfativo (Vokshoor et al., 2013).

Transductores.

La nariz es un transductor, que convierte las moléculas presentes en el aire, en señales eléctricas, que viajan a través de los nervios hasta el cerebro, donde son procesadas para formar olores (Bolton, 2001).

Los transductores son dispositivos que facilitan la transformación de una propiedad física a una propiedad eléctrica, generalmente se presenta como intensidad o voltaje. Un transductor es diferente a un sensor, ya que el sensor presenta una respuesta a las variaciones de propiedad que mide, y el transductor lleva a cabo la transformación de la propiedad física de entrada para dar como respuesta una señal eléctrica (Granada et al., 2015).

1.1.2. Sistema olfativo artificial

Como se describió anteriormente, un sistema olfativo artificial se construye en esencia de dos componentes (ver Figura 1-3): a) un sistema de medición, permite obtener un olor y un sistema de flujo de aire, que permite enviar los compuestos volátiles a una matriz de sensores de gas, estos sensores convierten estas mediciones en señales eléctricas; b) un sistema de información con técnicas de reconocimiento de patrones que permiten la identificación y clasificación de los olores presentes en las muestras medidas (Quicazan S et al., 2011). El fin de crear y trabajar con una matriz de sensores es generar una señal, llamada “huella digital” como respuesta a un olor propio de la muestra.

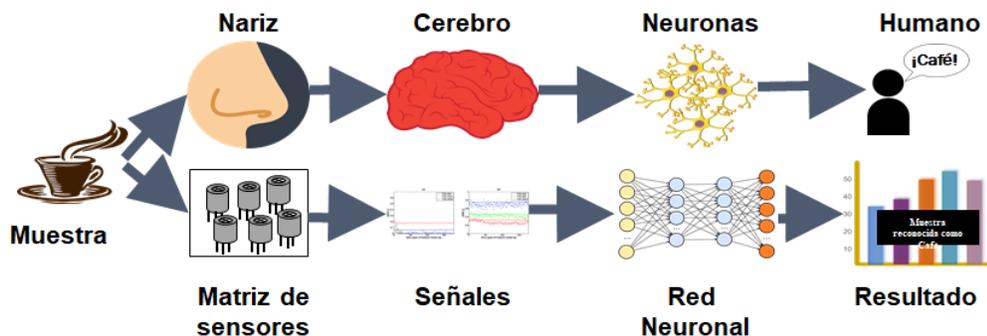


Figura 1-3. Sentido del olfato humano y sistema olfatorio artificial.

En las siguientes secciones, se describen cada uno de los compuestos del sistema olfativo artificial:

Sistema de medición.

Con base en la composición de nariz electrónica que sugieren Durán y Torres (McCranie et al., 2011) el proceso de medición se compone de tres etapas: concentración, medida y reposo. En la Figura 1-4, se explica brevemente cada etapa:

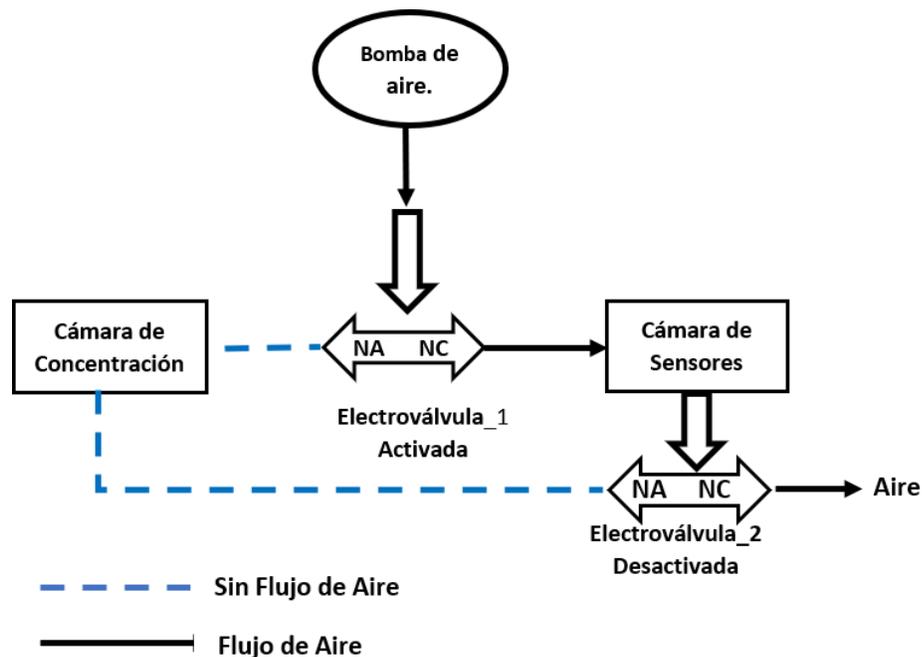


Figura 1-4. Proceso de medición.

▪ Etapa de concentración

Inicia con la concentración de los compuestos volátiles en una cámara libre de factores que modifiquen su composición. Esta cámara contiene un par de electroválvulas de dos vías, una de ellas permite la entrada y la otra la salida, con ello se busca aislar los compuestos del ambiente anterior. El objetivo de esta etapa es dirigir el flujo de aire hacia la matriz de sensores, después limpiarlos y estabilizarlos.

- **Medida**

Esta etapa busca medir la respuesta de los sensores al olor que se ha recibido, se activa la electroválvula 2 la cual permite que el flujo de aire llegue desde la cámara de concentración a la matriz de sensores.

- **Reposo**

Finalmente se busca dejar limpios los sensores y eliminar los posibles residuos de los compuestos volátiles. En la Figura 1-5 se puede observar el proceso para realizar una nueva medición si eso es lo que se requiere.

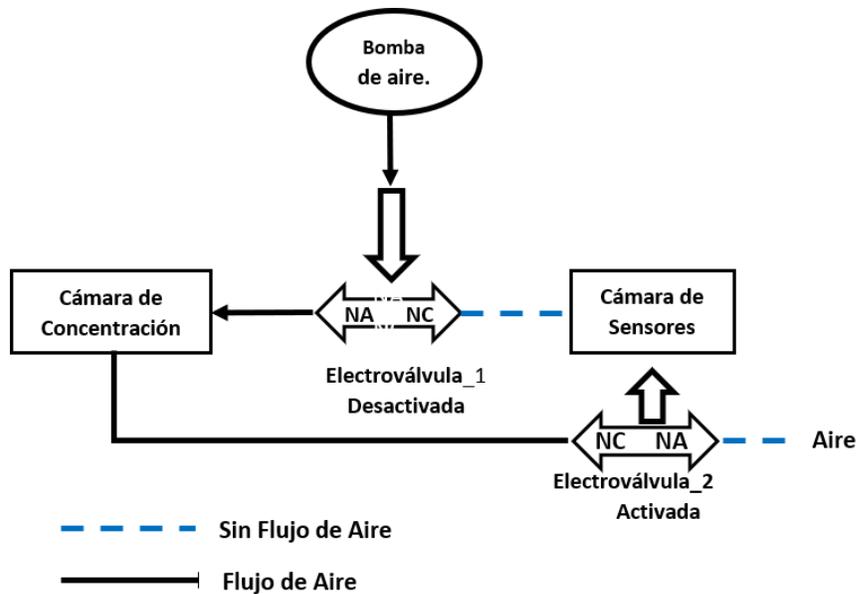


Figura 1-5. Proceso de reposo.

Sistemas de información.

Para el análisis de los datos que se obtienen con la nariz electrónica, se pueden aplicar varias técnicas de reconocimiento de patrones (TRP), algunas de estas técnicas pueden ser supervisadas o no supervisadas. En general, las TRP utilizan varios métodos estadísticos como el análisis de componentes principales, de función discriminante, entre otros (Gutiérrez, 2011)

El uso de técnicas de inteligencia artificial ha permitido obtener un análisis más acertado, así como obtener mejores resultados en las aplicaciones que se han implementado, las técnicas más utilizadas son las redes neuronales artificiales que proporcionaron la correcta ejecución de una manera correcta el monitoreo de la fermentación del yogurt (Cimander et al., 2002), el método de los “k” vecinos más cercanos en el control del crecimiento de bacterias (Schiffman et al., 2000) y el uso de máquinas de soporte vectorial para la detección de tipos de (Khalaf et al., 2008).

Sin embargo, la utilización de estos métodos debe ser revisada cuidadosamente ya que las aplicaciones en el análisis de datos no lineales pueden producir o no los resultados más confiables, por lo cual se sugiere hacer un análisis previo de la información y tratar de reducir la dimensión de la matriz obtenida de las señales de los sensores.

1.2. Antecedentes.

La implementación de los sistemas olfativos artificiales comenzó hacia los años 60's cuando la empresa Bacharach Inc. creó un dispositivo conocido con el nombre de “Sniffer”, compuesto solamente de un solo sensor de gas. Por lo tanto, no podía considerarse como una nariz electrónica (Schaller et al., 1998).

Para los años 80's los investigadores Krishna Persaud y George Dodd publicaron los primeros estudios relacionados con las narices electrónicas y orientaron sus experimentos al entendimiento de cada una de las fases que componen el sentido del olfato, los investigadores utilizaron para el desarrollo de sus dispositivos un conjunto de sensores semiconductores de óxidos metálicos (Gardner et al., 1994).

En 1989, una sesión en el Taller Avanzado sobre Procesamiento de la Información Quimiosensorial de la OTAN se dedicó al tema del olfato artificial y el diseño de un sistema olfativo artificial fue aún más establecido. Por último, la primera conferencia con el tema de las narices electrónicas se celebró en 1990 (Gardner et al., 1994).

Aunque había un avance significativo en el estudio del sistema del olfato, aun existían muchas incógnitas entorno al mismo, los investigadores Richard Axel y Linda Buck publican su trabajo en 1991 sobre los receptores nasales y la organización del sistema olfativo obteniendo en el 2004 el Premio Nobel en Fisiología o Medicina (Guevara, 2005). Esta investigación redefinió la manera de entender el olfato y lo colocó en el centro de la discusión.

En el 2000 Moretti utilizó una nariz electrónica para la identificación de desórdenes fisiológicos en frutos de tomate, ellos observaron las variaciones de las concentraciones de gas carbónico y etileno en relación con el aspecto de los tomates que se analizaban. Los resultados que obtuvieron con la nariz electrónica fueron los esperados y concluyeron que este dispositivo si puede ser utilizado para identificar la calidad de los tomates frescos, además se logró reducir el costo y el tiempo de análisis en comparación con otras técnicas (Pagani et al., 2014).

Para el 2012, en el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia se realizó una investigación con el objetivo de hacer una comparación de los resultados que se obtienen de una nariz electrónica y de los resultados capturados por un panel sensorial en el análisis del comportamiento de calidad de la mora en un lapso de 5 días. La investigación mostró que los resultados de la nariz son más precisos y exactos que los del panel sensorial, ya que el panel no logró detectar cambios en los primeros 3 días del experimento (Carvajal et al., 2012).

La Universidad de Pamplona en el 2013 desarrolla una nariz electrónica a partir de un dispositivo de hardware FPGA con el objetivo principal de sustituir la computadora y crear un sistema que sea más sencillo y portable, además tratando de proporcionar resultados automáticamente. Los experimentos fueron exitosos, obteniendo un porcentaje del 100 % de acierto en la identificación y categorización de los componentes químicos (Gualdrón Guerrero et al., 2013).

Como resultado de los trabajos mencionados anteriormente se han obtenido narices electrónicas eficientes que comenzaron desarrollándose desde computadoras hasta tarjetas electrónicas obteniendo los resultados esperados para sus experimentos. Las condiciones actuales demandan una mayor capacidad de procesamiento, aumento en la portabilidad y soluciones que se adapten a distintos problemas. motivo

1.3. Trabajos relacionados

Valbuena y Medina desarrollaron un sistema capaz de detectar en tiempo real los niveles de gas en un hogar, con el fin de emitir una alarma si éstos sobrepasan los parámetros mínimos y se convierta en una amenaza para los residentes, utilizan una RPi con un módulo GSM/GPRS para realizar las notificaciones del sistema (Valbuena Nuñez et al., 2018).

Tiwari, Sadistap y Mahajan proponen un sistema para monitorear los parámetros ambientales como la humedad, la intensidad de la luz, el gas metano y la temperatura de una manera rentable usando un sistema embebido en RPi. La información detectada por los sensores se digitaliza mediante un convertidor analógico digital, se almacena en la memoria de la tarjeta RPi y finalmente se carga en la plataforma ThingSpeak IoT (Tiwari et al., 2018).

1.4. Aplicaciones comerciales.

Se realizó un estudio de dos aplicaciones exitosas de la nariz electrónica, para analizar el área donde son implementados tanto los beneficios que proporcionan y los resultados obtenidos.

- **E0S507**

Es un instrumento capaz de controlar continuamente la calidad del aire en el ambiente, detectar la presencia de olores y reconocer su procedencia. Es una nariz electrónica, especialmente desarrollada para monitorear los olores ambientales. Los resultados demostraron que el instrumento era capaz de discriminar entre las diferentes sustancias puras que se estaban ensayando y estimar las concentraciones (Eusebio et al., 2016).

Esta nariz electrónica está compuesta de seis sensores MOS diferentes, cuya capa activa consiste típicamente de una mezcla de óxidos metálicos semiconductores (SnO_2 , pero también WO_3 , In_2O_3 , TiO_2 , NbO_x), cuya sensibilidad puede ser modulada a través de la abundancia relativa de cada óxido metálico, así como por la adición de otros componentes que actúan como catalizadores, como oro (Au), plata (Ag), o molibdeno (Mo).

Este instrumento también está equipado con un sistema que ajusta la humedad del aire de la muestra a un valor fijo, calculado para optimizar la capacidad de regulación del instrumento, basándose en la humedad ambiental externa, esto representa una mejora muy importante, ya que las condiciones atmosféricas variables, especialmente la humedad, son uno de los principales aspectos críticos para el monitoreo de olores ambientales que normalmente implica su uso al aire libre.

- **A-NOSE**

Consiste en una nariz electrónica desarrollada para realizar el análisis de tipos de café colombianas en Almacafé en Cúcuta, Colombia (Rodríguez et al., 2010). Su principal objetivo es la detección y clasificación de defectos en las muestras. Los resultados revelan que la tecnología puede ser una herramienta útil para el control de calidad en la evaluación de la excelencia del café colombiano producido por la Federación Nacional de Cafeteros.

La "A-NOSE" se compone principalmente de cuatro partes con diferentes funciones, éstas son descritas a continuación:

La primera es preparar la adecuación de la mezcla de gases del muestreo. Esto se hace a través de la cámara de concentración. La dinámica del sistema incluye dos válvulas de tres vías y una bomba de aire, que se utilizan en las tres etapas del proceso: concentración, medición y limpieza. Se controlan por medio de un microcontrolador, que dirige simultáneamente una pantalla LCD alfanumérica que visualiza los mensajes correspondientes a cada etapa.

La segunda parte del dispositivo es desarrollada por varios sensores de gas que detectan los volátiles. En este caso es una matriz de ocho sensores de gas de óxido metálico fabricados por FIGARO Inc. (Sensores TGS) y FIS Inc. (sensores SP).

La tercera parte está compuesta por los sistemas de control y adquisición de datos, esto se realiza mediante un dispositivo DAQ USB6009 que se conecta al puerto USB. El dispositivo utiliza ocho canales de entrada analógicos para adquirir señales de ocho sensores de gas y utiliza tres canales configurados como entradas y salidas digitales para proporcionar comunicación con el microcontrolador.

La última parte del equipo es el software de extracción de características principales o marca de cada olor mediante redes neuronales artificiales y análisis de componentes principales.

1.5. Justificación

Actualmente, los sistemas que se utilizan para brindar protección en espacios de trabajo son los orientados de detección de gases, pero no es posible identificar si este gas proviene de una fuente natural o de una mezcla orgánica (Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2008). Además, sólo se encuentra diseñado para detectar metano y no otros gases. Para esta situación, las narices electrónicas superan esta limitación, porque su procesamiento está basado en un proceso similar a la nariz humana, en donde su interpretación de las señales es un conjunto de datos, lo cual permite reconocer mezclas orgánicas. A su vez, puede aprender a discriminar y/o reconocer nuevos olores.

El estudio acerca de las aplicaciones y desarrollo de los sistemas olfativos artificiales, permiten distinguir con claridad la importancia que presentan para la resolución de problemas concretos, en un área de concentración específica.

Este proyecto de investigación busca desarrollar un dispositivo innovador como propuesta de sistema olfativo artificial que emita una alarma cuando se detecte una concentración de compuestos volátiles tóxicos que amenacen con la seguridad de las personas presentes en el espacio de trabajo y además que se pueda adaptar y ajustar para ser utilizado en otras áreas de interés.

Capítulo 2 Objetivos

2.1 Objetivo general.

Desarrollar un sistema olfativo artificial que permita reconocer los compuestos volátiles en espacios de trabajo cerrados, haciendo el uso de redes neuronales en una matriz de sensores de gases para garantizar la seguridad de los trabajadores.

2.2 Objetivos específicos.

- Desarrollar un análisis y selección de compuestos volátiles con mayor número de intoxicaciones.
- Desarrollar un análisis y selección sensores capaces de identificar los compuestos volátiles de la investigación.
- Determinar las características metodológicas que definen el funcionamiento de los sensores.
- Realizar la caracterización de sensores mediante una celda de pruebas con una matriz de sensores de gas, estableciendo las reglas del ambiente.
- Implementar una red neuronal capaz de clasificar las mezclas producidas por los gases.
- Evaluar el rendimiento del sistema olfativo artificial en la localización de la fuente de olor.

2.3 Finalidad.

Se pretende desarrollar un sistema olfativo artificial para proveer un dispositivo que permita conocer la calidad del aire en un espacio de trabajo, mediante la clasificación de las medidas que obtengan los sensores de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e hidrogeno (H₂).

Capítulo 3 Propuesta de solución

En este capítulo se describe la propuesta para la creación de un sistema olfatorio artificial (SOA); se describen los transductores, las principales características de los sensores y el sistema electrónico que satisface el problema presentado, además se incluye el sistema de procesamiento con el que son tratadas las señales de los sensores y los ajustes de regresión que se utilizaron para la calibración.

Los SOA son dispositivos que simulan el funcionamiento del sistema olfato humano, al respirar los compuestos volátiles suspendidos en el aire son percibidos por los receptores nasales y para cada compuesto se envía una señal al cerebro que identifica el olor. Son muchas las áreas en las que se puede utilizar un SOA ya que se puede configurar para la identificación de los compuestos volátiles que se desea medir o clasificar, la implementación depende de la finalidad del proyecto o va encaminada a los experimentos que el investigador realice.

Uno de los principales componentes para crear un SOA es su sistema electrónico que debe componerse de sensores, transductores y elementos electrónicos que permitan obtener, convertir los compuestos volátiles en señales entendibles y fáciles de procesar, uno de los retos fue la implementación en una Raspberry Pi.

Es importante que el sistema sea capaz de interpretar y adquirir las señales correctamente por lo que la creación de los sistemas de procesamiento y adquisición de datos deben seguir las especificaciones y configuraciones que se describen en este capítulo.

3.1. Sistema olfativo artificial.

Los SOA son dispositivos que simulan el funcionamiento del sistema olfato humano, al respirar los compuestos volátiles suspendidos en el aire son percibidos por los receptores nasales y para cada compuesto se envía una señal al cerebro que identifica el olor. El sistema olfativo artificial los receptores nasales son simulados por un sistema electrónico compuesto por una matriz de sensores de gas que reaccionan a las propiedades químicas volátiles presentes en el aire produciendo un cambio en las propiedades de los sensores, enviando una señal a un sistema de procesamiento de señales que examinará los rasgos más característicos de cada aroma y presenta el resultado mediante el análisis de un algoritmo de clasificación de patrones.

Los SOA se han convertido en soluciones portables, usables y económicas, incrementando el número de aplicaciones, como la detección de enfermedades por el aliento, la calidad de los alimentos, la presencia de explosivos o la medición de gases tóxicos en el ambiente.

Aquellos dispositivos cuyo objetivo es realizar un análisis de aromas, mezclas complejas de gases o compuestos volátiles, son considerados como SOA. Estos dispositivos se componen de un sistema de muestreo, un conjunto de sensores químicos no selectivos que forman una matriz y una unidad de adquisición o procesamiento de datos, tratando de emular el sistema olfativo humano(Hui, 2016).

En esta investigación se propone el desarrollo de un SOA capaz de detectar compuestos volátiles tóxicos, utilizando una matriz de sensores de gas de la serie MQX y un sensor de temperatura y humedad, un convertidor analógico digital, una RPi 3 modelo B, una pantalla táctil y el uso de un algoritmo para el reconocimiento de patrones.

3.1.1. Transductores.

Los transductores son dispositivos que facilitan la transformación de una propiedad física a una propiedad eléctrica, generalmente se presenta como intensidad o voltaje. Un transductor es diferente a un sensor, ya que el sensor presenta una respuesta a las variaciones de propiedad que mide, y el transductor lleva a cabo la transformación de la propiedad física de entrada para dar como respuesta una señal eléctrica (Bolton, 2001).

El proceso por el cual una señal analógica se convierte en una señal digital se considera como digitalización (Bagant, 2017), que consiste en la representación de la forma de una onda mediante números.

En el caso de la Raspberry Pi, en el caso de la Raspberry PI, es necesario el uso de un convertidor analógico digital para la manipulación de estas señales, adquiriendo la información de los sensores mediante el protocolo SPI (McGrath, 2016).

3.1.2. Adquisición de datos.

Una señal se define como cualquier magnitud física que varía con el tiempo, el espacio o cualquier otra variable o variables independientes (Soria Olivas et al., 2007). La temperatura, humedad, presión, sonido, entre otras, son señales analógicas que requieren de transductores para ser convertidas en señales eléctricas y después a señales digitales, este proceso que puede ser realizado con la ayuda de un convertidor analógico digital. Una vez obtenidas las señales estas son procesadas para ser almacenadas y exhibidas según sea la aplicación en las que serán utilizadas.

Para la adquisición de los datos se utiliza el convertidos analógico digital microchip MCP3008 de ocho canales (CH0 – CH7) con una resolución de 10 bits, utilizando la interfaz SPI. Utiliza un rango de voltaje entre 2.7v a 5.5v para su correcta operación (Microchip, 2008), este convertidor aparece en la Figura 3-1.

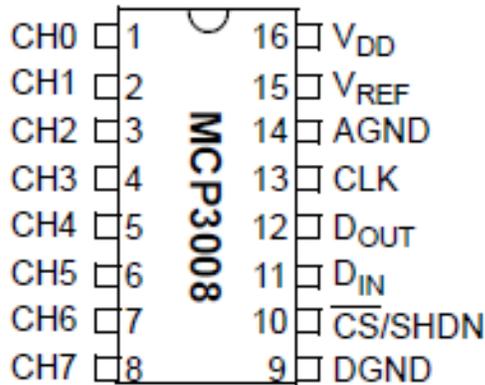


Figura 3-1. Descripción del convertidor analógico digital MCP3008 (Microchip, 2008).

La comunicación entre la Raspberry Pi y el convertidor MCP3008 permite que la información sea enviada a partir del Modo 1 (0,1) SPI, donde el reloj se encuentra en estado lógico bajo y en cada transición de alto a bajo se envía la información. El canal CH0 debe configurarse como se muestra en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Configuración de canal 0 del MCP3008

Bits de Control				Selección del Canal
single / diff	D2	D1	D0	
1	0	0	0	CH0

Como se muestra en la Figura 3-2, es necesario habilitar el módulo SPI en las configuraciones generales de la Raspberry Pi para permitir la comunicación con el convertidor MCP3008.

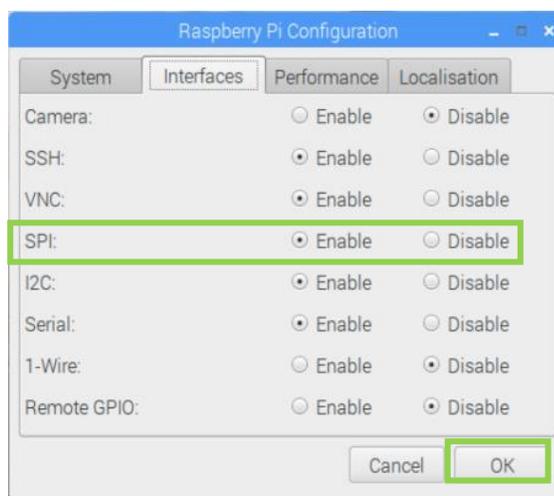


Figura 3-2. Configuración SPI Raspberry Pi 3.

En la Tabla 3-2 se muestra cómo se debe llevar a cabo la conexión de pines del GPIO de la Raspberry Pi y del MCP3008, en la Figura 3-3 se ilustra la conexión entre los pines del GPIO de la Raspberry Pi 3 modelo B y el convertidor MCP3008.

Tabla 3-2. Conexión entre pines GPIO Raspberry Pi 3 y MCP3008

Numero de pin de MCP3008	Nombre de pin MCP3008	No. pin GPIO	
		Raspberry Pi 3 Modelo B	Raspberry Pi 3 Modelo B
16	VDD	1	3.3 v
15	VREF	17	3.3 v
14	AGND	20	GND
13	CLK	23	GPIO11 SPI0_SCLK
12	DOUT	21	GPIO10 SPI0_MISO
11	DIN	19	GPIO9 SPI0_MOSI
10	CS	24	GPIO8 SPI0_CE0_N
9	DGNG	25	GND

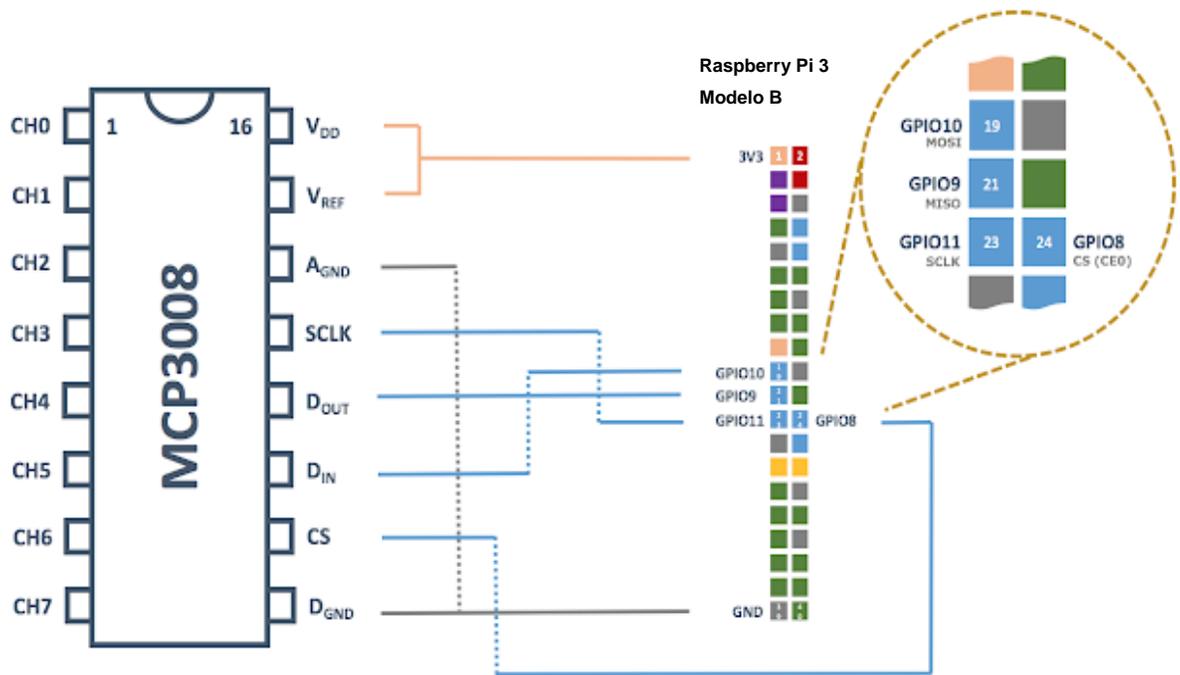


Figura 3-3. Conexión física entre GPIO Raspberry Pi 3 y MCP3008 (McGrath, 2016).

3.1.3. Sistema de procesamiento.

Para el procesamiento de las señales se utiliza la tarjeta electrónica Raspberry Pi 3 modelo B, como se mencionó anteriormente permite la conexión al convertidor analógico digital MCP3008 mediante el protocolo SPI.

La Raspberry Pi 3 (Figura 3-4) es un pequeño ordenador económico desarrollado con un circuito integrado Broadcom BCM2837 con procesador ARMv8 con velocidad de hasta 1.2 GHz, un GPU Video Core 4 3D y 1 GB de memoria RAM. Además cuenta con una salida de vídeo y audio a través de un conector HDMI, una salida de vídeo compuesto, una salida de audio, cuatro puertos USB, una conexión Ethernet 10/100 y una conexión inalámbrica (McGrath, 2016).



Figura 3-4. Raspberry Pi 3 modelo B. Fuente: Raspberry Pi (McGrath, 2016).

Se instaló en una tarjeta SD con 16 GB de almacenamiento el sistema operativo Raspbian de Linux que permite la interacción de forma gráfica con la Raspberry Pi 3, de esta forma se facilita la programación para la recuperación y procesamiento de las señales analógicas, así como la exhibición de los datos obtenidos de las muestras. En el Anexo 1, se describe a detalle la instalación, configuración y actualización de la Raspberry Pi 3.

3.1.4. Armazón para montaje de sensores.

Es importante proteger el sistema electrónico y realizar un instrumento que facilite el montaje de los sensores, por lo que se realizó un armazón en 3D que se compone de los siguientes elementos:

- Caja contenedora con un espacio para colocar el circuito electrónico, ranuras para insertar la tarjeta con los sensores, un espacio para realizar mediciones de compuestos volátiles y una ranura para integrar un ventilador que funcionará como extractor. Se puede visualizar en la parte izquierda de la Figura 3-5a.
- Tapa para asegurar los componentes y sellar el espacio para las mediciones, mostrada en la derecha de la Figura 3-5b.
- Una tarjeta de montaje que permite intercambiar y montar 5 sensores de gas y un sensor de temperatura y humedad, se puede observar en la Figura 3-5c.

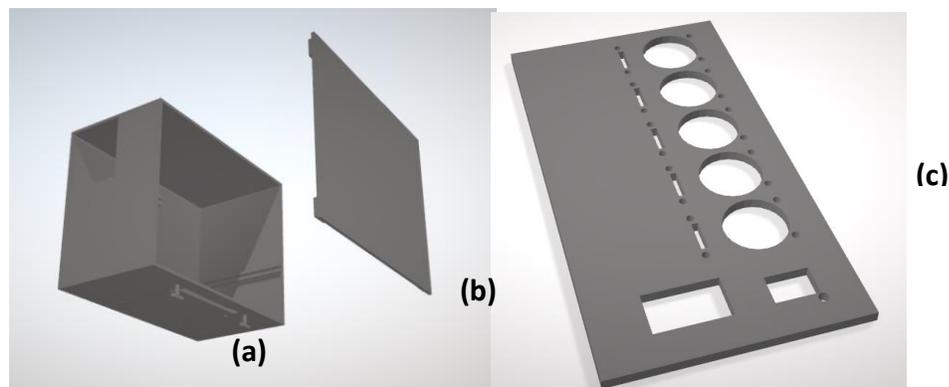


Figura 3-5. (a) Modelo 3D de armazón para montaje de circuito electrónico, tarjeta de sensores y ventilador, (b) tapa del armazón y (c) modelo 3D de tarjeta para montaje de sensores de gas y un sensor de temperatura y humedad.

El diseño y elaboración del armazón se basó en los procesos que realiza el sistema de medición, etapa de concentración, medición y reposo descritos en el apartado Sistema olfativo artificial en el capítulo 1.

3.1.5. Sistema de exhibición.

La mayoría de los sistemas actuales muestran los resultados en pantallas LCD donde solo se visualizan y permiten muy poca interacción con el usuario, por tal motivo en este proyecto se propone mostrar los resultados obtenidos durante la adquisición de datos y procesamiento de señales serán mostrados en una pantalla táctil de siete pulgadas.

Se pretende mejorar la experiencia del usuario al interactuar con este dispositivo, por lo cual la pantalla táctil permitirá desarrollar una interfaz de usuario simple que contenga los elementos de interés para el usuario y facilite la comunicación entre los usuarios y el sistema y sobre todo que permita realizar configuraciones de manera sencilla y práctica sin requerir de una capacitación.

La pantalla Raspberry Pi es de 7 pulgadas táctil con dimensiones de 194mm x 110mm x 20mm, una resolución: 800 x 480 píxeles y táctil capacitivo de 10 puntos. Se conecta a la Raspberry Pi con el puerto DSI y prácticamente permite utilizar a la Raspberry Pi en una tableta táctil (McGrath, 2016).



Figura 3-6. Pantalla táctil Raspberry Pi 7 pulgadas (Element 14, 2009).

3.2. Sistema electrónico.

Es un sistema compuesto por un conjunto de circuitos relacionados entre sí, que trabajan a la par para generar un resultado a ciertas características del ambiente, es necesario conocer los componentes de un sistema electrónico para entender su funcionamiento, por lo tanto, es necesario dividirlo en las siguientes partes:

1. **Entradas:** Son aquellos sensores o transductores que interactúan con las propiedades químicas del ambiente y las convierten en señales analógicas que generan un aumento de voltaje para que puedan ser interpretadas por el procesador. En este proyecto de investigación se utilizan un sensor de temperatura y humedad y 6 sensores de gas.
2. **Procesadores:** Son instrumentos electrónicos capaces de transformar una señal de voltaje proveniente de los sensores a una señal digital que representa el valor de lectura de una propiedad química. En este proyecto se utiliza un convertidor analógico digital microchip 3008 con capacidad de lectura suficiente para el desarrollo del proyecto.
3. **Salidas:** Son los dispositivos que permiten la visualización de las señales en valores comprensibles para los usuarios del sistema. En proyecto se utiliza una pantalla táctil de siete pulgadas que permite la visualización de los valores mediante una interfaz gráfica.

3.3. Sensores.

Los sensores son la unidad electrónica que convierte una magnitud física o propiedad química en una señal eléctrica, dentro de sus múltiples aplicaciones se encuentra la grabación de sonido, la captura de fotografías, la medición de la temperatura del cuerpo, etc.

La mayoría de los sensores presentan respuestas físicas y químicas con los compuestos volátiles. Los sensores utilizados en la nariz electrónica deben cumplir una serie de características similares a la nariz humana, estas

características son: poco susceptible a la humedad y la temperatura; deben ser estables y comportarse de manera uniforme durante la medición, deben reaccionar en el menor tiempo posible y ser fáciles de calibrar (Schaller et al., 1998).

Los sensores, regularmente emiten una reacción típica ante un cambio de alguna propiedad física, por ejemplo, voltaje, conductividad o corriente. Los tiempos de respuesta varían entre segundos y minutos, y dependiendo del estímulo que se reciba de los componentes volátiles de la muestra se obtendrá el valor.

Existen distintos tipos de sensores clasificados por el principio físico que son capaces de medir, como la temperatura, humedad y los gases necesarios para este proyecto. En los siguientes apartados se describen los sensores seleccionados para el desarrollo de este proyecto.

Actualmente existen una gran cantidad de técnicas que permiten el análisis de la composición química de muestras de gases, se podrían incluir la espectrometría de masas o la cromatografía de gases, sin embargo, las aplicaciones de los SOA limitan el tipo de sensores que se deben utilizar (Russell, 2000). A continuación, se describen las principales características que se deben considerar al elegir los sensores:

- Alta sensibilidad: Se refiere a la capacidad del transductor de percibir los cambios mínimos en los compuestos volátiles del aire.
- Respuesta rápida: El tiempo que toma el transductor para reaccionar ante la muestra de compuestos volátiles actual.
- Bajo consumo de energía: Elegir aquellos transductores con el consumo de energía más eficiente.
- Robustez: Transductores capaces de resistir movimientos continuos sin alterar los valores de las muestras actuales.
- Tamaño compacto: Selección de transductores de acuerdo al espacio disponible en el dispositivo.

A partir de las características mencionadas anteriormente se seleccionaron 6 sensores de la serie MQX y un sensor de temperatura y humedad para satisfacer el objetivo de esta investigación, en la Tabla 3-3 se describen las características de los sensores:

Tabla 3-3. Descripción de la composición de la matriz de sensores.

No.	Sensor	Variable Física	Rango de sensibilidad	Voltaje
1	HMZ – 433A	Temperatura	0°C a 60°C	5V
		Humedad	30% a 90% HR	5V
2	MQ – 2	Humo	200 a 10000 ppm	5V
3	MQ – 4	Monóxido de carbono (CO)	200 a 10000 ppm	5V
4	MQ – 8	Hidrogeno	200 a 10000 ppm	5V
5	MQ – 9	Metano	00 a 10000 ppm	5V
6	MQ – 135	Dióxido de Carbono (CO ₂)	100 a 1000 ppm	5V

HMZ-433A

Sensor que permite la medición de la humedad relativa en un rango de 20% a 100% (ver Figura 3-7). y de 0° a 60 ° centígrados la medición de la temperatura (ver Figura 3-8). Sus características principales son: económico, entrega una salida lineal de voltaje para la lectura de humedad que va de 0 a 3.3 volt, tiene un termistor integrado del tipo NTC para medir la temperatura, tamaño reducido, se alimenta con 5 voltios y un bajo consumo de corriente

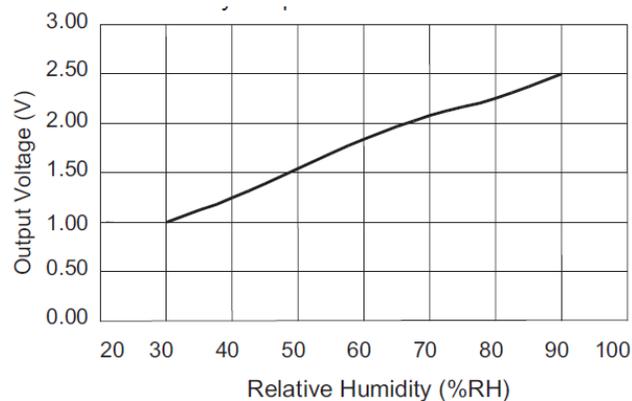


Figura 3-7. Características de sensibilidad para la Humedad (RFE International, 2006).

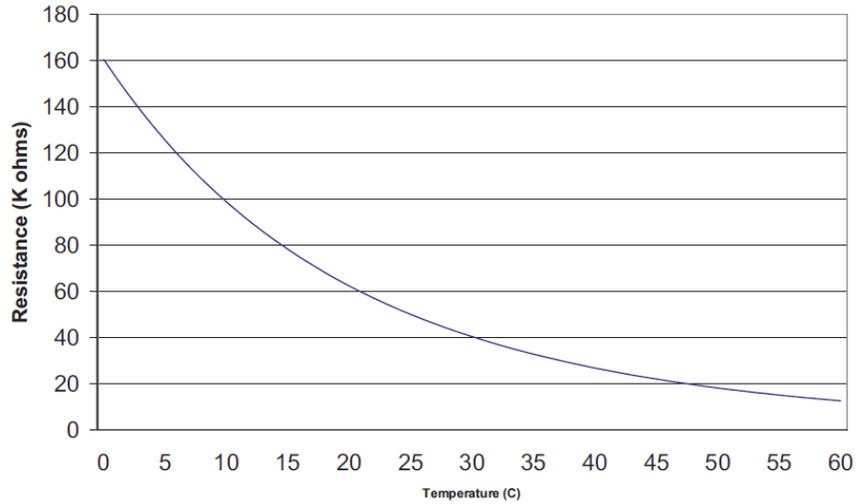


Figura 3-8. Características de sensibilidad para la Temperatura (RFE International, 2006).

MQ-2

Es un sensor de gas analógico, regularmente es utilizado en equipos de detección de fugas de gas en los mercados de consumo e industria. Este sensor está diseñado para medir GLP, i-butano, propano, metano, alcohol, hidrógeno, humo. Tiene una alta sensibilidad y un tiempo de respuesta rápido. Sus principales características son su interfaz: es analógica, amplio alcance de detección, circuito simple y vida estable y larga. El rango de sensibilidad es de 200 a 10000 ppm que se observa en la Figura 3-9 a.

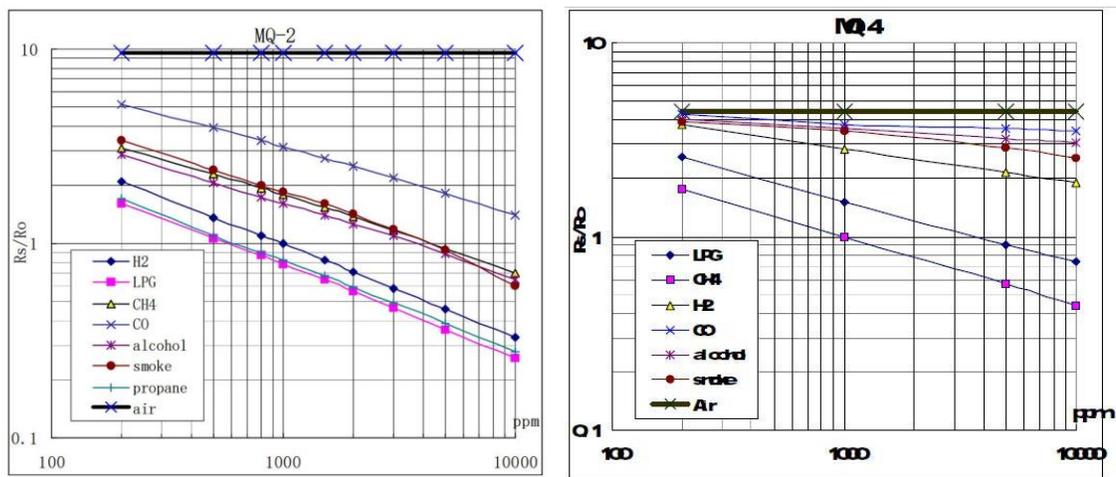


Figura 3-9. (a) Características de sensibilidad del MQ-2 y (b) del sensor MQ-4 (Electronics, 2006).

MQ-4

Este es un sensor capaz de detectar gas metano (gas natural) en el aire en concentraciones desde las 300 hasta las 10000 ppm (Figura 3-9 b). Este sensor tiene una alta sensibilidad y un tiempo de respuesta rápido. La salida del sensor tiene una resistencia analógica. Sus características son temperatura de funcionamiento-10 a 50 °C, consumo de potencia menos de 900 mW, integrado a un comparador de tensión LM393 y potenciómetro para calibrar la salida digital, alta sensibilidad al gas metano (gas natural), monóxido de carbono (CO), amplio rango de detección y funcionamiento estable, larga vida, bajo costo.

MQ-7

Es un sensor para la detección de monóxido de carbono (CO) para medir la concentración de este gas en el aire. Puede medir concentraciones de gas monóxido entre 20 a 2000 ppm (Figura 3-10 a). Posee una alta sensibilidad y rápido tiempo de respuesta, es muy fácil además realizar la interfaz del sensor con un microcontrolador. La sensibilidad de la señal digital puede ajustarse mediante un potenciómetro colocado en el módulo.

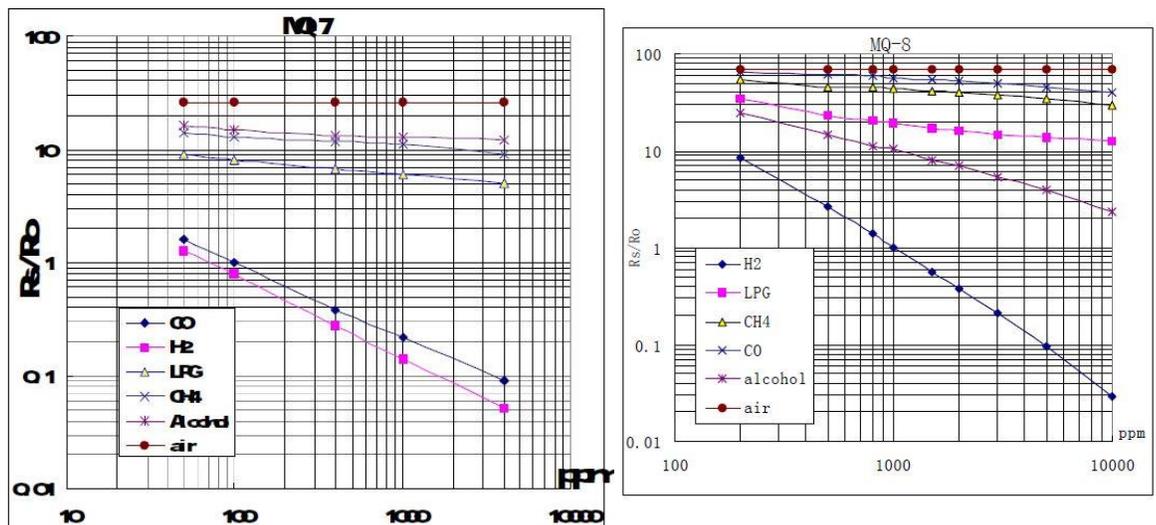


Figura 3-10. (a) Características de sensibilidad del MQ-7 y (b) del sensor MQ-8 (Electronics, 2006)

MQ-8

Este sensor tiene alta sensibilidad al hidrógeno (H_2) y menos sensibilidad al alcohol y humo (ver Figura 3-10 b). El gas de hidrógeno es altamente inflamable y arde en el aire en un rango muy amplio de concentraciones. La sensibilidad del sensor puede ajustarse con el potenciómetro. La salida es proporcional a la densidad del gas. Sus principales características son interfaz analógica, alta sensibilidad al hidrógeno (H_2), baja sensibilidad al alcohol, LPG, humos, larga vida y estable, tamaño: 40x20 mm (1.57 "x0.79") y peso 10g.

MQ-9

Este sensor de gas es un semiconductor que detecta la presencia de Monóxido de carbono en concentraciones de 10 hasta 1000 ppm y gas combustible desde 100 hasta 10000 ppm (Figura 3-11). Este sensor puede operar a temperaturas de -10 hasta 50°C y consume menos de 150mA a 5V. Sus características son sensor semiconductor, buena sensibilidad a CO / gas combustible, alta sensibilidad al metano, propano y CO, larga vida útil y bajo costo.

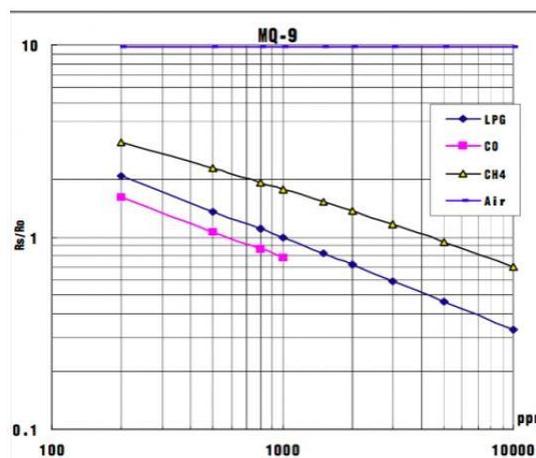


Figura 3-11. Características de sensibilidad del MQ-9.

MQ-135

Se utilizan en equipos de control de calidad del aire para edificios y oficinas, son adecuados para la detección de amoníaco (NH_3), óxidos de nitrógeno (NO_x), alcohol, sulfuros, benceno (C_6H_6), dióxido de carbono (CO_2), humo y otros gases nocivos. Es sensible en proporciones similar a los gases mencionados, con lo que podemos determinar si el aire está limpio. Sus características son voltaje de trabajo de 5V, respuesta rápida, con una larga vida y estabilidad fiable, un rango de detección de 10 a 1000 ppm (Figura 3-12) y un circuito de accionamiento simple.

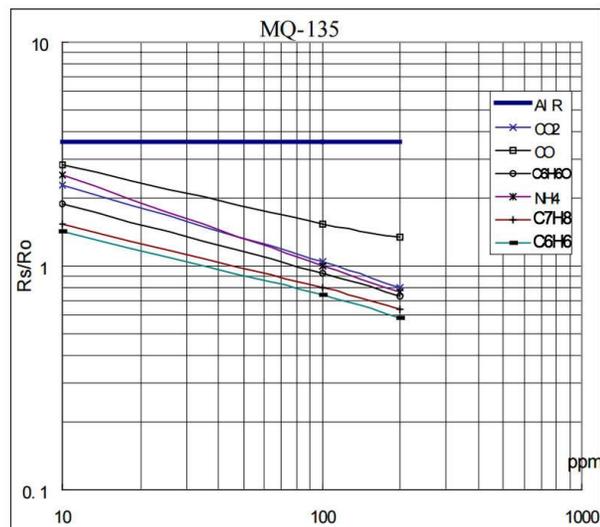


Figura 3-12. Características de sensibilidad del MQ-135.

3.4. Sistema de procesamiento de señales.

Este sistema es capaz de interpretar y manipular las señales analógicas recibidas por los sensores, después transformadas en señales digitales por el convertidor analógico digital MCP3008 presente en el sistema electrónico. Además, permite el procesamiento de los valores de voltaje para el cálculo del valor de la magnitud física medida.

Este sistema se divide en tres procesos: desarrollo del instrumento de adquisición, recolección y análisis de datos, dichos procesos son necesarios para calcular y mostrar los valores que los sensores están midiendo. Cada uno de los procesos se describen en las siguientes secciones.

3.4.1. Desarrollo del instrumento de adquisición de datos

Para el desarrollo de este instrumento se deben considerar todas las partes que componen el SOA: el hardware, los sensores y el software de aplicación para adquirir, analizar y presentar la información correcta al usuario.

A continuación, se describen las principales características que se sugieren para el diseño de estos instrumentos propuestas por Fernando Ramírez (Ramírez Neyra, 2009):

- Especificación de las entradas analógicas: se determina la precisión y capacidad del dispositivo en la adquisición de datos. Es necesario especificar el número de canales, la velocidad de muestreo, la resolución y el rango de entrada.
- Número de canales: se refiere al número de entradas diferenciales y entradas de terminal sencilla. Las entradas de terminal sencilla comparten una terminal de tierra, en cambio con entradas diferenciales, cada entrada requiere una única referencia a tierra para reducir el ruido captado regularmente por una sola terminal.
- Velocidad máxima de muestreo: determina la velocidad con la que se realizan las conversiones de las señales. Entre mayor sea la velocidad de muestro, mejor será la representación de la señal original.

- Resolución de los datos: se refiere a los números de bits que el ADC necesita para la representación de la señal analógica. Si la resolución es mayor pueden detectarse cambios mínimos de voltaje en una señal.

3.4.2. Recolección de datos

El MCP3008 es de 10 bits, por lo que puede mostrar valores en un rango de números de 0 a 1023 (2 a la potencia de 10). Una lectura de 0 significa que la entrada es 0V y una lectura de 1023 significa que la entrada es 5V. El rango de 0-5V equivaldría a los rangos de sensibilidad que se muestran en la Tabla 3-3.

3.4.3. Análisis de datos

Se realizaron lecturas con los sensores en diferentes condiciones para comprobar que los sensores funcionaran correctamente y se procedió a calcular los coeficientes de las ecuaciones para calibrar los sensores y obtener el valor correspondiente a la magnitud física que miden. En las siguientes secciones se describe el cálculo de los coeficientes de los sensores.

Sensor de temperatura y humedad HMZ-433A

Para la calibración del sensor de humedad se realizó un ajuste de regresión lineal mediante el método de mínimos cuadrados, ya que la variación de la humedad relativa es totalmente lineal, se graficaron (Figura 3-13) los puntos obtenidos de la hoja de datos.

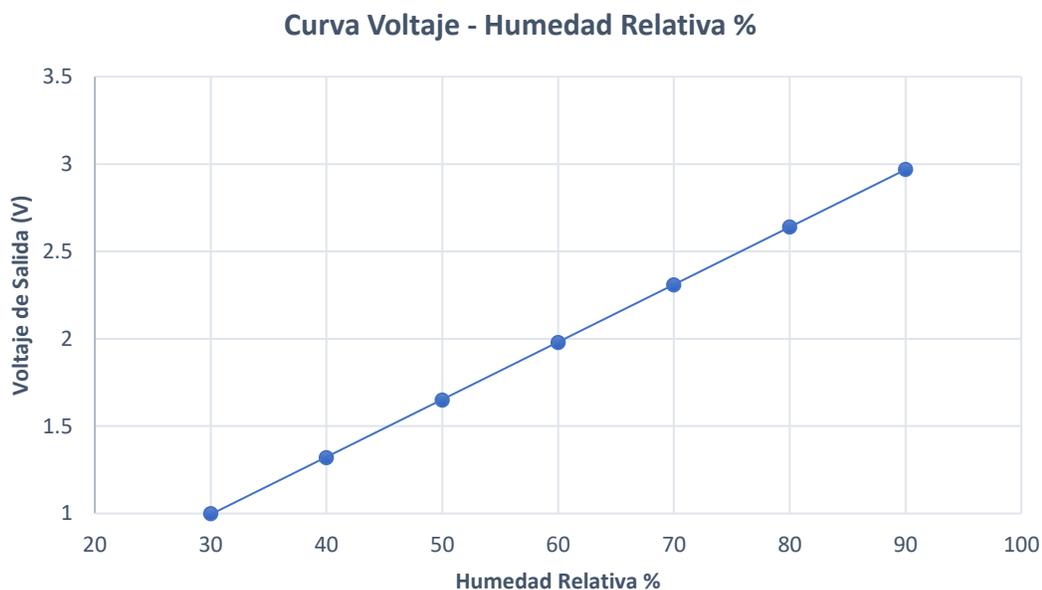


Figura 3-13. Regresión lineal para la humedad relativa .

Para realizar el ajuste de curvas por regresión lineal se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 3-4 :

Tabla 3-4. Puntos de la curva de sensibilidad del sensor HMZ433A - Humedad Relativa %.

No.	VOLTAJE	HUMEDAD RELATIVA%
1	30	1
2	40	1.32
3	50	1.65
4	60	1.98
5	70	2.31
6	80	2.64
7	90	2.97

Para obtener los coeficientes a y b se utilizaron las ecuaciones dadas por el método de mínimos cuadrados para regresión lineal.

$$Y = AX + B \tag{3-1}$$

Donde:

$$Y = \text{Voltaje (V)}$$

$$X = \text{Humedad Relativa (\%)}$$

Para el cálculo de los coeficientes a y b, se utilizaron las siguientes formulas:

$$A = \frac{n \sum_1^n X_i Y_i - (\sum_1^n X_i)(\sum_1^n Y_i)}{(n \sum_1^n X_i^2) - (\sum_1^n X_i)^2} \quad (3-2)$$

$$B = \frac{\sum_1^n Y_i - A \sum_1^n X_i}{n} \quad (3-3)$$

Después se procedió a obtener los valores para el cálculo de los coeficientes

Tabla 3-5 Calculo de variables para humedad relativa.

N	X (VOLTAJE)	Y (HUMEDAD RELATIVA)	X*Y	X ²
1	30	1	30	900
2	40	1.32	52.8	1600
3	50	1.65	82.5	2500
4	60	1.98	118.8	3600
5	70	2.31	161.7	4900
6	80	2.64	211.2	6400
7	90	2.97	267.3	8100
$\sum 7$	420	13.87	924.3	28000
\bar{X}	46.667	$\bar{X} * \bar{Y} = 102.7$		

Por último, se sustituyeron los valores en las ecuaciones 3-2 y 3-3:

$$A = \frac{(7 * 924.3) - (420 * 13.87)}{(7 * 28000) - (420)^2} \quad A = \mathbf{0.0329}$$

$$B = \frac{13.87 - (0.0329 * 420)}{7} \quad B = \mathbf{0.0079}$$

Entonces se sustituyen los valores encontrados en la ecuación 3-1 y se hace un cambio de variables

$$V = 0.0329 * HR + 0.0079$$

Despejamos HR para obtener la ecuación de la humedad relativa:

$$HR = \frac{V - 0.0079}{0.0329}$$

Para el cálculo de la temperatura se tomaron puntos de la curva de resistencia contra temperatura de la hoja de datos del sensor y se obtuvo la Tabla 3-5.

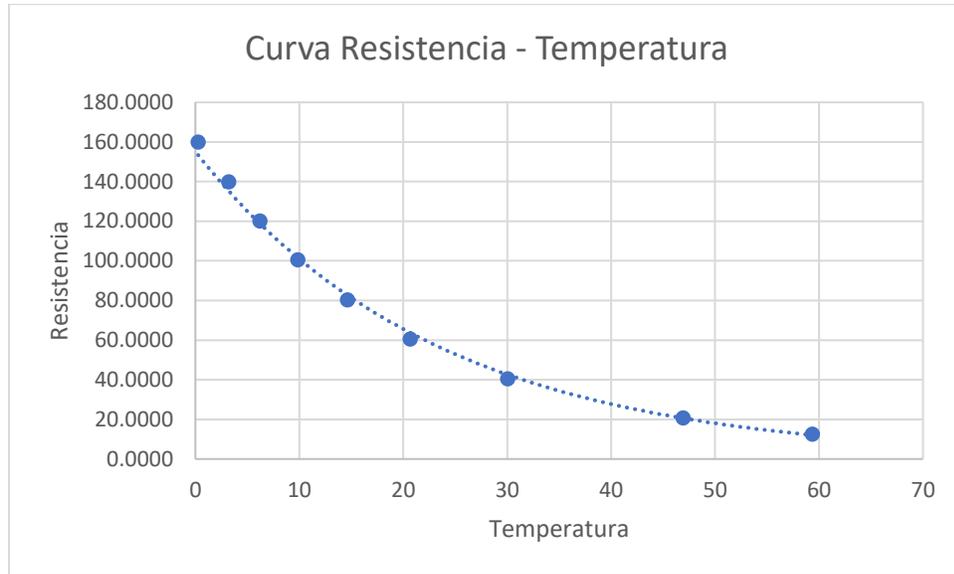


Figura 3-14. Regresión exponencial para el cálculo de la temperatura.

Para realizar el cálculo de los coeficientes a y b se escribieron los puntos de la Figura 3-14 en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Puntos de la curva de sensibilidad del sensor HMZ433A - Temperatura.

N	Temperatura	Resistencia
1	0	160.56
2	10	98.71
3	20	62.32
4	25	50.00
5	30	40.30
6	40	26.75
7	50	18.80
8	60	12.50

Se ajustaron los datos mediante el método de ajuste de curvas exponencial de la forma:

$$Y = Ae^{Bx} \quad (3-4)$$

Tomando logaritmos en (3-4):

$$\ln(Y) = \ln(A) + \ln(e^{Bx}) \quad (3-5)$$

Haciendo un cambio de variables en (3-5)

$$C = \ln(Y), X = \ln(A), B = \ln(e^{Bx})$$

Se obtiene una relación lineal entre las nuevas variables X y Y:

$$C = A + BX \quad (3-6)$$

Ahora se calcula la recta de regresión para los puntos de la Tabla 3-6, para lo que se utilizan las correspondientes ecuaciones normales de Gauss:

$$B = \frac{n(\sum XC) - (\sum X * \sum C)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (3-7)$$

$$A = \bar{C} - B \bar{X} \quad (3-8)$$

Se calculan los valores necesarios para las ecuaciones 3-7 y 3-8 en la Tabla 3-7

Tabla 3-7. Calculo de variables para temperatura.

	Temperatura X	Resistencia Y	C	X*C	X ²
1	0	160.56	5.0787	0.00	0.00
2	10	98.71	4.5922	45.92	100.00
3	20	62.32	4.1323	82.65	400.00
4	25	50.00	3.9120	97.80	625.00
5	30	40.30	3.6964	110.89	900.00
6	40	26.75	3.2865	131.46	1600.00
7	50	18.80	2.9339	146.69	2500.00
8	60	12.50	2.5257	151.54	3600.00
\sum	235	469.94	30.1576	766.96	9725.00
\bar{X}	29.375	$\bar{C} =$	3.769		

A partir de los datos de la Tabla 3-7 y la Tabla 3-8 se sustituyen los valores en (4) y (5) se obtienen los siguientes resultados:

$$B = \frac{8(\sum 766.96) - (\sum 235 * \sum 469.94)}{8 \sum 9725^2 - (\sum 235)^2}$$

$$B = \frac{-951.3907}{22575} \quad \quad \quad \mathbf{B = -0.0421}$$

$$A = 3.7697 - (-0.0421 * 29.375)$$

$$A = \exp(5.0077) \quad \quad \quad \mathbf{A = 149.556}$$

La hoja de datos del sensor indica los valores mostrados en la tabla para el correcto funcionamiento del sensor

Tabla 3-8. Especificaciones del sensor 433A-HMZ.

Símbolo	Parámetro	Condición
V_C	Voltaje del circuito	5.0 v
R_L	Resistencia de carga	50 k

A partir de los valores encontrados para las constantes procedemos a calcular la temperatura, estableciendo el valor de RT y utilizando los valores de la Tabla 3-8:

$$RT = Ae^{BT} \quad \quad \quad (3-9)$$

A partir de la ecuación para calcular el voltaje:

$$V = \frac{V_C (R_k)}{R_k + R_T} \quad \quad \quad (3-10)$$

Despejamos 3-10:

$$V (R_k + R_T) = V_C (R_k) \quad \quad \quad (3-11)$$

Sustituimos el valor de RT:

$$VR_k + VAke^{BT} = V_C (R_k) \quad \quad \quad (3-12)$$

Despejamos RT

$$e^{BT} = \frac{V_C (R_k) - V R_k}{V A k} \quad (3-13)$$

Aplicamos logaritmos:

$$\ln e^{BT} = \ln \left(\frac{V_C (R_k) - V R_k}{V A k} \right) \quad (3-14)$$

Obtenemos

$$BT = \ln \left(\frac{V_C (R_k) - V R_k}{V A k} \right) \quad (3-15)$$

Despejamos T y obtenemos la ecuación de temperatura:

$$T = \ln \left(\frac{\frac{V_C (R_k)}{V A k} - \frac{R_k}{A k}}{B} \right) \quad (3-16)$$

Sensores MQ-X

Para obtener la función de correlación de los sensores MQ-X se realizó un ajuste por regresión potencial, basándose en las características de sensibilidad de la hoja de datos de cada sensor, las cuales se pueden observar en la Figura 3-9 a la Figura 3-12.

Se seleccionó la curva de sensibilidad del sensor MQ-135 (Figura 3-15) para obtener los coeficientes de CO₂, el proceso se realiza de igual manera para el resto de los sensores. Comenzamos obteniendo los puntos para dicho gas mediante la herramienta *WebPlotDigitalizer*, en el Anexo 3 se especifican los pasos necesarios para realizar este proceso.

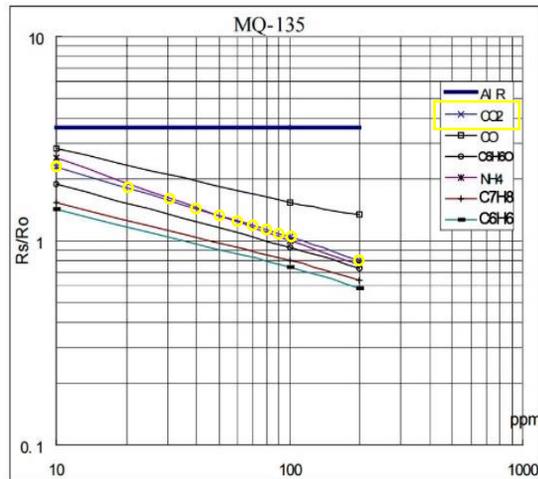


Figura 3-15. Selección de datos para CO₂ de la curva de sensibilidad del MQ-135

Al observar los datos de la curva de sensibilidad del MQ-135 se puede ver que se trata de una gráfica logarítmica, lo que significa que ambos ejes tienen escalas logarítmicas. Por lo que como primer paso se voltean los ejes de la gráfica, se considera R_s/R_o como el eje X y ppm como el eje Y. A manera de ejemplo se ilustra en la Figura 3-16.

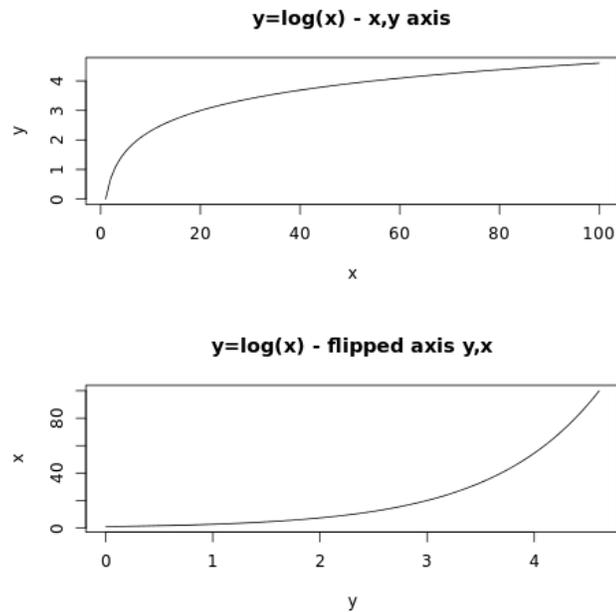


Figura 3-16. Voltar ejes de la gráfica.

A partir de la curva de sensibilidad, se obtuvieron los siguientes datos de la con los cuales se procedió a calcular los coeficientes a y b.

Tabla 3-9. Puntos de la curva de sensibilidad del sensor MQ-135 - CO2.

N	R_s/r_o	ppm
1	6.82691	9.94345
2	6.32137	20.08888
3	6.01236	30.22008
4	5.844	40.12807
5	5.63314	50.06191
6	5.54904	59.34703
7	5.42261	69.56079
8	5.31024	80.61279
9	5.22593	89.27686
10	5.1417	101.14074
11	4.55148	199.75268

Se generó la gráfica de la Figura 3-17 a partir de los puntos encontrados en la curva de sensibilidad y al voltear los ejes.

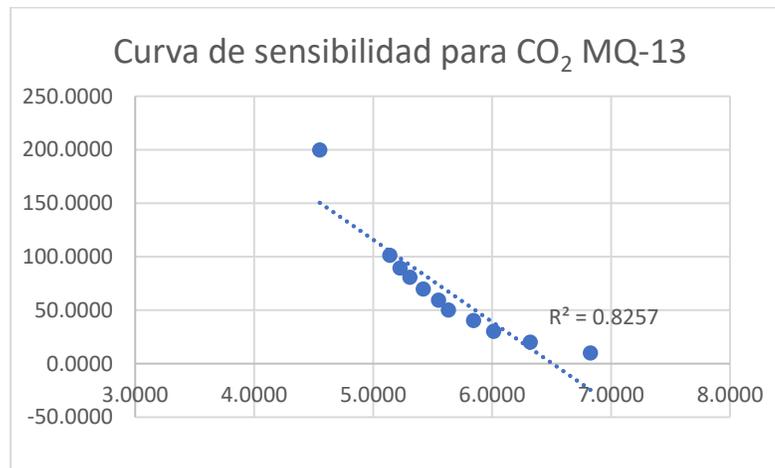


Figura 3-17 Regresión potencial para el CO2 del sensor MQ-135.

Se ajustaron los datos mediante el método de ajuste de curvas potencial de la forma:

$$Y = AX^B \tag{3-17}$$

Tomando logaritmos en (1):

$$\ln(Y) = \ln(A) + \ln(X^B) \quad (3-18)$$

Aplicando propiedades de logaritmo obtenemos:

$$\ln(Y) = \ln(A) + B \ln(X) \quad (3-19)$$

Haciendo un cambio de variables en (3-19)

$$Y' = \ln(Y), A' = \ln(A), X' = \ln(X)$$

Se obtiene una relación lineal entre las nuevas variables X y Y:

$$Y' = A' + BX' \quad (3-20)$$

Ahora se calcula la recta de regresión (3) para los puntos de la, para lo que se utilizan las correspondientes ecuaciones normales de Gauss:

$$B = \frac{n(\sum X'Y') - (\sum X' * \sum Y')}{n \sum X'^2 - (\sum X')^2} \quad (3-21)$$

$$A = \exp\left(\frac{1}{n} \sum Y' - \frac{b}{n} \sum X'\right) \quad (3-22)$$

Se calculan los valores en la siguiente tabla

Tabla 3-10. Calculo de variables para los coeficientes a y b para CO2 del MQ-135.

	RS/RO X	PPM Y	ln(X) X'	ln(Y) Y'	ln(X) * ln(Y) Y'	ln(X) ² X' ²	ln(Y) ² Y' ²
1	6.8269	9.9435	1.9209	2.2969	4.4121	3.6897	5.2758
2	6.3214	20.0889	1.8439	3.0002	5.5321	3.4001	9.0010
3	6.0124	30.2201	1.7938	3.4085	6.1142	3.2178	11.6179
4	5.8440	40.1281	1.7654	3.6921	6.5180	3.1167	13.6314
5	5.6331	50.0619	1.7287	3.9133	6.7647	2.9883	15.3136
6	5.5490	59.3470	1.7136	4.0834	6.9974	2.9365	16.6742
7	5.4226	69.5608	1.6906	4.2422	7.1718	2.8581	17.9963
8	5.3102	80.6128	1.6696	4.3897	7.3291	2.7877	19.2691
9	5.2259	89.2769	1.6536	4.4917	7.4277	2.7345	20.1757
10	5.1417	101.1407	1.6374	4.6165	7.5590	2.6810	21.3122
11	4.5515	199.7527	1.5155	5.2971	8.0275	2.2966	28.0591
\sum	61.8388	750.1333	18.9330	43.4315	73.8537	32.7070	178.3263
\bar{X}'	0.8463	$\bar{Y}' =$	20.1614				

A partir de los datos de la Tabla 3-10 se sustituyen los valores en las ecuaciones 3-21 y 3-22:

$$B = \frac{11(73.8537) - (18.9330 * 43.4315)}{11(32.70707) - (18.9330)^2}$$

$$B = \frac{-9.8990}{1.3177} \quad \mathbf{B = -7.5122}$$

$$A = \exp\left(\left(\frac{1}{11} * 43.4315\right) - \left(\frac{7.5122}{11} * 18.9330\right)\right)$$

$$A = \exp(16.8782) \quad \mathbf{A = 21383983.3708}$$

La ecuación es:

$$PPM = A * \left(\frac{R_s}{R_o}\right)^B$$

$$PPM = \mathbf{21383983.3708} * \left(\frac{R_s}{R_o}\right)^{-7.5122}$$

Con un coeficiente de determinación:

$$R^2 = 0.09973$$

Para conocer el valor de R_o , se debe calcular bajo los algunos parámetros ambientales. Para conocer el valor teórico R_o se utilizan los datos mostrados en la Figura 3-17; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se observa que los valores que saturan el sensor son los que se aproximan a los 10000 PPM. Entonces se expone al sensor MQ-135 a una concentración grande de CO_2 , se despeja la ecuación para R_o y se calcula el valor aproximado:

$$R_o = \frac{R_s}{\left(\frac{PPM}{A}\right)^B} \text{ Donde: } PPM \rightarrow 10000$$

Para calcular R_s es necesario despejar el divisor de voltaje para R_s y se obtiene

$$R_s = R_L \left(\frac{V_{CC}}{V_{ADC}} - 1\right) = 1k\Omega \left(\frac{5v}{V_{ADC}} - 1\right)$$

Donde V_{ADC} es el voltaje obtenido por el convertidor analógico digital, el voltaje de alimentación $V_{cc} = 5$ v y la resistencia $R_L = 1k\Omega$, para un convertidor

analógico digital con resolución de 10 *bits*, V_{ADC} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{ADC} = \left(\frac{V_{CC}}{2^{10} - 1} \right) * ADC = \left(\frac{5v}{1023} \right) * ADC$$

El valor de ADC es la salida que nos da el convertidor analógico digital entre 0 y 1023 ($2^{10} - 1$), representando los 1024 niveles de cuantización.

Para obtener el funcionamiento correcto es necesario considerar las condiciones de trabajo establecidas en las hojas de datos. La Tabla 3-11 indica las especificaciones que requiere el sensor:

Tabla 3-11. Especificaciones del sensor MQ-2

Símbolo	Parámetro	Condición
V_C	Voltaje del circuito	5.0 v
V_H	Voltaje del calentador	5.0 v
R_L	Resistencia de carga	Ajustable
R_H	Resistencia del calentador	33.0

El ajuste de regresión exponencial se aplicó al resto de los sensores de la serie MQX y se obtuvieron los datos que se muestran en la Tabla 3-12:

Tabla 3-12. Ajuste de regresión exponencial a los sensores MQ-X.

Sensor	Gas Objetivo	A	B	R^2
MQ-2	Monóxido de carbono	33409.5	-3.0642	0.9972
MQ-4	Humo	1.20215e+15	-20.5457	0.9605
MQ-8	Metano	957.801	-0.6886	0.998
MQ-7	Hidrogeno	4149.88	-2.6023	0.9987

Capítulo 4 Desarrollo y Resultados

En este capítulo se describe el desarrollo del SOA, detallando el proceso de construcción para el sistema electrónico desde el diseño de la tarjeta PCB hasta el ensamblaje de la misma, se describe el sistema de procesamiento de señales que incluye las implementaciones de software necesarias para el tratado de las señales digitales obtenidas por el convertidor analógico digital y se describen las interfaces graficas que integran el sistema de exhibición.

La innovación no solo es crear, sino que también es mejorar lo que ya existe, la integración de los diferentes sistemas que se crearon para dar solución al problema planteado derivó en la creación del prototipo de un SOA configurable y que puede ser utilizado en diferentes áreas, en este capítulo se describe el desarrollo de cada elemento y resultado esperado, se indica paso a paso la creación de los elementos y como interactúan entre ellos.

4.1. Sistema electrónico

Uno de los objetivos específicos del proyecto fue la creación de una PCB (*Printed Circuit Board*), una placa que agrupe los elementos que componen el circuito electrónico del SOA, el contar con una tarjeta PCB permite reducir el ruido que se genera en los sensores por el uso de protoboard.

Las PCB se componen de una base no conductora, fabricadas con un laminado de fibra de vidrio reforzado o plástico, sobre la que se incluyen las pistas de material conductor que por lo general es cobre. Son utilizados para sostener y conectar elementos electrónicos discretos.

A continuación, se describe el proceso seguido para la fabricación de la tarjeta PCB y los resultados obtenidos:

- Para comenzar el montaje en protoboard se reunieron e identificaron todos los componentes de circuito electrónico físicamente, se colocó el ADC, los sensores de gas, el sensor de temperatura y humedad y la Raspberry Pi para ubicar la localización en el sistema electrónico y observar las conexiones de todo el circuito, pudiendo así delimitar los espacios y el tamaño de la tarjeta.

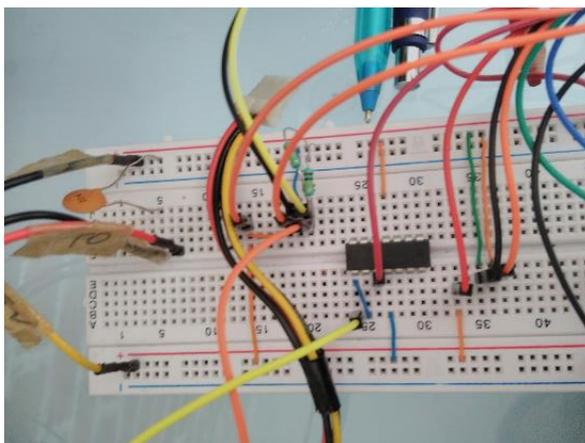


Figura 4-1. Montaje de sensores de gas, convertidor ADC y Raspberry Pi en protoboard.

—Posteriormente se realizó un diagrama esquemático en Proteux 8 Professional, incluyendo los componentes del circuito electrónico, se agregaron las fuentes de alimentación de 5V para alimentar los sensores, 3.3V para alimentar el ADC, las conexiones para la interfaz SPI, tierra, un capacitor de 0.1 μ F y un resistor de 50k para el sensor de temperatura y humedad.

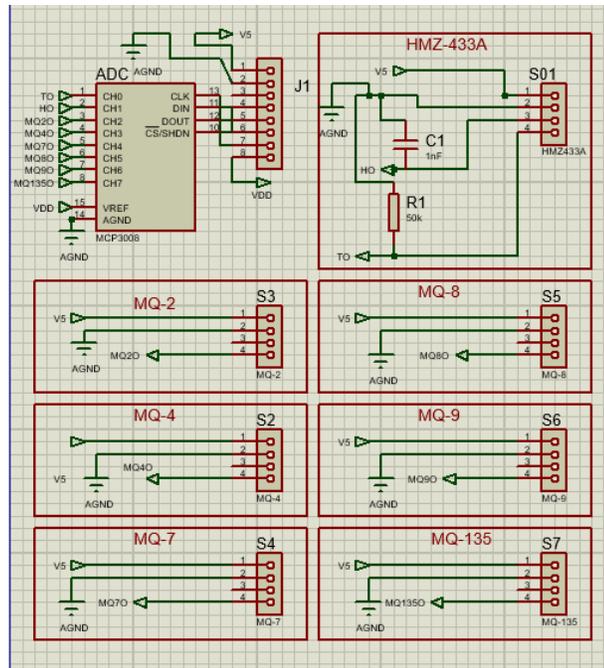


Figura 4-2. Diagrama esquemático.

—Después de realizar el diagrama con las conexiones necesarias, se procedió a realizar la tarjeta PCB, se utilizaron las herramientas de *auto-placer* y *auto-router* proporcionados por el software y se establecieron las siguientes configuraciones:

- Defina una rejilla adecuada de acuerdo a la cantidad de componentes del circuito electrónico, distribuyendo los elementos y aprovechando el máximo el tamaño de la placa.
- Establecer la longitud de las pistas para evitar caída de tensión en la pista, deben de ser lo más cortas y directas posibles para que la transmisión de las señales se realice correctamente. Particularmente

en los circuitos analógicos - digitales de alta velocidad en los que la impedancia y los efectos parásito limitarían el rendimiento del sistema.

- Optimización del espacio para gestionar la distribución de las líneas y tomas a tierra, agrupar componentes con características similares para facilitar pruebas y encontrar errores en el diseño de la tarjeta.

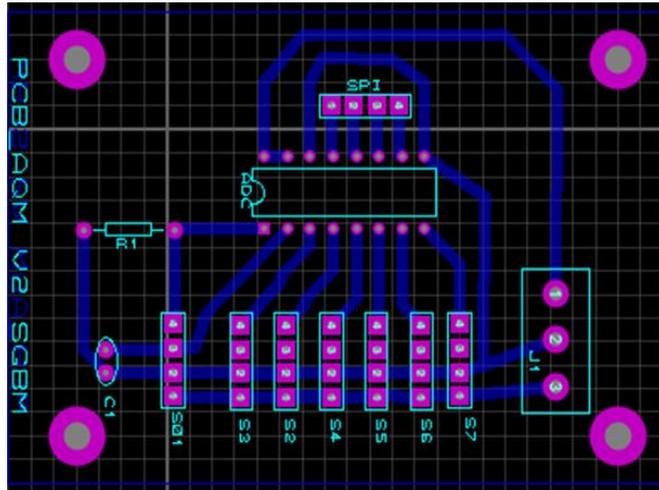


Figura 4-3. Diseño final de la tarjeta PCB.

- Para continuar con el desarrollo del sistema, se cotizaron diferentes servicios de manufactura de PCB y se envió a envió el diseño de la tarjeta para la fabricación bajo el método foto-termotransferible, obteniendo como resultado la tarjeta PCB mostradas en la Figura 4-4.

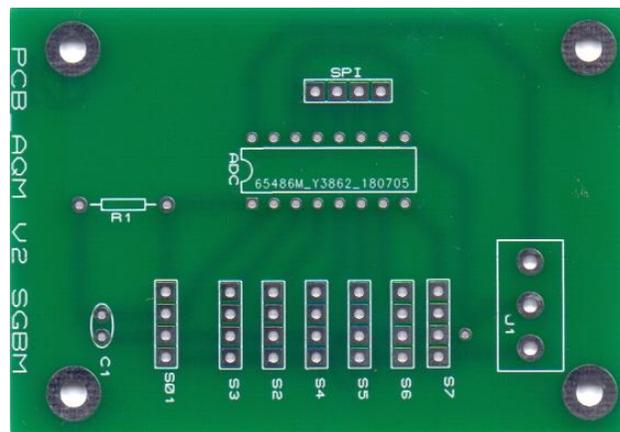


Figura 4-4. Tarjeta final PCB.

- Por último, se procedió a ensamblar los componentes en la tarjeta PCB como se observa en la Figura 4-5, para poder realizar pruebas y verificar el correcto funcionamiento.

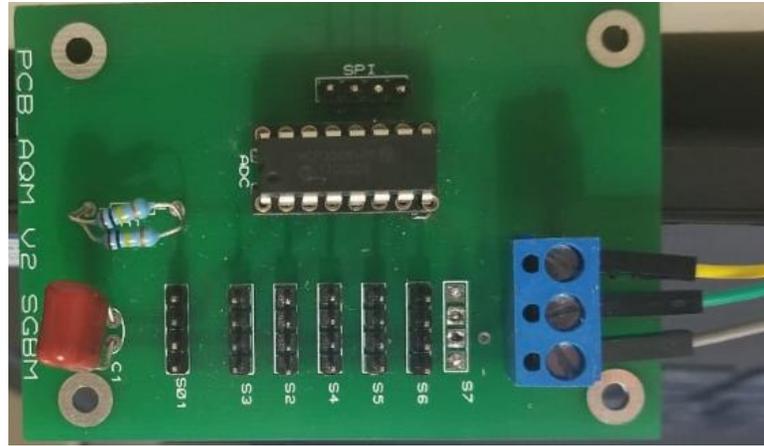


Figura 4-5. Ensamble de los componentes electrónicos en la PCB.

Para realizar mediciones adecuadas es necesario precalentar los sensores durante 5 minutos después apagarlos por 1 minuto y volverlos a encender, por lo que se desarrolló un interruptor de encendido y apagado (Figura 4-6), la RPi cuenta con el pin 18 que da una salida de 3.3V, sin embargo, se requieren 5V y un consumo de corriente constante para alimentar la tarjeta PCB con los sensores y el ventilador, para solucionar este requerimiento se desarrolló e implemento el circuito mostrado en la Figura 4-7, compuesto principalmente de los transistores BJT tipo NPN y un relevador de 5V.

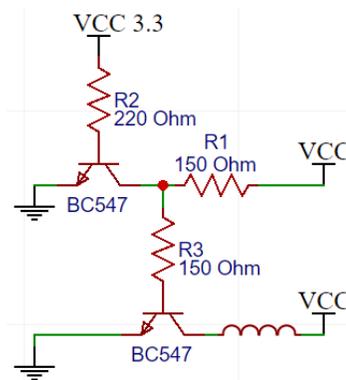


Figura 4-6. Diagrama esquemático del interruptor encendido y apagado.

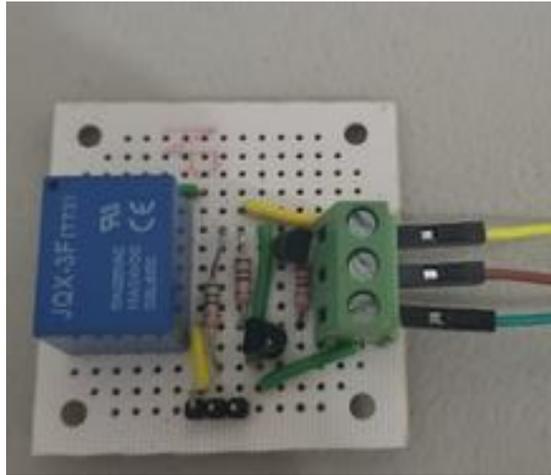


Figura 4-7. Ensamble de los componentes electrónicos de interruptor

4.2. Sistema de exhibición

Existen diferentes sistemas de software para el desarrollo de interfaces graficas de usuario compatibles con Raspberry, estos sistemas permiten trabajar con lenguajes de programación como C, C++, Java y Python, para el desarrollo de este proyecto se decidió hacer uso de QT Creator que permite la creación de interfaces más completas y robustas.

El sistema de exhibición de este SOA consiste básicamente en una pantalla para el inicio de sesión, una pantalla principal a modo de monitor de la calidad del aire y una pantalla que permite la calibración de los sensores estas pantallas se describen a detalle en las siguientes secciones.

4.2.1. QT Creator

QT Creator es un IDE (entorno de desarrollo integrado) independiente de los sistemas operativos y los tipos de compiladores de C ++. QT Creator admite una mejor integración con el framework Qt, es de código abierto, multiplataforma e incluye las herramientas necesarias de un IDE. En la Figura 4-8 se muestra la pantalla principal de QT Creator.

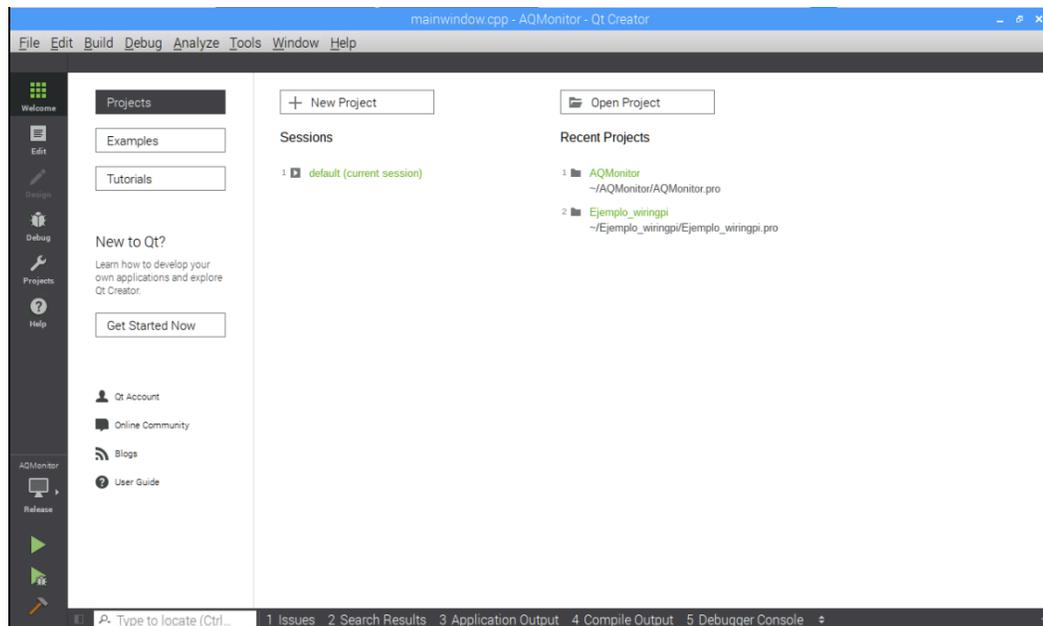


Figura 4-8.- Pantalla principal de QT Creator 5.

Las principales características de QT Creator son: administración de múltiples estados mediante sesiones, administración de múltiples proyectos QT, diseño de interfaces de usuario, edición de código, creación y ejecución de aplicaciones en todas las plataformas QT compatibles, depuración de aplicaciones y ayuda contextual (Tazehkandi, 2018).

4.2.2. Monitor de la calidad del aire

Es la pantalla principal del sistema y permite que las interacciones con el usuario ocurran, su función principal es mostrar los datos capturados por el sensor y analizados por la red neuronal.

Los procesos que realiza el sistema olfatorio artificial al iniciarse mediante interfaz gráfica de monitor se muestran en el diagrama de secuencia de la Figura 4-9, para realizar una captura de valores de los sensores se involucran el encendido de los sensores en la clase MQ, obtener el voltaje que devuelve el convertidor analógico digital mediante la clase MCP3008, hacer el cálculo de parámetros necesarios para medir la calidad del aire en la clase Cowoard, calcular el estado de

la calidad del aire mediante la red neuronal y por ultimo añadir el registro a la base de datos.

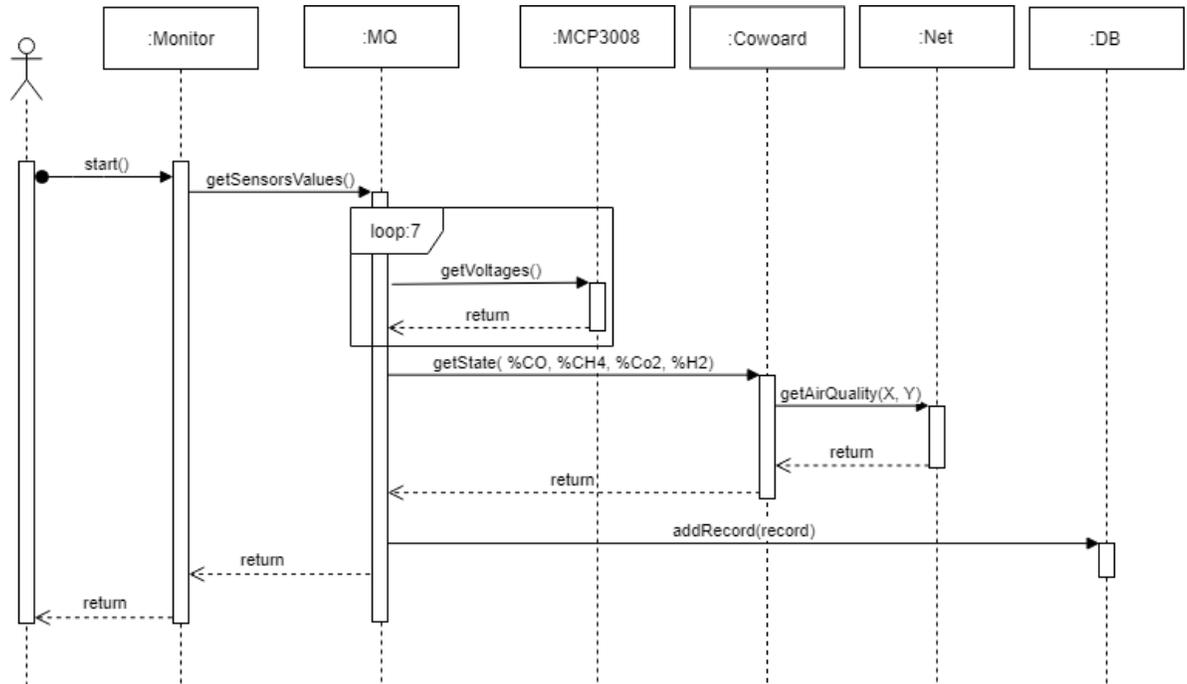


Figura 4-9. Diagrama de Secuencia de los procesos del monitor de la calidad del aire.

En esta pantalla el usuario puede controlar el estatus de los sensores desde encenderlos y apagarlos, pausar las mediciones, revisar los valores obtenidos en las muestras, apagar el sistema y realizar las configuraciones necesarias para la calibración de sensores, a continuación, se enlistan cada uno de los componentes de la pantalla:

1. El botón iniciar (3) permite realizar una muestra cada que el usuario desee, captura los datos de los sensores, convierte los datos y actualiza los valores del monitor.
2. El botón pausar (4) detiene las mediciones de los sensores y muestra el resumen de los valores de la última muestra.
3. El botón parar (5) apaga los sensores.
4. El botones siguiente (2) y previo (1), permiten visualizar cada uno de los valores obtenidos en la última muestra.

5. La figura del bloque A corresponde al estado que indica la calidad del aire, simula un semáforo, en el que el verde indica ambiente seguro, naranja advertencia de posible intoxicación, rojo advierte peligro.
6. Los valores de temperatura y la humedad relativa actuales se muestran en el bloque B.
7. En el bloque C indica la hora y fecha.
8. El bloque D muestra la cantidad de partes por millón presentes en el ambiente de cada uno de los gases.
9. El estado actual del sistema olfatorio artificial se muestra en el bloque E, los estados que podría tomar el sistema son:
 - a. *Welcome*. Indica que se inició el sistema.
 - b. *[n]*. n corresponde a el número del sensor que se muestra el valor.
 - c. *Sense*. Indica que se está realizando un sensado.
 - d. *Stop*. Indica que los sensores se han apagado
 - e. *Pause*. Indica que el sistema está detenido.
 - f. *Calibrating*. Se iniciará el proceso de calibración.

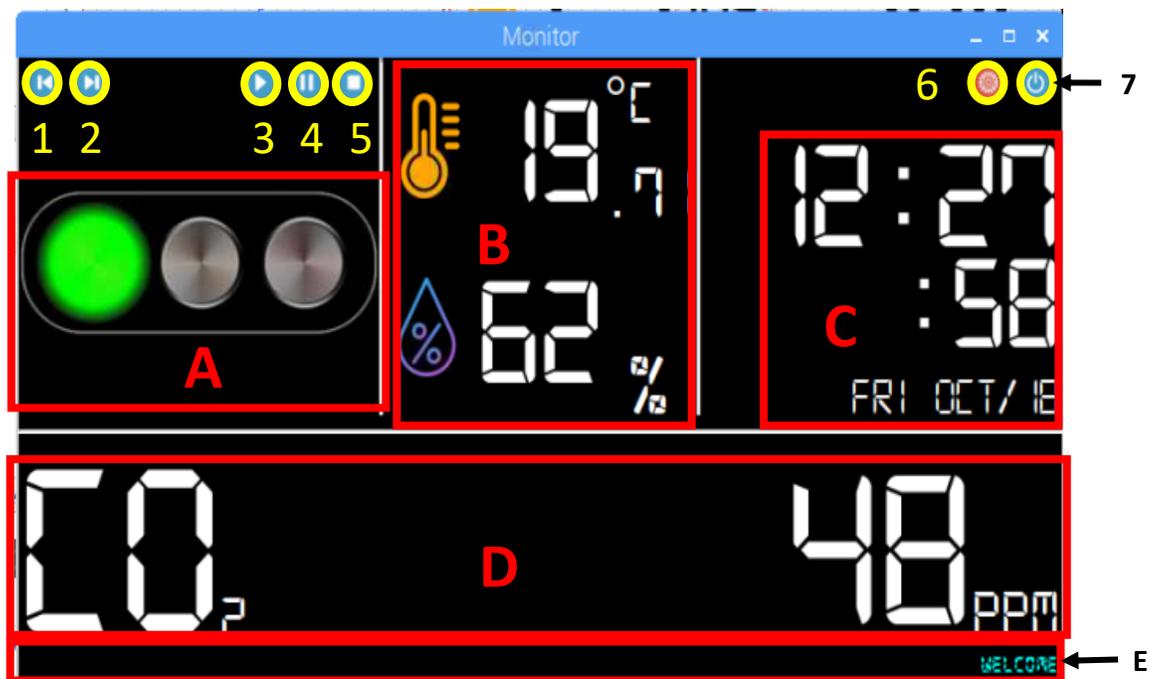


Figura 4-10. Monitor de la calidad del aire.

4.2.3. Pantalla calibración de sensores

El sistema de calibración de sensores, Figura 4-11 permite hacer los ajustes de regresión y cálculo de las variables para las ecuaciones de cada uno de los sensores, el usuario puede agregar los puntos correspondientes a la curva de sensibilidad y obtener de forma automática el valor correspondiente a la variable que se está recalibrando.



Figura 4-11. Pantalla para la calibración de sensores.

A continuación, se enlistan los bloques que componen la interfaz gráfica para la calibración de sensores:

1. En el bloque A se encuentran las pestañas con los nombres de los gases en el que se puede acceder para su calibración.
2. Los botones del bloque B permiten la interacción con el usuario para la recalibración de sensores, los botones son los siguientes:
 - a. El botón Agregar (*Add*) permite agregar una nueva fila en la tabla para que el usuario ingrese los nuevos puntos.
 - b. El botón Eliminar (*Delete*) elimina la fila con los puntos que el usuario selecciono.

- c. Botón Actualizar (*Update*) actualiza la gráfica a partir de las modificaciones realizadas por el usuario.
- 3. En el bloque C se muestra una tabla con los valores de la curva de sensibilidad previamente agregados.
- 4. El bloque D muestra las variables obtenidas por el cálculo de los ajustes de regresión para cada conjunto de datos, el usuario solo puede modificar la resistencia de carga (RL).
- 5. La etiqueta G corresponde al valor actual de la variable que mide el sensor.
- 6. La etiqueta F indica el nombre del sensor que se está configurando.

Los procesos que se involucran para la recalibración de sensores inician cuando el usuario selecciona una pestaña con el nombre de gas correspondiente al sensor que recalibrará, el usuario añade o elimina los nuevos puntos mediante la clase de Calibrate y la clase Plot, después se calculan las variables mediante la clase Regresion, se añade el registro a la base de datos mediante la clase DB y se actualiza la gráfica mediante la clase Plot, las secuencias de estos procesos se describen en el diagrama de la Figura 4-12.

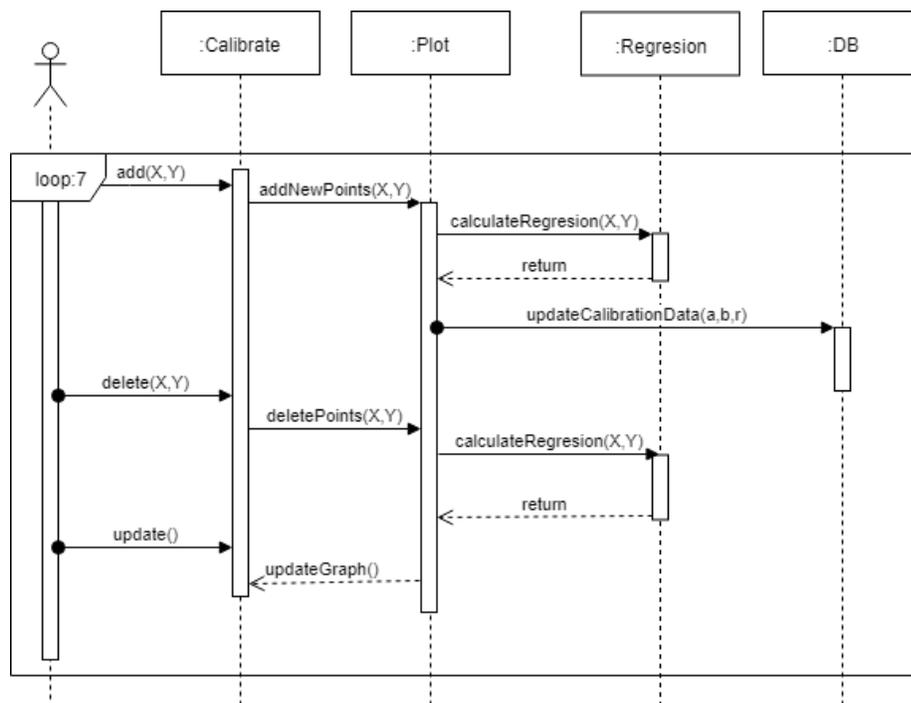


Figura 4-12. Diagrama de secuencia de los procesos para recalibración.

4.3. Sistema de procesamiento de señales

Para dar solución al sistema de procesamiento de señales propuesto en el capítulo 3 se hizo uso de la librería WiringPi (Anexo 4) que permite realizar los procedimientos necesarios para la adquisición y procesamiento de los datos obtenidos de los sensores y convertidos por el MCP3000.

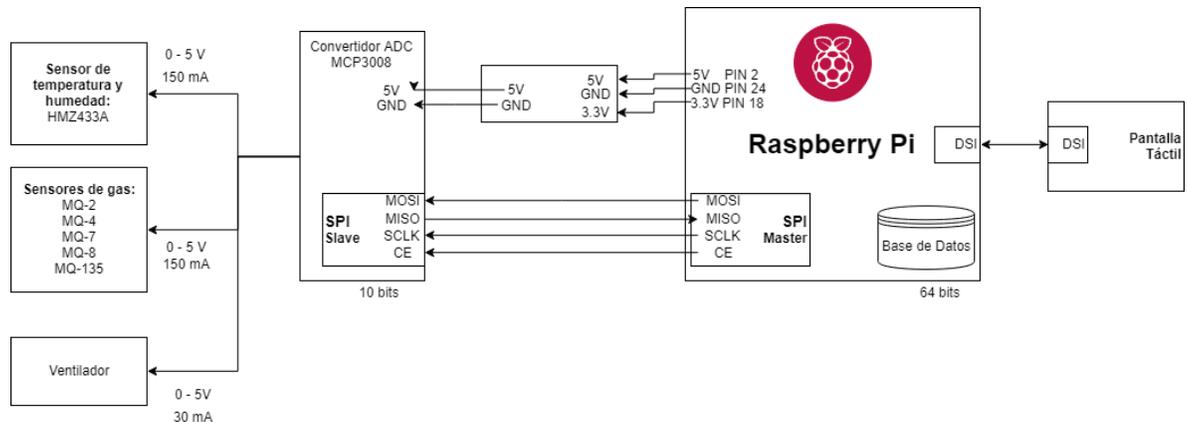


Figura 4-13. Diagrama de componentes del sistema olfatorio.

El flujo de las instrucciones que se realizaron para la recolección, almacenamiento y análisis de datos, se muestran en la Figura 4-14 y se describen en a continuación:

1. Para realizar el procesamiento de los datos es necesario configurar e incluir la librería de WiringPi, con las siguientes instrucciones:

- a. Agregar la librería en el archivo principal del proyecto (*.pro):

```
LIBS +=-L/usr/local/lib -lwiringPi
```

- b. Incluir los archivos de WiringPi

```
#include "wiringPi.h"
```

2. Configurar los pines de entrada y salida.

```
wiringPiSetup();  
pinMode(5, OUTPUT);
```

3. Ejecutar la instrucción para encender los sensores durante 5 minutos

```
digitalWrite(5,HIGH); //llamar mediante un timer
```

4. Leer los bits de datos:

```
buffer[1] = (CHANNEL_CONFIG+MQPin) << 4;  
wiringPiSPIDataRW(SPI_CHANNEL, buffer, 3);  
voltage = ( (buffer[1] & 3 ) << 8 ) + buffer[2];
```

5. Realizar las operaciones para obtener el valor en la variable deseada:

```
voltage = (voltage/READ_SAMPLE_TIMES) * (5.0/1023.0);
```

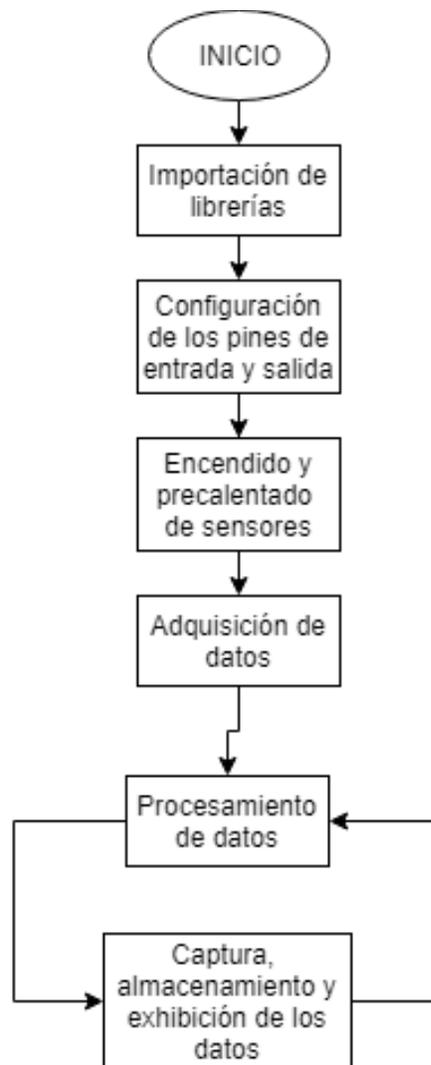


Figura 4-14. Procesamiento de señales.

Capítulo 5 Conclusiones.

El uso de la Raspberry para dar solución a problemas de la vida real es una opción factible, ya que el costo es accesible y en comparación con otras tarjetas el uso de programación orientada a objetos y las capacidades que ofrece permiten el desarrollo de mejores dispositivos.

Utilizar sensores analógicos resulta sencillo gracias a las facilidades que ofrece el convertidor analógico MCP3008 permitiendo realizar proyectos con mayor complejidad y utilidad que permitan el procesamiento de cualquier señal analógica en una tarjeta electrónica Raspberry Pi.

El experimento que se describió en este trabajo sirve como orientación para la creación de dispositivos conocidos como narices electrónicas y puede ser utilizados para desarrollar múltiples aplicaciones o como guía en la lectura de otros sensores analógicos.

Proveer el elemento gráfico de semáforo es una opción eficiente que logra fungir como alerta ante los niveles altos de gases y sobre todo en la detección temprana de mezclas que amenazan con la seguridad de los trabajadores y además permite hacer valoraciones constantemente del ambiente y obtener los resultados en el momento de la muestra.

5.1. Trabajo futuro

Como continuación de este trabajo de tesis, existen líneas de investigación en la cuales es posible seguir el trabajo y que aumentan el valor del dispositivo que se ha generado además que agregarían funcionalidad y podrían ayudar a que implemente en otras áreas. En la siguiente lista se muestran los posibles trabajos futuros:

- Desarrollo de sistema web o aplicación móvil, el sistema previamente registra datos en una base de datos la cual podría ser consultada por otros sistemas.
- Crear un sistema distribuido, se podrían colocar un conjunto de sistemas olfatorios artificiales en espacios amplios para obtener un mejor resultado de la calidad del aire.

Referencias

- Bagant, Montse Bonet. (2017). Nuevos caminos para la radio . Un proceso productivo digital para un negocio analógico Epígrafes :, (1990), 1–10.
- Bolton, W. (2001). *Mecatrónica* (5ta ed.). Alfaomega.
- Carvajal, Laura ... Quicazan, Martha. (2012). Uso de una nariz electrónica y panel sensorial para la evaluación de la calidad de mora. *Vitae*, 19.
- Cimander, Christian ... Mandenius, Carl Fredrik. (2002). Sensor fusion for on-line monitoring of yoghurt fermentation. *Journal of Biotechnology*, 99(3), 237–248. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00213-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00213-4)
- Dräger Safety AG & Co. KGaA. (2008). *Propiedades de gases y vapores peligrosos*.
- Electronics, Hanwei. (2006). MQ-2 Gas Sensor. *Smoke Sensor*, 1, 3–5.
- Element 14. (2009). Raspberry Pi Touchscreen Display.
- Eusebio, Lidia ... Sironi, Selena. (2016). Electronic Nose Testing Procedure for the Definition of Minimum Performance Requirements for Environmental Odor Monitoring. *Sensors*, 16(9), 1548. <https://doi.org/10.3390/s16091548>
- Gardner, Julian W., and Bartlett, Philip N. (1994). A brief history of electronic noses. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 18(1–3).
- Granada, Mercedes, and Mediavilla, Elena. (2015). *Instrumentación electrónica: transductores y acondicionadores de señal*. Santander: Univesidad de la Cantabria.
- Gualdrón Guerrero, Oscar, and Ortiz Sandoval, Jesús. (2013). Clasificación De Compuestos Químicos Usando Un Sistema Multisensorial (Nariz Electrónica) Desarrollada Sobre Un Dispositivo H. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT)*, 13–21.
- Guevara, Rosalinda. (2005). Las bases moleculares para el reconocimiento

- olfatorio. *ResearchGate*, 16(1), 52–55.
- Gutiérrez, Luis Felipe. (2011). Evaluación de la calidad de productos lácteos por medio de la nariz electrónica. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 61(2).
- Hui, Guohua. (2016). Apple Analysis and the Electronic Nose. In *Electronic Noses and Tongues in Food Science* (pp. 15–19). Elsevier.
- Khalaf, Walaa ... Gaudio, Manlio. (2008). Gas Detection via Machine Learning. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 2(1), 61–65.
- López, Juan Carlos. (2012). The molecular organization of the olfactory system. *Perceptnet.Com*. Retrieved from http://www.perceptnet.com/cien12_05.htm
- Martínez Fraga, Jorge. (2012). Anatomía y Fisiología., 1–12.
- McCranie, Kevin D. ... Long, Austin. (2011). La nariz electrónica, una novedosa herramienta para el control de procesos y calidad en la industria agroalimentaria. *Journal of Strategic Studies*, 34(2), 281–293. <https://doi.org/10.1080/01402390.2011.569130>
- McGrath, Mike. (2016). *Raspberry Pi 3 in easy steps*. <https://doi.org/10.1515/9781400821334.toc>
- Microchip. (2008). *MCP3004/3008*. Retrieved from <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MCP3008.pdf>
- Pagani, Alessandra A. C. ... Silva, Maria Aparecida A. P. (2014). Análisis del aroma de las gotas de papaya mediante los métodos de nariz electrónica y aceptabilidad sensorial. *Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 13(2), 163–170.
- Quicazan S, Martha C. ... Zuluaga, Carlos M. (2011). Electronic Nose a Novel Tool for Quality and Process Control in the Food Industry. *Vitae-Revista De La Facultad De Química Farmaceutica*, 18(2).

- Ramirez Neyra, Fernando Gabino. (2009). Sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales, 105. Retrieved from
- RFE International. (2006). Humidity & Temperature Module HMZ-433A.
- Rodríguez, Juan ... Reyes, Adriana. (2010). Electronic nose for quality control of Colombian coffee through the detection of defects in “Cup Tests.” *Sensors*, 10(1), 36–46.
- Russell, Andrew R. (2000). *Odour Detection By Mobile Robots*. (World Scientific Publishing Co., Ed.). River Edge, NJ, USA.
- Schaller, E. ... Escher, F. (1998). Electronic Noses and Their Application to Food. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie*, 31(4).
- Schiffman, S. S. ... Nagle, H. T. (2000). Effectiveness of an Electronic Nose for Monitoring Bacterial and Fungal Growth. *Proceedings of the 7th International Symp. On Olfaction and Electronic Nose*, 20–24.
- Soria Olivas, Emilio ... Camps Valls, Gustavo. (2007). *Tratamiento Digital de señales. Universitat de Valencia* (Vol. 53).
- Tazehkandi, Amin Ahmadi. (2018). *Computer Vision with OpenCV 3 and Qt5*. (A. Lazar, Ed.). Packt publishing Ltd.
- Tiwari, Abhai ... Mahajan, S. K. (2018). Development of Environment Monitoring System Using Internet of Things. In G. M. Perez, S. Tiwari, M. C. Trivedi, & K. K. Mishra (Eds.), *Ambient Communications and Computer Systems* (pp. 403–412). Singapore: Springer Singapore.
- Valbuena Nuñez, Miguel Anguel, and Medina Hernandez, David Ricardo. (2018). *Aplicación IoT para Mitigar Efectos de Escapes de Gas Natural en Comunidades Menos Favorecidas*.
- Vokshoor, Amir ... Meyers, Arlen D. (2013). Olfactory System Anatomy. *Medscape*, 3–7.

I. Apéndice: Instalación de Raspbian

Para utilizar la Raspberry Pi 3 es necesario instalar y configurar un sistema operativo, Raspbian es el sistema operativo oficial para todos los modelos de Raspberry, a continuación, se describen los pasos a seguir para realizar una correcta configuración.

1. Descargar de la página oficial de Raspberry Pi el sistema operativo <https://www.raspberrypi.org/downloads/>.

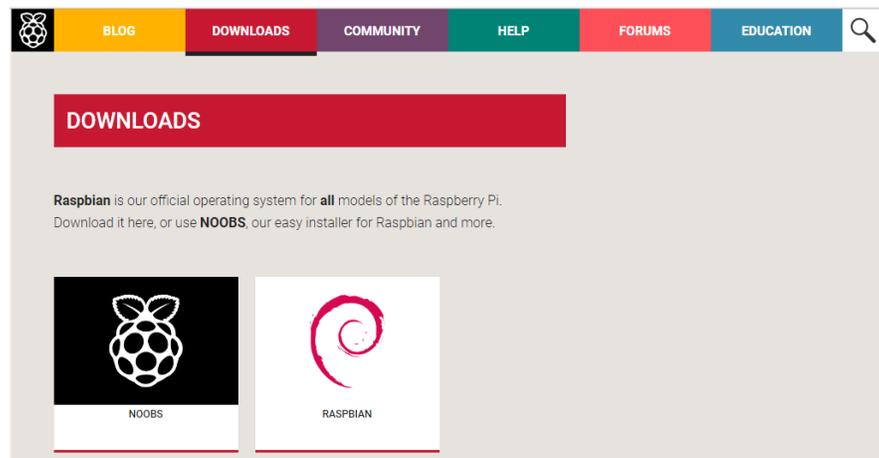


Figura I-1. Descarga del Sistema Operativo para Raspberry Pi.

2. Escribir la imagen en la tarjeta SD. Para escribir la imagen en la tarjeta es necesario contar con una herramienta para escribir en tarjetas SD, la herramienta que se utilizó en este proyecto es Etcher, permite escribir imágenes en tres pasos.

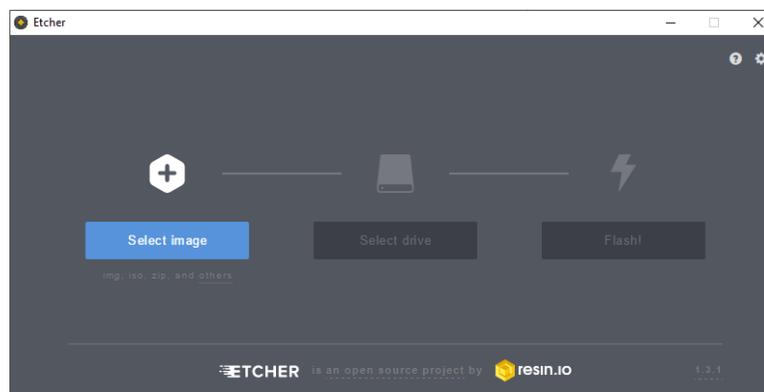


Figura I-2 Pantalla de Etcher.

3. Inserte la tarjeta en la ranura para la SD de la Raspberry Pi, conecte un teclado, ratón y monitor para iniciar el encendido.

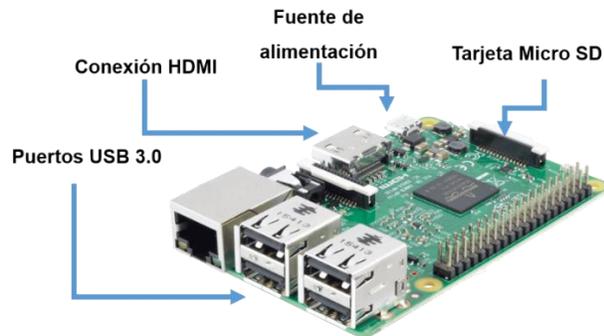


Figura I-3 Raspberry Pi 3 Modelo B+.

4. Ejecutar en la consola los siguientes comandos

```
$sudo apt-get update  
$sudo apt-get upgrade
```

```
pi@raspberrypi:~$ sudo apt-get update  
Des:1 http://archive.raspberrypi.org/debian stretch InRelease [25.3 kB]  
Des:2 http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian stretch InRelease [15.0 kB]  
Des:3 http://archive.raspberrypi.org/debian stretch/main armhf Packages [159 kB]  
Des:4 http://raspbian.raspberrypi.org/raspbian stretch/main armhf Packages [11.7 MB]  
Des:5 http://archive.raspberrypi.org/debian stretch/ui armhf Packages [32.5 kB]  
Descargados 11.9 MB en 23s (504 kB/s)  
Leyendo lista de paquetes... Hecho  
pi@raspberrypi:~$ sudo apt-get upgrade  
Leyendo lista de paquetes... Hecho  
Creando árbol de dependencias
```

Figura I-4. Ejecución de comando en la consola de la Raspberry Pi.

5. Iniciar la Raspberry Pi.



Figura I-5. Pantalla de inicio.

II. Apéndice: Configuración e instalación de QT Creator

1. Para la instalación de Qt Creator es necesario con los compiladores de C y C++ y con el paquete de *git* previamente por lo que es necesario ejecutar en la consola los siguientes comandos en el orden indicado:

- a. `sudo apt-get install g++`
- b. `sudo apt-get install gcc`
- c. `sudo apt-get install xterm`
- d. `sudo apt-get install git-core`
- e. `sudo apt-get install subversion`
- f. `sudo apt-get install qt4-dev-tools`
- g. `sudo apt-get install qtcreator`
- h. `sudo uname -a`
- i. `apt-cache search qt5`
- j. `apt-cache show qt5-default`
- k. `apt-cache search qtcreator`
- l. `apt-cache show qtcreator`
- m. `sudo apt-get qt5-default`
- n. `sudo apt-get install qtcreator`

2. Una vez instalado QT aparecerá en el menú programación, es necesario el IDE para configurar los compiladores *g++* y *gcc*.

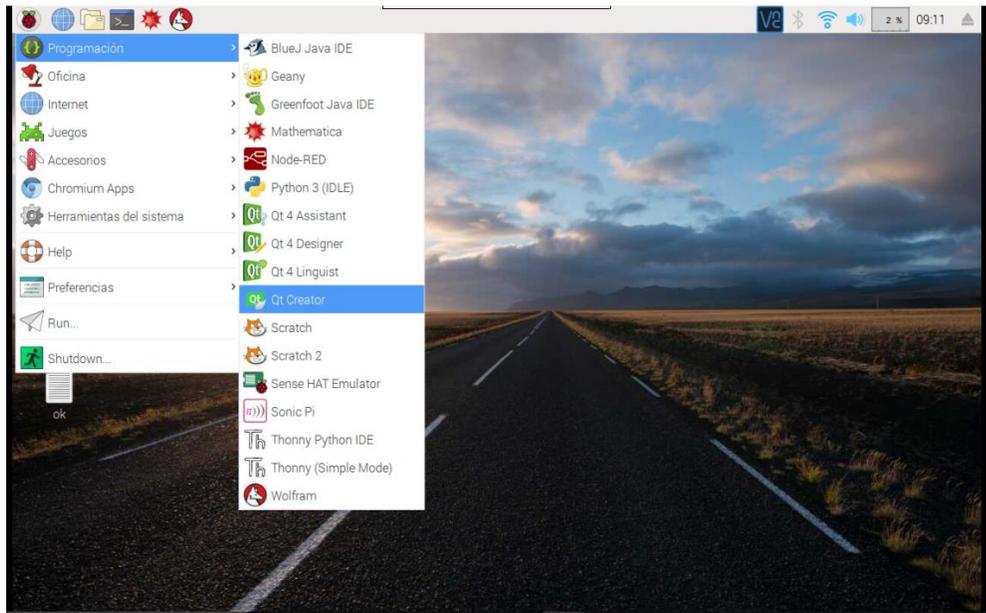


Figura II-1. Abrir QT Creator desde el menú.

3. Una vez iniciado QT es necesario ir a el menú *Tools* y seleccionar *Options*

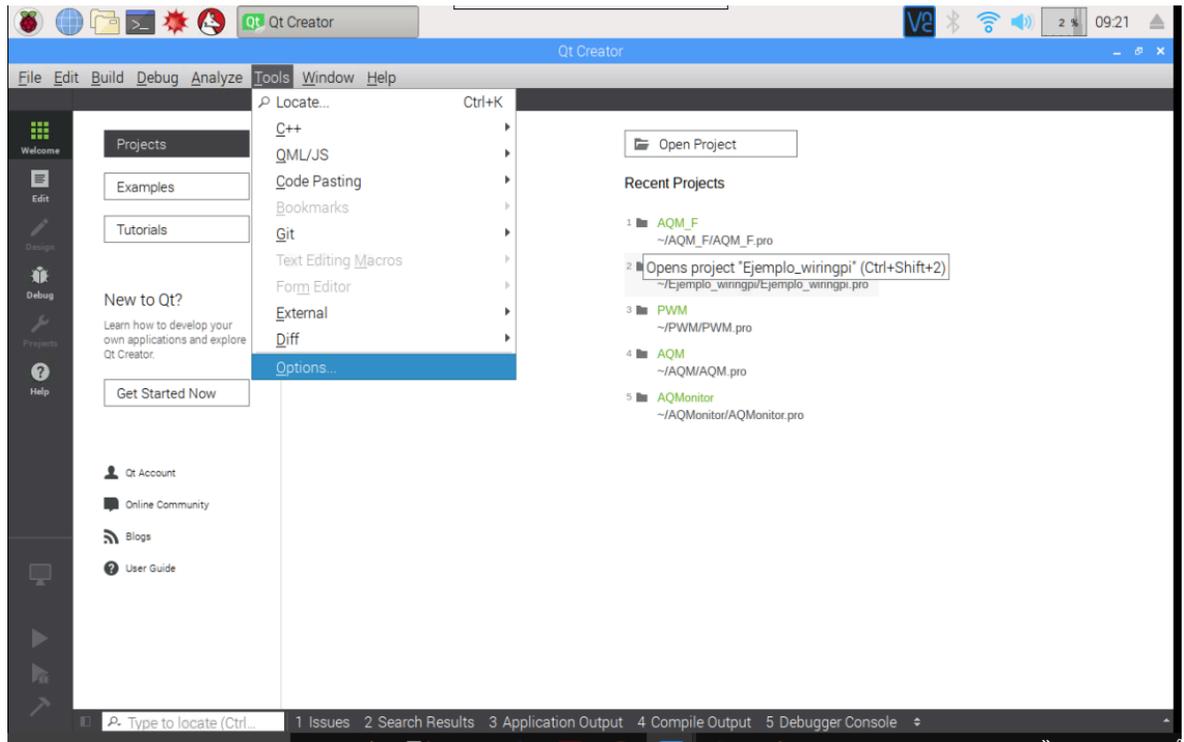


Figura II-2. Configuración de opciones de QT.

4. En la pantalla de *Options* es necesario seleccionar la opción *Build and Run*, después la opción *Compilers*, en seguida la opción *Add* y agregar los compiladores *GCC*.

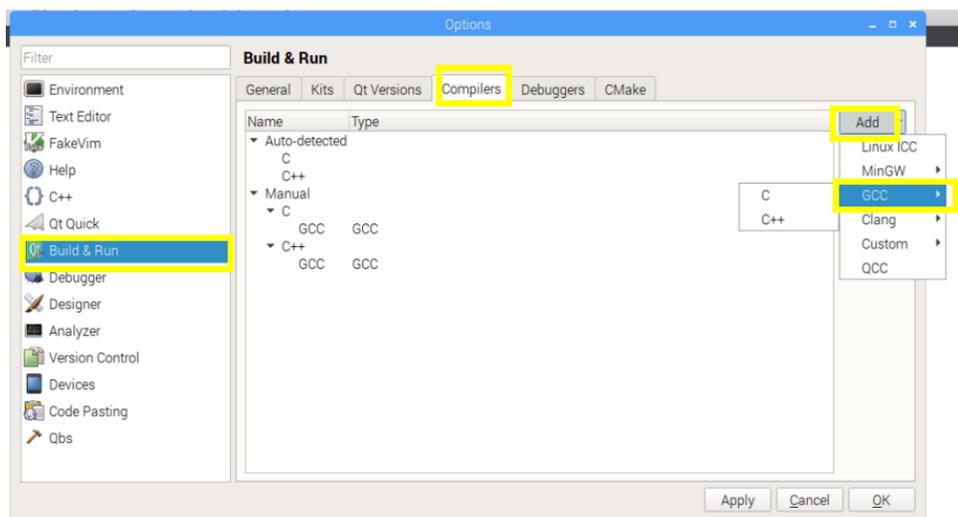


Figura II-3. Agregar los compiladores de C y C++.

5. Agregar la ruta del directorio donde se encuentran los compiladores.

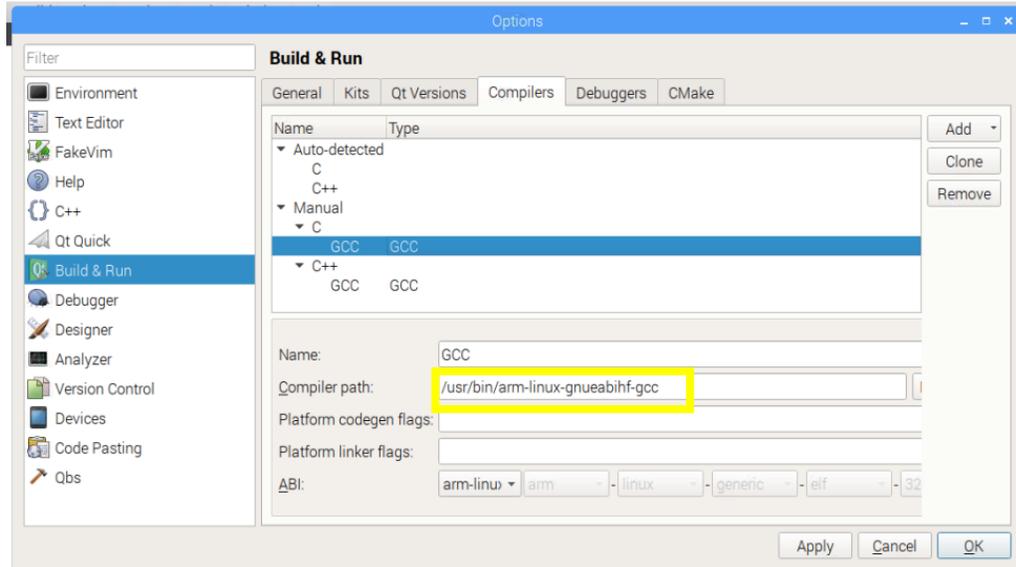


Figura II-4. indicar la ruta del compilador.

6. Iniciar QT Creator.

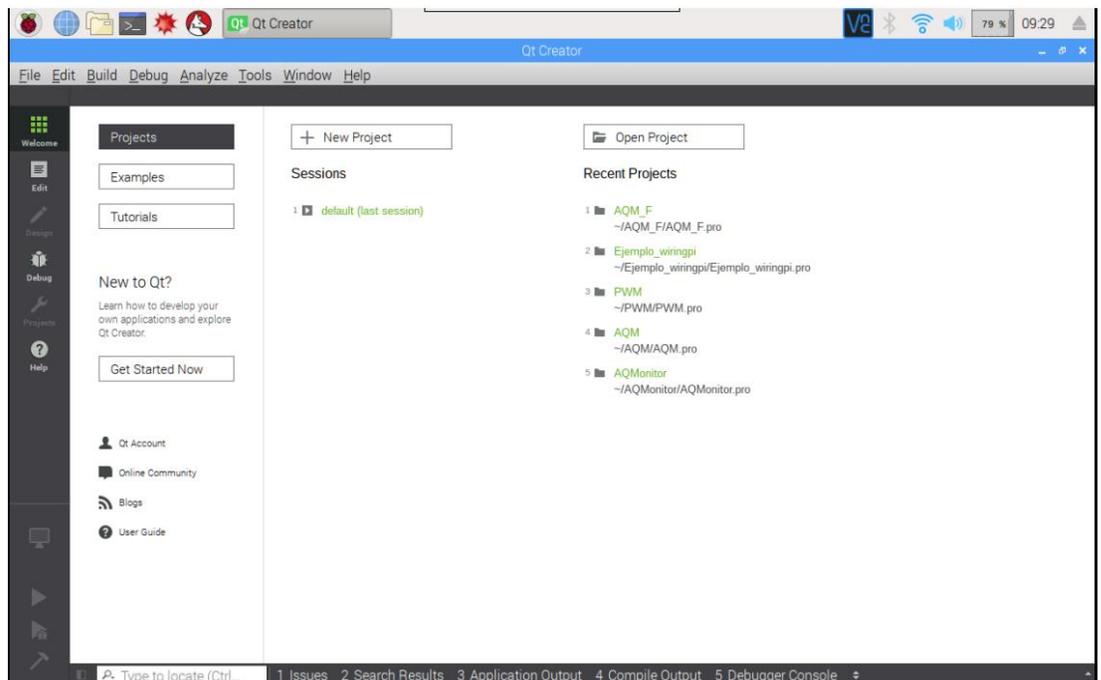


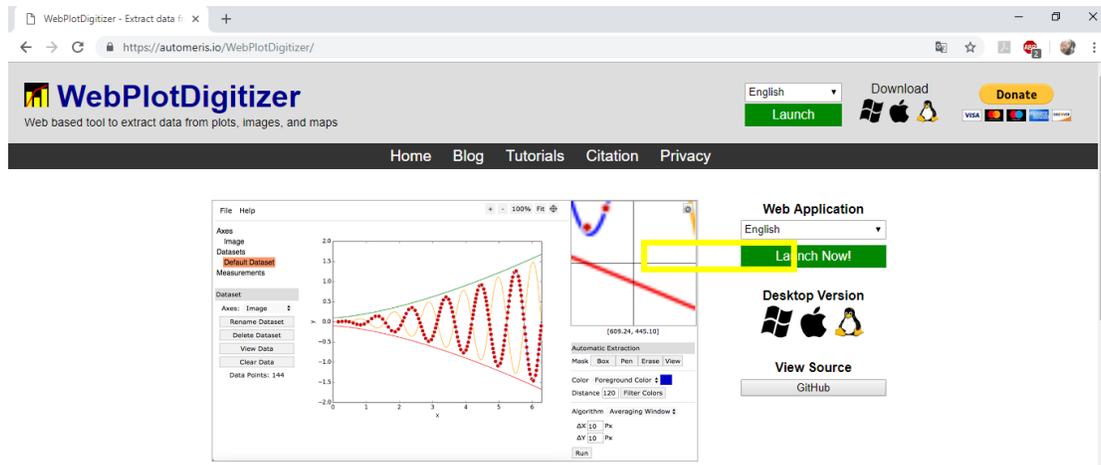
Figura II-5. Iniciar un Proyecto en el IDE QT.

III. Apéndice: Obtención de puntos de graficas de sensores.

1. Ingresar a la página:

a. <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>

2. Seleccionar la opción *Launch Now*:



It is often necessary to reverse engineer images of data visualizations to extract the underlying numerical data. WebPlotDigitizer is a semi-automated tool that makes this process extremely easy:

- Works with a wide variety of charts (XY, bar, polar, ternary, maps etc.)
- Automatic extraction algorithms make it easy to extract a large number of data points
- Free to use, opensource and cross-platform (web and desktop)

Figura III-1. Pantalla principal de WebPlotDigitizer.

3. Ingresar al menú *File* y seleccionar la opción *Load Image*

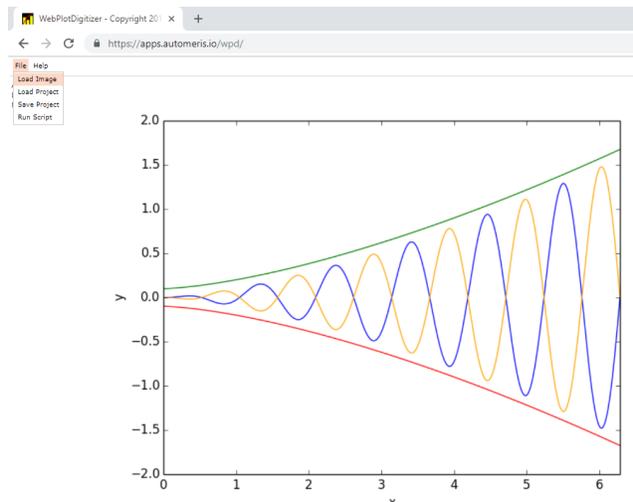


Figura III-2. Cargar imagen de la gráfica.

4. Seleccionar la opción 2D (X-Y) Plot que corresponde al tipo de grafica con la que trabajará:

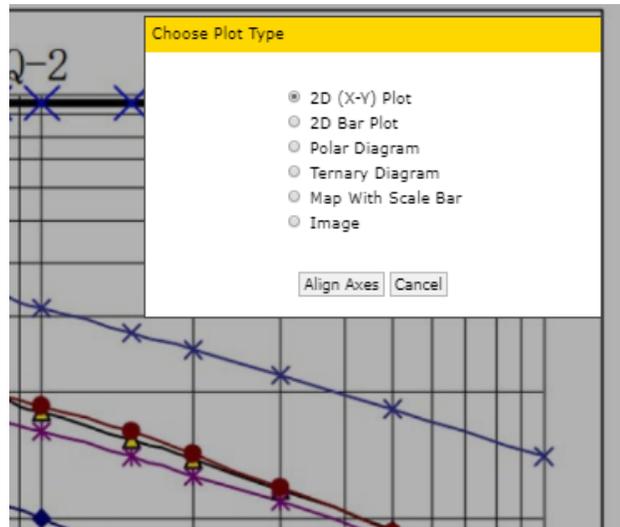


Figura III-3. Seleccionar la opción 2D (X-Y).

5. Indicar los rangos de X y Y de la gráfica para hacer la calibración e indicar que se encuentran es escala logarítmica:

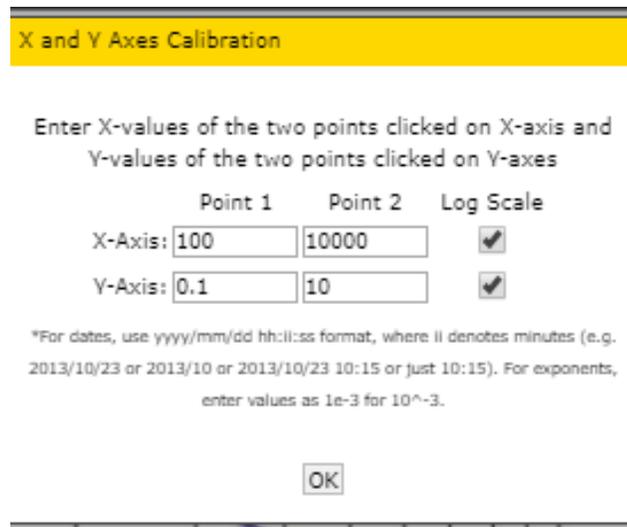


Figura III-4. Agregar los rangos de los ejes X y Y.

6. Después agregar cada uno de los puntos del gas objetivo del sensor:

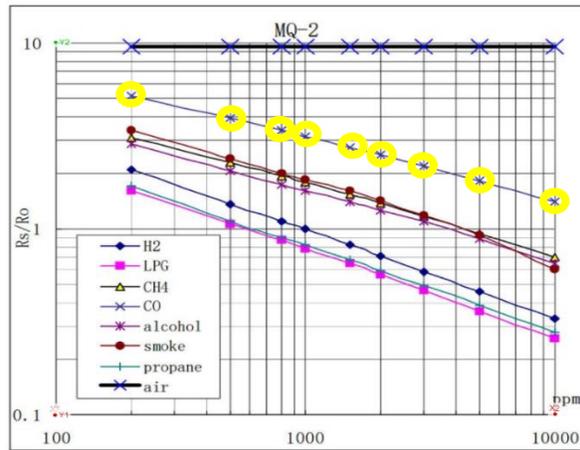


Figura III-5. Agregando los datos de la gráfica.

7. Ver el conjunto de datos e indicar el formato y descargar el archivo .CSV

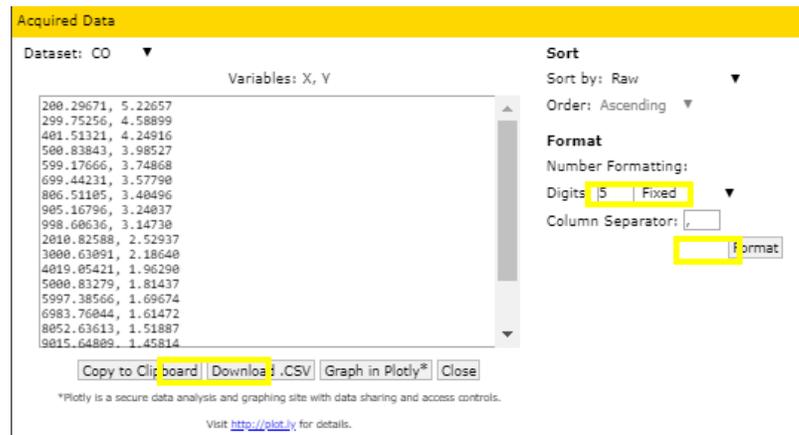


Figura III-6. Dar formato a los datos.

8. Guardar el proyecto.



Figura III-7. Guardar el proyecto.

IV. Apéndice: Instalación de WiringPi

WiringPi es una librería que permite el acceso a los pines del GPIO de las Raspberry, está desarrollada en C para los dispositivos BCM2835, BCM2836 y BCM2837. Está diseñado para ser familiar para las personas que han usado el sistema de "cableado" Arduino1 y está diseñada para ser utilizado por programadores experimentados de C / C ++. A continuación, se describe el proceso de instalación:

1. [Ejecutar en la línea de comandos las siguientes instrucciones:](#)

```
$ sudo apt-get purge wiringpi
$ hash -r
```

2. [Si no se ha instalado previamente GIT, ejecutar la siguiente instrucción:](#)

```
$ sudo apt-get install git-core
```

3. [Actualizar el sistema operativo](#)

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get upgrade
```

4. [Clonar el repositorio de WiringPi](#)

```
$ git clone git://git.drogon.net/wiringpi
```

5. [Acceder al directorio y realizar un *pull*](#)

```
$ cd ~/wiringpi
$ git pull origin
```

6. [Instalar el script:](#)

```
$ cd ~/wiringpi
$ ./build
```

7. [Probar la instalación de WiringPi](#)

```
$ gpio -v
```

V. Apéndice: Reconocimientos y constancias



**FOPER
2017**

La Universidad Autónoma de Querétaro
y la Secretaría de la Rectoría



otorgan el presente

RECONOCIMIENTO

a

Sandra Gabriela Briseño Muro

Por su participación como
Responsable de Proyecto
FOPER 2017
"Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría"

Santiago de Querétaro, Qro, noviembre 2017.



Dr. Gilberto Herrera Ruiz
RECTOR



Dra. Rebeca del Rocio Peniche Vera
TITULAR DE LA SECRETARÍA DE LA RECTORÍA





El Comité Organizador del 5º Encuentro de Jóvenes
Investigadores del Estado de Querétaro,
otorga la presente

CONSTANCIA

a:

Sandra Gabriela Briceño Muro

Coautores: Ricardo Chaparro Sánchez, Julio Alejandro Romero González.

POR PRESENTAR EN ESTE FORO ACADÉMICO, MODALIDAD CARTEL, EL TRABAJO:

IMPLEMENTACIÓN DE UNA NARIZ ELECTRÓNICA PARA LA DETECCIÓN DE
CONTAMINANTES EN AIRE.

Centro Educativo y Cultural del Estado de Querétaro
"Manuel Gómez Morín", octubre 5, 2017.

Dr. Irineo Torres Pacheco
Secretario Académico

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado



3er COLOQUIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática
Jefatura de Investigación y Posgrado

Otorga la presente

CONSTANCIA

a: **SANDRA GABRIELA BRICEÑO MURO**

Por su exposición de la ponencia:

"Sistema olfatorio artificial para detección de compuestos volátiles tóxicos"

En el Tercer Coloquio de Investigación y Posgrado de la Facultad de Informática en la ciudad de Querétaro, Qro.
Los días 22, 23 y 24 de noviembre de 2016.

Juriquilla, Querétaro 23 de noviembre de 2016

M.I.S.D Juan Salvador Hernández Valerio
Director de la Facultad

Dra. Teresa Guzmán Flores
Jefa de Investigación y Posgrado

VI. Apéndice: Publicación de artículo en congreso internacional.

31/10/2018

Gmail - CIMPS 2018: Notificación de artículo ID 28



Gaby Briceño <sgbm0592@gmail.com>

CIMPS 2018: Notificación de artículo ID 28

5 mensajes

CIMPS 2018 <conferenciacimps@cimat.mx>

22 de agosto de 2018, 18:23

Para: rchapa@uaq.mx, Gaby Briceño <sgbm0592@gmail.com>, clasesuaqfi@gmail.com

Estimados Autor(es): Sandra Briceño, Ricardo Chaparro Sánchez and Julio Alejandro Romero González.

ID 28: Digital Analog Conversion with SPI Protocol for Gas Sensors.

Nos complace informarle que el comité ha verificado las evaluaciones y se ha tomado la decisión de aceptarlo tomando en consideración los comentarios de los revisores para ser presentado en el congreso **CIMPS 2018** como **artículo** completo en idioma español. **Por lo que es necesario que traslade su artículo al formato IEEE siguiendo las indicaciones y en idioma español. Se valorará si de acuerdo a los cambios puede ser invitado a alguna de las revistas que ofrece el Congreso CIMPS en idioma español.**

Los artículos aceptados en idioma español serán enviados para ser indexados en la IEEE Digital Library.

"Por lo tanto, solicitamos a los autores revisar que cumpla con formato IEEE el artículo tomando en cuenta los cambios mencionados por los revisores"

Para enviar el archivo de la versión final en el nuevo formato de la IEEE, por favor enviar a este correo Conferenciacimps@cimat.mx, con las siguientes indicaciones:

Indicar en el asunto del email: ID_archivos versión camera ready

Este email debe contener los siguientes archivos:

1. Camera ready versión. Tomando en cuenta el formato IEEE que se adjunta en este email, nombrar al archivo Camera_Ready_ID_nombre_del_primer_autor en formato word o pdf.
2. Indicar los cambios y mejoras al artículo tomando en consideración los comentarios de los revisores en un archivo donde justifique cada comentario.
3. Enviar una copia de la versión camera ready en formato word resaltando todos los cambios y mejoras.
5. El límite de páginas es de 9 a 10.

Fechas:

La fecha límite para enviar las versiones finales del artículo adjuntando los archivos que se solicitan: **31 de Agosto 2018**.

Un artículo aceptado será publicado en las memorias del congreso y considerado para su publicación en cualquier Revista Internacional sólo si la versión final es acompañado por el recibo de pago en el sitio web de registro hasta el **07 de Septiembre de 2018**. En breve recibirá un correo electrónico automático acerca de cómo realizar el registro y el pago.

Se adjunta el formato IEEE y las revisiones realizadas a su artículo.

El archivo correspondiente a la versión final, la carta de justificación de cambios y el archivo donde se resaltan **los cambios realizados se analizarán para verificar que el artículo ha sido mejorado con respecto a los comentarios.**

<https://mail.google.com/mail/u/0?ik=37f8e1ee4a&view=pt&search=all&permthid=thread-F%3A1609547168350672416&simpl=msg-f%3A1609547168350672416> 1/3



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE MATEMÁTICAS, A.C. &
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**

MATHEMATICS RESEARCH CENTER, A.C. & UNIVERSITY OF GUADALAJARA

in recognition and appreciation to:

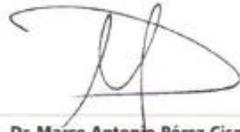
**Sandra Briceño, Ricardo Chaparro Sánchez
and Julio Alejandro Romero González**

In the international Conference CIMPS 2018, with article titled as:

**Digital Analog Conversion with SPI Protocol
for Gas Sensors**

**CIMPS was held at the Electronics and Computing Division of the University Center for
Exact Sciences and Engineering – CUCEI of the University of Guadalajara.**

Guadalajara, Jalisco, Mexico, 17-19 October 2018.



Dr. Marco Antonio Pérez Cisneros
Director of the Electronics and Computing Division



Dra. Ruth Padilla Muñoz
Rector of the CUCEI



Dr. Jezreel Mejia Miranda
CIMPS President



Applications in Software Engineering

Proceedings of the
7th International Conference In Software Process Improvement

CIMPS 2018

Guadalajara, Jalisco, México
October 17 - 19, 2018



Editors

Maria A. Muñoz Mata

Isabel Mejía Miranda

María Elena Pérez-Negrón

Antonio Hernández

Yolanda Quiñonez Carrillo

**2018, International Conference on Software Process
Improvement (CIMPS 2018)**

Copyright © 2018 by International Conference on Software Process
Improvement (CIMPS 2018). All rights reserved.

Copyright and Reprint Permissions

Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923.

For other copying, reprint or republication permission, write to
CIMPS, Avenida Lasec Andador Galileo Galilei, Manzana 3 Lote 7, 98160,
Zacatecas, Zacatecas, México, México. 98068. All rights reserved.

IEEE Catalog Number, electronic: CFP18J12-ART

ISBN: 978-1-7281-0158-3

Additional copies of this publication are available from:

Curran Associates, Inc

57 Morehouse Lane

Red Hook, NY 12571 USA

Phone: (845) 758-0400

Fax: (845) 758-2633

E-mail: curran@proceedings.com

Conversión Analógica Digital Con Protocolo Spi Para Sensores De Gas.

Digital Analog Conversion with SPI Protocol for Gas Sensors.

S. G Briceño-Muro¹, R. Chaparro-Sánchez², J. A. Romero-Gonzalez³

Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

sgbm0592@gmail.com¹, rhapa@uaq.mx², jarg.romero25@gmail.com³

Resumo—Estetrabajo permite conocer los procesos necesarios para lectura y recuperación de señales utilizando un convertidor analógico-digital y una tarjeta electrónica Raspberry Pi 3. El protocolo SPI es utilizado para la comunicación entre el convertidor y la tarjeta electrónica (Raspberry) con el fin de leer, guardar y mostrar los datos obtenidos de los sensores de gas que permiten conocer la partes por millón (ppm) de cada gas presentes en una muestra.

PalabrasClave -Convertidor Analógico-Digital; Nariz Electronica; Protocolo SPI; Sensor De Gas; Sistema Olfatorio Artificial, Raspberry.

Abstract—This work allows to know the necessary processes for reading and recovery of signals using an analog-digital converter and an electronic card Raspberry Pi 3. The SPI protocol is used for communication between the converter and the electronic card (Raspberry) in order to read, save and display the data obtained from gas sensors that allow knowing the parts per million (ppm) of each gas present in a sample.

Keywords—Artificial Olfactory System; Digital Analog Converter; E-Nose; Gas Sensor; Raspberry, SPI Protocol.

I. INTRODUCCIÓN

Se han construido diferentes dispositivos que permiten realizar tareas de una manera más sencilla y sobre todo tratando de salvaguardar la integridad de los usuarios en todo momento. Estos se dispositivos tratan de emular los sentidos humanos (auditivo, visual, gustativo, olfativo y táctil) realizando sus funciones de manera similar a los humanos.

Este trabajo presenta el proceso de diseño, construcción e implementación de un dispositivo capaz de reconocer las partes por millón (ppm) de compuestos volátiles presentes en una muestra, se describen los materiales para construirlo, el proceso para realizar la conexión, se detalla el proceso para desarrollar la interfaz gráfica del sistema y se muestran el proceso para realizar el instrumento para montarlo.

Una señal se define como cualquier magnitud física que varía con el tiempo, el espacio o cualquier otra variable independiente[1]. La temperatura, humedad, presión, sonido, entre otras son señales analógicas que requieren de

transductores para ser convertidas en señales eléctricas y después a señales digitales, este proceso puede ser realizado con la ayuda de un convertidor analógico digital. Una vez obtenidas las señales estas son procesadas para ser almacenadas y exhibidas según sea la aplicación en las que serán utilizadas.

Los transductores son dispositivos que facilitan la transformación de una propiedad física a una propiedad eléctrica, generalmente se presenta como intensidad o voltaje. Un transductor es diferente a un sensor, ya que el sensor presenta una respuesta a las variaciones de propiedad que mide, y el transductor lleva a cabo la transformación de la propiedad física de entrada para dar como respuesta una señal eléctrica.[2]

El proceso por el cual una señal analógica se convierte en una señal digital se considera como digitalización[3], donde se representa mediante números la forma continua de una onda, este proceso puede ser observar en la Figura 1.

La Raspberry Pi (RPi) ofrece múltiples funcionalidades, sin embargo, para poder utilizar señales analógicas se requiere un convertidor analógico-digital (CA/D) y mediante el protocolo SPI es posible el procesamiento de la información que se obtiene mediante los sensores[4].

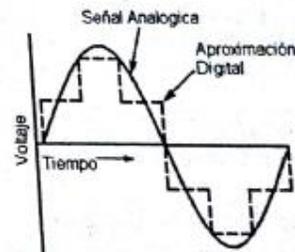


Figura 1. Conversión de una señal analógica a digital. La imagen muestra la transformación de una señal analógica a digital a través del tiempo. Fuente propia.

Al trabajar con señales analógicas es necesario conocer la frecuencia y amplitud. Debe ser importante que la amplitud se encuentre en los límites de la fuente de alimentación del circuito integrado, el valor de salida del CA/D puede ser expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Valor de salida digital} = \frac{1024 V_{IN}}{V_{REF}}$$

Donde:

V_{IN} = Voltaje analógico de entrada

V_{REF} = Voltaje de referencia

La frecuencia debe encontrarse entre los rangos establecidos para la velocidad de procesamiento por el circuito integrado del CA/D y el almacenamiento de la información digital para su manipulación.

Otro parámetro que se debe tener en cuenta para realizar la conversión de señales analógicas a digitales es la frecuencia mínima de muestreo (f_s), de acuerdo con el teorema de frecuencia de Nyquist[5], la frecuencia de muestreo debe ser el doble de la señal analógica. También es necesario considerar el tiempo de conversión que utiliza el CA/D para conocer el límite de frecuencia máxima de la señal de entrada.

II. 1.2. ANTECEDENTES

La implementación de sistemas capaces de reconocer compuestos volátiles comenzó hacia los años 60's, cuando la empresa Bacharach Inc., creó un dispositivo conocido con el nombre de "Sniffer", compuesto solamente de un solo sensor de gas[6].

Benedetti en el 2004 utilizaron la nariz electrónica para la selección identificación y categorización de miel, en el experimento se analizaron un total de setenta muestras y la nariz resultó un instrumento útil para el control de la calidad en la miel [7].

Para el 2012, en el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia realizó una investigación con el objetivo de hacer una comparación de los resultados que se obtienen de una nariz electrónica y de los resultados obtenidos por un panel sensorial, en el análisis del comportamiento de calidad de la mora en un lapso de 5 días. La investigación mostró que los resultados de la nariz son más precisos y exactos que los del panel sensorial, ya que el panel no logró detectar cambios en los primeros 3 días del experimento[8].

La Universidad de Pamplona en el 2013 desarrolla una nariz electrónica a partir de un dispositivo de hardware FPGA, con el objetivo principal de sustituir la computadora y crear un sistema que sea más sencillo y portable, además tratando de proporcionar resultados automáticamente. Los resultados fueron exitosos, obteniendo un porcentaje del 100 % de acierto en la identificación y categorización de los componentes químicos [9].

III. TRABAJOS RELACIONADOS

Valbuena y Medina desarrollaron un sistema capaz de detectar en tiempo real los niveles de gas en un hogar, con el fin de emitir una alarma si estos niveles sobrepasan los parámetros mínimos y se convierta en una amenaza para los

residentes, utilizan una RPi con un módulo GSM/GPRS para realizar las notificaciones del sistema[10].

A principios del 2018 se realizó un monitor bidireccional inteligente, que permite conocer el consumo eléctrico de un hogar, mediante un sitio web los usuarios reciben información de los patrones de consumo de energía, se realizan mediciones del voltaje de la red y la corriente de carga, estos datos son procesados mediante una RPi 3 a través del protocolo SPI [11].

Tiwari, Sadistap y Mahajan proponen un sistema para monitorear los parámetros ambientales como la humedad, la intensidad de la luz, el gas metano y la temperatura de una manera rentable usando un sistema embebido en RPi. La información detectada por los sensores se digitaliza mediante un convertidor analógico digital y se almacena en la memoria de la tarjeta RPi y luego se carga en la plataforma ThingSpeak IoT.[12].

IV. MATERIALES Y METODOS

A. Raspberry Pi 3

La RPi 3 es un pequeño ordenador económico desarrollado con un circuito integrado Broadcom BCM2837 con un procesador ARMv8 con velocidad de hasta 1.2 GHz, un GPU Video Core 4 3D y 1 GB de memoria RAM. Además, cuenta con una salida de video y audio a través de un conector HDMI, una salida de video compuesto, una salida de audio, cuatro puertos USB, una conexión Ethernet 10/100 y una conexión inalámbrica[4].

Previamente se acondicionó se instaló en una tarjeta SD con 16 GB de almacenamiento el sistema operativo Raspbian de Linux que permite la interacción de forma gráfica con la RPi 3, de esta forma se facilita la programación para la recuperación y procesamiento de las señales analógicas, así como la exhibición de los datos obtenidos de las muestras.



Figura 2. RPi 3 modelo B. La imagen muestra una tarjeta electrónica RPi 3 donde se aprecian sus componentes principales, entrada HDMI, puertos USB y los pines del GPIO. Fuente: [4].

El bus GPIO de la RPi está compuesto por 26 pines, lo cual facilita la comunicación con componentes externos, Figura 3. El voltaje para este puerto es de 3.3 volts con valor de 1 lógico y 0 volts para valor 0 lógico. El GPIO soporta una corriente máxima de 16mA.

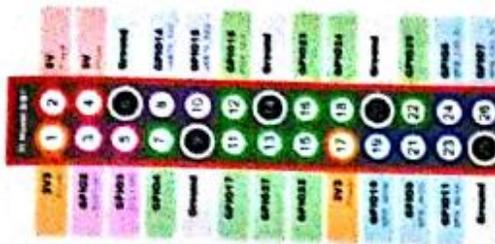


Figura 3. Puertos GPIO de la RPi 3 modelo B.[4]

B. Protocolo SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) es un protocolo estándar creado por Motorola que usa un bus de 4 líneas para conectar dispositivos periféricos de media y alta velocidad. Establece un enlace de datos de forma Síncrona que se basa en la estructura del modelo Master-Slave (maestro-esclavo); en el cual el maestro selecciona al esclavo y da pauta a el proceso de transmisión/recepción[13].

Los pines de trabajo en la RPi para el protocolo SPI son:

- 19 MOSI (Master Out Slave In)
- 21 MISO (Master In Slave Out)
- 23 SCLK (Serial Clock)
- 24 CEO (Chip Enable 0)
- 26 CE1 (Chip Enable 1)

Al combinar los parámetros basados en la señal de reloj se encuentra que existen cuatro modos (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) por los cuales se puede enviar información. El primero parámetro es la polaridad del reloj (CPOL = Clock Polarity) y el segundo es la fase del reloj (CPHA = Clock Phase). Cada parámetro puede tomar dos estados, entonces se tendrá entonces cuatro modos distintos de poder llevar a cabo el proceso de transmisión y envío de información[14].

TABLA 1.MODOS DE ENVIÓ DE INFORMACIÓN.

Modos de Operación SPI		Descripción
Modo 0	CPOL=0	El estado de reloj se encuentra lógico bajo y la información se envía en la

	CPHA=0	transición de bajo a alto, es decir alto activo.
Modo 1	CPOL=0	El estado de reloj se encuentra lógico bajo y la información se envía en la transición de alto a bajo, es decir bajo activo
	CPHA=1	
Modo 2	CPOL=1	El estado de reloj se encuentra lógico alto y la información se envía en la transición de bajo a alto, es decir alto activo
	CPHA=0	
Modo 3	CPOL=1	Donde el estado de reloj se encuentra lógico alto y la información se envía en la transición de alto a bajo, es decir bajo activo
	CPHA=1	

C. Convertidor Analógico-Digital

Para la adquisición de los datos se utiliza el convertidos analógico digital microchip MCP3008 de ocho canales (CH0 – CH7) con una resolución de 10 bits, utilizando la interfaz SPI. Utiliza un rango de voltaje entre 2.7v a 5.5v para su correcta operación[15].

La comunicación entre la RPi y el convertidor MCP3008 permite que la información sea enviada a partir del Modo 1 (0,1) SPI, donde el reloj se encuentra en estado lógico bajo y en cada transición de alto a bajo se envía la información. El canal CH0 debe configurarse como se muestra en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

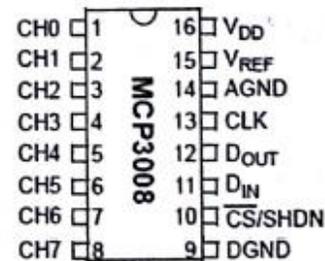


Figura 4. Descripción del convertidor analógico digital MCP3008. Esta imagen indica la correspondencia de los pines. Fuente: [15].

TABLA 2.CONFIGURACIÓN DEL MCP3008.

single / diff	Bits de Control			Selección del Canal
	D2	D1	D0	
1	0	0	0	CH0

Como se muestra en la Figura 5, es necesario habilitar el módulo SPI en las configuraciones generales de la RPi para permitir la comunicación con el convertidor MCP3008.

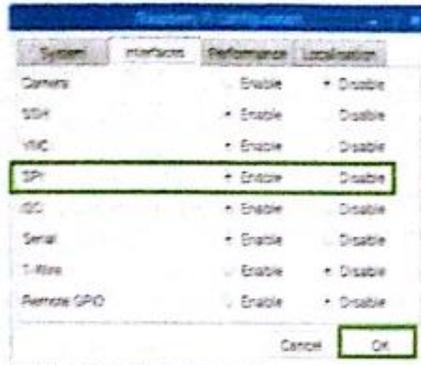


Figura 5. Configuración SPI RPi 3. Permite habilitar el protocolo SPI en la RPi 3 mediante la interfaz gráfica.

En la Tabla 3 se muestra cómo se debe llevar a cabo la conexión de pines del GPIO de la RPi y del MCP3008, se nombra el número de del pin en del MCP3008 y su correspondiente en pin en el GPIO de la RPi 3 Modelo B. En la Fig. 6 se ilustra gráficamente esta correspondencia.

TABLA 3. CONEXIÓN ENTRE PINES GPIO RASPBERRY PI 3 Y MCP3008.

Numero de pin de MCP3008	Nombre de pin MCP3008	No. pin GPIO Raspberry	Raspberry Pi 3 Modelo B
16	VDD	1	3.3 v
15	VREF	17	3.3 v
14	AGND	20	GND
13	CLK	23	GPIO11 SPI0_SCLK
12	DOUT	21	GPIO10 SPI0_MISO
11	DIN	19	GPIO9 SPI0_MOSI
10	CS	24	GPIO8 SPI0_CE0_N
9	DGND	25	GND

La Figura 3 3 ilustra la conexión entre los pines del GPIO de la RPi 3 modelo B y el convertidor MCP3008.

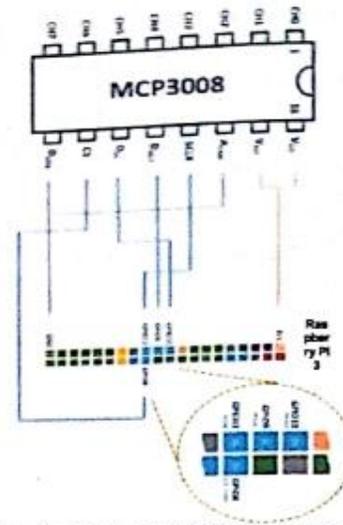


Figura 6. Conexión física entre GPIO RPi 3 y MCP3008. Ilustra la conexión entre los pines del GPIO de la RPi 3 modelo B y el convertidor MCP3008. Fuente: [4].

D. Sensores

La mayoría de los sensores presentan respuestas físicas y químicas con los compuestos volátiles. Los sensores utilizados en la nariz electrónica deben cumplir una serie de características similares a la nariz humana, estas características son: poco susceptible a la humedad y la temperatura; deben ser estables y comportarse de manera uniforme durante la medición, deben reaccionar en el menor tiempo posible y ser fáciles de calibrar.

Para el presente trabajo se realizaron pruebas con un sensor de temperatura y humedad y seis sensores de gas de la serie MQX, con el fin de obtener las partes por millón presentes en el ambiente de dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, hidrogeno y amoníaco.



Figura 7. Sensor MQ-2 sensible a monóxido de carbono.

Las características principales de los sensores se describen en la [Error! No se encuentra el origen de la referencia].

TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE SENSORES.

No.	Sensor	Variable Física	Rango de sensibilidad
1	HMZ-433A	Temperatura	0°C a 60°C
		Humedad	30% a 90% HR
2	MQ-2	Humo	200 a 10000 ppm
3	MQ-4	Monóxido de carbono (CO)	200 a 10000 ppm
4	MQ-7	Monóxido de carbono (CO)	200 a 10000 ppm
5	MQ-8	Hidrogeno	200 a 10000 ppm
6	MQ-9	Metano	200 a 10000 ppm
7	MQ-135	Dióxido de Carbono (CO ₂)	100 a 1000 ppm

Se eligieron los sensores MQX ya que tienen una alta sensibilidad y un tiempo de respuesta rápido. Sus principales características son su interfaz es analógica, amplio alcance de detección, circuito simple y una vida estable y larga.

Para la calibración de sensores se utilizó la gráfica de sensibilidad de la hoja de datos de los sensores y se procedió a calcular la función de correlación entre el valor de la señal obtenida del sensor y las partes por millón presentes en las muestras.

E. Pantalla Táctil

La mayoría de los sistemas actuales muestran los resultados en pantallas LCD donde solo se visualizan y permiten muy poca interacción con el usuario, por tal motivo en este proyecto se propone mostrar los resultados obtenidos durante la adquisición de datos y procesamiento de señales serán mostrados en una pantalla táctil oficial de RPi de siete pulgadas, permitiendo contar con una interfaz de usuario entendible, realizar configuraciones de manera sencilla y práctica, además de una fácil interacción con el sistema.

La pantalla RPi es de 7 pulgadas táctil con dimensiones de 194mm x 110mm x 20mm, una resolución: 800 x 480 píxeles y táctil capacitivo de 10 puntos. Se conecta a la RPi con el puerto DSI y prácticamente permite utilizar a la RPi en una tableta táctil[4].

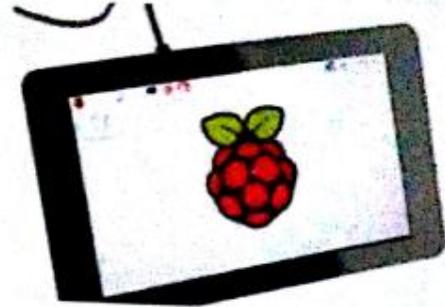


Figura 8. Pantalla táctil RPi 7 pulgadas. Fuente:[4].

F. Placa de circuito impreso (PCB)

Las PCB se componen de una base no conductora, fabricadas con un laminado de fibra de vidrio reforzado o plástico, sobre la que se incluyen las pistas de material conductor que por lo general es cobre. Son utilizados para sostener y conectar elementos electrónicos discretos.

Se desarrollo una PCB que agrupa los elementos que componen el circuito electrónico, el contar con dicha placa permite reducir el ruido que se genera en los sensores por el uso de un protoboard.

Para comenzar se diseñó un diagrama esquemático(Figura 9) en Proteus 8 Professional, incluyendo los componentes del circuito electrónico, se agregaron las fuentes de alimentación de 5V para alimentar los sensores, 3.3V para alimentar el ADC, las conexiones para la interfaz SPI, tierra, un capacitor de 0.1µF y un resistor de 50k para el sensor de temperatura y humedad.

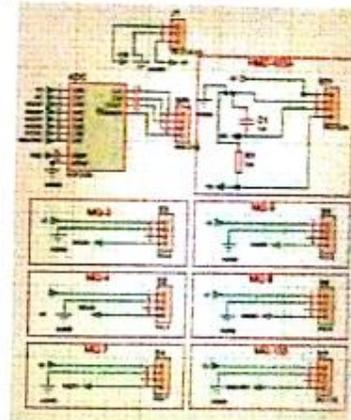


Figura 9. Diagrama esquemático. Muestra los componentes del circuito electrónico. Fuente propia.

Después de realizar el diagrama con las conexiones necesarias, se procedió a realizar la tarjeta PCB, se utilizaron las herramientas de *auto-placer* y *auto-router* proporcionados

por el software Proteux 8, obteniendo el diseño final de PCB que se muestra en la Figura 10.

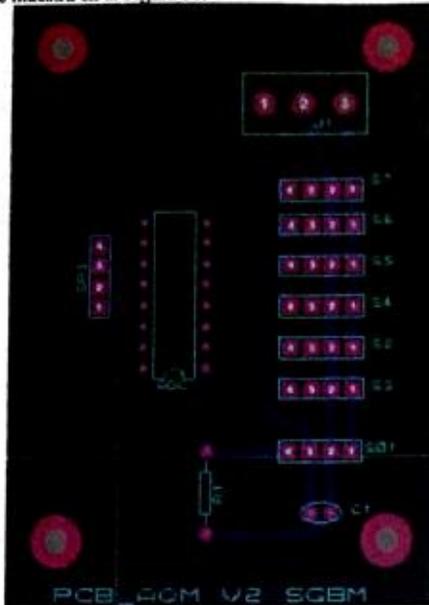


Figura 10. Diseño final de la tarjeta PCB. Fuente propia.

Se cotizaron diferentes servicios de manufactura de PCB y se envió el diseño de la tarjeta para la fabricación bajo el método foto-termotransferible, obteniendo como resultado la tarjeta PCB mostrada en la Figura 11

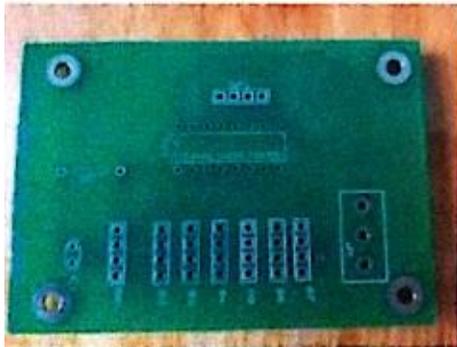


Figura 11. Placa de circuito impreso (PCB). Fuente: propia.

Por último, se soldaron y ensamblaron los componentes del circuito electrónico en la tarjeta PCB y se realizó la conexión con la RPi como se observa en la.

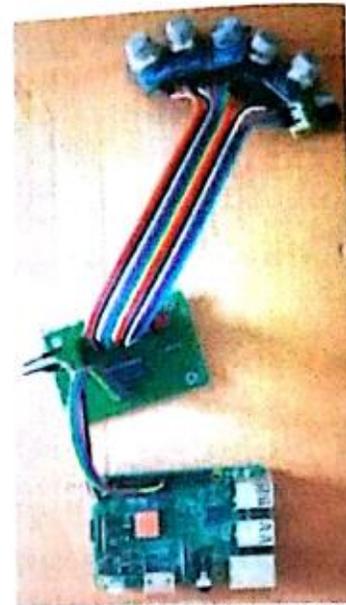


Figura 12. Conexión de la tarjeta PCB con la RPi y sensores. Fuente Propia

G. Armazón para montaje de sensores.

Para el montaje de los sensores se realizó el diseño de una armazón en 3D que se compone de los siguientes elementos:

- Caja contenedora con un espacio para colocar el circuito electrónico, ranuras para insertar la tarjeta con los sensores, un espacio para realizar mediciones de compuestos volátiles y una ranura para integrar un ventilador que funcionará como extractor. Se puede visualizar en la parte izquierda de la Figura 13.
- Una tarjeta para montar y asegurar los sensores, permite intercambiar los sensores de gas, se puede observar en la Figura 14.
- Tapa para asegurar los componentes y sellar el espacio para las mediciones, mostrada en la derecha de la Figura 13.

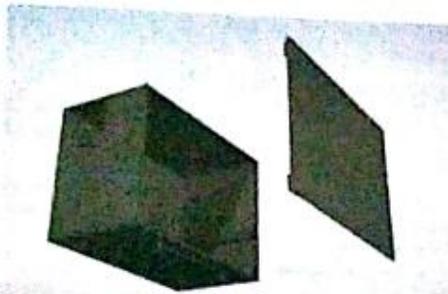


Figura 13. Modelo 3D de armazón para montaje de circuito electrónico, tarjeta de sensores y ventilador. Fuente propia.

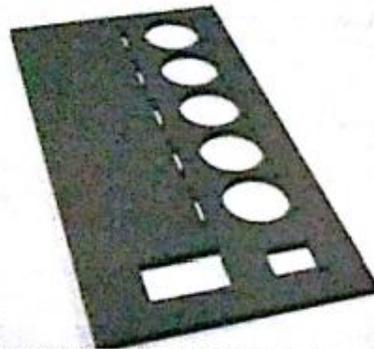


Figura 14. Modelo 3D de tarjeta para montaje de sensores de gas y un sensor de temperatura y humedad. Fuente propia.

H. Interfaz gráfica del sistema.

La interfaz gráfica del sistema consiste en una pantalla principal a modo de monitor de la calidad del aire (Figura 15), que muestra las lecturas de los sensores y una pantalla que permite la calibración de los sensores (Figura 16).

Para el desarrollo de la interfaz se utilizó QT Creator, que es un IDE (entorno de desarrollo integrado) independiente de los sistemas operativos y los tipos de compiladores de C++. QT es de código abierto, multiplataforma e incluye las herramientas necesarias de un IDE.

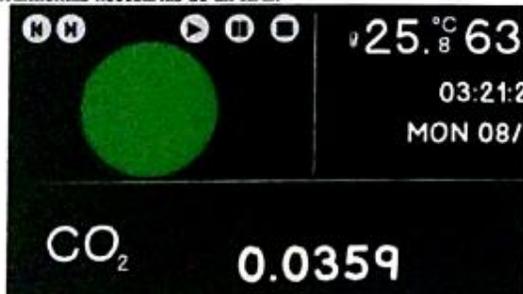


Figura 15. Prototipo del monitor para la calidad del aire. Fuente propia

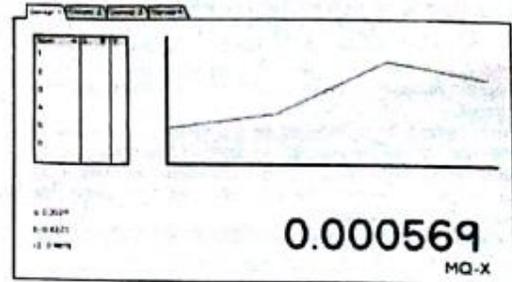


Figura 16. Prototipo de la pantalla para la calibración de los sensores. Fuente propia.

V. RESULTADOS

El MCP3008 es de 10 bits, por lo que puede mostrar valores en un rango de números de 0 a 1023 (2 a la potencia de 10). Una lectura de 0 significa que la entrada es 0V y una lectura de 1023 significa que la entrada es 5V. El rango de 0-5V equivaldría a los rangos de sensibilidad que se muestran en la TABLA 4.

Las lecturas que se obtuvieron de los sensores desde la consola de la RPi se pueden observar en la Figura 17. Se implementó un código en el lenguaje C con la ayuda de la WiringPi, es una librería que permite el acceso a los pines del GPIO escrita en C [16].

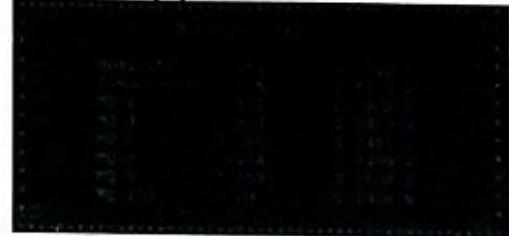


Figura 17. Lectura de sensores de gas. Fuente: propia.

Para mostrar los datos de las lecturas de los sensores se creó una interfaz gráfica, que corresponde a la Figura 18, que permite observar los datos obtenidos de los sensores a manera de monitor y permite controlar el muestreo y la calibración de sensores.



Figura 18. Monitor de la calidad del aire. Fuente: propia.

También se implantaron las interfaces necesarias para la calibración semiautomática de cada uno de los sensores que se utilizaron en este trabajo, permitiendo obtener mejores resultados.

Para realizar la calibración de los sensores se utiliza el método de regresión potencial, a partir de los datos que se muestra en las hojas de datos de cada sensor se obtiene su ecuación para relacionar la medición del sensor con la presencia del gas a medir.

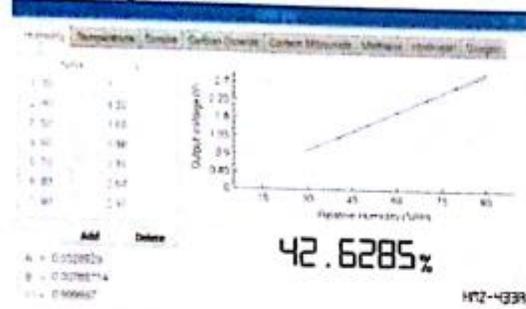


Figura 19. Pantalla para la calibración de los sensores. Fuente: propia.

VI. CONCLUSIONES

El uso de la Raspberry para dar solución a problemas de la vida real es una opción factible, ya que el costo es accesible y en comparación con otras tarjetas el uso de programación orientada a objetos y las capacidades que ofrece permiten el desarrollo de mejores dispositivos.

Utilizar sensores analógicos resulta sencillo gracias a las facilidades que ofrece el convertidor analógico MCP3008 permitiendo realizar proyectos con mayor complejidad y utilidad que permitan el procesamiento de cualquier señal analógica en una tarjeta electrónica RPi.

El experimento que se describió en este trabajo sirve como orientación para la creación de dispositivos conocidos como narices electrónicas y puede ser utilizados para desarrollar múltiples aplicaciones o como guía en la lectura de otros sensores analógicos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Fondo de Proyectos especiales de Rectoría de la Universidad Autónoma de Querétaro (FOPER) por solventar los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo, de igual manera a la Dirección de Posgrado de la Facultad de Informática por permitirnos utilizar la infraestructura y materiales de los laboratorios, al M. en C. Julio Alejandro Romero González por la guía durante la implementación de los circuitos y al M. en C. Ricardo

Chaparro Sánchez por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] E. Soria Olivás, M. Martínez Sober, J. V. Francés Villora, and G. Camps Valls, *Tratamiento Digital de señales*, vol. 53, no. 9, 2007.
- [2] W. Bolton, *Mecatrónica*, 5ta ed. Alfaomega, 2001.
- [3] M. B. Bagant, "Nuevos caminos para la radio . Un proceso productivo digital para un negocio analógico Epligrafes .," no. 1990, pp. 1-10, 2017.
- [4] M. McGench, *Raspberry Pi 3 in easy steps*. 2016.
- [5] J. Zavačký, "Multichannel Signal Digitization," no. May 2014, 1996.
- [6] E. Schaller, J. O. Bossert, and F. Escher, "Electronic Noses and Their Application to Food," *Leb. und-Technologie*, vol. 31, no. 4, 1998.
- [7] S. Benedetti, S. Mannino, A. G. Sabatini, and G. Marazzan, "Electronic nose and neural network use for the classification of honey.," *Apidologie*, vol. 37, pp. 275-292, 2003.
- [8] L. Carvajal, G. Cucaita, C. Zuluaga, and M. Quicaizan, "Uso de una nariz electrónica y panel sensorial para la evaluación de la calidad de mora.," *Vitae*, vol. 19, 2012.
- [9] O. Gualdrón Guerrero and J. Ortiz Sandoval, "Clasificación De Compuestos Químicos Usando Un Sistema Multisensorial (Nariz Electrónica) Desarrollada Sobre Un Dispositivo H,," *Rev. Ciencia, Innovación y Tecnol.*, pp. 13-21, 2013.
- [10] M. A. Valbuena Nuñez and D. R. Medina Hernandez, "Aplicación IoT para Mitigar Efectos de Escapes de Gas Natural en Comunidades Menos Favorecidas.," 2018.
- [11] J. Flores Figueroa, M. A. Romero Ochoa, M. Soto Rodríguez, and M. G. Vazquez Palma, "Diseño de un medidor de energía eléctrica bidireccional y monitoreado mediante aplicación móvil / Design of a two-way electric power meter monitoring with a mobile application," *RECI Rev. Iberoam. las Ciencias Comput. e Informática*, vol. 7, no. 14, p. 1, 2018.
- [12] A. Tiwari, S. Sadistap, and S. K. Mahajan, "Development of Environment Monitoring System Using Internet of Things," in *Ambient Communications and Computer Systems*, 2018, pp. 403-412.
- [13] M. Maksimović, V. Vujović, N. Davidović, V. Milošević, and B. Perišić, "Raspberry Pi as Internet of Things hardware: Performances and Constraints," *Des. Issues*, vol. 3, no. JUNE, p. 8, 2014.
- [14] E. L. Perez, "Ingeniería En Microcontroladores. Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface)," *Technology*, pp. 1-10, 2008.
- [15] Microchip, "MCP3004/3008," 2008.
- [16] "Wiring Pi," *GPIO Interface library for the Raspberry Pi*, 2013.