



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de La Laguna

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Construcción de un sistema para la caracterización de sensores
de gases ambientales.**

POR
Daniel Fidel Olivo Rangel

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR DE TESIS
DR. FRANCISCO GERARDO FLORES GARCÍA
ISSN 0188-9060



RIITEC: (04)-TMCIE-2018
Torreón, Coahuila, México
Noviembre 2018



Bldv. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coah. México

Tel. 01 (871) 7051313 e-mail: webmaster@correo.itlalaguna.edu.mx

www.tecnm.mx | www.itlalaguna.edu.mx



Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por financiar esta investigación y apoyar a jóvenes emprendedores como yo, por brindarme la oportunidad de demostrar de lo que puedo ser capaz, a ustedes gracias y este es el resultado de su confiabilidad hacia mi persona.

Mi profundo agradecimiento al Dr. Francisco Flores García, por creer en mí, por elegirme entre tantos candidatos y darme su confianza, junto a su conocimiento pude emprender una nueva etapa en mi vida, llenarme de experiencia. Gracias por estar presente en cada etapa de esta investigación.

A mi padre por darme estudio, por no dejarme declinar académicamente, sin ello no hubiera dado el siguiente paso y ahora concluir esta etapa de investigación en mi vida. Gracias por darme el mejor regalo que un padre puede dejar a su hijo: sus estudios, esto es para ti.

A mi madre por estar al pendiente de mí y de mi familia, por esas noches de desvelo en mis enfermedades, por acompañarme en mis noches de tensión durante la realización de mi investigación y brindarme las palabras adecuadas para seguir adelante, a ti gracias, porque mi éxito es tu éxito.

A mis hermanos por brindarme su apoyo moral y económico por no dejarme desistir, por escucharme en cada etapa de mi proyecto. Les agradezco no solo por estar presentes aportando buenas cosas a mi vida, sino por los grandes lotes de felicidad y de diversas emociones que siempre hemos vivido juntos.

Finalmente, pero no menos importante, a mis hijas pues a pesar de sus travesuras durante mis días ajetreados me enseñaron que con su sonrisa podía despejarme un momento y continuar. Hijas: son mi principal motivo, para superarme, para continuar preparándome, las amo, y espero que ello les inspire para lograr lo que anhelan, para llegar cuán lejos lo deseen porque siempre estaré ahí para ayudarles a volar cuando sus alas se quebranten, hijas: gracias por tantas risas y amor.

*A mi familia, por apoyarme esencialmente en mis sueños
en brindarme su apoyo en los momentos más difíciles y por
siempre creer en mí, muy en especial a mi abuelo José Santos
Olivo, por creer en mí y mis capacidades, por ayudarme a
levantar el vuelo cuando yo lo perdía...*

*Tito: he llegado a mi meta, gracias por acompañarme
y guiarme desde donde estas.*

Daniel

Resumen Desde hace varios años, la tecnología de los sensores de gas como los electroquímicos y semiconductores, han tomado gran importancia en la química analítica y en algunos otros campos de la investigación, además del desarrollo para la detección de gases nocivos en el ambiente, siendo estos de fácil uso y bajo costo. Actualmente en el mercado existen una gran variedad de sistemas para la calibración de este tipo de sensores, como la cámara de exposición de gas. Sin embargo, debido a la complejidad de estos sistemas de calibración, estos resultan caros y de difícil acceso sobre todo para los estudiantes o investigadores que así lo requieran. Este trabajo muestra la construcción de un sistema de cámaras de gas a partir del método de volumetría, es decir, la mezcla de dos gases con volumen conocido, donde el gas de interés a medir se diluye en otro gas que no tenga selectividad con el sensor de gas a calibrar. Con esto se obtendrán concentraciones y mezclas de gases adecuadas con solo un tanque de gas puro que se desea analizar y otro de gas diluyente, simplificando y economizando el método de calibración. Permitiendo la medición exacta, fiable, y de fácil acceso para proyectos multidisciplinarios.

PALABRAS CLAVES: Gases ambientales, Sensores de gas, Tarjeta Arduino Uno, Cámara de exposición de gas.

Abstract For several years the technology of gas sensors such as semiconductor and electrochemical sensors have taken great importance in analytical chemistry and in some other fields of research as well as development for the detection of harmful gases in the environment, being so, easy to use and low cost. Currently in the market there are a variety of systems for the calibration of this type of sensors, such as the gas exposure chamber. However, due to the complexity of these calibration systems, they are expensive and difficult to access, especially for students or researchers who require them. This document shows the construction of a gas chamber system based on the volumetric method, that is, where the gas of interest to be measured that must be pure in its concentration is diluted in another gas that has no selectivity with the gas sensors to calibrate. With this you will obtain concentrations and mixtures of suitable gases with only one tank of the pure gas that we want to analyze and another of diluent gas, simplifying and economizing the calibration method. Allowing accurate, reliable, and easily accessible measurement for multidisciplinary projects.

Keywords: Environmental gases, Gas sensors, Arduino Uno board, Gas exposure chamber

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	9
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	9
1.4 JUSTIFICACIÓN, IMPACTOS Y VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.4.1 <i>Justificación</i>	10
1.4.2 <i>Impacto social</i>	10
1.4.3 <i>Impacto tecnológico</i>	10
1.4.4 <i>Impacto económico</i>	10
1.4.5 <i>Impacto ambiental</i>	10
1.4.6 <i>Viabilidad de la investigación</i>	10
1.5 BOSQUEJO DEL MÉTODO	11
1.6 CRONOGRAMA	13
1.7 PRESUPUESTO	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 CONTAMINANTES EN EL AIRE	15
2.1.1 <i>Contaminantes Primarios</i>	16
2.1.2 <i>Contaminantes Secundarios</i>	17
2.1.3 <i>Acciones para la mejora de la calidad del aire</i>	18
2.2 GASES: CONCEPTOS BÁSICOS	18
2.2.1 <i>Gases ideales y presión parcial</i>	19
2.2.2 <i>Ley de presiones Parciales de Dalton</i>	21
2.2.3 <i>Unidades de medición del proyecto</i>	23
2.2.4 <i>Características de los Gases Licuados de Petróleo (GLP) utilizado para la evaluación del sensor en el proyecto</i>	24
2.3 INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES DE ESTADO SOLIDO	26
2.3.1 <i>Combustión Catalítica</i>	27
2.3.2 <i>Electrolitos sólidos</i>	29
2.4 DATOS TÉCNICOS DEL SENSOR MQ-5 DE GAS GLP	31
2.4.1 <i>Aplicación</i>	31
2.4.2 <i>Características</i>	31
2.4.3 <i>Especificaciones</i>	31
2.4.4 <i>Modulo FC-22</i>	33
2.5 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS ARDUINO UNO	34

2.5.1 Comunicación	35
2.5.2 I/O, Funciones y Retrocompatibilidad de shields	35
2.5.3 Lenguaje de programación.	35
2.5.4 Características Arduino UNO.....	35
2.5.5 Características del microcontrolador ATMEGA328P	35
2.5.6 Arduino Software (IDE)	36
2.5.7 Bibliotecas	37
2.5.8 Monitor serie	37
CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DE LA CÁMARA DE GAS	39
3.1 PROTOTIPO REALIZADO DE UN SISTEMA DE CÁMARAS DE GAS	40
3.2 FABRICACIÓN DE LAS CÁMARAS DE GAS.	42
3.2.1 Cámara de gas principal	43
3.2.2 Accesorios de la cámara de gas principal.....	43
3.2.3 Cámara de extracción de gas	44
3.2.4 Accesorios de la cámara de extracción de gas.....	44
3.2.5 Sellado de las cámaras de gas	44
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	46
4.1 PROCEDIMIENTO DE USO DEL SISTEMA	46
4.2 CONSIDERACIONES TÉCNICAS.	48
4.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	49
4.3.1 Material.....	50
4.3.2 Conexión entre la placa Arduino y el sensor MQ-5.....	50
4.3.3 Programación de la placa Arduino UNO	53
4.4 RESULTADOS	54
4.4.1 Sistema de cámaras de gas	54
4.4.2 Evaluación del sistema de cámaras de gas.....	55
CONCLUSIONES	59
FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS.....	61

Contenido de Figuras

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
Figura 1.1 Cámara de exposición de gas de Figaro Co [9].....	7
Figura 1.2 Actividades a realizar en el proyecto.	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	15
Figura 2.1 Emisión de contaminantes [4].....	15
Figura 2.2 La presión parcial de un gas en una mezcla es igual a la presión del gas en el recipiente solo. La suma de las presiones parciales nos da la presión total de la mezcla de gases [12].	22
Figura 2.3 Esquema del sensor semiconductor [15].....	27
Figura 2.4 Construcción básica del pellistor [15].	28
Figura 2.5 Estructura básica de un sensor de oxígeno de electrólito sólido [15]	30
Figura 2.6 Esquema de un sensor de oxígeno de zirconia (Cortesía Servomex) [15]	30
Figura 2.8 Especificaciones del sensor MQ-5 [16].....	32
Figura 2.9 Curva característica de sensibilidad del sensor [16].....	32
Figura 2.10 Curva de sensibilidad a diferentes temperatura y humedad	33
Figura 2.11 Circuito Esquemático del Módulo FC-22 [17]	34
Figura 2.12 Ubicación de la resistencia de carga	34
CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DE LA CÁMARA DE GAS	39
Figura 3.1 Prototipo del sistema de calibración hecho en plástico.	41
Figura 3.2 Cámara de gas principal hecha en acrílico.....	43
Figura 3.3 Sellado de la Cámara de gas.	45
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	46
Figura 4.1 Diagrama esquemático de la cámara de exposición de gas.....	47
Figura 4.2 Montaje del circuito electrónico del sensor de gas	51
Figura 4.3 Gráfica y ecuación característica del sensor MQ-5	52
Figura 4.4 Sistema de cámara de gas	55
Figura 4.5 Comparación de curvas de sensibilidad del fabricante y el proyecto.....	57

Contenido de Tablas

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
Tabla 1.1 Índice Metropolitano para la Calidad del Aire en ciudades mexicanas [6].	5
Tabla 1.2 Cronograma.	13
Tabla 1.3 Presupuesto.	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	15
Tabla 2.1 Configuración del sensor en la placa FC-22	34
CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DE LA CÁMARA DE GAS	39
Tabla 3.1 Especificaciones de cámara de gas principal	43
Tabla 3.2 Especificaciones de cámara de extracción de gas	44
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	46
Tabla 4.1 Configuración del sensor MQ-5	50
Tabla 4.2 Resistencia del sensor R_s y la relación R_s/R_o en diferentes concentraciones de gas LP	56

Capítulo 1. Introducción

Los sensores semiconductores se encuentran entre los más versátiles de todos los tipos de sensores de gas, ya que, detectan una gran variedad de gases y se pueden utilizar en aplicaciones diferentes. La experimentación con los sensores semiconductores implica la evaluación de su desempeño, sometiéndolos a diferentes mezclas gaseosas y por lo tanto se tendría que adquirir tantos cilindros de gas con dichas concentraciones iguales a los puntos que se quieran analizar para la calibración del sensor semiconductor, representando un gasto económico importante [1].

Es importante mencionar que la adquisición de la presentación más pequeña de un cilindro de gas que manejan la mayoría de los fabricantes como INFRA, es de 34 litros, un ejemplo sería: un cilindro con 100 ppm de CO (Monóxido de carbono) y gas balance de N₂ (nitrógeno) tiene un costo de 370.66 USD más IVA, y para la evaluación de los sensores necesitamos más de una mezcla con diferentes concentraciones. Por ejemplo, si se desea analizar 10 puntos de calibración del sensor se tendría que invertir en cilindros diferentes con un coste total de \$ 3706.60 USD más IVA. hoy en día, existen sistemas que diluyen un cilindro de gas puro para obtener diferentes concentraciones a partir de ese cilindro para la calibración de sensores gas, tanto electrónicos como de laboratorio, y debido a la naturaleza de sus componentes, estos resultan costosos, para ejemplificar lo anterior, la cámara de exposición de gas de la empresa Figaro tiene un costo aproximado de \$604 USD. (Figaro Co, 2018). Como solución a lo anterior se propone obtener mezclas de gas con diferentes concentraciones a partir de un solo cilindro de gas puro que se desea analizar. Por lo tanto, se requiere un sistema de cámaras de exposición de gas en la cual nos permita crear mezclas con diferentes concentraciones de gas para la evaluación del sensor, así como todos los elementos necesarios para su construcción, con un costo de fabricación de \$ 220 USD. teniendo ventajas importantes económicas y fácil manejo del instrumento.

En virtud de lo anterior, es posible diseñar un sistema de cámaras de gas y fabricarla convenientemente en acrílico, debido a su flexibilidad y su resistencia que lo convierten en el principal compuesto utilizado en las construcciones, sumado a la simplicidad, fácil manejo y bajo costo. Este sistema de cámaras de prueba, compacta, facilitará la preparación de concentraciones deseadas de gas de ensayo usando el método de volumen.

Dicha cámara de exposición de gas, podrá funcionar con sensores de gas del tipo semiconductor, al igual que con sensores de gas del tipo electroquímico. En la investigación se utilizó el sensor de gas tipo semiconductor MQ 5 sensible al gas LP, ya que este gas es de fácil acceso, además el gas será mezclado con aire, economizando la evaluación del sistema de calibración. Para el funcionamiento del sensor semiconductor se empleó una tarjeta Arduino que permita su manipulación y la transferencia de sus señales de respuesta a un ordenador para su posterior almacenamiento y análisis. Además de ser una opción ideal para el manejo de sensores, no implica una inversión monetaria importante para el usuario.

El precio de la tarjeta Arduino es de \$ 21.20 USD. mucho menor que una tarjeta de adquisición de datos como Texas Instruments[2], ambas opciones poseen entradas y salidas digitales y analógicas, así como conectividad con una computadora. Este comprende a un entorno de desarrollo de Arduino que es de libre acceso, con la posibilidad de descargar librerías para comunicarse con software matemático, de tal manera que se pueda controlar y manipular los datos adquiridos de forma más eficiente, puede ser descargado de su sitio web (Arduino 2015).

Este documento muestra el diseño y la construcción de un sistema completo para la puesta en marcha y evaluación de sensores de gas, utilizando equipo y materiales de bajo costo, con el fin de promover el uso de este tipo de tecnología en materia de investigación y desarrollo académico.

Este documento consta de cuatro capítulos, en donde en este primer capítulo se habla de la introducción, antecedentes, planteamiento del problema, justificación, planeación y otros detalles generales del proyecto. Después el segundo capítulo se habla del marco teórico del proyecto para facilitar la comprensión de la propuesta hecha. Seguido por el tercer capítulo donde se habla acerca de los prototipos de cámaras de exposición de gas. Por último, el cuarto capítulo donde ya se muestran los resultados del proyecto.

1.1 Antecedentes

Contaminación ambiental se refiere a la presencia de agentes externos de origen ya sea físico; químico o biológico, que atentan contra la integridad de la naturaleza, llegando a ser nocivo no sólo para el ambiente, sino también para los seres vivos que vivimos en él [3]. Esto también aplica en la contaminación del aire, ya que no sólo tiene su origen en la industria, en nuestros hogares o por el uso de los vehículos. Los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la Tierra como el caso de las erupciones volcánicas, que produce emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles, también contribuyen a la contaminación del aire. [4]

Como respuesta al problema de la contaminación del aire en las principales ciudades del país, el Gobierno Federal, por conducto de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en coordinación con los gobiernos estatales y municipales, y la participación de los distintos sectores de la sociedad, ha desarrollado programas de gestión para mejorar la calidad del aire, también conocidos como ProAire.

Estos se aplican a escala municipal, o como en el caso de la Zona Metropolitana de la Laguna (ZML) a escala regional, cuando por sus

características económicas, demográficas, urbanas, climáticas y geográficas, entre otras, las ciudades presentan problemas.

En mayo de 1996 se llevó a cabo una campaña de monitoreo de la calidad del aire con equipo móvil, cuya finalidad fue efectuar un diagnóstico inicial sobre los tipos y niveles de los contaminantes atmosféricos en las ciudades de Torreón y Gómez Palacio. Los resultados de esta campaña indicaron que para el caso de las partículas menores de 10 micrómetros (PM10) los registros rebasaron los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero sin ser superiores al valor normado de ese entonces de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En lo referente al ozono (O_3), las concentraciones estuvieron cercanas al límite máximo permitido de 0.11 ppm. Mientras que el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), mostraron registros muy por debajo del límite normado[5].

Para mayor referencia en la Tabla 1.1 se muestran los índices para la calidad del Aire [6].

Tabla 1.1 Índice Metropolitano para la Calidad del Aire en ciudades mexicanas [6].

INTERVALOS (IMECA)	CONCENTRACIONES	ECUACIONES
Partículas menores a 10 micrómetros (PM10)		
PM10		
	IMECA	µg/m ³
	0-50	0-60
	51-100	61-120
	101-150	121-220
	151-200	221-320
	>200	>320
		Ecuaciones
		$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/6$
		$I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * 0.5$
		$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/8$
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM2.5)		
PM2.5		
	IMECA	µg/m ³
	0-50	0-15.4
	51-100	15.5-40.4
	101-150	40.5-65.4
	151-200	65.5-150.4
	>200	>150.4
		Ecuaciones
		$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 50/15.4$
		$I[PM_{2.5}] = 20.50 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$
		$I[PM_{2.5}] = 21.30 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$
		$I[PM_{2.5}] = 113.20 + C[PM_{2.5}] * 49/84.9$
		$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 201/150.5$
Ozono (O3)		
	IMECA	ppm
	0-50	0-0.055
	51-100	0.056-0.110
	101-150	0.111-0.165
	151-200	0.166-0.220
	>200	>0.220
		Ecuaciones
		$I[O_3] = C[O_3] * 100/0.11$
Dióxido de Nitrógeno (NO2)		
NO2		
	IMECA	ppm
	0-50	0-0.105
	51-100	0.106-0.210
	101-150	0.211-0.315
	151-200	0.316-0.420
	>200	>0.420
		Ecuaciones
		$I[NO_2] = C[NO_2] * 50/0.105$
		$I[NO_2] = 1.058 + C[NO_2] * 49/0.104$
		$I[NO_2] = 1.587 + C[NO_2] * 49/0.104$
		$I[NO_2] = 2.115 + C[NO_2] * 49/0.104$
		$I[NO_2] = C[NO_2] * 201/0.421$
Dióxido de Azufre (SO2)		
SO2		
	IMECA	ppm
	0-50	0-0.065
	51-100	0.066-0.130
	101-150	0.131-0.195
	151-200	0.196-0.260
	>200	>0.260
		Ecuaciones
		$I[SO_2] = C[SO_2] * 100/0.13$
Monóxido de Carbono (CO)		
CO		
	IMECA	ppm
	0-50	0-5.50
	51-100	5.51-11.00
	101-150	11.01-16.50
	151-200	16.51-22.00
	>200	>22.00
		Ecuaciones
		$I[CO] = C[CO] * 50/5.50$
		$I[CO] = 1.82 + C[CO] * 49/5.49$
		$I[CO] = 2.73 + C[CO] * 49/5.49$
		$I[CO] = 3.64 + C[CO] * 49/5.49$
		$I[CO] = C[CO] * 201/22.01$

A partir del año 2006 se comienzan a detectar altas concentraciones de partículas suspendidas, dióxido de azufre y ozono. Por esta razón en el Plan Estatal de Desarrollo de Coahuila 2006-2011 y el Plan Estatal de Desarrollo de Durango 2005-2010, se definen estrategias preventivas y correctivas que dan origen al Programa

para Mejorar la Calidad del Aire en la Región de la Comarca Lagunera 2010- 2015 (ProAire Comarca Lagunera).

La contaminación del aire en la Región Lagunera se debe, en un 80 por ciento, a los vehículos, y el resto a la actividad económica, que tiene que ver con la extracción, además de la agricultura, de acuerdo a la directora general de Medio Ambiente en Torreón, Susana Estens de la Garza.

"Marmoleras, caleras, cementeras, que generan una cantidad importante de partículas suspendidas totales, además de la agricultura, cuando se realizan labores de barbecho, pero en un 75 a 80 por ciento son las fuentes móviles, cualquier actividad humana o empresa tiene un efecto sobre la calidad del aire" - Susana Estens de la Garza -[7].

1.2 Planteamiento del problema

El determinar la concentración de un contaminante en la atmósfera presenta una serie de dificultades, unas derivadas de la variabilidad de dicha concentración, y otras determinadas por el método utilizado en la zona de muestra y del análisis.

Para solventar en parte estos problemas es preciso establecer una adecuada estrategia de muestreo, con el fin de obtener unas estimaciones representativas de la exposición real. El otro aspecto a considerar en la evaluación ambiental lo constituye la calidad o exactitud del criterio de valoración a utilizar, es decir, si dicho criterio es suficientemente fiable para la prevención de los riesgos profesionales.

Desde hace varios años, la tecnología de los sensores de gas como los electroquímicos y semiconductores, han tomado gran importancia en la química analítica y en algunos otros campos de la investigación, además del desarrollo para la detección de gases nocivos en el ambiente. Los sensores semiconductores se encuentran entre los más versátiles de todos los tipos de

sensores de gas, ya que, detectan una gran variedad de gases y se pueden utilizar en aplicaciones diferentes.

La experimentación con los sensores semiconductores implica la evaluación de su desempeño, sometiéndolos a diferentes mezclas gaseosas.

En consecuencia, se puede esperar un rendimiento variable de cada uno de estos sensores, en términos de sensibilidad, selectividad, tiempo de respuesta y vida útil. [8]

Actualmente en el mercado existen gran variedad de sistemas de calibración de sensores de gas, el más utilizado para lograrlo es la cámara de gas. Sin embargo, debido a la complejidad de los mismos, estos resultan caros y de difícil acceso sobre todo para los estudiantes o investigadores que así lo requieran. Como se ejemplifica con la Figura 1.1, donde este instrumento equivale aproximadamente \$ 11,462 pesos mexicanos.

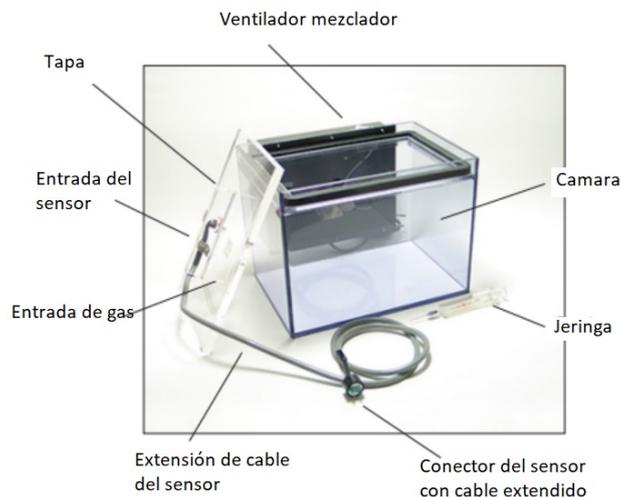


Figura 1.1 Cámara de exposición de gas de Figaro Co [9].

A continuación, se describe la cámara de gas, SR-3 – Bench Top Test Chamber de la marca Figaro, como ejemplo, de este tipo de instrumentos como método de calibración de sensores de gas.

El SR-3 es una cámara de prueba compacta debido a su volumen para uso en pruebas de evaluación de sensores de gas, utilizando gases de prueba de diversas concentraciones sin un sistema de control de suministro de gas adicional. La concentración deseada de gas de prueba puede prepararse fácilmente en la cámara usando el método de volumen. El sensor de gas SR-D1A, de la serie 8 y serie 26 de Figaro, en combinación con el módulo de conexión del sensor hacia la cámara de gas siendo posible solo con su marca de productos, ayuda al usuario a evaluar estos rápidamente sin que tengan que desarrollar la electrónica de manejo para cada sensor de gas. Este sistema tiene la principal característica de reducir costos en la adquisición de mezclas ya que se disuelve dentro de la cámara con aire puro, esto quiere decir que solo se tendrá que invertir en un solo tanque de gas que se desee analizar, pero siendo éste puro en su concentración, economiza el proceso total de calibración. Una de las desventajas del sistema de Figaro es que tiene un volumen eficaz de 5400ml (mililitros), lo cual dificultaría lograr concentraciones muy pequeñas, por ejemplo, menores a 50 partes por millón, la cual esta cantidad de agentes externos se aproxima a la que se encuentra en el aire [9].

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo General.

Diseñar y construir una cámara de gas la cual utilizará el método de volumetría, es decir, donde el gas de interés a medir debe ser puro en su concentración se diluye en otro gas que no tenga selectividad con los sensores de gas a caracterizar como en el caso de gas nitrógeno o aire limpio. Esta obtendrá concentraciones y mezclas de gases adecuadas con sólo un tanque de gas puro que se desea analizar y otro de gas nitrógeno o simplemente aire limpio, logrando economizando el método de calibración. Permitiendo la medición exacta, fiable, y de fácil acceso para proyectos multidisciplinarios que a futuro así lo requieran.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Integrar al sensor semiconductor de gas un modelo de caracterización a bajo costo.
- Proporcionar lecturas confiables de los sensores de gas acoplado un control riguroso a la variable temperatura.
- Obtener un método de calibración de sensores de gas ambiental confiables y a bajo costo.
- Elaborar un sistema de calibración de sensores versátil que permita su uso para futuros proyectos de docentes y alumnos.
- Desarrollar un artículo científico en base a los resultados de la evaluación de los sensores de gas empleados con el sistema de calibración propuesto.

1.4 Justificación, impactos y viabilidad de la investigación.

1.4.1 Justificación.

Al caracterizar un sensor de gas este suministrará información precisa, aumentando la eficiencia y reduciendo las lecturas erróneas, utilizando equipo y materiales de bajo costo, desarrollándose como un instrumento multidisciplinario para proyectos que pudieran realizarse.

1.4.2 Impacto social.

No se prevé ningún impacto social significativo.

1.4.3 Impacto tecnológico.

No se prevé ningún impacto tecnológico significativo.

1.4.4 Impacto económico.

Al ser de bajo costo, se prevé que la cámara de gas sea una opción ideal como instrumento de caracterización para los sensores detectores de gases ambientales.

1.4.5 Impacto ambiental.

No se prevé ningún impacto ambiental inmediato, pero a largo plazo podría permitir ofrecer información a las instancias gubernamentales sobre especies de gas nocivas en el ambiente.

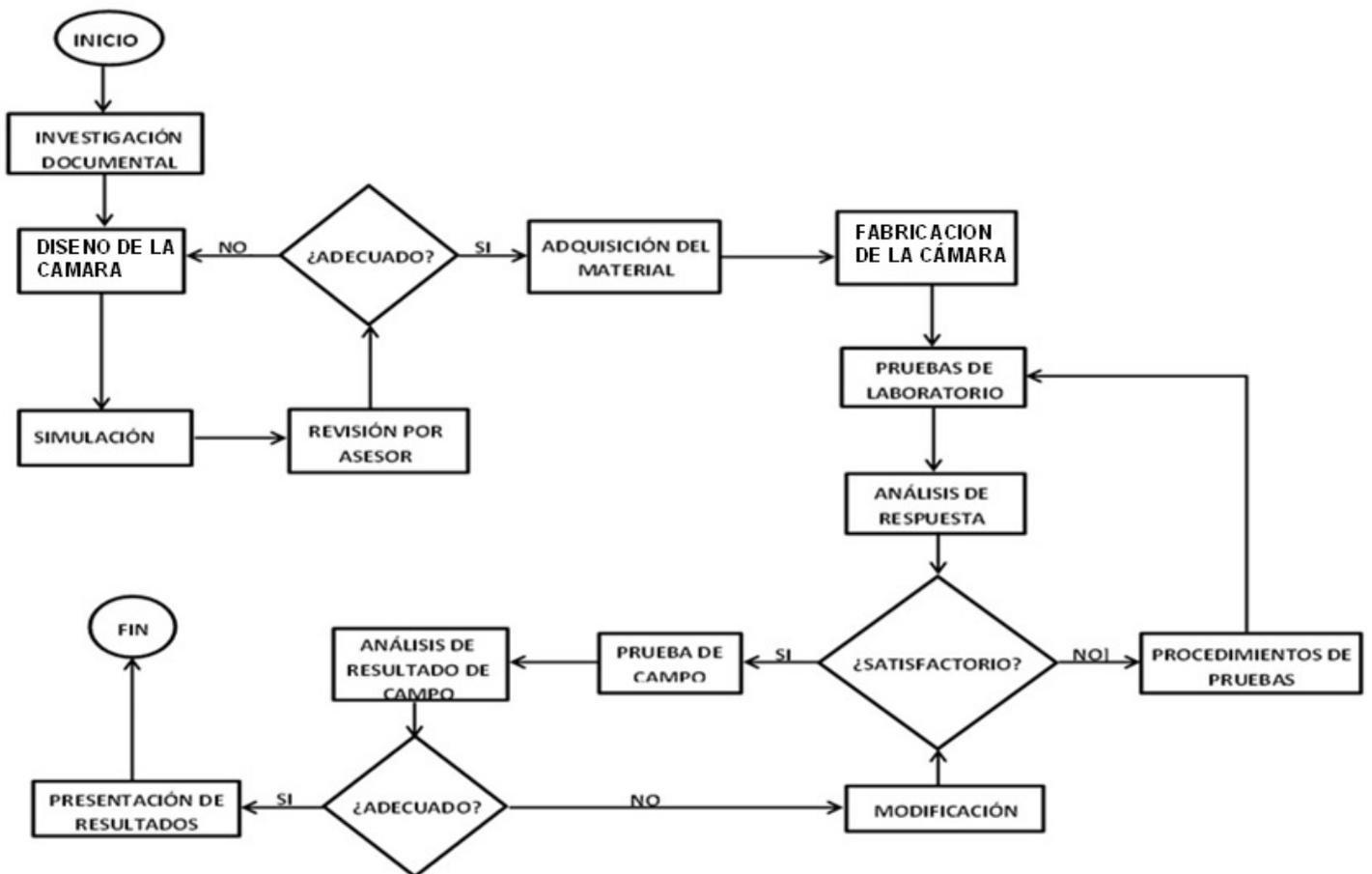
1.4.6 Viabilidad de la investigación.

Este proyecto es viable debido a que:

- Se tienen los recursos necesarios para la elaboración del proyecto ya que es de bajo costo.
- La información que se recabe con este método sería precisa.
- Reduciría el riesgo de lecturas erróneas, así como un fallo de funcionamiento como instrumento de medición ambiental.
- Se puede utilizar la caracterización del sensor de gas en proyectos multidisciplinarios que así lo requieran.
- Se cuenta con los conocimientos para desarrollar el proyecto.

1.5 Bosquejo del Método.

En la figura 1.2, se presenta el diagrama de flujo de las actividades a seguir en



el proyecto.

Figura 1.2 Actividades a realizar en el proyecto.

1.7 Presupuesto.

En la tabla 1.3, se presenta el presupuesto para desarrollar el proyecto.

Tabla 1.3 Presupuesto.

No. Partida	Cantidad	Unidad	Concepto	Costo Unitario	Costo total
1	1	20 lts	Cámara principal	3285	3285
2	1	1.700 lts	Cámara de extracción	650	650
3	1	10 lts	Tanque de Gas LP	720	720
4	1	1 m	Tubo de cpvc	41.70	41.70
5	1		Bomba de aire manual	350	350
6	2		Llave de 3 vías para intravenosa	30	60
7	1	1ml	Jeringa	5	5
8	1	5ml	jeringa	8	8
9	2	70 g	Tubos silicón frío hermético	41	82
10	1		Conector hembra, conector macho contratuerca, empaques,	108	108
11	2	¼	Válvulas de plástico	35.50	71
12	1		Triplay pliego chico	180	180
13	1	½	Válvula con estrangulamiento para manguera	52	52
14	1	353 g	Tubo de pegamento blanco <i>no más clavos</i>	48	48
15	1	½	Material galvanizado	81	81
16	1	¼	Material galvanizado	81	81
17	1		Conector de bronce para manguera tipo pichancha	82	82
19	2	0 a 15 psi	Manómetros	223	446
				Total	4429.70

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Contaminantes en el aire.

La contaminación en el aire no sólo tiene su origen en la industria, en nuestros hogares o por el uso de los vehículos. Los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la Tierra –como el caso de las erupciones volcánicas, que produce emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles–, también contribuyen a la contaminación del aire.

Por esta razón, se pueden clasificar según su origen como naturales y antropogénicos. Los primeros provienen de fuentes naturales y los segundos son aquellos derivados de las actividades del hombre como se muestra en la figura 2.1 [4].

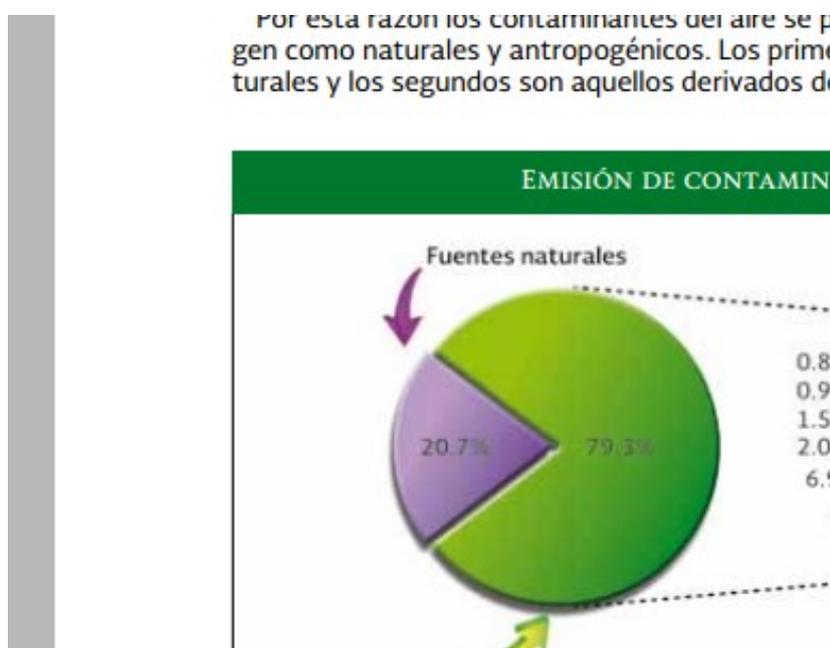


Figura 2.1 Emisión de contaminantes [4].

2.1.1 Contaminantes Primarios.

Son vertidos directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, entre otros. Los contaminantes atmosféricos que integran este grupo son:

- **Óxidos de azufre (SO_x).** Se forman por la combustión del azufre presente en el carbón y el petróleo. Los SO_x forman con la humedad ambiente aerosoles, incrementando el poder corrosivo de la atmósfera, disminuyendo la visibilidad y provocando la lluvia ácida.
- **Monóxido de carbono (CO).** Es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera. Se produce por la combustión incompleta de compuestos de carbono. Es un gas inestable que se oxida generando dióxido de carbono (CO₂). Alrededor del 70 por ciento del CO provienen de los vehículos.
- **Óxidos de nitrógeno (NO_x).** Se producen en la combustión de productos fósiles, destacando los vehículos, carbón y quemas de madera. La producción de fertilizantes y explosivos, tabaco y calderas generan emisiones importantes de NO_x. El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) requieren especial atención. El NO se oxida formando NO₂, mientras que el NO₂ es precursor del esmog fotoquímico.
- **Partículas.** Es material respirable presente en la atmósfera en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras). De acuerdo con su tamaño se pueden dividir en dos grupos principales: las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 µm (PM₁₀) y las de fracción respirable más pequeña (PM_{2,5}).
- **Hidrocarburos (HC).** Las emisiones de HC están asociadas a la mala combustión de derivados del petróleo. Las fuentes más importantes de emisión son el transporte por carretera, los disolventes, pinturas, vertederos y

la producción de energía. Los de mayor interés son los compuestos orgánicos volátiles (COV), dioxinas, furanos, bifenilos policlorados (PCB) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) [4].

2.1.2 Contaminantes Secundarios.

Son los contaminantes originados en el aire como consecuencia de la transformación y reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera. Se puede considerar:

- **Ozono (O₃).** Como se mencionó anteriormente el O₃ forma parte de la composición de la atmósfera, sin embargo, a baja altura (O₃ troposférico) resulta perjudicial por su carácter oxidante, reactivo, corrosivo y tóxico, por lo que reacciona con rapidez generando compuestos secundarios. [4]
- **Lluvia ácida.** Es el término que se ha usado para describir el proceso por el cual ciertos ácidos se forman en la atmósfera a partir de contaminantes y luego se precipitan a la tierra. El SO₂ (dióxido de azufre) y los NO_x, causan la lluvia ácida. Estas sustancias en presencia de agua, O₂ y otros compuestos químicos forman ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃) respectivamente, que se precipitan a la tierra en forma líquida cuando se presentan lluvias o en forma seca en presencia de nevadas o neblinas. El pH de la lluvia normal es de alrededor de 6, mientras que la lluvia ácida presenta un pH menor a 5.
- **Contaminación fotoquímica.** La constituyen la luz solar y sustancias susceptibles de ser oxidadas. El smog fotoquímico es una mezcla de contaminantes que se forman por reacciones producidas por la luz solar al incidir sobre los contaminantes primarios.

2.1.3 Acciones para la mejora de la calidad del aire

Las Guías de la Calidad del Aire de la OMS constituyen un análisis consensuado y actualizado sobre los efectos de la contaminación en la salud, que recomiendan los parámetros de calidad del aire para reducir de modo significativo los riesgos a la salud.

Derivado de esto, las autoridades nacionales elaboran las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) por conducto de la Secretaría de Salud, las cuales fijan los valores máximos permisibles para aquellos contaminantes que representan un riesgo comprobado en la salud humana. Los límites vistos en la tabla 1.1 se establecen utilizando como referencia a los grupos más sensibles de la población, como niños, adultos mayores y personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares [4].

2.2 Gases: Conceptos básicos

Las moléculas de los gases se mueven continuamente debido a la temperatura. Cuanto mayor sea la temperatura, con más velocidad se moverán las moléculas. Pero la temperatura no se mide en la escala normal de temperaturas, la escala Celsius o Centígrada, sino en una escala especial llamada escala Kelvin o escala absoluta. A -273°C las moléculas estarían quietas. Por eso no puede haber una temperatura más baja. En la escala Kelvin, 0 K equivale a -273°C . Y no pueden existir temperaturas inferiores, así que no pueden existir temperaturas negativas. Para pasar de una escala a otra basta sumar o restar 273. Así, 100°C serán $100 + 273 = 373\text{K}$ y 500K serán $500 - 273 = 227^{\circ}\text{C}$. Es en esta escala de temperatura en la que deberemos medir siempre la temperatura de un gas. Las moléculas de gas ocupan un volumen y en él se mueven y desplazan. Aunque en el Sistema Internacional el volumen se mida en m^3 (metros cúbicos), cuando se trata de gases el volumen que ocupa se mide en litros (l). Pero no hay que olvidar que 1 litro equivale

a 1 dm^3 (decímetro cúbico), es decir, que 1000 L son 1 m^3 . Como las moléculas de gas se están moviendo, chocarán con el recipiente que las contiene (y entre sí, claro). Al chocar, ejercerán una presión, otra magnitud física, resultado de dividir la fuerza por la superficie. En el sistema internacional se mide en pascales (Pa), pero cuando se estudian los gases se suele emplear la atmósfera (atm), que es la presión que ejerce la atmósfera a nivel del mar (en la playa, vamos) y que equivale a 101300 Pa. Equivale a aplicar una fuerza de un Newton en una superficie de un metro cuadrado. El pascal es una unidad muy pequeña, así que se han definido otras mayores y que se emplean en distintas ciencias. En meteorología, en la que también es importante la presión, ya que dependiendo de ella cambiará o no el tiempo y hará más o menos frío y habrá mayor o menor posibilidad de lluvia, la presión se mide en bares (b) o milibares (mb). Finalmente, por razones históricas, a veces se mide la presión en milímetros de mercurio (mmHg), siendo una atmósfera 760 mmHg. Evidentemente, 1 b equivale a 1000 mb y son 100000 Pa [10].

2.2.1 Gases ideales y presión parcial

Los gases en las mezclas se acercan a los gases ideales. Esta suposición generalmente es razonable siempre y cuando la temperatura del gas no sea demasiado baja (cerca a 0°K). Y la presión esté alrededor de 1 atm [11].

De acuerdo a lo anterior se considerará lo siguiente:

- Las moléculas de gas no ocupan volumen.
- Las moléculas no tienen atracciones intermoleculares, lo que significa que actúan de forma independiente de las demás moléculas de gas.

De acuerdo con estas suposiciones, se calcula la contribución de cada uno de los gases en una mezcla a la presión total. La presión que ejerce un gas en particular en una mezcla se conoce como su presión parcial. Se puede calcular la presión parcial de un gas utilizando la ley de los gases ideales [11,12].

Ejemplo: el cálculo de la presión parcial de un gas

Se tiene una mezcla de gas hidrógeno H_2 (g), y gas O_2 (g). La mezcla contiene 6.7 moles de gas hidrógeno y 3.3 moles de gas oxígeno. La mezcla está en un recipiente de 300 litros a $273^\circ K$, y la presión total de la mezcla de gases es 0.75 atm.

La contribución del gas hidrógeno a la presión total es su presión parcial. Puesto que las moléculas gaseosas en un gas ideal se comportan independientemente de los demás gases en la mezcla, la presión parcial de hidrógeno es igual a si no hubiera otros gases en el recipiente. Por lo tanto, si se quiere saber la presión parcial del gas hidrógeno en la mezcla, P_{H_2} , podemos ignorar el gas oxígeno completamente y usar la ley de los gases ideales, ecuación 1:

$$P_{H_2}V = n_{H_2}RT \quad (1)$$

Al despejar la ecuación de los gases ideales para obtener P_{H_2} , tenemos, ecuación 2:

$$P_{H_2} = \frac{n_{H_2}RT}{V} \quad (2)$$

$$P_{H_2} = \frac{(6.7 \text{ mol})(0.08206 \frac{\text{atm}\cdot\text{l}}{\text{mol}\cdot\text{K}})(2731)}{3001} = 0.50 \cdot \text{atm}$$

Así, la ley de los gases ideales dice que la presión parcial de hidrógeno en la mezcla es 0.50atm. También podemos calcular la presión parcial de hidrógeno en este problema usando la ley de presión parcial de Dalton, que se analizará en la siguiente sección.

2.2.2 Ley de presiones Parciales de Dalton.

En la vida cotidiana, medimos la presión de un gas cuando utilizamos un barómetro para revisar la presión atmosférica al aire libre, o un manómetro para medir la presión en el neumático de una bicicleta. Cuando hacemos esto, estamos midiendo una propiedad física macroscópica de un gran número de moléculas de gas que son invisibles a simple vista. A nivel molecular, la presión que estamos midiendo resulta de la fuerza de las moléculas individuales del gas que chocan con otros objetos, tales como las paredes del recipiente que las contiene [11,12].

La ley de presión parcial de Dalton establece que la presión total de una mezcla de gases es la suma de la presión parcial de sus componentes, ecuación (3):

$$P_{Total} = P_{gas\ 1} + P_{gas\ 2} + P_{gas\ 3} \dots(3)$$

Donde la presión parcial de cada gas es la presión que el gas ejercería si fuera el único gas en el recipiente. Esto se debe a que suponemos que no hay fuerzas de atracción entre los gases. Como se muestra en la Figura 2.2.

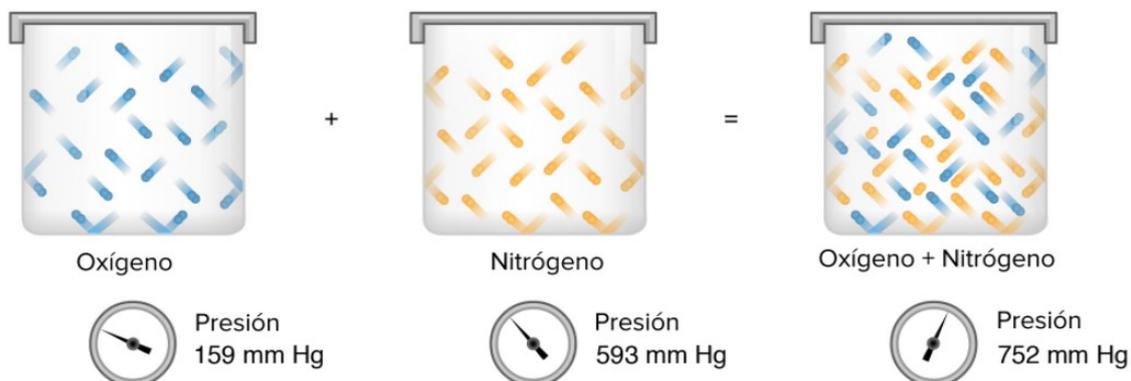


Figura 2.2 La presión parcial de un gas en una mezcla es igual a la presión del gas en el recipiente solo. La suma de las presiones parciales nos da la presión total de la mezcla de gases [12].

La ley de presión parcial de Dalton también se puede expresar en términos de la fracción molar del gas en la mezcla. La fracción molar de un gas es el número de moles de ese gas entre el número total de moles en la mezcla, y frecuentemente se abrevia como x , ecuación (4) [12,13]:

$$x_1 = \text{fracción molar de gas 1} = \frac{\text{moles de gas 1}}{\text{moles totales de gas}} \quad (4)$$

Se puede despejar la ley de Dalton para obtener la presión parcial del gas 1 en una mezcla en términos de la fracción molar del gas 1, ecuación (5):

$$P_{\text{gas 1}} = x_1 P_{\text{Total}} \quad (5)$$

Ambas formas de la ley de Dalton son muy útiles para resolver diferentes tipos de problemas, lo que incluye:

- El cálculo de la presión parcial de un gas cuando se conocen la relación molar y la presión total.
- El cálculo de los moles de un gas específico si se conocen la presión parcial y la presión total.
- El cálculo de la presión parcial si se conocen las presiones parciales de los componentes.

2.2.3 Unidades de medición del proyecto

La concentración de gases y vapores se expresa como partes de vapor o de gas por millón de partes del aire contaminado (partes por millón = p.p.m), en unidades de volumen por 10^6 de volúmenes y usualmente se corrige para 25°C y 760 mmHg (presión). Variaciones en la expresión de partes por millón son, por ciento de volumen y partes por mil millones [13].

$$ppm = \frac{\text{partes de aire contaminado}}{\text{millón de partes de Aire}}(5)$$

$$p.p.m = \frac{\text{litros}}{10^6 \text{ lts}} p.p.m = \frac{\text{centímetros}^3}{10^6 \text{ cm}^3}$$

$$p.p.m = \frac{\text{Pie}^3}{10^6 \text{ pie}^3} p.p.m = \frac{\text{metros}^3}{10^6 \text{ m}^3}$$

Entonces es similar a:

$$ppm = \left[\frac{\text{volumen del contaminante puro}}{\text{volumen total}} \right] * 10^6 (6)$$

2.2.4 Características de los Gases Licuados de Petróleo (GLP) utilizado para la evaluación del sensor en el proyecto.

Los GLP son una mezcla de hidrocarburos ligeros obtenidos en el proceso de refinación del petróleo, compuestos principalmente por butano y propano en proporciones variables, que suelen ser del orden del 60% de butano y un 40% de propano.

A presión atmosférica su punto de ebullición es de -17°C . Se almacenan y transportan en forma líquida (de ahí el nombre) aunque van siempre acompañados de una bolsa o cámara de fase gaseosa. El elevado índice de octano y su poder calorífico, superior al de los combustibles líquidos, juntamente con el hecho de que con presiones entre 5 y 15 bares son líquidos, hace que su utilización como sustituto de los combustibles líquidos en vehículos sea viable desde hace ya más de treinta años [14]

Es un combustible que tiene una composición química donde predominan los hidrocarburos butano y propano o sus mezclas, las cuales contienen impurezas principales, como son el propileno o butileno o una mezcla de estos.

Los gases butano y propano, en estado puro, son hidrocarburos del tipo:

- C_nH_{2n+2} :
 - Butano: C_4H_{10}
 - Propano: C_3H_8

Las fuentes de obtención de este combustible son las refinerías (destilación del petróleo) y las plantas de proceso de gas natural, las cuales aportan alrededor de un 25% y un 75% de GLP respectivamente

Los GLP son hidrocarburos derivados del petróleo. Su nombre, Licuado del Petróleo, proviene de convertir el estado gaseoso en el que se encuentra a presión atmosférica en líquido mediante compresión y enfriamiento, necesitándose 273 litros de vapor de GLP para obtener 1 litro de GLP líquido.

Para su obtención, el petróleo se somete a una operación denominada destilación, mediante la cual se van separando ordenadamente, de acuerdo con sus densidades y puntos de ebullición, los diversos componentes: gasolinas ligeras, kerosenos, butano, propano, gas-oil, fuel-oil y aceites pesados.

Los gases derivados de esta destilación que forman el grupo de los GLP son el butano (40%) y el propano (60%), que se distinguen entre sí por su composición química, presión, punto de ebullición y su poder calorífico.

La obtención de GLP a partir de gas natural es conocida como proceso de licuefacción del GLP. Dicho proceso es explicado a continuación: El gas natural está constituido por metano, etano, propano, butano e hidrocarburos más pesados, así como por impurezas tales como el azufre. Este gas se envía a las plantas de proceso. En una primera etapa la corriente de gas pasa por una planta endulzadora, donde se elimina el azufre.

Posteriormente se introduce en una planta criogénica, en la cual mediante enfriamiento y expansiones sucesivas se obtienen dos corrientes: una gaseosa formada básicamente por metano (gas residual) y otra líquida (licuables).

En el proceso siguiente de fraccionamiento, la fase líquida se separa en diferentes componentes: etano, gas LP y gasolinas naturales.

Para facilitar su transporte y almacenamiento, el gas licuado del petróleo que se encuentra en estado gaseoso a condiciones normales de presión y temperatura, se licua y se utiliza a bajas presiones (entre 5 y 9 bar) para así mantenerlo en estado líquido. El almacenamiento se realiza en tanques o en depósitos [14].

2.3 Introducción a los sensores de estado sólido

Este es probablemente el sensor de gas más numeroso y simple. Funciona bajo el principio de que la conductividad eléctrica de un material semiconductor se altera cuando se expone a un gas. El gas se adsorbe a la superficie del material y altera su conductividad superficial, o altera la "química del defecto" del material y, por lo tanto, su conductividad a granel. El resultado neto es que se observa un cambio de resistencia cuando el gas está presente y esto se usa como un medio para detectar el gas [15].

El óxido de estaño, un semiconductor de tipo N, es probablemente el material de óxido de metal más utilizado; también se han usado óxido de zinc y adiciones de metales preciosos, dependiendo la elección del gas de interés. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de un sensor simple de "efecto de volumen". Una bobina de calentamiento y una bobina de detección están incrustadas en una sinterización de óxido de estaño principalmente. La bobina del calentador se energiza y se monitorea el cambio en la resistencia entre el calentador y la bobina de detección. Los sensores de este tipo se utilizan principalmente como alarmas en el hogar por fugas de gas o humo. También se usan como alarmas personales o de área. Son simples, de bajo costo y son capaces de detectar bajas concentraciones de gases tóxicos o inflamables en el aire. Sin embargo, no son selectivos y pueden ser inhibidos por algunos gases. Existe una amplia investigación acerca de familias de óxidos de metales, semiconductores orgánicos y polímeros por sus propiedades sensibles a los gases. El sensor cuenta con la inclusión de calentadores y el uso de películas

gruesas. Otra vía es el uso de varios sensores, cada uno sensible principalmente a un gas diferente, para crear una "nariz electrónica" junto con el análisis de redes neuronales; esto se presta a un tipo de detección cualitativa en lugar de cuantitativa [15].

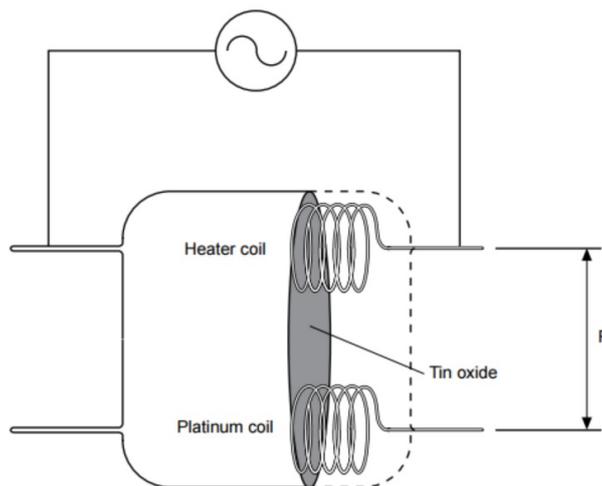


Figura 2.3 Esquema del sensor semiconductor [15].

La principal fortaleza del estado sólido es su larga vida útil, ya que el sensor generalmente dura 10 años o más en aplicaciones limpias. Esta es una gran ventaja en comparación con otros tipos de sensores, tales como perlas catalíticas o sensores electroquímicos, que típicamente duran solo de uno a dos años [15].

2.3.1 Combustión Catalítica

Este es un método simple y muy popular para detectar gases combustibles en el aire. La energía liberada por la oxidación de un gas combustible en la superficie de un catalizador se convierte en un cambio en la resistencia de un elemento sensible a la temperatura. Una forma de este sensor conocido como Pellistor ha sido popular desde la década de 1950. La construcción básica de un Pellistor se muestra en la Figura 2.4.

Una bobina delgada de alambre de platino está incrustada en un cordón refractario poroso, generalmente alúmina, de aproximadamente 1 mm de diámetro. Una referencia y un elemento activo están dispuestos en un puente de Wheatstone. El elemento activo está dopado con un catalizador elegido para adaptarse al gas que se detectará. Platino, paladio y thoria son algunos de los catalizadores utilizados.

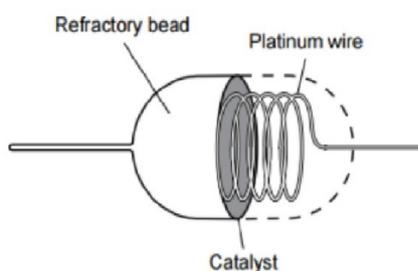


Figura 2.4 Construcción básica del pellistor [15].

El elemento de referencia, por otro lado, no tiene catalizador. Las cuentas se llevan a su temperatura de funcionamiento normal a través de un voltaje aplicado. El puente se equilibra inicialmente en presencia de aire libre de combustibles. A continuación, se admite una concentración conocida del gas combustible de interés con aire en el detector. El gas combustible y el oxígeno reaccionan en la superficie del catalizador y la energía resultante aumenta la temperatura del cordón y, por lo tanto, la de la espiral de platino, lo que provoca un cambio de resistencia en un brazo del puente. La salida del puente es casi lineal, con la concentración de gas que permite el diseño de sistemas simples de detección de gases. La técnica, sin embargo, es básicamente no selectiva; ciertos gases y compuestos inhiben (azufre) o envenenan (siliconas) el catalizador, y la presencia de oxígeno es necesaria para completar el proceso de combustión [15].

2.3.2 Electrolitos sólidos.

Las soluciones sólidas como la ititia o la calcia en zirconia forman una familia de electrolitos sólidos en los que la conductividad eléctrica se debe principalmente a la movilidad de los iones de oxígeno. El electrolito sólido debe calentarse a más de 600°C antes de que la conductividad se convierta en un valor utilizable y se puede suponer una conducción iónica pura. Al seleccionar soluciones sólidas alternativas, los iones que no sean oxígeno pueden producir la movilidad. Sin embargo, el oxígeno es el gas principal a medir usando electrolitos sólidos y el uso de sensores de oxígeno electrolítico sólido permite la medición de oxígeno en gases de combustión, la detección de partes por millón de niveles de oxígeno en gases puros como el nitrógeno, la regulación y el monitoreo del suministro de oxígeno del piloto de combate, o el análisis de respiración por respiración de los atletas en entrenamiento. La estructura básica de un sensor se muestra en la Figura 2.5. Una muestra y una cámara de referencia están separadas por un electrolito sólido que conduce un ion de oxígeno. Esto podría ser un disco en un conjunto tubular. El electrodo de platino y los hilos conductores se depositan a cada lado del disco. Un calentador eléctrico lleva la temperatura del sensor al punto de trabajo. La salida del sensor leído entre los electrodos se relaciona con la relación de la presión real de oxígeno entre el gas de referencia y el gas muestra. Existen muchas variedades de diseños prácticos. Un ejemplo de un diseño resistente que elimina el riesgo de fractura suspendiendo el elemento de zirconia entre los diafragmas flexibles se muestra en la Figura 2.6 y un sensor real en la foto. Uno de los principales problemas del uso de este tipo de sensor es que si el gas de muestra contiene combustibles, es probable que estos gases ardan dentro del sensor debido a su alta temperatura de funcionamiento y la presencia de electrodos catalíticos que conducen a un error en el nivel de oxígeno indicado .

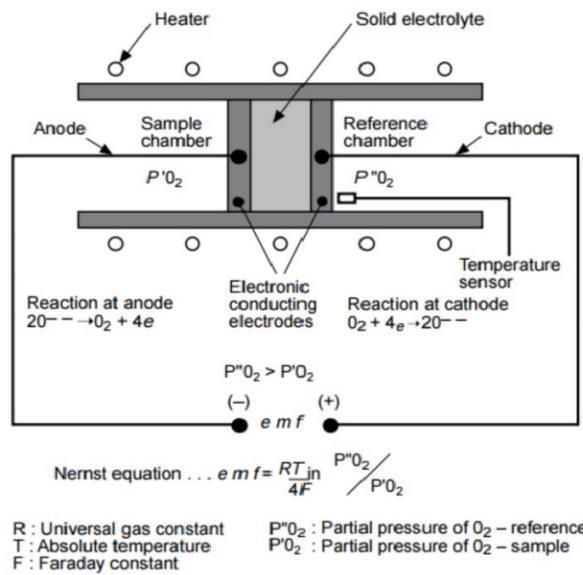


Figura 2.5 Estructura básica de un sensor de oxígeno de electrólito sólido [15].

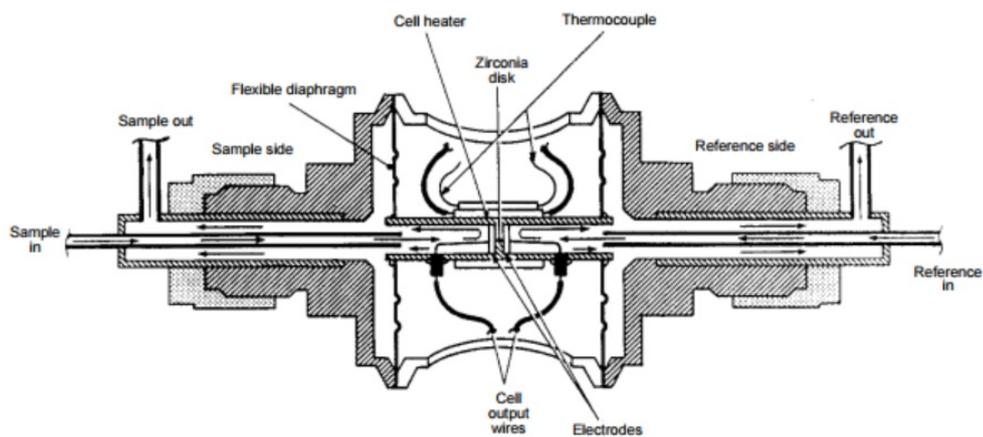


Figura 2.6 Esquema de un sensor de oxígeno de zirconia (Cortesía Servomex) [15]

El trabajo en el material de los electrodos, la baja temperatura de funcionamiento, los electrolitos sólidos y el diseño del sensor se están llevando a cabo en muchos centros de investigación de todo el mundo [15].

2.4 Datos técnicos del sensor MQ-5 de gas GLP

Sensor de gas utilizado en el proyecto que además integra un módulo FC-22 que se explicará más adelante.

2.4.1 Aplicación

Se utilizan en la detección de fugas de gas equipos en la familia y la industria, son adecuados para detectar GLP, gas natural, gas ciudad, evitar el ruido de los gases de alcohol y de cocina y el humo del cigarrillo.

2.4.2 Características

- Alta sensibilidad GLP, gas natural.
- Pequeña sensibilidad alcohol y humo.
- Respuesta rápida
- Larga vida útil
- Circuito de activación sencillo

2.4.3 Especificaciones

Condiciones estándar de trabajo se muestran en la figura 2.8. El sensor está compuesto por un tubo de dióxido de aluminio, la capa sensible de dióxido de estaño (SnO_2), el electrodo de medición y el calentador se fijan en una corteza hecha de plástico y malla de acero inoxidable. El calentador proporciona las condiciones de trabajo necesarias para el funcionamiento de los componentes sensibles. El MQ-5 se compone de 6 pines, 4 de ellos se usan para buscar señales, y otros 2 se usan para proporcionar corriente de calefacción, y en la figura 2.9 se da la curva característica [16].

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	ACOR DC
P _L	Load resistance	20K Ω	
R _H	Heater resistance	31 ± 10%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10°C-50°C	
T _{as}	Storage Tem	-20°C-70°C	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
R _s	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (5000ppm methane)	Detecting concentration scope: 200-10000ppm LPG,LNG Natural gas, iso-butane, propane Town gas
α (5000ppm/1000 ppm CH ₄)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20°C ± 2°C Humidity: 65%±5%	V _c :5V±0.1 V _h : 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

Figura 2.8 Especificaciones del sensor MQ-5 [16]

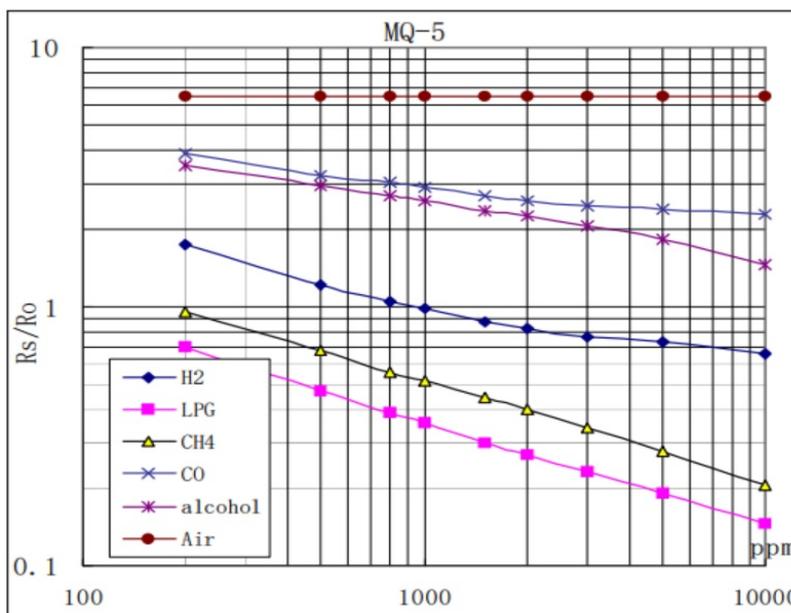


Figura 2.9 Curva característica de sensibilidad del sensor [16]

La figura 2.10 muestra la dependencia típica del sensor MQ-5 de la temperatura y la humedad. R_o : resistencia del sensor a 1000 ppm de H_2 en aire a 33% de HR y 20 grados. R_s : resistencia del sensor a diferentes temperaturas y humedades [16].

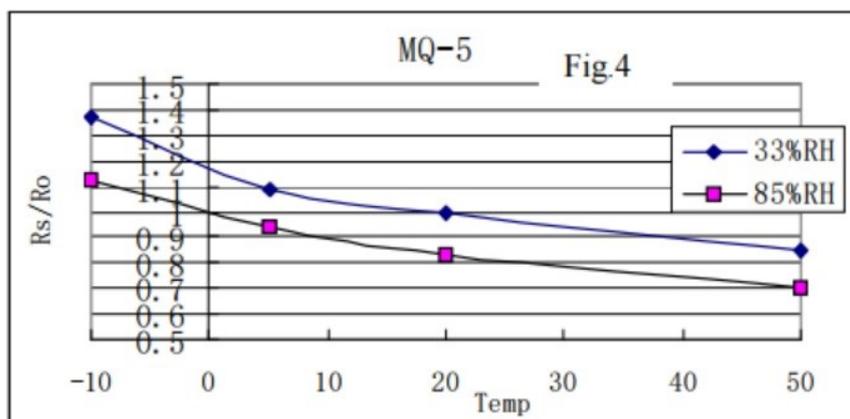
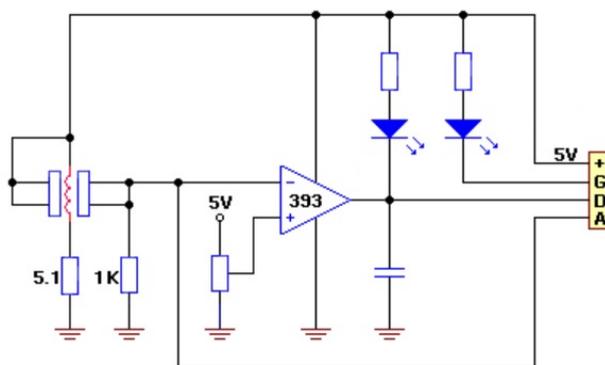


Figura 2.10 Curva de sensibilidad a diferentes temperatura y humedad

2.4.4Modulo FC-22

El módulo FC-22 está compuesto por el circuito que se muestra en la figura 2.11, lo cual facilita y simplifica la interacción del sensor MQ-5 con alguna tarjeta de adquisición de datos para poder observar el comportamiento de dicho instrumento [17].



FC-22 Gas Sensor Module

2.5.1 Comunicación

Arduino Uno utiliza ATmega16U2 para el manejo de USB en lugar de 8U2 (o de FTDI encontrado en generaciones previas). Esto permite ratios de transferencia más rápidos y más memoria [18].

2.5.2 I/O, Funciones y Retrocompatibilidad de shields

La tarjeta Arduino Uno R3 incluso añade pines SDA y SCL cercanos al AREF. tiene dos nuevos pines cerca del pin RESET. Uno es el IOREF, que permite a los shields adaptarse al voltaje brindado por la tarjeta. El otro pin no se encuentra conectado y está reservado para propósitos futuros. La tarjeta trabaja con todos los shields existentes y podrá adaptarse con los nuevos shields utilizando esos pines adicionales [18].

2.5.3 Lenguaje de programación.

Arduino es una plataforma computacional física open-source basada en una simple tarjeta de I/O y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. Arduino Uno R3 puede ser utilizado para desarrollar objetos interactivos o puede ser conectado a software de tu computadora (por ejemplo, Flash, Processing, MaxMSP) [18].

2.5.4 Características Arduino UNO

- Microcontrolador ATmega328.
- Voltaje de entrada (7-12) V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 6 entradas análogas.
- 32k de memoria Flash.
- Reloj de 16MHz de velocidad.
- 8 bits.

2.5.5 Características del microcontrolador ATMEGA328P

- Microcontrolador arquitectura de 8 bits de la familia AVR
- Hasta 23 pines I/O disponibles

- Memoria de programa flash de 32 kB
- SRAM de 2 kB
- EEPROM de datos de 1 kB
- Velocidad max. de la CPU 20 MIPS
- Oscilador externo hasta 20 MHz
- Voltaje de operación 1.8 V a 5.5 V
- ADC de 10 bits y 6 canales
- 2 timers/contadores/comparadores de 8 bits
- 1 timer/contador/comparador/Captura de 16 bits
- Canales PWM
- USART Full duplex
- SPI
- TWI 2-hilos interfaz serial (2-Wire) (I2C compatible)
- Comparador análogo
- Múltiples fuentes de interrupción
- Oscilador de reloj interno
- Brown-out Reset de valor programable
- Power-on Reset
- Modos de bajo consumo
- Soporta 10,000 ciclos de borrado/escritura en memoria flash
- Soporta 100,000 ciclos de borrado/escritura en memoria EEPROM
- Protección de código programable
- Encapsulado PDIP de 28 pines

2.5.6 Arduino Software (IDE)

Los programas escritos con Arduino Software (IDE) se denominan bocetos. Estos bocetos se escriben en el editor de texto y se guardan con la extensión de archivo.ino. El editor tiene funciones para cortar / pegar y para buscar / reemplazar

texto. El área de mensajes da retroalimentación al guardar y exportar y también muestra errores. La consola muestra el texto generado por el software Arduino (IDE), incluyendo mensajes de error completos y otra información. La esquina inferior derecha de la ventana muestra la tarjeta configurada y el puerto serie. Los botones de la barra de herramientas le permiten verificar y cargar programas, crear, abrir y guardar bocetos y abrir el monitor en serie.

La instalación es un proceso muy sencillo sólo se descarga el software de la siguiente página <https://www.arduino.cc/> siguiendo el wizard de instalación dando siguiente y aceptando términos del software libre [18].

2.5.7 Bibliotecas

Las bibliotecas proporcionan funcionalidad adicional para su uso en bocetos, por ejemplo, trabajar con hardware o manipular datos. Para utilizar una biblioteca en un boceto, selecciónela en el menú Boceto> Importar biblioteca. Esto insertará una o más instrucciones `#include` en la parte superior del boceto y compilará la biblioteca con su boceto. Debido a que las bibliotecas se suben al tablero con su boceto, aumentan la cantidad de espacio que ocupa. Si un boceto ya no necesita una biblioteca, simplemente elimine sus instrucciones `#include` desde la parte superior de su código.

Hay una lista de bibliotecas en la referencia. Algunas bibliotecas se incluyen con el software Arduino. Otros se pueden descargar desde una variedad de fuentes a través del Administrador de la Biblioteca. A partir de la versión 1.0.5 del IDE, puede importar una biblioteca desde un archivo zip y usarla en un boceto abierto. Consulte estas instrucciones para instalar una biblioteca de terceros [19].

2.5.8 Monitor serie

Muestra los datos en serie enviados desde la tarjeta Arduino (USB o tarjeta serie). Para enviar datos al tablero, ingrese el texto y haga clic en el botón "enviar" o

presione enter. Elija la velocidad en baudios de la lista desplegable que coincida con la velocidad pasada a Serial.begin en su boceto [19].

Capítulo 3 Implementación de la cámara de gas

Las cámaras de gas para la calibración de sensores son recipientes que pueden ser fabricados en plástico, acrílico, acero o incluso bolsas tedlar que se utilizan para almacenar suero, y tienen como principales características poder almacenar gas y que sean completamente herméticos, además de tener la posibilidad de poder ingresar un sensor de gas dentro del recipiente o expulsar el gas por medio de conducto de salida que tenga contacto con la cara sensible del sensor de gas. Otras de las virtudes de la cámara de exposición de gas, es poder crear mezclas de dos o más gases y obtener concentraciones deseadas para la calibración de sensores por el método de volumen, para estos siempre se tiene que tener en cuenta el volumen efectivo del recipiente. Estos sistemas o al menos los más económicos emplean jeringas para poder controlar la cantidad de gas que ingresa en el recipiente y controlar las mezclas.

Este proyecto se basó en la investigación y en la experimentación, en el cual se tomaron modelos de cámara de exposición de gas de otras investigaciones y tratar de mejorar los puntos débiles de esos modelos, que por lo general eran fabricados con bolsas para sueros o recipientes de plásticos pequeños y lograr crear mezclas gaseosas de manera económica. Las debilidades más marcadas en los modelos realizados con bolsas para suero conocidos como bolsas tedlar, es que a pesar de ser muy económicos estos no podrían ser suministradas por tanque de gas directamente con su respectivo regulador, debido a que estos utilizan salidas hechas con conectores de bronce roscados donde embonan en una entrada que también debe estar roscada para poder evitar fugas entre las conexiones, este sería un punto donde la seguridad juega un papel muy importante ya que algunos gases que se desean evaluar pueden ser inflamables o nocivos para la salud. Otro de los inconvenientes de las cámaras de exposición de gas hechas con bolsas de suero es debido al poco volumen efectivo que tienen, esto dificultaría la creación de mezclas

de gases de baja concentración, además de sólo poder administrar los gases con jeringas médicas y no tener la capacidad de soportar bajas presiones, esto provocaría buscar alternativas para lograr almacenar gases en dichas jeringas que por lo regular se adquieren en cilindros con cierta presión. Sabiendo esto se optó por crear la cámara de gas hecha con recipientes de plástico, pero atacando las debilidades de las bolsas para suero.

Por fines económicos se escogió evaluar un sensor con sensibilidad al gas licuado, simplemente por la fácil adquisición ya que es algo cotidiano en cualquier hogar y no representar un gran gasto económico.

3.1 Prototipo realizado de un sistema de cámaras de gas

Para corregir las debilidades de otras cámaras de exposición, se optó por un sistema más robusto hecho con recipientes de plástico, donde se eligió incrementar el volumen efectivo del sistema para poder crear concentraciones más pequeñas de gas. Además de mejorar la extracción del gas puro que se va analizar por medio de una cámara extra de menor volumen, la cual cuenta con accesorios para poder conectarse de manera segura con el cilindro de gas y lograr extraer el gas con una jeringa para poder ingresar el gas en la cámara principal donde se va a analizar el sensor.

Primeramente, se describirá la cámara de gas principal, donde se utilizó un recipiente morado de la marca tupperware con la capacidad de almacenar 20 litros con el cual se resuelve el problema de la preparación de mezclas de baja concentración ya que cuenta con un accesorio donde se tiene la posibilidad de conectar jeringas de (10, 5 y 1) mililitro. Éste tiene un tamaño adecuado para poder instalar una entrada y salida de gas con conectores de rosca de $\frac{1}{2}$ pulgada de CpvC, una vez instalado todos sus accesorios se procedió a sellar la tapa aplicando en los bordes de la tapa con silicón hermético transparente y soportar por lo menos 1 psi sin

que haya fugas de gas ya que este contendrá aire puro para disolver el gas de interés que en este caso es gas licuado, los cuales se obtienen por medio de una bomba de aire manual y tanque de gas de 10 litros respectivamente. Lo anterior mencionado se puede apreciar mejor en la figura 3.1.



Figura 3.1 Prototipo del sistema de calibración hecho en plástico.

La hermeticidad de la cámara de gas principal junto con el recipiente pequeño que funciona como cámara de extracción donde se conectaría el tanque de gas LP para lograr extraer el gas con una jeringa, fue probado por el método de burbujeo, el cual consiste en llenar de aire ambos recipientes por separado para después ser sumergidos en un recipiente con agua mucho más grande que ambas cámaras, hasta que estos estén totalmente cubiertos por el agua, después si se aprecian burbujas saliendo de las cámaras significa que el sistema tendrá fugas de gas, el cual con esta prueba se comprobó que el sistema propuesto si fue hermético. La desventaja de esto es que al ingresar aire en la cámara principal se tuvo un problema muy notorio, el recipiente se deformaba levemente y esto repercutió en que el sistema

no lograra mantener el gas dentro por tiempos prolongados, esto se logró reducir aplicando y pegando con resistol cero, clavos un trozo de madera triplay del tamaño de la tapa del recipiente de 20 litros. Otro inconveniente el cual se presentó en el sistema prototipo es que fue necesario medir la presión en ambas cámaras para ser igualadas y lograr que las mezclas sean más homogéneas, con el cual se adquirió un manómetros de 0 a 15 psi para al menos tener una lectura de 1 psi y asegurar que el gas estaba dentro de los recipientes y descartar que no hubiera fugas, pero a pesar que se manejó una presión muy baja se maltrataban mucho ambos recipientes deformándolos un poco pensando que se podrían soportar dicha presión, y con estos se dificulta la idea la extracción de gas del tanque de gas LP hacia la jeringa y no lograr resolver el problema de extraer el gas de forma controlada y prácticamente directa.

En el siguiente tema se realizan mejoras que resuelve todos los inconvenientes presentados en el prototipo durante su elaboración y pruebas, el cual aportó ideas para quitar problemas que tenían otros sistemas de calibración hechos con el método de cámaras de exposición, con la gran diferencia que se obtiene un sistema más robusto al fabricarlo en acrílico donde se logró tener un diseño el cual permitió implementar, corregir y mejorar el diseño anterior.

3.2 Fabricación de las cámaras de gas.

Para hablar de esto se tiene que poner en contexto la manera en que se obtendrán las diferentes concentraciones de gas para la calibración de los sensores; en este caso, se emplea la mezcla de dos gases diferentes con la misma presión (baja presión), pero de diferente volumen; ambos gases con volumen conocido (volumetría). Sabiendo la necesidad de combinar gases se debe diseñar un contenedor (cámara de gas principal) donde evaluar el sensor y que contendrá aire para la dilución, y otro contenedor para extraer el gas LP por medio de una jeringa y diluirlo en la cámara de gas principal de forma segura, controlada y medida para la creación de la mezcla de gas con la concentración deseada, siendo posible la purga en ambos recipientes. Por ello, se optó en hacer la cámara de exposición de gas en

acrílico de alto impacto, debido a las ventajas económicas y de resistencia que ofrece sobre otros materiales. Así mismo, su construcción estuvo a cargo de la empresa Acriplas de la Laguna, basándose en el diseño previo de la cámara de gas como se ve en la figura 3.2.



Figura 3.2 Cámara de gas principal hecha en acrílico

3.2.1 Cámara de gas principal

Tabla 3.1 Especificaciones de cámara de gas principal

Especificaciones de cámara de gas principal	
Dimensiones	43W x 34.5D x 16H (cm)
Capacidad Interna Efectiva	23,763ml
Material Principal de la Cámara	Acrílico
Material del empaque	Neopreno
Soporte para sellado	Hierro
Grosor del empaque	6mm

3.2.2 Accesorios de la cámara de gas principal

Bomba de aire manual, conector espiga ¼ in, manómetro de presión con escala de 0 a 15 psi con entrada de ¼ in, válvula de bola de ¼ in, 2 niples de ¼ in, acoplamiento en T hembra galvanizado de ¼ in, reducción campana galvanizado de

½ in a ¼ in, válvula para dispensador de agua, válvula con manguera de ½ in, manguera con diámetro de 20 mm, conector para llave de tres vías para intravenosa.

3.2.3 Cámara de extracción de gas

Tabla 3.2 Especificaciones de cámara de extracción de gas

Especificaciones de cámara de extracción de gas	
Dimensiones	14.5W x 14.7D x 9.7H (cm)
Capacidad Interna Efectiva	2,067ml
Material Principal de la Cámara	Acrílico
Material del empaque	Neopreno
Soporte para sellado	Hierro
Grosor del empaque	6mm

3.2.4 Accesorios de la cámara de extracción de gas

Tanque con gas LP de 10 litros, regulador para tanque de gas, conector de gas 3/8 in a 1/4 in, manguera flexible para gas de 3/8 in, manómetro de presión con escala de 0 a 15 psi con entrada de ¼ in, válvula de bola de ¼ in, 2 niples de ¼ in, acoplamiento en T hembra galvanizado de ¼ in, reducción campana galvanizado de ½ in a ¼ in, válvula para dispensador de agua, conector para llave de tres vías para intravenosa, jeringa.

3.2.5 Sellado de las cámaras de gas

Para un sellado hermético en la cámara de gas principal (aire) y en la de extracción de gas a evaluar (LP), se emplearon, en ambas, un empaque de neopreno con un grosor de 6 milímetros y sobre esto se coloca la tapa de acrílico también de alto impacto, todo esto es soportado por medio de cuatro barras de metal que ejercen presión de forma vertical en la tapa gracias a las varillas roscadas y tuercas de 3/8 in para un sellado hermético y soportar presiones de hasta 10 psi como se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3 Sellado de la Cámara de gas.

Capítulo 4 Resultados

Como resultado se obtuvo un sistema de cámaras de gas fabricada en acrílico donde se corrigen problemas de deformación de los recipientes y pérdida de presión, con la ayuda de manómetros instalados en cada recipiente para poder valorar su hermeticidad e igualar la presión para comenzar la calibración del sensor. En este capítulo se explica cómo operar el sistema fabricado, así como la evaluación de un sensor de gas para ver el desempeño de la cámara de exposición y la adquisición de datos del sensor.

4.1 Procedimiento de uso del sistema

La figura 4.1 muestra el diagrama esquemático con el diseño implementado. Primeramente, se mencionan las posiciones iniciales de cada válvula y llave, en la cámara de extracción (8), la válvula de purga (12) debe estar cerrada, igualmente en la cámara principal (9), la válvula de purga (13) y la válvula con manguera (14) la cual se puede adaptar de manera sencilla a cualquier sensor semiconductor intercambiando la manguera al diámetro del sensor de gas (15) a utilizar, dando una salida adaptable, deben estar cerradas considerando que el sistema tiene aire limpio. Ahora la llave intravenosa de tres vías (11) tiene una modificación importante en el flujo que presenta normalmente, teniendo sólo dos flujos diferentes, el primero conecta la jeringa (10) con la cámara principal, el segundo conecta la misma jeringa (11) pero ahora con la cámara de extracción (8), siendo la segunda la posición inicial de la llave de tres vías (11).

El siguiente paso es llenar la cámara principal (9) con aire y la cámara de extracción (8) con gas LP. En el lado de la cámara principal (9), debemos tener la válvula de bola (6) abierta y empezar a llenarla con aire con la ayuda de la bomba manual (5) hasta que el manómetro (7) marque presión, una vez teniendo la presión deseada que pueda ser cualquiera que no exceda los 15 psi y con la condición de

que la cámara de extracción (8) tenga la misma presión que indica el manómetro (4), cerramos la válvula de bola (6).

Ahora por el lado de la cámara de extracción (8), el procedimiento es similar, debemos tener la válvula de bola (3) abierta, y con precaución abrimos sólo un poco la llave del tanque de gas LP (1), en este el flujo es limitado gracias a un regulador (2) para mayor seguridad, hasta que el manómetro marque la presión deseada, considerando las mismas condiciones que en la cámara con aire, rápidamente cerramos la válvula de bola (3) y la llave del tanque de gas (1). Cabe destacar, que no importa el orden del llenado de gas en las cámaras, se puede empezar primero por la cámara de gas principal o por la cámara de extracción.

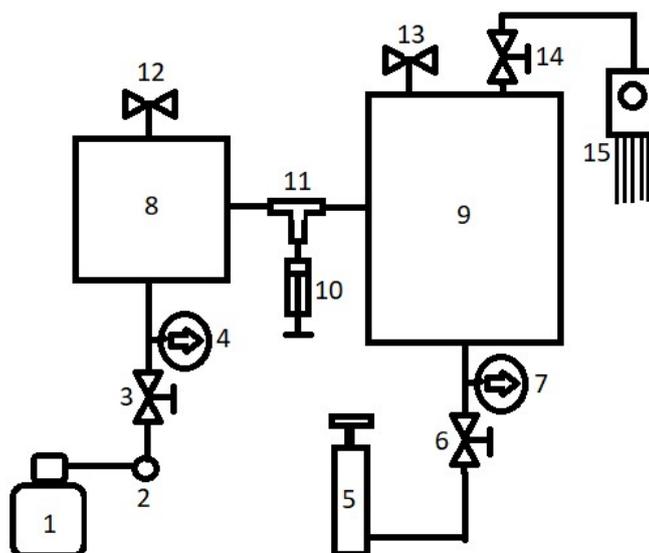


Figura 4.1 Diagrama esquemático de la cámara de exposición de gas.

Como la posición inicial de la válvula de tres vías (11), tiene flujo de la jeringa (10) hacia el tanque de extracción que contiene el gas LP, se podrá extraer con la jeringa (10) de forma controlada y medida cierto volumen, una vez llenas ambas cámaras

con la misma presión, considerando la concentración que deseamos mezclar aplicando la siguiente fórmula (1):

$$V = 23,763 \times \frac{C}{1,000,000} \quad (7)$$

Donde C es la concentración que deseamos obtener y V es el volumen de gas LP que necesitamos extraer con la jeringa (10), por ejemplo, si se quisiera una concentración de 800 ppm de gas LP, sólo sustituimos 800 en C y obtendremos el volumen en mililitros, que es la cantidad requerida para dicha concentración como se muestra en la formula (2).

$$V = 23,763 \times \frac{800}{1,000,000} = 19.01 \text{ ml} \quad (8)$$

Una vez obtenida la concentración deseada, sólo esperamos un poco para que la mezcla sea homogénea. Por último, abrimos la válvula con lamanguera (14) para dejar pasar el gas hacia el sensor (15) para su calibración. Este proceso se deberá repetir las veces que sea necesario para poder tener una calibración más fiable del sensor de gas (15), teniendo en cuenta que siempre hay que limpiar el sistema entre mezclas hechas, utilizando las válvulas de purgas (12 y 13) para expulsar el gas y hacer una mezcla nueva.

4.2 Consideraciones Técnicas.

Antes de usar este sistema de calibración de sensores de gas se deben tomar en cuenta los siguientes puntos como en muchas cámaras de exposición hechas en acrílico [9]:

1) Antes de realizar las pruebas de evaluación de los sensores de gas utilizando esta cámara de prueba, la sala o laboratorio debe estar adecuadamente ventilada y sin contaminación en el aire. Esto es necesario ya que el aire se utiliza para mezclar con el gas de prueba.

2) El amoníaco, los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los vapores de disolventes orgánicos son gases adherentes que pueden adherirse fácilmente a la pared interna de la cámara. Esta cámara de prueba no es adecuada para tales gases adherentes.

3) En el caso de que se inyecten gases adherentes en la cámara de prueba, purgue completamente la cámara de los gases adheridos en la pared interior después de que la evaluación del sensor finalice, ventilando durante un tiempo suficientemente largo u otras medidas de limpieza.

4) Cuando se usa gas combustible para la prueba, la concentración máxima de gas de prueba en la cámara no debe exceder el 50% LEL (límite inferior de explosión).

5) Cuando se utilicen gases combustibles y/o gases tóxicos, manténgalos alejados de cualquier fuente de ignición potencial.

6) Es aconsejable utilizar esta cámara de prueba bajo la humedad normal de la habitación. Si los sensores de gas se prueban utilizando esta cámara de prueba en condiciones de humedad extremadamente baja o alta, dicha humedad interior puede influir en los resultados de la medición.

7) Evitar respirar los gases de prueba.

4.3 Sistema de adquisición de datos.

En el mercado, generalmente los sensores MQ se encuentran en módulos, lo que nos simplifica la parte de conexiones y nos facilitan su uso, solo basta con alimentar el módulo y empezar a leer el sensor, estos módulos también tienen una salida digital la cual internamente trabaja con un comparador y con la ayuda de un potenciómetro podemos calibrar el umbral y así poder interpretar la salida digital como presencia o ausencia del gas.

4.3.1 Material

Un computador, un sensor semiconductor MQ-5 con tarjeta de salidas digital y analógica, una placa Arduino UNO, cables tipo jumper macho-hembra calibre 26 AWG y cable flexible USB tipo A y tipo B.

4.3.2 Conexión entre la placa Arduino y el sensor MQ-5

El sensor semiconductor de gas MQ-5 integra un módulo FC-22 con 4 pines de salida, simplificando la adquisición de los datos del sensor para su análisis, la configuración proporcionada por el fabricante es la que se muestra en la tabla 4.1, además de que esta configuración está señalada físicamente en el mismo.

Tabla 4.1 Configuración del sensor MQ-5

N° de PIN	Símbolo	Descripción
1	D0	Salida Digital
2	A0	Salida Analógica
3	GND	Tierra
4	VCC	Alimentación positiva (2.5V-5V)

Además, el sensor necesita un tiempo de precalentamiento de 24 horas para tener lecturas estables, siendo esto normal por el principio de funcionamiento de los sensores semiconductores, ya que cuenta con resistor variable hecho de dióxido de estaño (SnO_2), cuyo valor resistivo depende de la cantidad de gas LP que se encuentra en el aire, y un calefactor que proporciona las condiciones de trabajo necesarias para el buen funcionamiento de los componentes sensibles [16] El calefactor necesita una resistencia de carga (R_L) para cerrar el circuito y con este hacer un divisor de tensión y poder leerlo desde un microcontrolador, por lo cual el módulo FC-22 simplifica la parte de conexiones y facilitan su uso, donde R_L tiene un valor de $1\text{K}\Omega$.

La figura 4.2 muestra la conexión del sensor con la placa Arduino, donde en este caso en particular se alimenta al sensor con la fuente de voltaje de 5 V integrada en la placa Arduino mediante un cable rojo, la tierra de ambos elementos está conectada por medio de un cable negro, la salida digital del sensor está conectada a un pin digital de la placa Arduino representado por un cable verde, esta conexión digital ayuda a comprobar por medio de un led ubicado en el sensor si hay presencia de gas, y por último la salida analógica que nos ayuda a determinar la concentración de los gases, el sensor está conectado por medio de un cable morado a un pin analógico de la placa Arduino.

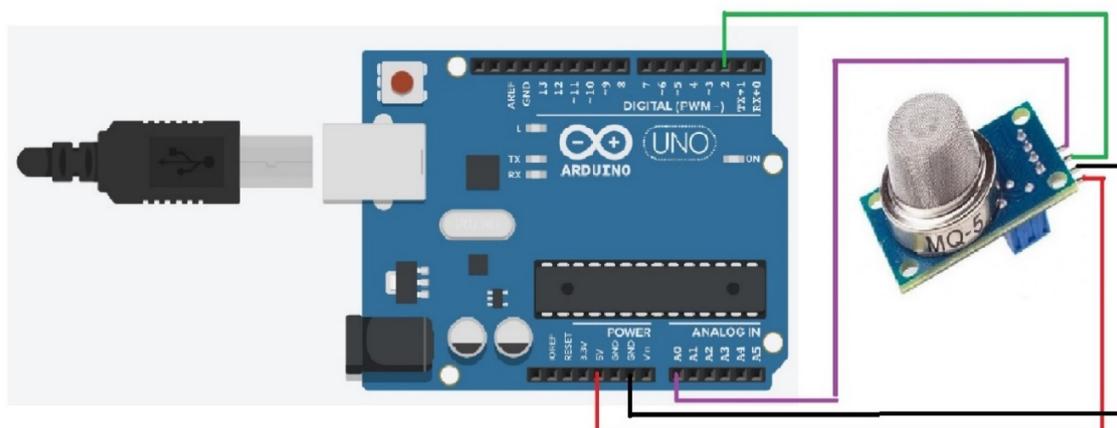


Figura 4.2 Montaje del circuito electrónico del sensor de gas

El fabricante del sensor MQ- 5 (HANWEI ELECTRONICS CO.,LTD) sólo proporciona la gráfica con la curva característica y no la ecuación, un método de evaluación del sensor sería encontrar dicha ecuación por regresión ingresando la mayor cantidad de puntos. Esto se puede lograr con la ayuda de cualquier software matemático que nos permita graficar y encontrar la ecuación característica, para este caso en particular se obtuvo lo siguiente que se muestra en la Figura 4.3, donde 'x'

es la concentración de gas, por otro lado 'y' es R_s/R_o , el otro método de evaluación podría ser simplemente viendo la relación entre R_s/R_o y la concentración de gas.

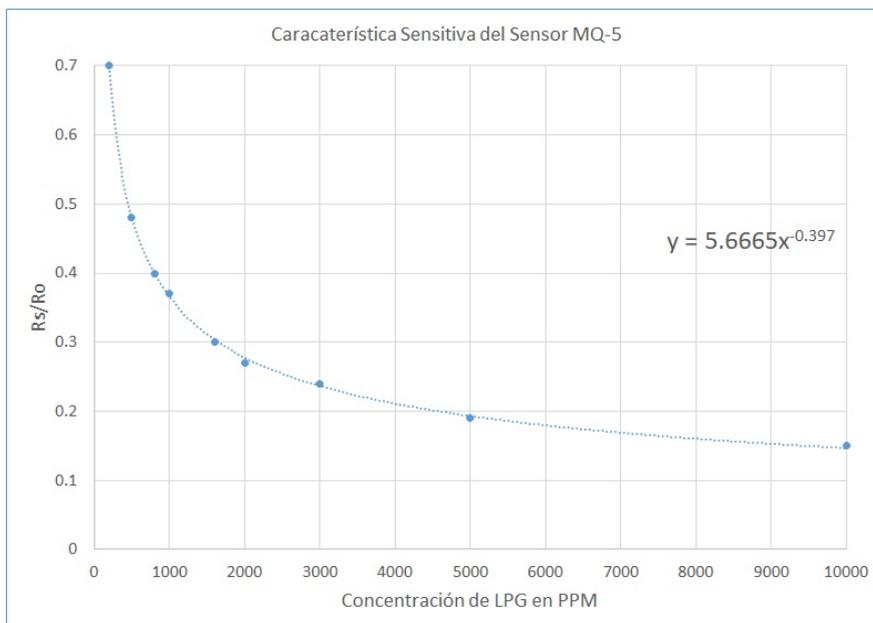


Figura 4.3 Gráfica y ecuación característica del sensor MQ-5

Para calcular el valor de R_s despejamos la ecuación del divisor de voltaje (3) que forma el sensor con la resistencia de carga R_L , y estará dada por la siguiente relación [17].

$$R_S = R_L \left(\frac{5 - V_{RL}}{V_{RL}} \right) \quad (9)$$

Para la calibración, necesitamos encontrar el valor de R_O mientras medimos el aire limpio. Para esto se necesita consultar la curva de sensibilidad que proporciona el fabricante del sensor MQ-5, en la cual la relación del aire limpio del gráfico es 6.50, podemos calcular el R_O a partir de la siguiente ecuación (4):

$$R_O = \frac{R_S}{6.50} \quad (10)$$

4.3.3 Programación de la placa Arduino UNO

Utilizando el entorno de Arduino, necesitamos medir el voltaje de carga VRL que nos envía el sensor desde su salida analógica, obteniendo lecturas por medio de la entrada analógica A0 de nuestra tarjeta Arduino y enviando las muestras a la computadora por medio del puerto serial. El código del programa para medir el voltaje VRL y Rs se muestra a continuación.

```
void setup() {  
  
  Serial.begin(9600);  
  
}  
  
void loop() {  
  
  int adc_MQ = analogRead(A0); //Lemos la salida analógica del MQ  
  
  float voltaje = adc_MQ * (5.0 / 1023.0); //Convertimos la lectura en un valor de voltaje  
  
  float Rs=1000*((5-voltaje)/voltaje); //Calculamos Rs con un RL de 1k  
  
  Serial.print("adc:");  
  
  Serial.print(adc_MQ);  
  
  Serial.print("  voltaje:");  
  
  Serial.print(voltaje);  
  
  Serial.print("  Rs:");  
  
  Serial.print(Rs);
```

```
delay(100);  
  
}
```

Una vez obtenido el valor R_s para varias concentraciones de mezclas de gas se procede a evaluar el sensor con la relación R_s/R_o con la curva de sensibilidad dada por el fabricante

4.4 Resultados

Esta tesis a estudiado los logros y avances de investigaciones dedicadas a la realización de cámaras de exposición de gas como las reportadas en algunos artículos, el cual consiste en la fabricación de la mezcla de gas y evaluarlo con ayuda de la curva características del sensor empleado y controlar los volúmenes del gas gracias a una jeringa con la cual inyectar ambos gases para obtener la concentración deseada [20,21]

4.4.1 Sistema de cámaras de gas

Se construyó el sistema mencionado en el documento al igual que la integración de todos sus componentes y accesorios principales que se muestra en la foto de la figura 4.4, además de evaluar el sistema en un entorno seguro, controlando siempre el flujo de gas LP.

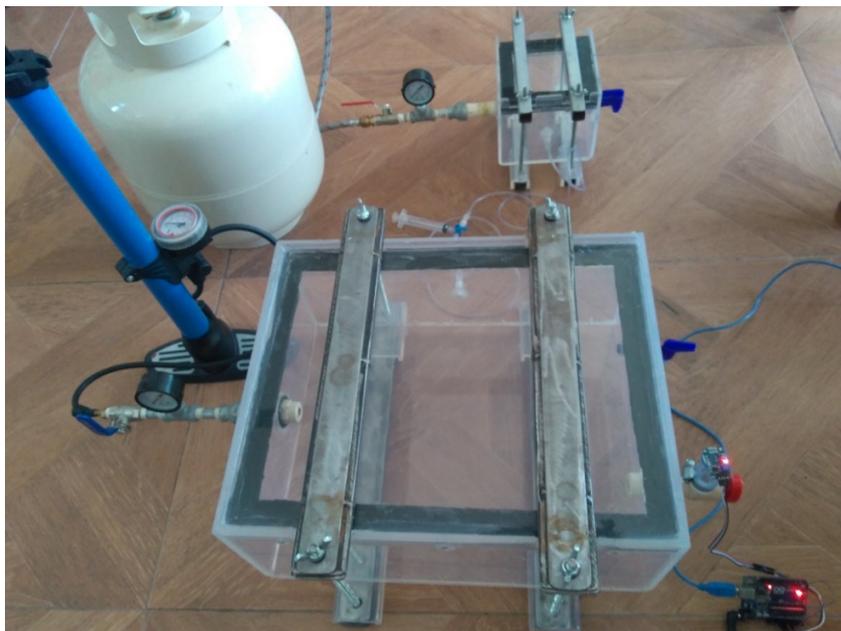


Figura 4.4 Sistema de cámara de gas

El fácil uso del sistema nos permite tener un adecuado control del volumen de aire en la cámara, gracias a la bomba de aire manual integrada en la misma la cual nos ayuda tanto para limpiar el sistema como para la admisión de aire limpio. Además, que los manómetros de presión nos permiten verificar la presión en ambas cámaras, logrando mantener la misma presión y obtener mezclas de gas LP y aire requeridas.

También se obtuvo un buen desempeño del control de la dirección de flujo de inyección de volumen de gas mediante la jeringa y la válvula de tres vías, los cuales son muy económicos. Además de mantener un buen nivel hermético dado las bajas presiones que se trabajan en el sistema, en gran parte gracias a los soportes metálicos que hace más robusto el sistema en materia de durabilidad y hermeticidad.

4.4.2 Evaluación del sistema de cámaras de gas

La cámara de exposición fue evaluada basándonos en la curva característica de sensibilidad del sensor MQ-5 de gas LP y poder representar fielmente dicha curva, todo esto haciendo las mezclas de aire limpio con gas LP para obtener diferentes concentraciones y tener los mismos puntos de referencia. Siendo R_0 la resistencia

que se obtiene con sólo aire limpio representada en la curva de sensibilidad del fabricante, y R_S es la resistencia del sensor que reacciona a una concentración particular de gas LP en aire, y así poder tener la curva de sensibilidad del sensor al graficar la razón R_S/R_0 contra la concentración de gas LP. En la tabla 4.2 se muestran los datos obtenidos con el sensor de gas donde se mezclan gases en diferentes concentraciones que van desde 200 ppm hasta los 10,000 ppm, que se puede comparar con la curva de sensibilidad de la figura 3.5 del fabricante (HANWEI).

Tabla 4.2 Resistencia del sensor R_S y la relación R_S/R_0 en diferentes concentraciones de gas LP

Concentración de gas LP en aire (ppm)	R_S	R_S/R_0
200	1070.23	0.70
500	701.34	0.46
800	590.12	0.39
1000	554.04	0.36
1600	449.56	0.29
2000	417.89	0.27
3000	370.54	0.24
5000	312.54	0.19
10000	244.78	0.16

A
ntes
de

hacer pruebas en la cámara, se consideró el valor de R_0 con el sensor puesto en la cámara tomando en cuenta que solo hay aire limpio en ésta.

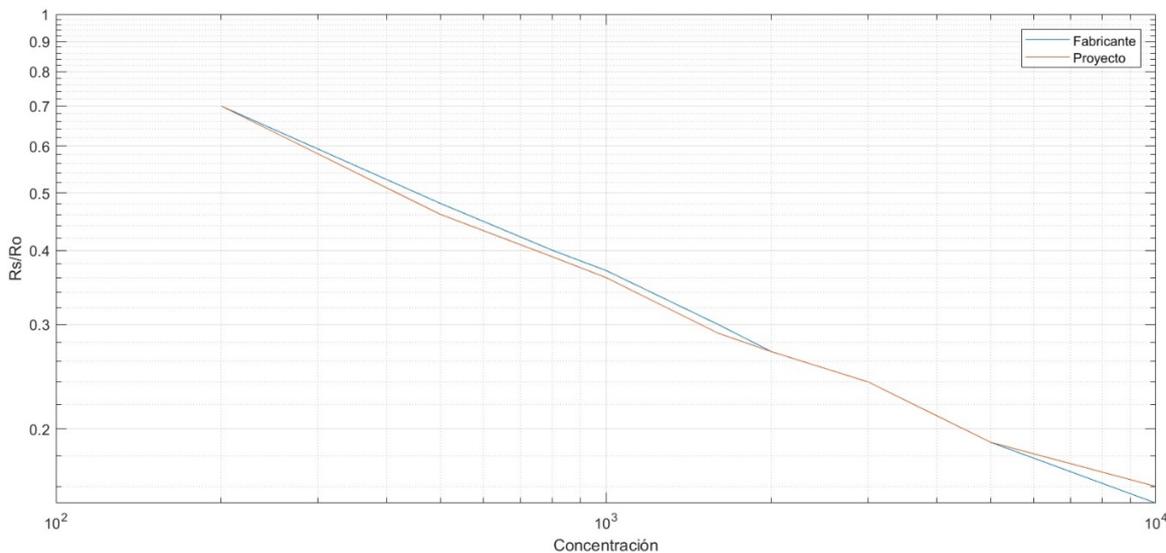


Figura 4.5 Comparación de curvas de sensibilidad del fabricante y el proyecto

Se puede observar que al comparar resultados de la figura 4.5 se obtuvo una similitud con la curva presentada por el fabricante del sensor (HANWEI) de la figura 2.9 del capítulo 2, esto nos dice que el sistema propuesto puede lograr resultados similares a lo que pudiera tener con opciones de equipos de laboratorio de alto costo como los medidores de flujo másico o sistemas electrónicos de calibración profesionales.

Ahora con la curva característica dada por el fabricante del sensor MQ-5 de HANWEI sólo se puede estimar los valores de $RS/R0$ obtenidos en los puntos de la concentración referenciado por ellos, y comparando ambos sistemas, se puede determinar que el error que hay en sistema propuesto en el valor de $RS/R0$ es de ± 0.02 aunque sea solo una aproximación por la escala logarítmica en dicha curva. En cuestión de repetitividad del sistema en el cual se analizó los puntos de 200ppm y 1000ppm se presentó una variación pequeña de $\pm 0.03mV$ de la salida del sensor bajo las mismas condiciones vistas en el monitor serial del programa de Arduino.

Conclusiones

El sistema de calibración se adapta de manera fácil a cualquier tipo de sensor semiconductor gracias a su salida de gas adaptable a mangueras de diferentes diámetros, todo esto considerando las diferentes dimensiones de la cara sensible de los sensores semiconductores, ya que las dimensiones de estos son muy variadas, otra clara ventaja sobre otros sistemas de calibración es la posibilidad de crear mezclas incluso menores a 1 ppm, debido a la facilidad de adaptación de jeringas de 1 ml y el volumen de cámara de gas principal. Esta es la forma más económica de medir con precisión la cantidad de gas. La jeringa médica desechable con una aguja de calibre grande es más práctica para crear mezclas con concentraciones mayores, pero hay pocas jeringas con más de cien centímetros cúbicos de volumen. Por lo tanto, las mediciones de gran volumen pueden ser problemáticas. El sistema es compatible con un amplio rango de tipos de gases, como son los contaminantes ambientales. Una de las virtudes del sistema es que no representa un alto costo económico a los investigadores.

Se observó que, para poder calibrar de manera leal en el caso de los sensores semiconductores, se deberá tomar el valor de R_0 con el sensor ya puesto en la cámara de gas llena con sólo aire limpio, sin presión y sin fugas en la salida de la cámara, ya que se podría tener una variación de (15 a 20) mV, esto debido a que el sensor semiconductor presenta sensibilidad al obstruir la entrada de aire. El tiempo de recuperación del sensor ya puesto en la cámara de gas es de aproximadamente 2 horas, se puede disminuir este tiempo si quitamos el sensor de la salida de gas hasta que llegue al R_0 considerado anteriormente y no colocarlo otra vez hasta que el sistema esté completamente limpio. No hay un estándar establecido que defina el punto cero en un sensor. Muchos procedimientos analíticos, usan nitrógeno puro o aire sintético puro para establecer el punto cero. La razón de esto es que el nitrógeno embotellado y el aire sintético puro están disponibles. Como resultado, se cree que usar nitrógeno embotellado o aire sintético es un buen método para poner a cero un

sensor. Lamentablemente, esto no es correcto. El aire contiene trazas de diferentes gases además de nitrógeno y oxígeno. Además, el aire ambiente normalmente contiene un pequeño porcentaje de vapor de agua. Por lo tanto, es mucho más realista y práctico poner a cero el sensor utilizando el aire que rodea el sensor cuando se considera que el área está limpia. Este punto de referencia puede ser difícil de establecer. Por lo tanto, un buen punto de referencia puede estar en el área donde el aire siempre se considera limpio, como en un área de oficinas. Esto dará una representación más realista del punto cero porque será representativo de la condición del aire ambiente local. La falta de vapor de agua puede hacer que el ajuste del punto cero sea menor que en el aire ambiente, haciendo que el sensor cero parezca desviarse. Esto es más notable en sensores de estado sólido.

El diseño del sistema lo hace de fácil uso y acceso gracias a la simplicidad de crear mezclas con la concentración deseada, incluso para personas con diferentes especialidades que no sea la ingeniería química, como por ejemplo electrónicos o informáticos.

Fuentes de información consultadas.

[1] Vitz, E. y Chan, H. (1995). LIMSport VII. Semiconductor gas sensors as GC detectors and “breathalyzers”. *Journal of Chemical Education*, 72, 920---925. (Consultado el 16 de enero del 2018)

[2] National Instruments. Disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/compactdaq/esa/> (consultado el 29 de Enero, 2018)

[3]Contaminación ambiental: Qué es, tipos de contaminación, causas, consecuencias y soluciones<https://cumbrepuebloscop20.org/medio-ambiente/contaminacion/ambiental/> (Consultado el 28 de Junio del 2018).

[4] Contreras, Ana María Contreras & Bárbara Icaza, B. (2013). Calidad del aire: Una práctica de vida. *Semarnat*, 26. (Consultado el 23 de Febrero del 2018).

[5] SEMARNAT, Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Región de la Comarca Lagunera 2010 -2015.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/69347/Anexo_1_I_Informe_ProAire_Comarca_Lagunera_E11.pdf (consultado el 16 de Mayo del 2017).

[6]Índice metropolitano de la calidad del Aire.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_04&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce; (Consultado 22 de mayo de 2017).

[7] El Siglo de Torreón, Autos los que más contaminan en la Laguna.
<https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1305403.autos-los-que-mas-contaminan-en-la-laguna.html>; (consultado el 17 de Mayo del 2017).

[8] R. Kocache, “Gas sensors,” *Sens. Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 8–12, 1994. (Consultado 15 de febrero del 2018).

- [9] FIGARO Engineering Inc., product information FIGARO USA Inc. <https://docs-emea.rs-online.com/w ebdocs/15a6/0900766b815a66c2.pdf> (Consultado el 01 de Febrero del 2018).
- [10] Gases, "La materia, elementos y compuestos 3^o e.s.o. 2.6.," vol. 3, no. 1, pp. 121–133. (Consultado el 25 de febrero del 2018)
- [11] "Dalton's Law of Partial Pressures" (Ley de presión parcial de Dalton) de UC Davis Chem, CC BY-NC-SA 3.0 US. (Consultado el 28 de Febrero del 2018).
- [12] "Dalton's Law of Partial Pressure" (Ley de presión parcial de Dalton) de Boundless Chemistry, CC BY-SA 4.0. (Consultado el 28 de Marzo del 2018).
- [13] Emigester Consultado en:
https://www.emagister.com/uploads_user_home/Comunidad_Emagister_4761_quimica.pdf (Consultado el 12 de junio 2018)
- [14] GNVBLOG <https://gnvblog.wordpress.com/2012/02/16/caracteristicas-de-los-gases-licuados-del-petroleo-glp/> (Consultado el 27 de Febrero del 2018).
- [15] E. Bakker, "Electrochemical sensors," *Anal. Chem.*, vol. 76, pp. 3285–3298, 2014. (Consultado 15 de febrero del 2018).
- [16] "HANWEI Co." Consultado en: <http://www.hwsensor.com>(Consultado el 23 de octubre 2018)
- [17] D. Strucyure, "TECHNICAL MQ-5 GAS SENSOR," vol. 1, pp. 1–2.(Consultado el 27 de octubre 2018)

[18] Jr member natong Arduino [Consulta: 16 noviembre 2018]. Disponible en: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=416377.0> (Consultado el 29 de octubre 2018)

[19] Arduino, 2018 Consultado en: <https://arduino.cl/arduino-uno/> (Consultado el 12 de noviembre 2018)

[20] A. Delgado-Castro and O. Rojas-Bolaños, "Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases," *Educ. Quim.*, vol. 26, no. 4, pp. 299–306, 2015. (Consultado el 21 de enero del 2018)

[21] Alyea, H. N. (1992). Syringe gas generators. *Journal of Chemical Education*, 69, 65. (Consultado el 23 de octubre 2018)