



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE HIDALGO



# Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

## Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

---

---

Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

### Tesis

Implementación de un circuito electrónico para el sensado de  $CO_2$  utilizando películas delgada hecha de óxido de zinc

Para obtener el título en la licenciatura en ingeniería en electrónica y telecomunicaciones

PRESENTA

**José Carlos Ortega Montiel**

ASESORES

**Dr. VENKATA KRISHNA KARTHIK TANGIRALA**

**Dra. ALEMÁN AYALA KARINA**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
*Institute of Basic Sciences and Engineering*  
**Área Académica de Computación y Electrónica**  
*Computer Science and Electronics Department*

Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 16 de octubre del 2017.

**Número de control:** ICBI-AACyE/1855/2017

**Asunto:** Autorización de impresión de Tesis

**PDIET. JOSÉ CARLOS ORTEGA MONTIEL**  
**PRESENTE.**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al trabajo de titulación de nombre "IMPLEMENTACIÓN DE CIRCUITO ELECTRÓNICO PARA EL SENSADO DE CO2 UTILIZANDO PELÍCULAS DELGADAS FABRICADAS DE OXIDO DE ZINC" y que después de revisarlo en reunión de sinodales, han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

**PRESIDENTE:** Dr. José Luis González Vidal  
**PRIMER VOCAL:** Dr. Venkata Krishna Karthick Tangirala  
**SEGUNDO VOCAL:** Dra. Karina Alemán Ayala  
**TERCER VOCAL:** Dr. Esteban Rueda Soriano  
**SECRETARIO:** Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas  
**PRIMER SUPLENTE:** Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez  
**SEGUNDO SUPLENTE:** Dr. Obed Pérez Cortes

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad y mi atenta consideración.

**ATENTAMENTE.**  
**"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"**

**Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas**  
 Coordinador de la Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  
 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
 Área Académica de Computación y Electrónica



EGR/pov



Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 ext. 6320  
 aacye\_icbi@uaeh.edu.mx

[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

José Carlos Ortega Montiel

**Implementación de un circuito electrónico  
para el sensado de  $CO_2$  utilizando películas  
delgada hecha de óxido de zinc**

*Gracias a:*

***UAEH*** *Por la formación  
académica brinda a lo largo  
de la carrera y el apoyo brindado  
por los doctores para la realización  
del presente trabajo*

## Agradecimientos

Quiero agradecerle a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por brindarme esta buena formación académica con la cual he podido aprender y poner en práctica día con día conocimientos nuevos sin los cuales no sería posible la elaboración del presente trabajo.

También quiero agradecer a mi familia por apoyarme siempre y en todo momento ya que sin ellos no habría podido realizar este logro por siempre estar cuando los necesito y ayudarme en todo momento.

De igual forma quiero agradecerle a todas aquellas personas que siempre han estado para apoyarme que han creído en mí y me han brindado su confianza a todos ellos quiero darles las gracias.

Por ultimo quiero agradecer a mis asesores de tesis porque siempre me han apoyado y me han ayudado a seguir adelante. Por enseñarme lo que no sabía y siempre estar ahí cuando tenía dudas, por ayudarme en los problemas que se presentaban a lo largo del presente trabajo.

## Resumen

En el presente trabajo se desarrolló un sistema de monitoreo de gas  $CO_2$ , el cual es uno de los gases más presentes en el ambiente, esto con el fin de disminuir daños en la salud que son causados por la exposición a concentraciones elevadas de este gas, que van desde mareo, jaqueca, disnea, hasta asfixia dependiendo el tiempo de exposición.

Con el fin de poder prevenir que las personas se expongan a concentraciones elevadas de este gas, se desarrolló el sistema de monitoreo aquí presente, que funciona a través de un sensor del tipo semiconductor. Una de las razones más importantes para censar este gas es el hecho de ser un gas incoloro e inodoro por tal motivo el ser humano no lo puede detectar y puede causar daños importantes en la salud.

Este sistema de monitoreo fue desarrollado para poder probar sensores de gas fabricados con películas de óxido de zinc, las cuales presentaban diversas características con la finalidad de estudiar su desempeño y poder elegir el mejor sensor variando la temperatura.

El sistema cuenta con una etapa de comunicación de datos, esto con el fin de poder realizar gráficas de funcionamiento de los sensores en tiempo real, así como una etapa de escritura de datos en una memoria para poder tener una base de datos, y la posibilidad de un posterior desarrollo de gráficas de comportamiento.

Para estudiar la implementación del dispositivo se utilizaron sensores de película delgada con diferentes características y sensores de gas para el gas emitido por exhalaciones humanas, de humo de cigarro y humo de madera. Para poder realizar un comparativo se utilizaron también sensores comerciales.

El estudio de los sensores se realizó mediante la obtención de gráficas de respuesta de voltaje, ante cada una de las exposiciones de los gases, para así poder comparar cuál de los sensores presentaba un mejor cambio en respuesta ante la presencia de un determinado gas.

## Prefacio

Los sensores se han vuelto una parte crucial en todo sistema tecnológico en las últimas décadas, debido a la gran necesidad que tienen los sistemas en conocer como son las condiciones que los rodean, para así poder funcionar de una mejor y más óptima forma.

La necesidad del sensado de los gases surgió debido al creciente desarrollo industrial, como forma de controlar la contaminación que se producía en estas, así como poder tener un control en sustancias inflamables como las utilizadas en todas las industrias petroquímicas, con la finalidad de poder prevenir cualquier accidente.

En este documento se presenta un sistema de monitoreo de cantidad de partículas de determinado gas en el ambiente, principal gas estudiado es  $CO_2$  el cual es uno de los gases más abundantes en el planeta.

El trabajo está compuesto por 5 capítulos, los cuales muestran el desarrollo de dicho sistema de monitoreo. En el capítulo 1 tenemos una breve introducción en el cual se explicará los motivos, y objetivos que se pretenden desarrollar a lo largo del trabajo, además, de tener una breve descripción de algunos trabajos que han sido desarrollados en relación al tema.

En el segundo capítulo podemos encontrar, de forma más detalla el funcionamiento de los sensores más particularmente de los sensores de gas semiconductores que son en los que se centra este trabajo. También veremos de forma más detallada las diferentes partes a utilizar en el sistema y una pequeña explicación de su funcionamiento.

En el capítulo 3 tendremos los diversos procedimientos experimentales utilizados durante el desarrollo del sistema, además, de la explicación de funcionamiento de forma detallada del circuito del sistema.

En el capítulo 4 tendremos el análisis detallado de la forma de operación, así como, los parámetros a considerar al momento de censar los diversos gases, así como, la forma de obtención de las gráficas de las diversas películas utilizadas.

Para finalizar en el último capítulo tendremos un análisis de los resultados obtenidos, mediante las comparaciones de las gráficas de los diversos sensores estudiados, expuestas ante los diversos gases, para así, medir la eficiencia de cada uno de los sensores.

# Índice general

Resumen . . . . .	IV
Prefacio . . . . .	V
Índice de figuras . . . . .	IX
Índice de tablas . . . . .	X
<b>Capítulo 1</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación . . . . .	1
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.3. Propuesta de solución . . . . .	1
1.4. Objetivos . . . . .	2
1.4.1. Objetivo general . . . . .	2
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.5. Contribución . . . . .	2
1.6. Estado del arte . . . . .	3
<b>Capítulo 2</b>	<b>3</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.1. Gases . . . . .	4
2.1.1. Gases nocivos . . . . .	5
2.1.2. Razones más comunes para la detección de gases . . . . .	6
2.1.3. Dióxido de carbono . . . . .	7
2.1.4. Monóxido de carbono . . . . .	8
2.2. Sensores . . . . .	9
2.2.1. Clasificación de sensores . . . . .	10
2.2.2. Sensores químicos . . . . .	10
2.2.3. Sensores semiconductores . . . . .	12
2.2.4. Óxido de zinc . . . . .	14
2.2.5. Dióxido de estaño . . . . .	15
2.3. Funcionamiento de los sensores de gas . . . . .	16
2.3.1. Importancia de temperatura en el sensado . . . . .	20
2.4. Tarjeta de adquisición de datos . . . . .	21
2.4.1. Microcontrolador . . . . .	22
2.5. Pantalla de cristal líquido - LCD . . . . .	24
2.6. Memoria externa microSD . . . . .	26
2.7. Comunicación serial . . . . .	28



<b>Capítulo 3</b>	<b>29</b>
<b>3. Desarrollo experimental</b>	<b>30</b>
3.1. Construcción del prototipo . . . . .	30
3.1.1. Mediciones de resistencia en un microcontrolador . . . . .	30
3.1.2. características del sistema de monitoreo . . . . .	33
3.1.3. Funciones del sistema de monitoreo . . . . .	34
3.1.4. Parámetro de muestreo de comportamiento resistivo de sensores comerciales	37
3.2. Sensores no comerciales . . . . .	38
3.2.1. Deposito de película delgada de óxido de Zinc . . . . .	38
3.2.2. Deposito de pastilla de óxido de estaño . . . . .	39
3.2.3. Metodología de medición de respuesta a sensor . . . . .	39
<b>Capítulo 4</b>	<b>40</b>
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>41</b>
4.1. Resultados experimentales de sensores comerciales . . . . .	41
4.1.1. Respuesta al sensado de MQ2 . . . . .	41
4.1.2. Respuesta al sensado de MQ3 . . . . .	43
4.1.3. Respuesta al sensado de MQ7 . . . . .	44
4.1.4. Respuesta al sensado de MQ135 . . . . .	45
4.1.5. Comparación de respuesta de los sensores comerciales . . . . .	46
4.2. Resultados experimentales de sensores no comerciales . . . . .	47
4.2.1. Película delgada de óxido de zinc de 8 inmersiones . . . . .	48
4.2.2. Película delgada de óxido de zinc a 10 inmersiones . . . . .	50
4.2.3. Pastilla de óxido de estaño dopada con cobre . . . . .	52
4.2.4. Pastilla de óxido de estaño dopada con platino . . . . .	55
4.2.5. Comportamiento de sensores no comerciales expuestos ante exhalación . . . . .	57
4.2.6. Comportamiento de las películas delgas expuestas ante humo de cigarro . . . . .	58
4.2.7. Comportamiento de las películas delgas expuestas ante humo de madera . . . . .	59
4.3. Discusión general . . . . .	61
<b>Capítulo 5</b>	<b>61</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>62</b>
<b>Glosario</b>	<b>63</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>65</b>

# Índice de figuras

2.1. Molécula de dióxido de carbono . . . . .	7
2.2. Molécula de monóxido de carbono . . . . .	8
2.3. Diagrama de un sensor químico . . . . .	11
2.4. Estructura de banda de valencia, de conducción y gap en los materiales. . . . .	12
2.5. Reacción superficial en el óxido de zinc causada por la exposición a $CO_2$ . . . . .	18
2.6. Proceso superficial de reducción en ZnO causado por exposición a CO . . . . .	19
2.7. Esquema de partes de plataforma de microcontrolador . . . . .	21
2.8. Diagrama interno de un microcontrolador (?) . . . . .	23
2.9. LCD de 16x2 comercial . . . . .	24
2.10. Pines de Display LCD 16x2 . . . . .	24
2.11. Diagrama de conexión de LCD con Arduino Nano . . . . .	25
2.12. Memoria Flash microSD . . . . .	26
2.13. Pines de E/S de la tarjeta microSD . . . . .	27
2.14. Módulo de comunicación SPI a microSD . . . . .	27
2.15. Diagrama de conexión de módulo SPI-SD . . . . .	28
2.16. Módulo de conexión Tx-Rx . . . . .	29
3.1. Diagrama de conexión de sensor de gas al microcontrolador . . . . .	31
3.2. Gráfica de error de Respuesta al sensor . . . . .	33
3.3. Esquema de partes de sistema de monitores . . . . .	34
3.4. Pantallas de display LCD 16x2 . . . . .	35
3.5. Datos obtenidos por monitor serial . . . . .	35
3.6. Archivo de datos de valores de muestro de datos de voltaje de entrada . . . . .	36
3.7. Gráfica de muestra de variación resistiva . . . . .	36
4.1. Gráfica de comportamiento del sensor MQ2 . . . . .	42
4.2. Gráfica de comportamiento del sensor MQ3 . . . . .	43
4.3. Gráfica de comportamiento del sensor MQ7 . . . . .	44
4.4. Gráfica de comportamiento del sensor MQ135 . . . . .	45
4.5. Gráfica de comportamiento resistivo de película delgada de ZnO a 8 inmersiones en relación a la temperatura . . . . .	48
4.6. Gráfica de comportamiento de la película ZnO 8 inmersiones ante muestras . . . . .	49
4.7. Gráfica de comportamiento resistivo de película delgada de ZnO a 10 imersiones en relación a la temperatura. . . . .	50
4.8. Gráfica de comportamiento de la película ZnO 10 inmersiones ante muestras . . . . .	52
4.9. Gráfica de comportamiento resistivo de pastilla de $SnO_2 - Cu$ en relación a la temperatura . . . . .	53

4.10. Gráfica de comportamiento de pastilla de $SnO_2$ dopada con cobre ante muestras. . .	54
4.11. Gráfica de comportamiento resistivo de pastilla de $SnO_2 - Pt$ en relación a la temperatura. . . . .	55
4.12. Gráfica de comportamiento de pastilla de $SnO_2$ dopada con platino ante muestras. .	56
4.13. Gráfica comparativa de sensibilidad de las películas ante la exposición de exhalación.	57
4.14. Gráfica comparativa de sensibilidad de las películas ante la exposición de humo de cigarro . . . . .	59
4.15. Gráfica comparativa de sensibilidad de las películas ante la exposición de humo de cigarro . . . . .	60

# Índice de tablas

3.1. Abreviaciones de los compuestos gaseosos . . . . .	38
3.2. Abreviaciones de nombres de las películas delgadas . . . . .	40
3.3. Nombre de etiqueta de gases . . . . .	40
4.1. Comportamiento de sensor MQ2 . . . . .	42
4.2. Comportamiento de Sensor MQ3 . . . . .	44
4.3. Comportamiento de Sensor MQ7 . . . . .	45
4.4. Comportamiento de Sensor MQ135 . . . . .	46
4.5. Tabla comparativa de los valores de respuesta al sensado de cada uno de los distintos sensores . . . . .	46
4.6. Respuesta del Sensor en relación a la exposición de las muestras en ZnO 8 inmersiones.	49
4.7. Respuesta del sensor en relación a la exposición de las muestras en ZnO 10 inmersiones	51
4.8. Respuesta al sensor en relación a la exposición de las muestras en $SnO_2 - Cu$ . . .	53
4.9. Respuesta del sensor en relación a la exposición de las muestras en SnO-Pt. . . . .	56

# Capítulo 1

## Introducción

En esta sección se hablará sobre el problema que se busca solucionar, así como analizar las posibles propuestas de solución con el fin de poder resolver la problemática planteada. Además de estudiar algunos sensores con similares características y que buscan solucionar problemáticas similares, mediante distintos tipos de sensores.

### 1.1. Justificación

El monitoreo de algunos gases se ha convertido en una necesidad para la vida actual, debido a la gran cantidad de la utilización de compuestos que pueden producir gases que, aunque en algunos casos se generen en pequeñas cantidades al irse acumulando puede llegar a convertirse en un riesgo, debido a estas razones el conocer la cantidad de algún tipo de elemento gaseoso puede ayudar a prevenir riesgos y mantener a salvo a las personas. Existen una gran cantidad de accidentes causados por la exposición prolongada a cierto tipo de gases en lugares cerrados, para esto es necesario mantener controlada la exposición de las personas ante estos peligrosos.

### 1.2. Planteamiento del problema

En lugares cerrados en los cuales sea un posible riesgo la cantidad de gas de algún tipo para la seguridad y la salud humana, algunos gases como el dióxido de carbono tienen características de ser inodoros e incoloros, lo que presenta un gran problema debido a que es difícil determinar cuando una persona se encuentra ante una peligrosa exposición.

### 1.3. Propuesta de solución

Se planea la construcción de un sistema de sensado de gas  $CO_2$  que sea económico y eficiente, mediante películas delgadas de Óxido de Zinc, con lo cual se busca aumentar la cantidad de sensores en el mercado para así lograr que exista mayor sensado de gases en lugares de riesgo. Además de que se busca determinar la eficiencia de este tipo de sensor en comparación con sensores comerciales o más comunes.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Diseñar un dispositivo para medir el  $CO_2$  basado en sensores de película delgada de óxido de zinc.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Medir las respuestas de películas delgadas de óxido de zinc fabricadas en la UAEH de corriente voltaje en función de la temperatura y expuestas a diferentes contaminantes: exhalación humana, humo de cigarro y humo de madera.
- Diseñar sistema de comunicación serial para obtención de la base de datos mediante de una computadora.
- Integrar el sistema de la base de datos que permita guardar los valores obtenidos de las respuestas de los sensores a través del tiempo.
- Incorporar al sistema la base de datos para monitorear la respuesta corriente-voltaje en tiempo real del sensor.
- Analizar y comparar comportamiento de las diversas películas delgadas y sensores estudiados.
- Determinar cuál es la película delgada que presenta mejores características y bajo que condiciones.
- Comparar los resultados obtenidos del comportamiento de las películas delgadas y compararlos con los resultados obtenidos de los sensores comerciales con el fin de poder determinar cuál es el que presenta mejores características.

## 1.5. Contribución

El presente trabajo tienen como finalidad la construcción de un sistema que permita conocer el comportamiento de los sensores de gas, diseñados a través de películas delgadas de óxido de zinc, las cuales son elaboradas con diferentes características, con el fin, de poder medir sus respuesta ante la exposición ante algunos tipos de gases de óxidos carbónicos, como lo son  $CO$  y  $CO_2$ , además, de medir el tiempo de respuesta de cada una de las diversas pruebas, además del tiempo de recuperación, con la finalidad de obtener las gráficas de comportamiento de estos sensores, ante determinadas exposiciones.

## 1.6. Estado del arte

En la actualidad la necesidad por el monitoreo de los parámetros en sistemas automatizados, se ha convertido en una necesidad, los sistemas de seguridad que involucran el monitoreo de gases peligrosos son cada vez más requeridos, por esta razón se buscan cada vez más sistemas de seguridad que tengan la capacidad de poder detectar la presencia de determinados tipos de gases, esto se ha convertido en una tarea importante y de gran relevancia.

Los sensores de gas son diseñados con una amplia variedad de características y parámetros, que los hacen reaccionar de formas distintas ante la presencia de diversos compuestos gaseosos, sin embargo, la sensibilidad que estos tienen varía en relación a diversos factores, como la cantidad de concentración, el tipo de sensor, el método de síntesis del sensor, entre otras muchos parámetros.

En 1938 Wagner y Hauffe estudiando a algunos semiconductores, pudieron observar como es que algunos átomos y moléculas que están en contacto con el semiconductor pueden ser absorbidos o crear enlaces, debido a procesos químicos que se realizan superficialmente. Estos científicos pudieron descubrir como es que el hecho de que algunos átomos y moléculas se absorban en un semiconductor, puede llegar a influir en sus propiedades, como lo son conductividad y potencial superficial, lo que fue el inicio para los sensores de gas (Matsuura and Takahata, 1991).

Este cambio en las propiedades eléctricas del material debido a la exposición de un compuesto gaseoso, se debe a que ocurre una reacción en la superficie del sensor, lo que cambia sus propiedades estructurales en la superficie y esto cambia la corriente superficial que pasa por el material sensible, esto en función a la cantidad de gas en contacto y el tipo de reacción superficial que puede llegar a ocurrir (McAleer *et al.*, 1987).

El primer sensor de gas de óxido semiconductor fue desarrollado en 1962, y se ha continuado su desarrollo con la misma teoría desde esa época, lo cual lo convirtió en uno de los dispositivos más utilizados hasta ahora, ha llegado a ser uno de los dispositivos más utilizados para la detección de fugas de gas inflamables (Katiyar, 1970). En los últimos años muchos esfuerzos de investigación se han dirigido a la detección de bajas concentraciones de gases, como lo pueden ser los componentes olorosos (Xu *et al.*, 2002) entre otros componentes, para que estos sensores funcionen correctamente es necesario que tengan alta sensibilidad, selectividad y ser altamente estables debido a las propiedades de los compuestos para los que están destinados.

# Capítulo 2

## Antecedentes

En la primera parte de este capítulo hablaremos del funcionamiento del sensor de óxido de zinc en interacción con el dióxido de carbono, esto con el fin de comprender a fondo el funcionamiento de este sensor, para así saber los requerimientos que deben considerarse a la hora de diseñar el sistema de monitoreo, de igual forma se estudiarán las características de los materiales de los que está compuesto el sensor. Mientras que en la segunda parte de este capítulo abordaremos, algunos conceptos, además, se hablara de algunos de los componentes utilizados para la realización del sistema para monitorear los compuestos gaseosos.

### 2.1. Gases

El nombre de “Gas” fue dado por Van Helmont, el cual considero como gas a toda sustancia parecida al aire y que no poseía un volumen o una forma determinada, el nombre surgió como una relación a lo que los griegos llamaban a la materia original de lo que todo fue creado «Chaos» y debido a su fonética en la pronunciación flamenca este nombre paso a ser “Gas” (Asimov *et al.*, 1975).

Dicho término posteriormente fue utilizado como nombre a uno de los estados de agregación de la materia, los cuales se clasifican dependiendo de la relación de la fuerza de unión de las partículas que componen un material. En el estado gaseoso se tiene como característica el hecho de que sus moléculas interaccionan débilmente entre sí, por lo cual, la distancia entre dichas moléculas es mucho mayor que en los demás estados, además de que posee la característica de distribuirse en todo el volumen que lo contiene así como adoptar su forma (Echeverría, 2005).

Las partículas que contienen los compuestos gaseosos, se mueven de forma aleatoria, esto provoca que las moléculas o átomos que componen al gas tiendan a ocupar todo el espacio disponible. Las moléculas o átomos que componen a un gas son altamente estables, lo que implica que sea difícil que formen enlaces con otras moléculas, esto implica que estos materiales no tengan una estructura sólida, o que sea difícil que la tengan.

Existe una gran cantidad de compuestos gaseosos que están presentes tanto de forma natural como artificial en la tierra, así como una gran cantidad de clasificaciones para estos mismos, el presente trabajo se centrara en un solo tipo de gases, los cuales son los gases nocivos, estos gases tienen la característica que pueden presentar un riesgo en la salud. Esta clasificación de compuesto gaseoso es la que se estudiara en la sección 2.1.1.



### 2.1.1. Gases nocivos

En la actualidad, existen una gran cantidad de gases, los cuales se procura controlar los niveles de exposición a los que las personas puedan estar presentes. Algunos de estos gases son altamente tóxicos los cuales se emiten diariamente por diversas razones, entre las que se encuentran; las industrias, las emisiones de automóviles procesos laboratorios o por emanación natural. También tenemos presentes los gases con propiedades inflamables, los cuales se busca que no rebasen su límite de explosión, el cual es el límite necesario de concentración de un gas que se necesita para que este explote, por lo cual, el control de estos gases es una de las más grandes prioridades de la industria, como lo son: la industria del petróleo, el transporte y los lugares especializados en el almacenamiento de gas además de todas las empresas e industrias que trabajan con los productos petrolíferos (Makeenkov *et al.*, 2015).

En la actualidad tenemos que en la atmosfera se encuentran una gran cantidad de estos gases, algunos de los más importantes y que están presentes son: los Óxidos de Nitrógeno ( $NO_X$ ), Los Óxidos de Carbono ( $CO$ ,  $CO_2$ ), el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), el Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ), el Ozono ( $O_3$ ), el amoníaco ( $NH_3$ ), además de algunos compuestos orgánicos que son volátiles entre otros gases (Eranna, 2011).

Gran parte de estos gases son provocados por el efecto de la contaminación, el cual esta estrechamente vinculado con el desarrollo y el crecimiento industrial además del crecimiento de la población. La contaminación se generó debido a la actitud tomada por los seres humanos, hacia el poco cuidado de la naturaleza, durante el último siglo, se dio lugar a este que es uno de los grandes problemas de la humanidad moderna.

Hace relativamente poco tiempo se consideraba que la contaminación no repercutía directamente a la salud, sin embargo, en años recientes se le ha prestado más atención, debido al aumento a incidentes relacionados con la contaminación en todo el mundo. Estos efectos se dan cuando la entrada de sustancias a un sistema rebasa la capacidad de este para asimilarlas y/o degradarlas, si se sobrepasa este límite que tienen un sistema, las repercusiones pueden ser dañinas para este. Podemos decir que el sistema puede representar a un ser humano y las repercusiones en este caso serian daño en la salud (Albert, 1997).

De acuerdo con dos nuevos informes de la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de una cuarta parte de las defunciones de niños menores de cinco años son consecuencia de la contaminación ambiental. Cada año, las condiciones insalubres del entorno, tales como la contaminación del aire en espacios cerrados y en el exterior, la exposición al humo de tabaco ajeno, la insalubridad del agua, la falta de saneamiento y la higiene inadecuada, causan la muerte de 1.7 millones de niños menores de cinco años (OMS, 2017).

También estudios realizados en un servicio de emergencias revelaron que se tiene aproximadamente en los ingresos a hospitales, causados por productos químicos, un 67.3% de los ingresos son causados en accidentes domestico mientras que solo un 14.8% se deben a accidentes laborales, además de tener un ingreso por tentativa suicida del 11.2% y causados por terceros como forma de agresión un 3.2%.

De dichos accidentes, se tiene que los productos químicos que mayormente fueron implicados fueron los productos cáusticos con un 39.9 %, mientras que los gases irritantes un 13.8 %, detergentes 12.3 %, disolventes 12 % y gases asfixiantes 9.5 % (Quitian, 2011). Con lo que podemos ver que los productos gaseosos, presentan un gran porcentaje de accidentes con químicos, y por lo tanto deben mantenerse en un control constante.

En general todos los gases que se consideran nocivos es necesario mantener controlados, para evitar tener niveles peligrosos que puedan llegar a ser dañinos. Por estas y otras razón en la sección 2.1.2 se enlistan las principales razones que se tienen para detectar gases.

### 2.1.2. Razones más comunes para la detección de gases

- Para protección personal, debido al riesgo a la salud que se puede presentar por una exposición prolongada a algunos de los gases, así como la protección personal por posibles explosiones.
- La protección de la propiedad privada debido a que las explosiones que algunos de los gases, que pueden terminar en la destrucción del material y la propiedad privada.
- Disminución de la contaminación debido a que existe un estándar que no se puede rebasar de agentes contaminantes, que puede generar algún proceso industrial, así como emanaciones de máquinas como lo son los automóviles.
- Confiabilidad de que algún sistema o proceso estén operando dentro de los parámetros permitidos.
- Evitar envenenamiento o intoxicación de seres humanos.

El desarrollo del sistema se centró en el estudio de dos tipos de gases en particular, los cuales se generan de forma tanto natura como artificial, estos gases se busca que los sensores que se estudian tengan una buena respuesta.

Los gases estudiados son los óxidos carbónicos en particular el dióxido de carbono, el cual es uno de los gases más fácilmente producidos en la tierra, este gas se puede generar por la exhalación de animales, este gas se estudiara en mejor medida en la sección 2.1.3. También se hablará de otro tipo de oxido carbónico que es el monóxido de carbono el cual es un gas que se genera en menor medida, este tipo de gas se estudiara en la sección 2.1.4.

### 2.1.3. Dióxido de carbono

La contaminación atmosférica en las grandes ciudades está compuesta en su mayoría por partículas suspendidas, estas partículas están compuestas por los llamados criterios contaminantes, entre las partículas más importantes de este criterio se encuentra el monóxido de carbono y el dióxido de carbono  $CO_2$ , que pueden llegar a producir efectos en la visión (López Acuña *et al.*, 1987).

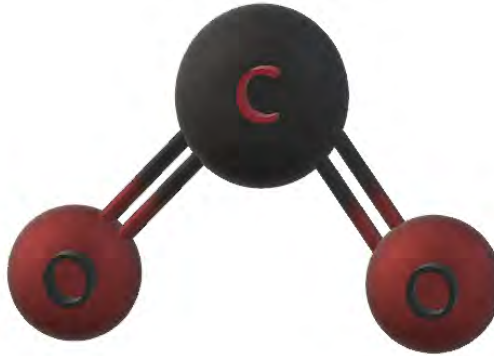


Figura 2.1: Molécula de dióxido de carbono

El dióxido de carbono  $CO_2$  es una molécula compuesta por dos átomos de carbono y un de oxígeno, como se puede observar en la Figura: 2.1. Este es un gas incoloro, denso y poco reactivo, este gas forma parte de la composición de la tropósfera. El balance del dióxido de carbono es sumamente complejo por las interacciones que existen entre la reserva atmosférica de este gas, las plantas que lo consumen en el proceso de fotosíntesis y el transferido desde la tropósfera a los océanos (Raynaud *et al.*, 1993).

El dióxido de carbono, es uno de los principales gases que son directamente responsables por el cambio climático, esto se determinó debido a muestras de burbujas de gas congeladas encontradas en bloques de hielo en la Antártida, que datan desde hace 150,000 años y con lo cual se determinó que en los últimos 160 años ha habido una aceleración mucho mayor a lo que se esperaría, con lo cual se pudo determinar que el aumento en los últimos 160 años ha sido mucho mayor a lo que puede depurarse mediante el ciclo de carbono lo que provoca el cambio climático.

Estas partículas son resultado principalmente de quemas agrícolas e incendios forestales, estos contaminantes pueden provocar entre otras cosas: conjuntivitis, obstrucción nasal, cefalea y molestia en las vías respiratorias. La exposición muy alta a concentraciones de gas puede provocar una sensación punzante, la inhalación de concentraciones muy elevadas de  $CO_2$  puede producir efectos en la visión (Lladó Verdejo *et al.*, 2000).

El dióxido de carbono  $CO_2$  está presente naturalmente en la atmósfera a niveles muy bajos, de aproximadamente 0.035 % lo cual no tiene ningún riesgo, sin embargo, la exposición de cantidades más elevadas puede tener efectos en la salud, dependiendo del periodo de exposición. Si la cantidad de  $CO_2$  en el ambiente se encuentra por debajo del dos por ciento, es decir, que no ha superado las 20,000 partes por millón no provoca efectos nocivos para la salud.

La concentración de  $CO_2$  puede llegar a provocar el desplazamiento del oxígeno esto combinado con la toxicidad del  $CO_2$  puede llegar a provocar efectos nocivos a la salud. Si el nivel de  $CO_2$  llega a 7.5 % puede provocar disnea, ritmo aumentado del pulso, jaqueca, mareos, sudor, fatiga, desorientación visual desarrollada. Si la exposición llega a veinte minutos de exposición puede provocar también disminuir el rendimiento mental. Cuando la exposición llega a niveles de 30 % de concentración de  $CO_2$  puede llegar a afectar el corazón (CCSSO, 1997).

Mediante el tratado de Kyoto, las ciudades más industrializadas se comprometieron a reducir estas emisiones para reducir la contaminación y el malestar de las personas se reduzca, en el cual se comprometieron a reducir las emisiones de las empresas y automóviles con el fin de disminuir en un 5 % por año las emisiones, esto desde el 2010, con el fin de lograr llegar a un 50 % para estabilizar los niveles de la atmósfera (Køfalusi and Aguilar, 2006).

#### 2.1.4. Monóxido de carbono

Al igual que el dióxido de carbono, el monóxido de carbono es un gas compuesto por oxígeno y carbono, la diferencia se presenta en el tipo de enlace, que en este caso hay una molécula de oxígeno por cada molécula de carbono como se ve en la figura 2.2. De forma natural, en la atmósfera de la tierra se contiene solo una pequeña cantidad de monóxido de carbono.



Figura 2.2: Molécula de monóxido de carbono

Casi 3,000 millones de personas en todo el mundo siguen sin acceso a combustibles y tecnologías menos contaminantes para cocinar, calentar espacios y alumbrarse. Cada año millones de personas mueren como consecuencia de la contaminación del aire en los hogares: 34 % por accidentes cerebrovasculares, 26 % por cardiopatías isquémicas, 22 % por neuropatías obstructivas crónicas, 12 % por neumonía infantil y 6 % por cáncer de pulmón.

Esto se debe principalmente al elevado nivel de monóxido de carbono que se genera en la quema de combustibles, en general se esperaría que la quema de combustibles con base carbono produzca dióxido de carbono, pero si el proceso de quemado no contiene suficiente oxígeno se produce monóxido de carbono. Debido a esto, este es el gas que causa la tasa de intoxicación más frecuente debido a que son muy habituales los procesos de combustión de este tipo, además de que también se puede llegar a producir mediante el humo de incendios (Oliu *et al.*, 2010).

En los hogares con fogones de carbón o biomasa que queman a fuego abierto y no disponen de ventilación, las emisiones de partículas en suspensión y otros contaminantes pueden ser 100 veces superiores a los niveles que recomienda la OMS. Tales contaminantes son carcinógenos y provocan enfermedades cardíacas y pulmonares puesto que debilitan la respuesta inmunitaria, reducen la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, provocan inflamación generalizada e isquemia, entre otros trastornos fisiológicos (OMS, 2017).

La exposición al monóxido de carbono puede llegar a ocasionar los siguientes síntomas y signos más frecuentemente que son cefalea (96,9%), mareo (66,1%), náuseas (35,8%), inestabilidad a la marcha (32%), pérdida de conciencia (29,2%) y taquicardia (20%). Además de que la exposición a un nivel muy alto de este contaminante puede llegar a provocar la muerte.

Para poder mantener niveles de gas que no sean dañinos, es necesario poder medir la cantidad de gases, esto se realiza mediante la conversión de la cantidad de gas a una señal o impulso eléctrico que pueda ser procesado. Esta coerción se realiza mediante la utilización de un sensor. El cual se detallara de forma mas amplia en la sección 2.2.

## 2.2. Sensores

El termino sensor es un concepto que se originó de la palabra sentido, el cual, es un concepto que se refiere a la facultad de que se tiene para la captación y transmisión de estímulos periféricos mediante determinados órganos, en el caso del cuerpo humano. En el caso del cuerpo humano se dice que se cuenta con cinco sentidos: vista, olfato, gusto, tacto, y audición, sin embargo, con el paso del tiempo se ha llegado a descubrir que se cuentan con muchos sentidos más, que permiten sentir cosas como la temperatura, el dolor, el equilibrio entre otros. Todo esto con el fin de que tengamos una mejor idea del medio que nos rodea, de igual forma es que funcionan los sensores que permiten conocer ciertas condiciones existentes en el ambiente (Willard and Tang J, 1937).

En la actualidad la electrónica está presente en innumerables aspectos de la vida cotidiana y esto es posible gracias a los sensores, ya que estos son los que permiten trabajar con los sistemas electrónicos en relación a las diversas variables físicas, las cuales son indispensables para tareas como el control, la automatización, manufactura, automóviles entre algunas otras cosas.

Los transductores son dispositivos que convierten mediante un determinado proceso un tipo de energía física a otra, por esta razón se considera que los sensores son un tipo particular de transductores en los cuales se convierte un tipo de energía física a una energía eléctrica que pueda ser utilizada para un dispositivo electrónico (Areny, 2004). Por esta razón son la interfaz entre el mundo físico y los dispositivos eléctricos.

Por el contrario, los actuadores son dispositivos que pueden convertir señales eléctricas en fenómenos físicos, por esto son elementos complementarios, debido a que mientras uno permite conocer las condiciones que nos rodean el otro ayuda a manipular el entorno. Según el Comité Electrotécnico Internacional (CEI), “El sensor es la parte principal de una cadena de medición que convierte la variable de entrada” (Kim *et al.*, 1999).

Aunque no necesariamente un sensor dé una conversión de forma lineal, dependiendo el sensor y la energía física que detecta es lo que dice si puede o no ser lineal, puede dar como resultado una transformación de magnitudes logarítmica o incluso comportarse de forma lineal solo bajo ciertas condiciones, por esta razón para el uso de sensores es necesario conocer el comportamiento de dichos sensores bajo las condiciones utilizadas, para así tener una utilización más precisa.

El entorno que rodea al sensor es un factor que tomar en cuenta, debido a que las condiciones que los rodean afectan de manera directa su funcionamiento. En este caso la temperatura es de los factores más importantes que tomar en cuenta debido a que con una temperatura adecuada este tipo de sensores permitiría mejorar las características de sensibilidad de un sensor, lo cual se explicara de mejor forma la sección 2.3.1.

### 2.2.1. Clasificación de sensores

Existe una amplia variedad de clasificaciones de sensores que varían dependiendo de sus propiedades, si son de contacto o no, activos o pasivos, absolutos o relativos, las señales que proporcionan o si son analógico o digital.

Otra forma de clasificar un sensor es dependiendo a su naturaleza de funcionamiento, es decir, los sensores pueden ser clasificados dependiendo de la razón por la que presentan variaciones en la conversión, como puede ser: posición, magnetismo, temperatura, humedad, presión, eléctricos, químicos, entre otros muchos existentes.

Inclusive pueden ser clasificados dependiendo de los elementos que contienen: mecánicos, resistivos, inductivos, capacitivos, piezoeléctricos, semiconductores, etc (Serna Ruiz *et al.*, 2010).

Con esto en mente podemos saber que el sensor con el que se trabajara en el sistema de monitoreo será un sensor, activo ambiental es decir no será de contacto, también sabemos que es un sensor relativo puesto que no tiene valores fijos o definidos, también deberá de ser un sensor analógico y debido a su naturaleza podemos decir que es un sensor químico construido con un semiconductor.

Los sensores químicos como el de que aquí se menciona, son aquellos que presentan una relación en tiempo real sobre la composición química del entorno. En la sección 2.2.2 tenemos una explicación más detallada sobre estos sensores y en la sección 2.2.3 se explica que es un sensor semiconductor que es también una de las características del sensor de gas que se utilizó.

### 2.2.2. Sensores químicos

En la actualidad, pese a los grandes avances los sensores químicos son complejos y solo se optimizan para una tarea en particular, sin embargo, estos sensores tienen las siguientes ventajas de funcionamiento (Traytor *et al.*, 1971):

- Sustitución de procedimientos analíticos estándar, mediante detección y análisis rápidos debido a sensores especializados.
- Automatización del análisis y seguimiento de las cantidades químicas.
- Análisis de campo mediante instrumentos portátiles.

Es decir, un sensor químico permite determinar la presencia, concentración o cantidad detectable de una sustancia dada, esto se realiza, mediante la detección de una molécula o la relación de la reactividad asociada a esta.

La sensibilidad se refiere a la cantidad de concentración que es posible detectar de una molécula o elemento es decir el analito. Pero este aspecto, así como el de selectividad de la detección química se ven afectados por la estructura del sensor, ya sea por los aspectos dimensionales o temporales.

Estos sensores brindan la posibilidad de medir analitos presentes en los tres estados de la materia, aunque un poco limitado, para los estados sólidos puesto que solo permitiría mediciones superficiales. Este sensor mide directamente los cambios que se presentan en determinados eventos químicos para los que fue diseñado, dando como resultado un cambio en su salida en relación a la cantidad de eventos dados.

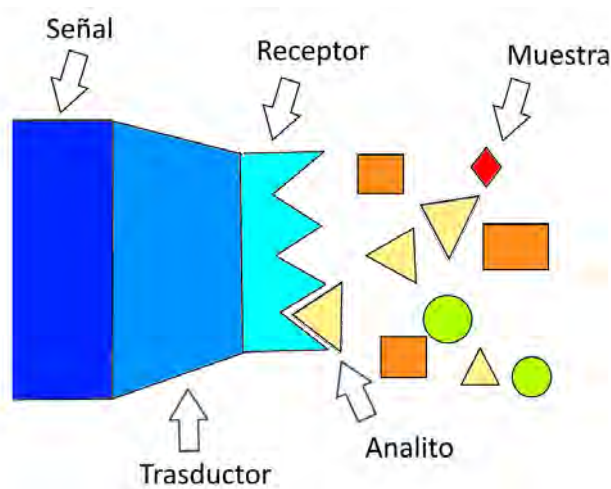


Figura 2.3: Diagrama de un sensor químico

Como se puede observar en la Figura 2.3, el sensor químico funciona como detector por selección, esto ocurre cuando el sensor se encuentra en presencia de una muestra, la cual solo producirá una respuesta si tiene los elementos adecuados para que ocurra alguna reacción química. La parte que se encuentra en contacto con la muestra recibe el nombre de receptor, este es el encargado de interactuar directamente con las partes del analito que se encuentran en la muestra. Posteriormente la parte del transductor es la encargada de generar una respuesta en relación a la reacción ocasionada por el contacto con el receptor y el analito, en este caso se produce una señal eléctrica puesto a que este transductor es un sensor.

Los sensores de gas que se estudiaron en este trabajo además de ser un sensores químico por su reacción con otros materiales también son considerados como sensores tipo semiconductor por la naturaleza de su funcionamiento, en la sección 2.2.3 se describirá a mayor detalle que son y cuál es su funcionamiento.

### 2.2.3. Sensores semiconductores

Los materiales se pueden dividir en tres grandes grupos dependiendo de su conductividad, como lo son: aislantes, metales y semiconductor. Cada uno de estos grupos se clasifica dependiendo de qué tanta conductividad poseen o dicho de otra forma que tanta resistencia a la corriente presentan, los aislantes son aquellos materiales que presentan una muy alta resistencia, lo que se traduce como una muy baja conducción, por el contrario, los metales son los que tienen una muy alta conducción, por último, los semiconductores son aquellos materiales que tienen características tanto de aislantes como de conductores.

La conducción de un semiconductor varía en relación a diversos factores, estos factores, pueden llegar a cambiar la conducción del material en forma dinámica. Estos factores pueden llegar a ser campos eléctricos o magnéticos, presión, radiación, temperatura entre otros (Candal *et al.*, 2001).

Aunque en un comienzo estos sensores se desarrollaron de forma empírica fue necesario tener una idea más detallada de su funcionamiento debido a que esta es la única forma de mejorar sus propiedades y hacer cada vez mejores y más exactos los sensores existentes.

Estos materiales son los que mayormente se desarrollan en la actualidad a nivel tecnológico. Estos materiales tienen enlaces covalentes muy inestables que se ve afectada por los factores anteriormente descritos, también su conductividad se puede ver afectada por deformación, luz o absorción de sustancias, incluso por contacto de ciertas sustancias, por esta razón son buenos sensores de los mismos factores que los afectan debido a que presentan un cambio en la conductividad en relación que son afectados por ciertos factores ya previamente mencionados.

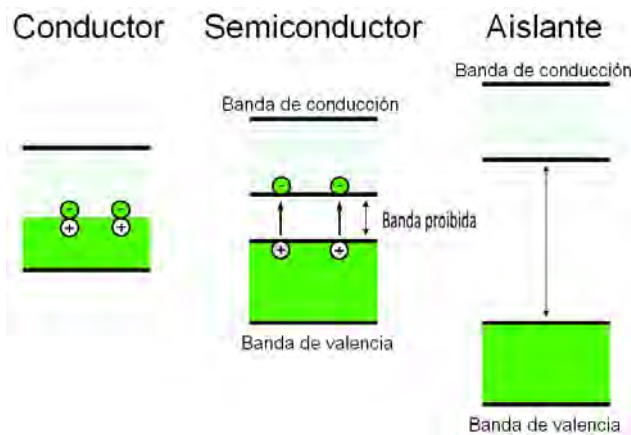


Figura 2.4: Estructura de banda de valencia, de conducción y gap en los materiales.



Los factores que determinan que tan conductor es una materia se debe a su conducción en sus tres bandas, las cuales se pueden observar en la Figura: 2.4. La cual muestra la relación de tamaños de las diversas bandas o niveles energéticos que se encuentran en cada tipo de material.

Como se puede ver en la figura 2.4 tenemos como es que los materiales están formados por tres bandas: la banda de conducción, la banda de valencia y la banda prohibida. La primera banda, la banda de conducción es la que se encarga del transporte de electrones a lo largo del material, esta banda es la que permite el flujo de corriente en un material. La segunda banda, la llamada banda de valencia, es el nivel de energía en el cual se encuentran los electrones de la capa superior de un electrón.

Para la tercera banda, la banda prohibida, tenemos que es la separación que existe entre las dos primeras bandas, además esta banda como su nombre lo indica, es un estado de energía en el cual no es posible que se encuentre un electrón. La separación que existe entre la banda de valencia y la de conducción es lo que da el valor de la banda prohibida o band gap como también se le conoce.

El tamaño del band gap es el que indica que tipo de material es. Para materiales aislantes, la banda prohibida, es muy grande lo que dificulta el salto de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Mientras que para materiales conductores estas dos bandas están traslapadas por lo que no existe un band gap que impida el mover un electrón de un átomo.

Para los semiconductores sabemos que el band gap no es tan grande como la de un aislante, sin embargo, existe a diferencia de un conductor. Lo cual lo hace el material perfecto para utilización en electrónica por que mediante diversos dopados se puede manipular el grosor de esta banda y así controlar su conductividad.

Para el caso de un sensor semiconductor, es aquel que permite tener un cambio en su banda prohibida en relación aun cambio de un parámetro externo que lo afecte, como puede ser: luz, presión, vibración, temperatura, entre muchos otros. El cambio de la banda prohibida se puede traducir como el cambio dinámico en propiedades eléctricas, que en su mayoría se utiliza cambio en sus propiedades resistivas.

En general para todos los sensores operativos de este tipo tienen que tener alta durabilidad química, con el fin de aumentar la vida útil del dispositivo, además de que no deben de formar compuestos estables con las partículas que son absorbidas, ya que de formarlos solo podrían ser utilizados pocas veces, así mismo deben de ser compuestos con alta resistencia térmica.

Los compuestos de óxidos metálicos como  $ZnO$ ,  $SnO_2$ ,  $TiO_2$  entre otros, son muy buenos candidatos para ser utilizados como semiconductores, debido a que se ajustan muy bien a estas características.

Otra característica que tienen este tipo de materiales es que pueden llegar a tener propiedades físicas muy buenas, como lo son: la dureza, la flexibilidad, la resistencia mecánica, entre otras. Estas propiedades dependen de los materiales con los que estén construidas, un ejemplo muy claro es el caso de los sensores basados en silicio amorfo, el cual es considerador tan fuerte mecánicamente hablando como lo es el acero, además de que el silicio no presenta histéresis mecánica (Arendy, 2004).

Los sensores de gas son en su mayoría de este tipo, sensores semiconductores, pero a su vez también son sensores químicos como los que se estudiaron en la sección 2.2.2, los cuales tienen un funcionamiento que depende de que el material esté en contacto con la superficie del sensor, el funcionamiento de estos sensores se verá explicado en la sección 2.3.

Pero antes de entrar al funcionamiento del sensor de gas se hablarán de algunas de las características que conforman al material del que están hechos los sensores no comerciales, el primer material utilizado es el óxido de zinc del cual se habla en la sección 2.2.4, así como del óxido de estaño que se estudia en la sección 2.2.5.

#### 2.2.4. Óxido de zinc

Es una molécula compuesta por átomos de zinc y átomos de oxígeno el cual es un polvo grueso de color blanco o grisáceo, sin olor, sabor amargo, soluble en ácidos y álcalis, insoluble en agua y alcohol, y no combustible. Algunos de sus usos más comunes son como pigmento, agente de refuerzo en el caucho, ungüentos, inhibidor de pinturas, absorbente de rayos UV en los plásticos, cerámica, sales de baldosas, vidrio, zinc, aditivo para alimentación animal, suplemento dietético, tratamiento de semillas, cosméticos, fotoconductor en las máquinas copadoras de oficina y en fotografía en color, dispositivos piezoeléctricos.

El óxido de zinc es considerado un material cristalino que posee un gran ancho de banda cercano a los 3,37 eV, y con una gran energía de unión de 60 meV, un radio de Bohr de 1,4 nm a 3,5 nm. Debido a su única dimensionalidad estructural posible pueden tener propiedades electrónicas y ópticas muy interesantes, por lo cual se utiliza para el diseño de dispositivos electrónicos u ópticos como es el caso de sensores UV.

Las propiedades eléctricas que posee el óxido de zinc pueden ser utilizados en electrónica, optoelectrónica y fotoquímicas lo vuelven un material sumamente atractivo en la electrónica, puesto a que pueden ser utilizados en el diseño de celdas solares, electrodos transparentes, sensores de gas, varistores, transductores piezoeléctricos, dispositivos optoelectrónicos entre otros dispositivos. Además, las propiedades magnéticas y eléctricas pueden modificarse introduciendo intencionalmente impurezas en la red.

El óxido de zinc es una capa activa de sensor de gas tiene diferentes características como alta estabilidad química, facilidad de dopaje, no toxicidad, bajo costo y sensibilidad química a numerosas especies de gas incluyendo acetileno ( $C_2H_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), etanol ( $C_2H_5OH$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y ozono ( $O_3$ ) (Pour *et al.*, 2015).

Otra de las características por las cuales se llega a utilizar el óxido de zinc es el poseer un punto de fusión muy alto, además de alta estabilidad química y un valor alto de energía de enlace superior a la gran mayoría de semiconductores (Martínez G. *et al.*, 2010).

El efecto del sensado de gas se basa principalmente en la reacción entre los iones de oxígeno y las moléculas de gas absorbidas sobre la superficie activa. En el cual el efecto donador de electrones de la molécula de gas es el factor más importante a tener en cuenta, en particular este efecto se ve con mayor impacto en el gas etanol, debido a que este es un gas que tiene el efecto donador de electrones más fuerte que otros gases cuando la cantidad de concentración es equivalente (Zhang *et al.*, 2009).

El efecto donador no es el único factor que se debe de tomar en cuenta en cuanto a la reacción del óxido de zinc en interacción con los gases, sin embargo, pese a las variaciones de estos factores el etanol, sigue siendo uno de los elementos gaseoso con menor tiempo de respuesta ante un sensor químico semiconductor.

Ya que el sensor de gas es un semiconductor su conductividad también es afectada, como en cualquier semiconductor, con variaciones de la temperatura, por lo cual el conocer a que temperatura tiene una mejor respuesta, es uno de los principales puntos a consideración en un sensor de gas.

Los sensores de óxidos metálicos o MO son los sensores más ampliamente utilizados para la detección de gases ya sean tóxicos o explosivos que pueden estar presentes en el aire. Los sensores de esta clase detectan los gases, principalmente, por la región de agotamiento que se genera en la capa superficial del sensor, dicha capa de agotamiento al cambiar su grosor cambia la conductividad del material. Dicho cambio se debe principalmente, a la reacción entre los iones de oxígeno absorbidos y la molécula de gas con la que este en contacto.

### 2.2.5. Dióxido de estaño

Muchos óxidos metálicos son utilizados para la detección de gases por sus características y posibilidad de hacer enlaces fácilmente, el óxido de estaño es el material más comúnmente utilizado para el sensado de gases.

El dióxido de estaño es un compuesto inorgánico, con enlaces metálicos que tiene la fórmula química  $SnO_2$ . Este compuesto al igual que los demás óxidos metálicos puede ser utilizado como un sensor resistivo, el cual tiene un cambio en su conductividad en relación a la cantidad de gas y al tipo de gas al que este expuesto.

Este tipo de sensores reaccionan ante un gas atrapando átomos del compuesto medido, o reaccionando a estos químicamente, todo esto genera un cambio de conductividad en el material, lo cual es posible medir mediante diversos sistemas electrónicos. En general, estos sensores son utilizados para censar gases inflamables y tóxicos que pueden estar presentes en de forma natural, como es el caso del gas natural ( $CH_4$ ), gas LP o óxidos de carbono, entre otros gases (Aguilar *et al.*, 2012).

Los sensores de dióxido de estaño presentan las mismas características que tienen los sensores de óxido de zinc debido que al ser un óxido metálico al igual que en el óxido de zinc su reacción es muy similar, la diferencia es que debido a estructura física presenta una mejor respuesta al sensado, en algunas ocasiones. Debido a todas estas razones los sensores de óxido de estaño serán comparados con el óxido de zinc debido a que estos sensores son los más ampliamente utilizados. Por otro lado, el óxido de zinc como un sensor, es más fácilmente procesado para poder funcionar como sensor, además de tener un menor precio que el óxido de estaño.

Los óxidos de los que se habló en esta sección así como en la sección anterior fueron utilizados para así poder desarrollar los sensores se utilizaron en el capítulo 3 (desarrollo), estos sensores fueron ocupados debido a que, para los sensores de óxido de son los sensores mas utilizados, y fueron utilizados como punto de control para poder comparar los resultados obtenidos por los sensores de óxido de zinc. El funcionamiento de estos sensores se ve detallada en la sección 2.3.

## 2.3. Funcionamiento de los sensores de gas

Los sensores de gas semiconductores de óxidos generan un cambio resistivo en relación de la cantidad de gas a los que están expuestos, como ya se habló en la sección 2.2.3, este cambio resistivo se debe directamente al cambio que se presenta en el ancho de banda prohibida del materias, que al ser este un material semiconductor tiene un cambio de ancho de banda, que varía por la temperatura y a la reacción química en su superficie.

Para que en un material ocurra conducción eléctrica, será necesario que ocurra una transferencia de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción, para esto sirve conocer el ancho de banda prohibida, la cual es el límite que se tiene que superar de energía para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción, sin embargo, este ancho de banda no tiene un determinado valor sino más bien cambia dependiendo de las condiciones en las que se encuentre, así como del material del sé este en contacto.

Ya que tanto en los aislantes como en los semiconductores su energía de fermi se encuentra en la banda prohibida su diferencia se encuentra en el tamaño de dicha banda, siendo una banda muy grande en el caso de los aislantes y más pequeña para los semiconductores, en estos casos el ancho de banda prohibida podría llegar un electrón de valencia llevarlo a la banda de conducción con un estímulo como luz, descargas eléctricas, temperatura, etc. Sin embargo, dicho estimulo será en relación al ancho de banda, entre mayor sea el ancho de banda mayor será la energía en el estímulo que se necesite para llevar un electrón de valencia a la banda de conducción. Con esto en mente sabemos que para que esto ocurra en un aislante la energía necesaria es mucho mayor que en los semiconductores.

Algunas cosas que tener en cuenta que podrían afectar la calidad de un sensor son parámetros como: la sensibilidad y la selectividad. En cuanto al caso de la sensibilidad, indica como es el cambio resistivo del semiconductor cuando esta en presencia de un analito, cuando mayor sea el cambio en presencia del analito mejor será la sensibilidad del material. Para el caso de selectividad este parámetro indica que tan bueno es el sensor para discriminar a ciertos tipos de exposiciones, un buen sensor es el que solo reacciona ante el elemento analizado.

También existen factores como la estabilidad, la cual podemos considerarla como la capacidad de un sensor que tienen para mantener sus valores y condiciones ante cambios externos o a través del tiempo. Este concepto se refiere a que tan robusto es nuestro sistema, el cual debería mantener o buscar mantener, su relación de cambio en presencia de un analito, a pesar de largos periodos de uso, o ante condiciones distintas de temperatura, presión flujo, etc.

Los parámetros en los cuales es posible determinar la cantidad de analito, se conoce como la resolución del material, delimitado por los límites de trabajo del sensor. Estos factores pueden estar influidos directamente por la linealidad del material, en las partes en las cuales deja de ser lineal la gráfica de comportamiento de un sensor, es menos útil para la detección de los analitos.

Otro punto que se debe de tener en cuenta son los tiempos de funcionamiento, el tiempo en que un sensor puede operar de forma correcta sin mostrar desgaste se conoce como el tiempo de vida, además se debe de tener en cuenta el tiempo de respuesta y el tiempo de recuperación en todos los dispositivos electrónicos, el primero es el tiempo que tarda en detectar de forma correcta la cantidad de analito, es decir, el tiempo que tarda de pasar de inicio a cierto valor determinado de muestra. Mientras que el tiempo de recuperación es lo contrario es el tiempo que tarda el sensor cuando se regresa a sus parámetros de inicio, siendo estos dos tiempos no necesariamente igual variando en relación de los materiales del sensor (Venkata K, 2015).

A diferentes temperaturas los sensores de este tipo presentan cambios en sus características, tanto resistivas como de sensibilidad, lo que es como un punto crucial a tener en cuenta a la hora de trabajar con estos sensores, para poder observar como es que afecta la temperatura el estudio de los sensores de óxido de zinc, se estudiaran a diversas temperaturas, con el fin de poder observar su comportamiento ante este factor.

La temperatura es uno de los factores que más hay que tener en cuenta en los sensores de gas semiconductores, no solo por que influyen en las propiedades físicas del material sino también porque afecta a las reacciones superficiales que ocurren en el material, esto se debe a que pueden llegar a ocurrir diferentes reacciones con los mismos materiales, dependiendo de la temperatura se encuentren (Venkata K, 2015).

Como en los óxidos metálicos la absorción depende directamente de la temperatura, esto se debe a que es más fácil que reaccionen los compuestos que se miden con la superficie del sensor, la temperatura a que el sensor trabaja mejor es la llamada temperatura de funcionamiento (Bing *et al.*, 2015).

Si se encuentra el sensor en los rangos de 100°C a 500°C, la interacción de la superficie semiconductor y el oxígeno atmosférico va generar una absorción en formas de iones al semiconductor, lo que estabilizara electrostáticamente al gas en la superficie, atrapando los electrones en la banda de conducción. La ecuación que describe este proceso que se crea debido a la temperatura con el gas está dado por (Alim *et al.*, 2005):



La capa que se forma en la superficie atrapa iones de oxígeno, esto provoca que la resistencia del material aumente, estos átomos de oxígeno, al estar atrapados superficialmente son los átomos que interactúan con los gases analizados. La interacción puede ser de dos formas distintas, la primera de estas formas es aquella en la que los iones formen enlaces con el analito. Para la segunda forma es necesario que los oxígenos se una formando enlaces con el analito liberando electrones en el material.

Sin embargo, tenemos que a temperaturas bajas la tasa de absorción es alta, esto tiene la desventaja de tener un tiempo de respuesta menor, a pesar de esto la tasa de absorción aumenta con la temperatura así como el tiempo de respuesta decrece, por lo que se busca tener una temperatura alta en los sensores, pero que generalmente que no supere los 300°C para no afectar los componentes.

El proceso que ocurre en la capa superficial del sensor depende de con que gas este en contacto, ya que si es puesto en contacto con un gas oxidante como es el caso del dióxido de carbono, el cual es un gas oxidante, el proceso será muy distinto al que ocurriría en contacto con el monóxido de carbón el cual se considera como un gas reductante, el proceso que ocurre en el primer caso es el que se expresa mediante la siguiente imagen.

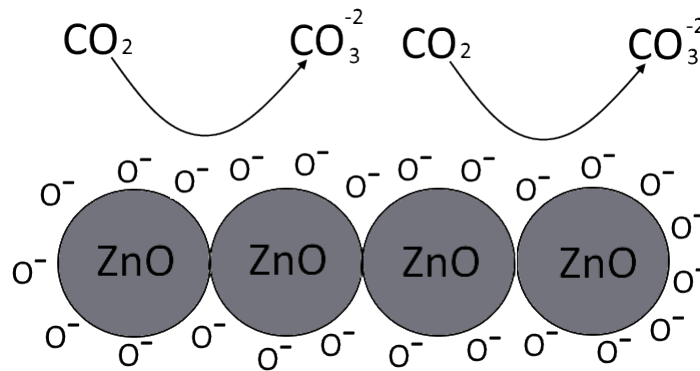


Figura 2.5: Reacción superficial en el óxido de zinc causada por la exposición a  $CO_2$

Como se puede ver en la figura 2.5, debido a las altas temperaturas se crea una capa superficial de iones de oxígeno los cuales se generan superficialmente, debido a la estructura cristalina del óxido de zinc los enlaces se rompen en la capa superficial, con las altas temperaturas existe una reacción entre los iones de oxígeno con los gases que entra en contacto, lo que ocurre cuando el ión de oxígeno entra en contacto con el dióxido de zinc esta descrito en la ecuación 2.2.



Lo que ocurre en este proceso químico, es que para que se logre el balanceo de la ecuación anterior, se tiene que cumplir que el gas de  $CO_2$  al estar expuesto a los iones de oxígeno, busca formar carbonatos mediante un proceso de oxidación del óxido de zinc, lo que provoca que para que se logre el balanceo químico de esto es necesario que se utilice un electrón de la capa de conducción del óxido de zinc, esto ocurre cada vez que se realice este proceso, lo cual se puede decir que en forma proporcional a las partículas presentes de dióxido de carbono, serán los electrones perdidos lo que significa una disminución de la conductividad lo que se traduce como un aumento en la resistencia del material, tenemos un cambio resistivo en aumento en relación al aumento a la exposición del dióxido de carbono que se espera en los resultados físicos.

El proceso que ocurre cuando en lugar de ser expuesta la película delgada a un oxidante se expone a un reductor, como es caso de un gas como lo es el monóxido de carbono, tenemos como resultado un proceso químico muy distinto, aunque igual como en el caso anterior, la temperatura alta provoca que se generen iones de oxígeno alrededor de la película la reacción de estos iones con el monóxido de carbono es lo que se muestra en la figura 2.6.

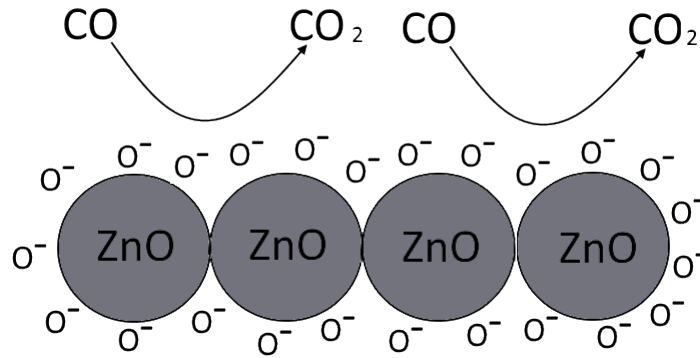


Figura 2.6: Proceso superficial de reducción en ZnO causado por exposición a CO

Como se muestra en este caso tenemos que el proceso que ocurre es uno de reducción, puesto a que el monóxido de carbono busca ser más estable en su molécula y para esto utiliza un oxígeno de los de la capa superficial del óxido de zinc, lo que se ve expresado en la siguiente ecuación (Matsuura and Takahata, 1991):



Como se observa en la ecuación, se tiene que, al ocurrir el proceso de reducción, tenemos que el balanceo de la ecuación se pueda llevar a cabo, cuando después de ocurrir la reacción, tendremos un electrón libre en la banda de conducción, esto indica que el material tiene una mejor conducción, con lo cual, se tiene que la resistencia del material baja en forma proporcional a la cantidad de moléculas con las que interactúa el sensor.

Sin embargo, este proceso solo funciona para bajas temperaturas, puesto que, al trabajar con altas temperaturas, el balanceo no sucede de esta forma, esto debido a que al sobre pasar los 300°C los enlaces del dióxido de carbono debido a la temperatura comienzan a romperse como lo describe la ecuación 2.4.



Lo que provoca que la resistencia igualmente suba, y la reacción ante este gas es la misma que en el caso de la exposición a un gas reductor, es decir, que la resistencia baja, esto genera un comportamiento no lineales de resistencia y provocando que los valores suban y bajen en relación a que tan rápido los enlaces se rompan, lo que implica esto es que cuando las temperaturas alcanzan valores altos los resultados no son muy exactos, aunque esto también se ve afectado en medida de que tan rápido se caliente el gas que se expone a las superficie, esto quiere decir que si la temperatura no es tan alta para calentar el gas que se acerca a la película, los enlaces no se romperán.

Para poder medir el comportamiento resistivo de los diversos sensores, los cuales se estudiaron, se desarrolló un sistema de monitoreo que permite medir los valores de resistencia en tiempo real, con el fin de poder tener una mejor comprensión del comportamiento, de los sensores ante la exposición de los diversos gases. El prototipo de monitores constaba de diversas partes de las cuales se hablara en las secciones siguiente, y en la sección 3.1 se describirá de forma más detallada la construcción del sistema completo.

### 2.3.1. Importancia de temperatura en el sensado

Como ya se mencionó antes, sabemos que la temperatura es factor clave en la medición de un sensor, poder generar una capa de iones de oxígeno en la capa superficial del sensor, es necesario tener una alta temperatura. El control de esta temperatura, permite controlar los niveles de iones que interactúan y generan una reacción química, lo cual significa que, una alta temperatura podría dar una mejor respuesta al sensado.

Por otro lado, la temperatura también ayuda a formar enlaces y romperlos en la composición del gas. Una muy elevada temperatura no permitiría formar las nuevas moléculas, esto debido a que temperaturas muy elevadas romperían los enlaces interatómicos de las moléculas, por lo cual una temperatura muy elevada no es muy factible, además de que no debemos acercarnos a temperaturas de fusión de le material sensitivo.

Un factor importante a tener en cuenta en altas temperaturas, es que las temperaturas afectan a los componentes cercanos, esto puede llegar a provocar que algunos componentes se puedan llegar a comportar de forma muy diferente, o incluso podrían dejar de funcionar. Por lo cual tenemos que, en un sistema de este tipo, podemos aislar la temperatura en una pequeña sección, o alejar al sensor del sistema de medición.

Para poder tener una temperatura elevada, en el sensor de película delgada de óxido de zinc, se utilizo en una resistencia de micromel, el cual es un material altamente térmico, que al momento de circular una corriente este por su estructura atómica genera una gran temperatura. Este tipo de material es uno de los mas utilizados para industrialmente para la fabricación de calentadores comerciales y radiadores.

Las resistencias de micromel se hacen por medio de un embobinado fino de este material, el cual aumenta su inductancia y provoca que los electrones que circulan por el choquen con mas fuerza con los átomos del material, lo que implica que la temperatura aumente con mayor rapidez. Para este tipo de resistencias son encapsuladas para su protección y para poder distribuir la temperatura que generan, el encapsulado generalmente esta constituido por un cerámico, debido a que los materiales cerámicos, soportan temperaturas más elevadas que muchos otros materiales.

Para la construcción de sistema de monitoreo se necesitó de varios componentes que se detallaran en las secciones posteriores, estos componentes son controlados por medio de un Arduino, el cual se detallara su razón de funcionamiento, así como las razones por las que se trabajó con esta tarjeta, de todo esto se mostrara en la sección 2.4



## 2.4. Tarjeta de adquisición de datos

En la actualidad existen una gran variedad de tarjetas de adquisición de datos, como es el caso de la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (DAQ), esta tarjeta presenta una muy buena en muchos aspectos, sin embargo, esta tarjeta es muy costosa.

Existen otras tarjetas que permiten adquirir datos como es el caso de Arduino, la cual es una plataforma microcontroladora diseñada para la elaboración de prototipos electrónica de código abierto (open-source), basada en hardware y software flexibles. Esta al ser un open-source brinda la posibilidad de compartir, modificar y estudiar el código fuente de su software, así como su diagrama electrónico, los open-source o códigos abiertos, promueven la colaboración entre los usuarios, con el fin de poder mejorar el sistema con la colaboración de los usuarios.

El microcontrolador de la placa se programa usando un lenguaje propio de programación, el cual es un lenguaje basado en C que lleva de nombre Write, este lenguaje se programa usando su propio compilador que lleva por nombre: “Arduino Development Environment” el cual está basado en Processing.

La placa que se utilizó para el desarrollo de este proyecto fue la placa Arduino nano, la cual tiene un tamaño de 18 x 45 milímetros de tamaño, con un peso total de 7 gramos, este cuenta con un microcontrolador ATmega 328, el cual opera a una caída de tensión de 5 volts, tiene una memoria total de 32KB con una velocidad de procesamiento de 16MHz. Este sistema cuenta con 8 entradas analógicas y 14 digitales, además de contar con comunicación seria Tx-Rx y además cuenta con la posibilidad de utilizar hasta 6 salidas de PWM de forma simultánea.

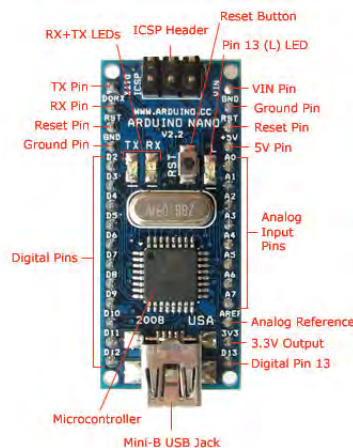


Figura 2.7: Esquema de partes de plataforma de microcontrolador

Como se muestra en la figura 2.7, es un esquema del como está conformada la construcción del Arduino nano, en el esquema podemos ver que cuenta con dos entradas una de TX y RX, es decir de comunicación serial, también cuenta con una entrada de mini USB para su alimentación, o puede ser alimentada mediante la conexión de una fuente en las terminales de 5V y la terminal de negativo Ground, una parte importante que es necesario señalar es el hecho de su velocidad de trabajo está limitada a 16MHz debido a que está configurada por su cristal de trabajo.

También cuenta con una terminal ICSP header, la cual brinda la posibilidad de reprogramar el programa de raíz presente en el microcontrolador que viene de fábrica. Esta entrada está disponible para modificar el programa de raíz, con el fin de agregar o quitar algunas características del programa o arquitectura principal, también cuenta con esta terminal para configurar un nuevo microcontrolador de ser necesario, lo que lo hace compatible con microcontroladores de mayor capacidad o mayor velocidad de procesamiento.

Se escogió esta tarjeta para el desarrollo del prototipo, debido a su bajo costo además de cumplir con todas las características de memoria y procesamiento necesarias, así como contar con los pines necesarios para los protocolos de comunicación utilizados, el TX-RX y comunicación por protocolo SPI. Además de que su reducido tamaño y bajo costo lo hacen indicado para reducir el tamaño del prototipo. Como se mencionó en esta sección el Arduino nano está controlado por un microcontrolador el cual será explicado su funcionamiento de forma más detallada en la sección 2.4.1.

### 2.4.1. Microcontrolador

Con el paso del tiempo ha surgido la necesidad de ir controlando sistemas cada vez más complejos, debido a estas exigencias tecnológicas fue que se diseñaron tanto los microcontroladores como los microprocesadores, los cuales realizan la función de una computadora en una escala mucho menor. Estos fueron diseñados para poder controlar sistemas en tiempo real y a un bajo costo además de ser fáciles de programar (Dogan, 2006).

Para comprender mejor el concepto de microcontrolador es necesario explicar que es un controlador, el cual es dispositivo que permite gobernar uno o varios procesos, los cuales, brindan la capacidad de interpretar señales físicas a través de la entrada de ciertos sensores, además de poder controlar las salidas necesarias para accionar los efectores que llevan a cabo el control de los procesos.

Con esto en mente tenemos que un microcontrolador fue diseñado con el propósito general de realizar las mismas tareas que un controlador común, pero disminuyendo su tamaño e incorporando todas las funciones externas que contiene un controlador común para realizar el proceso de un sistema.

Los microcontroladores integran las funciones de memoria, procesamiento y los recursos de entrada y salida, esto con el fin de reducir tamaño para poder ser utilizado en el mismo sistema que se desea controlar sin la necesidad de un dispositivo de control externo.

En la figura: 2.8 se muestra el diagrama estructural de la composición de un microcontrolador, en la cual se puede observar cómo es que además de tener las tres partes características de un microcomputador (procesador, módulo de E/S, Memoria), cuenta con otros subsistemas que se explicaran a continuación (Pérez and Areny, 2007).

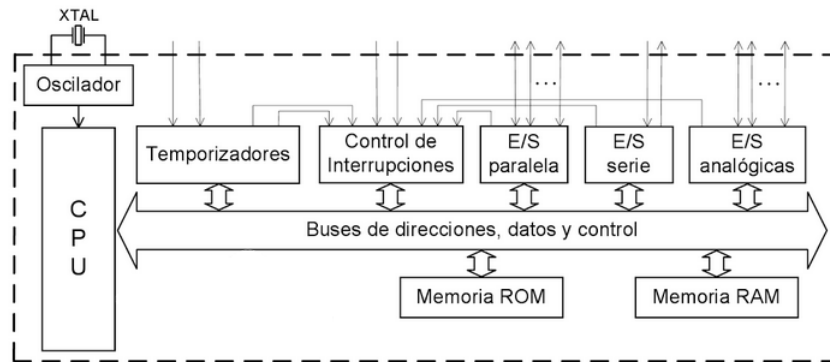


Figura 2.8: Diagrama interno de un microcontrolador (?)

Como Podemos ver en la figura 2.8, los microcontroladores además de contener las estructuras básicas de los microcomputadores, también está compuesto por otras secciones que fueron agregadas con el fin de controlar mejor el sistema, y así cubrir una mayor gama de necesidades que se puedan presentar.

Una de las partes de mayor importancia en todos los microcontroladores es el oscilador, el cual se encarga en conjunto con el cristal (XTAL), de proporcionar el tiempo en que se realiza cada uno de los procesos que realiza el CPU, lo cual permite tener una relación entre el tiempo de cada una de las acciones y el tiempo real, lo que permite realizar procesos en sistemas en tiempo real, además de contar con temporizadores, osciladores, generadores de PWM, entre otros muchos procesos dependientes del tiempo.

Una diferencia notable, entre un microcontrolador con un procesador normal, es que en un procesador no se tiene un modulo de entradas y salidas, los cuales se encuentran en distintos bloques con el fin de poder realizar procesos diferentes dependiendo cual sea el caso, para procesos simultáneos se utilizaran el módulo paralelo, mientras que para procesos secuenciales el serial. El sistema de entradas y salidas analógicas como su nombre lo indica tienen la función de gestionar entradas no digitales, en las que los valores pueden cambiar a más de un estado, esto dependiendo de la resolución con la que estemos trabajando generalmente se utiliza para datos en 8 y 16 bits.

El Watch dog o perro guardián es una característica que se agregó para mejorar el funcionamiento, aunque no es necesaria, el perro guardián tiene como función prevenir errores, este es un contador que si se activa en el programa comenzara a contar, y necesitara un reinicio que el programador del microcontrolador deberá de poner en los lugares adecuados antes de que el contador del Watch dog reinicie el programa, esto se hace con el fin de prevenir errores, en caso de existir un error en el programa no se seguira la secuencia correcta, por lo que el Watch dog no se desactivara y reiniciara el microcontrolador para prevenir fallas (Pérez and Areny, 2007).

El sistema de interrupción es el encargado de revisar que tarea tiene mayor prioridad en el microcontrolador, esto con el fin de poder darle prioridad a las tareas que sean más importantes, o en algunos casos de poder interrumpir algunas tareas, para así realizar un proceso que sea necesario en medio de ellas.

Para poder mostrar los datos en tiempo real, sin la necesidad de conexión con un sistema externo, se presentan los valores medidos mediante un pantalla tipo display de 16x2, con la cual tenemos la posibilidad de mostrar 32 dígitos a la vez, este dispositivo se encuentra detallada en la sección 2.5.

## 2.5. Pantalla de cristal líquido - LCD

La pantalla de cristal líquido LCD por sus siglas en inglés (Liquid Crystal Display), es un dispositivo electrónico que es empleado para visualizar el contenido o información en forma gráfica, la cual se expresa a través de caracteres o pequeños símbolos, la LCD que se utilizo es una pequeña pantalla que tiene la posibilidad de mostrar hasta dos filas de 16 caracteres.

Las LCD's son pantallas monocromáticas que se encuentran delante de una fuente de luz o fuente reflectora, que permite tener un mejor contraste de los caracteres mostrados, además de que tiene la ventaja de que puede ser utilizada con una pequeña batería gracias a su poco consumo energético.



Figura 2.9: LCD de 16x2 comercial

Este dispositivo se compone de una capa formada de moléculas alineadas entre dos electros transparentes, y dos filtros de polarización, cuenta con cristal líquido entre el filtro polarizante, de ay su nombre, la luz que pasa por el primer filtro sería bloqueada por el segundo, los que da los pixeles oscuros de cada carácter como se ve en la figura 2.9.

Algunos de los parámetros que se pueden manipular en la programación de una LCD son: brillo, contraste y tiempo de respuesta. Estas características se manipulan a través de los pines de control. Los pines de la LCD se pueden dividir en tres secciones: los pines de alimentación, los pines de control y los pines de dirección de datos, como se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10: Pines de Display LCD 16x2

Los pines de alimentación del LCD son tres; el pin del  $V_{SS}$  que es el pin que energiza el dispositivo, el pin  $V_{DD}$  es el pin de tierra común del dispositivo el cual es la otra línea de energía del circuito, mientras que el pin  $V_{EE}$  es un pin de alimentación opcional, en el cual la alimentación enciende una luz de fondo para mejorar la imagen en lugares oscuros.

La sección de los pines de control es la sección más importante siendo la entrada RS, la del pin que selecciona el registro de control de datos, esta función trabaja en conjunto con el bus de datos, cuando hay un 0 en este pin significa que la información en el bus de datos es una instrucción de control, y cuando el valor en RS es un 1 significa que los datos entrantes del bus de datos son caracteres que se mostrara.

El pin RW corresponde a la escritura, en el caso de tener un 0 en la entrada, pero si se tiene un 1 significa que el bus de datos está leyendo desde la pantalla. El pin E o enable es la entrada de bloqueo de cambio de estados, este pin se tiene que activar cada vez que se dese cambiar lo que se quiere mostrar en el LCD.

La última parte de los pines, es el bus de datos bidireccionales, los cuales envían el bus de datos correspondiente a cada instrucción o dirección de memoria de cada carácter. Este bus de datos puede ser controlado con los últimos cuatros bits solamente, esto si se utilizara los datos guardados en la memoria interna, mientras que si se busca programar pixel por pixel, será necesario la utilización de los 8 pines del bus de datos.

La conexión con el Arduino nano se dará en todo un bloque de salidas del microcontrolador, esto con el fin de mejorar el rendimiento del microcontrolador para no afectar las interrupciones internas, la conexión con el Arduino nano es la que se muestra en la figura 2.11.

Una vez que el sistema está diseñado por completo se tiene que poder graficar el comportamiento del sensor de gas mediante el muestro de datos, para esto es necesario tener un método para graficar los datos en tiempo real o poder guardar los datos de forma periódica, lo que permite graficar los datos cuando están previamente recopilados.

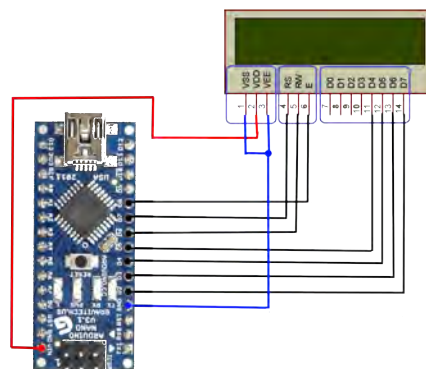


Figura 2.11: Diagrama de conexión de LCD con Arduino Nano

Esta recopilación de datos se realizara mediante el muestreo de datos, los cuales se guardan en tiempo real en una memoria externa tipo micro SD este sistema se analizara de manera más clara en la sección 2.6, donde se explicara el funcionamiento y la conexión con el microcontrolador.

## 2.6. Memoria externa microSD

En muchas aplicaciones de sistemas electrónicos o en sistemas de instrumentación, es necesario almacenar grandes cantidades de datos de forma continua, en muchos de los casos los microcontroladores pueden llegar a almacenar información en su memoria interna, pero esto provoca que se reduzca la velocidad del procesador, además de tener poca capacidad. Por lo cual para este tipo de sistema es más recomendable utilizar memorias tipo FLASH, ya que brinda una gran cantidad de almacenaje de dato, con respecto a la memoria interna, además de que este tipo de sistema tiene un bajo costo y es de fácil acceso.

Las tarjetas SD o Secure Digital es un dispositivo electrónico en forma de tarjeta de memoria, la cual se utiliza como memoria externa en dispositivos electrónicos como cámaras, teléfonos, computadores entre otras cosas. Las tarjetas Micro SD son una versión más nueva de las tarjetas SD, que al igual que su predecesora es una tarjeta de memoria tipo flash, lo cual quiere decir que es una tarjeta de sobre escritura de información.

Esta tarjeta mide tan solo  $15 \times 11 \times 1$  milímetros, con un área de  $165 \text{ mm}^2$ , como se ve en la figura 2.12. Esta tarjeta está diseñada con para poder soportar una tasa de transferencia muy elevada, alcanzando hasta los  $90 \text{ Mb/s}$  de lectura y los  $80 \text{ Mb/s}$  de escritura en óptimas condiciones.

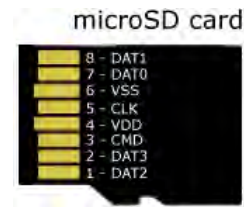


Figura 2.12: Memoria Flash microSD

Las tarjetas micro SD se construyen en diferentes clases las cuales indican la velocidad de transferencia de estas mismas las principales clases en las que se puede construir son en 2, 4, 6, 10 la clase dice la velocidad máxima de transferencia es decir puede grabar información hasta una velocidad de 2Mb, 4Mb, 6Mb y 10Mb respectivamente.

Las memorias microSD se pueden programar mediante dos distintos protocolos de comunicación el primero por serial llamado “BUS SD” el cual se programa mediante 4 líneas paralelas de comunicación el cual está más asociado a los puertos de las computadoras o dispositivos electrónicos que tengan un buen procesador.

El segundo tipo de protocolo para controlar una SD es el llamado protocolo serial SPI (Serial Peripheral Interface). El cual es un sistema que configura al envío de datos por medio de tres o cuatro líneas las cuales utilizamos para el envío de paquetes de datos configurados en 8 bits, el sistema está formado por un canal de envío de datos y uno de recepción, además de tener una señal de reloj que permite separar cada bit entre si además de permitirnos formar los paquetes de datos.



**Figura 2.13:** Pines de E/S de la tarjeta microSD

En la imagen 2.13 se tiene la configuración de los pines del protocolo de comunicación de la microSD, como se puede ver este tiene los pines 1, 2, 7 y 8 del protocolo de comunicación tipo BUS, además se encuentra en los pines 4 y 6 la alimentación de la tarjeta microSD y en el pin 5 la señal de entrada de reloj para el protocolo SPI, también se tiene una entrada en el PIN 3 la entrada de señal de este mismo protocolo.

Sin embargo, para la utilización de los datos es necesario separar los datos que se envían y reciben para el protocolo de comunicación SPI, con lo cual es necesario la utilización del módulo de adaptación de protocolo SPI a memoria microSD, para simplificar el circuito y hacerlo más eficiente. El módulo que se utilizó es el que se muestran en la figura 2.14.



**Figura 2.14:** Módulo de comunicación SPI a microSD

Como podemos observar tenemos los pines de alimentación, además de tener la entrada SCK que es la entrada de señal de reloj, esta entrada regulariza la transferencia de datos del protocolo SPI. En cuanto a los pines MISO y el MOSI, estos pines reciben este nombre por sus siglas en inglés, Master Output Slave Input y Master Input Slave Output, lo que indica que los datos van del maestro al esclavo, o en inversa, en este caso consideramos al microcontrolador como el maestro y a la tarjeta microSD como esclavo. En cuanto al pin CS, es el control que selecciona si activar al MISO o al MOSI, ya que estas dos entradas no pueden utilizarse al mismo tiempo, debido a que la arquitectura de la microSD solo permite una entrada/salida de datos.

La conexión a la placa arduino, al módulo microSD se realiza mediante el puerto de comunicación SPI de la placa arduino, el cual es un protocolo de comunicación que permite el envío y recepción de datos a gran velocidad, la conexión del módulo microSD y la tarjeta arduino es la mostrada en la figura 2.15.



Figura 2.15: Diagrama de conexión de módulo SPI-SD

Otras cuestiones que tener en cuenta es el hecho de que para el protocolo de comunicación SPI que se está manejando en este caso, es que se tiene que realizar en una escritura de registro de datos de 16 bits, y debido a que en la actualidad gracias al crecimiento avanzado de la tecnología, tanto las memorias actuales como los ordenadores solo están en formato mínimo de 32 bits, lo que provocaría una diferencia en la velocidad de transferencia y causaría un error de compatibilidad de datos, por esta razón es necesario darle un formato específico de 16 bits a la memoria microSD, esto través de una partición parcial del espacio de archivo.

## 2.7. Comunicación serial

La comunicación serial es un protocolo muy común para comunicación entre dispositivos que se incluye de manera estándar en prácticamente cualquier computadora, la mayoría de las computadoras incluyen dos puertos seriales RS-232. La comunicación serial es también un protocolo comúnmente utilizado por varios dispositivos para instrumentación, además, la comunicación serial puede ser utilizada para adquisición de datos si se usa en conjunto con un dispositivo remoto de muestreo.

El concepto de comunicación serial es sencillo, el puerto serial envía y recibe bytes de información y lo hace un bit a la vez, a pesar de que cuando esto es más lento que la comunicación en paralelo, debido a que este tipo de comunicación solo permite la transmisión de un byte completo por vez, sin embargo, este método de comunicación es más sencillo y puede alcanzar mayores distancias. Por ejemplo, la especificación IEEE 488 para la comunicación en paralelo determina que el largo del cable para el equipo no puede ser mayor a 20 metros, con no más de 2 metros entre cualesquier dos dispositivos; por el otro lado, utilizando comunicación serial el largo del cable puede llegar a los 1200 metros.

Típicamente, la comunicación serial se utiliza para transmitir datos en formato ASCII. Debido a que la transmisión es asíncrona, es posible enviar datos por una línea mientras se reciben datos por otra. Para la conexión con la tarjeta arduino se realiza en mediante la conexión en los puertos RX0 y TX1 de la tarjeta arduino, estos puertos se muestran en la figura 2.16.



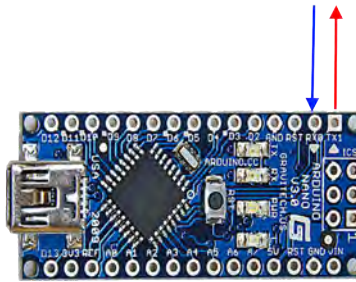


Figura 2.16: Módulo de conexión Tx-Rx

En el puerto de comunicación Rx, tenemos la entrada del bus de datos. Mientras que para la comunicación mediante Tx, es la comunicación de la tarjeta en la cual manda información. Debido a la arquitectura de comunicación serial tiene de forma independiente la entrada y la salida, sabemos que podemos mandar y recibir de forma paralela los datos mientras que para el caso de la comunicación SPI solo se puede mandar o recibir datos de información.

Para la construcción del prototipo así como el proceso que se llevo a cabo para el sensado de la respuesta de los sensores tanto los comerciales como los no comerciales, se detallara de forma más clara en el capítulo 3.

# Capítulo 3

## Desarrollo experimental

Este capítulo se dividirá en dos grandes partes la primera que se encargara del desarrollo de la construcción del sistema de monitorio, las partes que lo conforman, las funciones que tienen y el proceso utilizado para obtener los resultados de muestra, dicha sección abarca desde la sección 3.1 hasta la sección sección 3.1.4 . Mientras que la segunda parte muestra la comparativa de los sensores no comerciales utilizados, así como el su proceso de fabricación y el método utilizado para realizar las mediciones, esta etapa abarca desde la sección 3.2 a la sección 3.2.3.

### 3.1. Construcción del prototipo

Para la construcción del sistema que nos permite medir en tiempo real, así como como crear archivos de datos que podamos ir recopilando se realizó en varias partes, el principal problema que se presentó a la hora de desarrollar el prototipo fue la medición de resistencia, puesto que las entradas analógicas tanto de la tarjeta arduino como de los microcontroladores solo permite leer valores de voltaje, puesto a que en la tarjeta como en el circuito se utilizaron muchos componentes activos la relación de corriente no es exacta por lo que fue necesario tener un punto de referencia como se muestra en la sección 3.1.1.

#### 3.1.1. Mediciones de resistencia en un microcontrolador

La entrada analógica de la tarjeta Arduino Nano así como la de un microcontrolador, tiene una tolerancia máxima de voltaje de entrada que depende del límite de alimentación, debido a que la tarjeta será alimentada con un voltaje de 5 volts, este será el máximo de tolerancia de la entrada analógica del microcontrolador, la entrada que se utilizará será la entrada principal de la tarjeta de conmutación rápida, esto con el fin de minimizar el tiempo de respuesta del proceso final.

Para obtener la relación final en Ohms del valor del sensor, es necesario tener un punto de referencia que dé una relación del valor resistivo, en relación al voltaje medido de entrada, esto se realiza mediante el siguiente circuito:

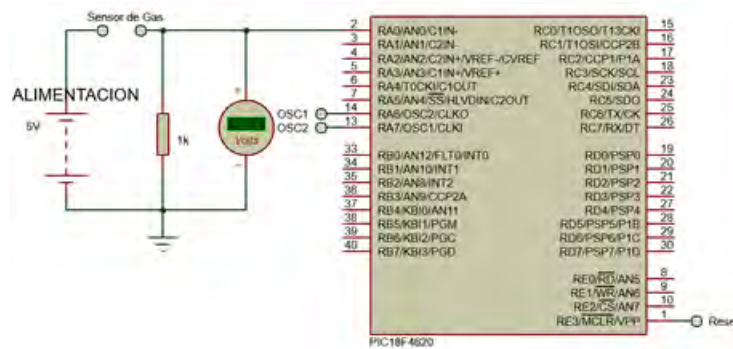


Figura 3.1: Diagrama de conexión de sensor de gas al microcontrolador

Como podemos ver en este arreglo el voltaje que se mide en la entrada en la tarjeta es igual al voltaje que pasa a través de la resistencia, la resistencia que propusimos es a través de la cual se medirá el voltaje la cual llamaremos  $R_1$ , esta resistencia esta en paralelo con la entrada. Así lo que obtenido en la entrada es  $V_{R_1}$ , teniendo esto podemos aplicar la ley de voltajes de Kirchhoff con lo cual obtendremos que:

$$-V_t + V_x + V_{R_1} = 0 \quad (3.1)$$

Siendo  $V_t$  el voltaje de alimentación que en este caso es de 5v, y  $V_X$  es el voltaje que pasa a través de sensor de gas. Además como sabemos que la corriente que pasa por el sensor es la misma que pasa por  $R_1$  podemos sustituir esto en la ecuacion 3.1 y obtendremos:

$$-V_t + (I * R_x) + (I * R_1) = 0 \quad (3.2)$$

Con lo que obtendremos el término que buscábamos, el valor de la resistencia del sensor de gas ( $R_X$ ) para resolver esta ecuación podemos factorizar la ecuación 3.2 y despejamos con el fin de encontrar la corriente que es el término en común que tienen ambas resistencias, tendremos que:

$$I = \frac{V_t}{(R_X + R_1)} \quad (3.3)$$

Con esto podemos aplicar la ley de ohm a la resistencia conocida ( $R_1$ ), con el fin de poder resolver la ecuación y simplificarla aún más, además así solo tendremos un término desconocido la incógnita buscada.

$$V_X = R_1 * \left( \frac{V_1}{R_X + R_1} \right) \quad (3.4)$$

Despejando la resistencia del sensor de gas que es el valor que estamos buscando tendremos que:

$$R_X = \left( \frac{V_1 * R_1}{V_X} \right) - R_1 \quad (3.5)$$

Con lo cual se obtuvo la ecuación necesaria para poder interpretar la señal de entrada del microcontrolador, como se observo, la ecuación la obtenida a raíz de la resistencia que se propuso para el circuito, dicha resistencia fue propuesta de un valor de  $1k\Omega$  esto con el fin de tener un valor de referencia, dicho valor entre mayor sea la resistencia más rango podrá tener la resistencia que deseamos medir, pero tendrá menor resolución por lo cual el valor será menos exacto.

Sustituyendo los valores conocidos podemos simplificar aún más la ecuación con lo cual tendríamos que la ecuación final será la siguiente:

$$R_X = \left( \frac{5}{V_X} \right) - 1 \quad (3.6)$$

Podemos quitar las unidades de la ecuación puesto que las unidades de voltaje de entrada se cancelan con las de salida, por lo cual no se indican las unidades de la resistencia, para así tener de salida la resistencia eléctrica en kilo Ohms.

Otra cosa que tener en cuenta es el hecho que debido a que se busca hacer lo más preciso posible, el valor medido se ha configurado la entrada a 10 bits lo que indica que su resolución será de 1024 valores en relación a los 5 volts máximos de entrada, con lo cual a la ecuación anterior aún hay que ajustarle este valor con una simple regla de tres para el cálculo de  $V_X$ .

Entonces considerando a la entrada en binario de 10 bits del microcontrolador como ADC siendo este el término dado a la entrada de conmutación rápida de un microcontrolador, con lo cual se tendría la siguiente ecuación.

$$V_X = \frac{5 * ADC}{1024} \quad (3.7)$$

Con lo cual se tendían todas las ecuaciones necesarias para poder convertir el valor de la entrada del microcontrolador, y así encontrar el valor más exacto posible del valor de la resistencia de sensor de gas.

Sin embargo, el hecho de utilizar una resistencia de referencia presenta un problema con la exactitud, es decir, el considerar una resistencia de referencia brinda una relación de valores con los cuales daría solamente 1024 valores que deben corresponder a todos los valores resistivos posibles, es decir, de 0 a infinito. Pero este rango de error se reduce a 0 conforme se acerca al valor de la resistencia de referencia, con lo cual la resistencia de referencia se deberá de escoger en relación al valor aproximado de la resistencia del sensor en reposo.

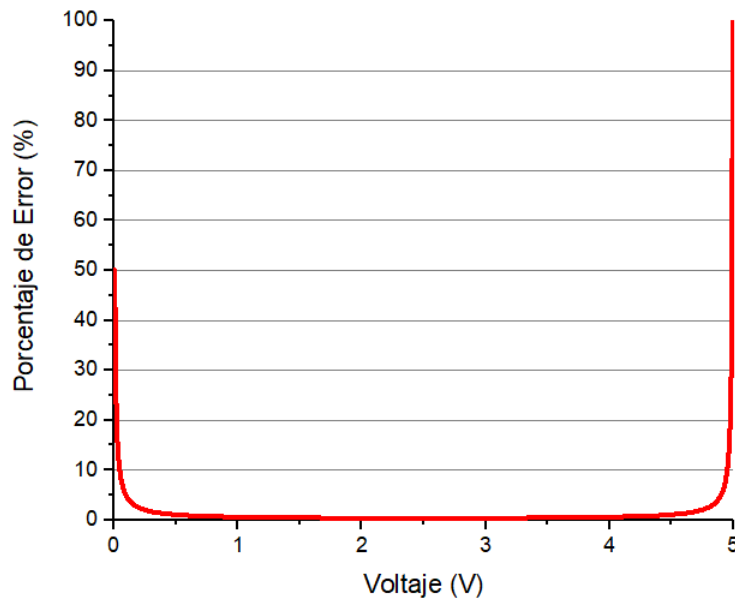


Figura 3.2: Gráfica de error de Respuesta al sensor

Como se puede ver en la gráfica de la figura 3.2, se tiene que el error es muy cercano a 0 a lo largo de casi todo el rango de valores considerandos, en este caso una resistencia de referencia de  $1K\Omega$ , los valores para los que sucede un cambio considerable de por lo menos 5% son los valores que se acercan a 50 veces el valor original y 50 veces menos, por lo que en este rango el sensor es muy sensible. Por lo cual con esto se escoge una resistencia con valores cercanos a los esperados para mejorar la precisión.

### 3.1.2. características del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo fue diseñado con el fin de ser transportable y ligero, además de poder ser alimentado con corriente en cualquier lugar, este tiene unas medidas de 17x13x6 cm la cual es color negro como se muestra en la siguiente figura 3.3.

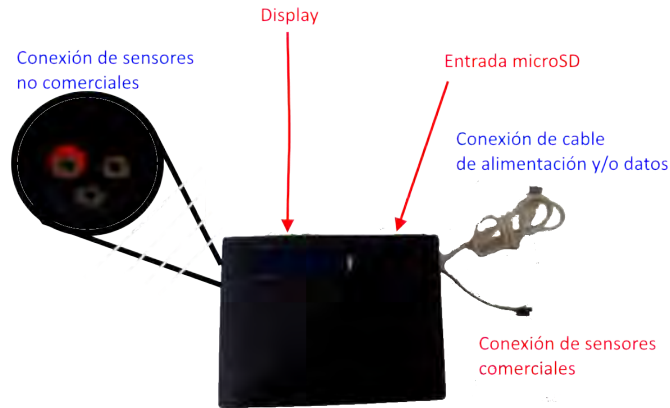


Figura 3.3: Esquema de partes de sistema de monitores

Este sistema como se muestra en la imagen 3.3 tiene cuatro partes importantes, la primera es el display el cual muestra el estado en tiempo real en el que se encuentra el sensor, además de mostrarnos, los estados en los que se encuentra la memoria microSD. La entrada de microSD es la ranura donde se inserta la memoria microSD para que así genere un archivo con los valores medidos en cada muestra de tiempo.

La entrada de alimentación tiene una entrada de tipo USB, para así poder ser utilizada de manera más cómoda y practica, este cable da la característica de poder alimentar el dispositivo incluso desde un cargador de celular, pero si se conecta a un periférico de entrada como lo son los puertos USB de una computadora brinda la posibilidad de transmitir datos de forma serial.

También cuenta con entradas para la conexión de sensores, en el costado izquierdo posee tres entradas, una de alimentación, una de tierra y una de entrada de señal dichas conexiones están diseñadas para poder conectarse de manera fácil a sensores no comerciales. Mientras que las entradas que se encuentran en el costado derecho del sistema de monitoreo, son conexiones que permite conectar sensores comerciales para medir sus características.

En la siguiente sección se muestra el funcionamiento de forma más detallada de las características del sistema de monitoreo, así como con las funciones que este cuenta

### 3.1.3. Funciones del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo está diseñado para poder medir voltaje y resistencia en tiempo real, es con el fin de obtener los valores característicos de los sensores estudiados, los valores medido se muestran a través de un display, sin embargo, los valores del display se actualizan cada segundo para evitar desgaste e inestabilidad visual del valor de los dígitos, pero los datos que se recaban en la memoria microSD y que se envían de forma serial por el Tx-Rx, se actualizan cada iteración del procesador dejando velocidad dependiente de la velocidad de procesamiento, por lo cual junto con el valor de entrada se toma una muestra de tiempo en milisegundos para poder sincronizar los valores.

Como se mencionó antes el display muestra estados de la memoria microSD, algunos de ellos son que reconoce la memoria, o que detecta que falta de ella, también muestra el estado del archivo indicando si hay un archivo previo o tiene que crear un archivo, y al momento de abrir el archivo para comenzar a grabar los valores de estado del sensor.



Figura 3.4: Pantallas de display LCD 16x2

Otra característica que posee el sistema de monitoreo, es la capacidad de mandar datos de forma serial a la par que realiza sus otras funciones, los valores que permite mandar son de la resistencia o voltaje con relación de tiempo, esto con el fin de poder utilizarlos en tiempo real por una computadora, y así poder procesar los datos de forma más rápida y eficiente.

Los datos que se reciben pueden ser vistos por cualquier monitor serial de datos que permita visualizar la información en tiempo real. Los valores estudiados se pueden ver en forma directa puesto que son mandados directamente en código ASCII. Una muestra de los datos obtenidos en tiempo real son los valores obtenidos del monitor serial que se puede ver en la imagen 3.5

```
10/08/2017 09:45:30.391 [RX] - Iniciando la memoria...Inicializacion lograda<CR><LF>
El archivo ya existe<CR><LF>
Creando archivo Sensor.txt...<CR><LF>
Abriendo archivo Sensor.txt...<CR><LF>
Sobre escribiendo archivo Sensor.txt...<CR><LF>
El archivo Sensor.txt encontrado...<CR><LF>
Tiempo: 0 ms , Voltaje:1.56 V<CR><LF>
Tiempo: 31 ms , Voltaje:0.00 V<CR><LF>
Tiempo: 66 ms , Voltaje:0.12 V<CR><LF>
Tiempo: 91 ms , Voltaje:5.00 V<CR><LF>
Tiempo: 120 ms , Voltaje:4.23 V<CR><LF>
Tiempo: 145 ms , Voltaje:0.00 V<CR><LF>
Tiempo: 169 ms , Voltaje:3.07 V<CR><LF>
Tiempo: 201 ms , Voltaje:0.84 V<CR><LF>
Tiempo: 235 ms , Voltaje:1.61 V<CR><LF>
Tiempo: 270 ms , Voltaje:2.63 V<CR><LF>
```

Figura 3.5: Datos obtenidos por monitor serial

Estos valores como se puede ver tienen un tiempo de muestro mucho más cortos que los cambios de valores dados por el display, esto se debe a que las muestra están hechas con la máxima velocidad posible del procesador de la tarjeta, los valores resultantes pueden estar dados tanto en voltaje como en resistencia esto dependiendo del tipo de sensor que se esté utilizando, dichos valores, son igualmente guardados con el fin de poder tener una base de datos de las interacciones ocurridas, sin la necesidad de mantener una constante vigilancia de los valores obtenidos de las concentraciones gaseosa a lo largo del tiempo.

Los valores de los datos muestreados se guardan de forma continua en una memoria microSD, los datos guardados se almacenan en un archivo con extensión “.TxT” con el fin de poder tener el máximo aprovechamiento de la memoria interna además de aumentar la duración del tiempo en el que mida la exposición de un determinado gas. Los datos guardados en la memoria microSD son al igual que los valores seriales de resistencia o voltaje, la principal causa por la que se decidió la utilización de esta parte, es porque brinda una mayor facilidad para la elaboración y el análisis de las gráficas obtenidas en todo momento.

```

SENSOR.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Muestra: 0 , Tiempo: 0 ms , Voltaje: 4.87 V
Muestra: 1 , Tiempo: 24 ms , Voltaje: 4.87 V
Muestra: 2 , Tiempo: 39 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 3 , Tiempo: 55 ms , Voltaje: 4.87 V
Muestra: 4 , Tiempo: 88 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 5 , Tiempo: 121 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 6 , Tiempo: 155 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 7 , Tiempo: 190 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 8 , Tiempo: 224 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 9 , Tiempo: 259 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 10 , Tiempo: 301 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 11 , Tiempo: 327 ms , Voltaje: 4.87 V
Muestra: 12 , Tiempo: 361 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 13 , Tiempo: 396 ms , Voltaje: 4.87 V
Muestra: 14 , Tiempo: 430 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 15 , Tiempo: 464 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 16 , Tiempo: 498 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 17 , Tiempo: 533 ms , Voltaje: 4.86 V
Muestra: 18 , Tiempo: 600 ms , Voltaje: 4.86 V

```

Figura 3.6: Archivo de datos de valores de muestro de datos de voltaje de entrada

Los valores al tener una muy pequeña separación entre las muestras, la resolución de los valores de la gráfica es más exacta por lo cual el archivo generado rápidamente aumente de datos obtenidos, con lo que se espera tener un mejor análisis ante la respuesta del sensor. Un ejemplo de este tipo de archivos es que se encuentra en la **figura 3.6**.

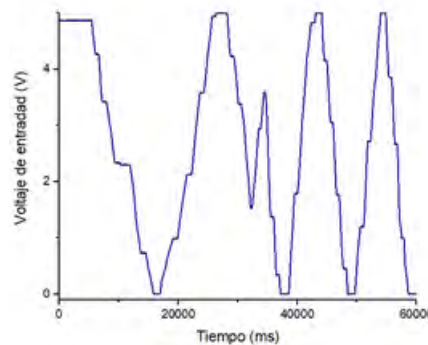


Figura 3.7: Gráfica de muestra de variación resistiva

Este tipo de archivo no se tiene que abrir necesariamente con un bloc de notas, también es posible con editores de cálculo separando cada columna por espacios, esto con el fin de poder obtener las gráficas de comportamiento a lo largo del tiempo analizado, un ejemplo de estos resultados son los obtenidos en la gráfica de la figura 3.7, la cual es una gráfica de comportamiento resistivo variable generado solamente por la variación resistiva de un potenciómetro, para medir si se graficaba correctamente la variación resistiva en relación del tiempo.

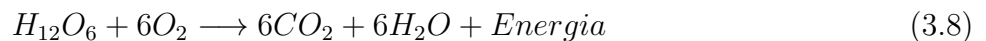


Para la obtención de las gráficas de comportamiento de los sensores comerciales ante la exposición de tres diferentes gases, y así poder comparar su comportamiento, esto realizando distintas pruebas en condiciones controladas de volumen y de exposición con el fin de poder determinar cuál de los sensores presentaba mejor respuesta al sentido, ante que gas en particular y cuales condiciones, las cuales se definirán en la sección 3.1.4, en la cual se establecerán los sensores, las condiciones y los gases ante los que se expondrá cada uno de los sensores.

### 3.1.4. Parámetro de muestreo de comportamiento resistivo de sensores comerciales

Para la primera parte de la sección experimental se comprobó el cambio resistivo en los sensores comerciales ante la exposición de los gases previamente mencionados. Los sensores de gas comerciales que se utilizaron fueron los siguientes: MQ2, MQ3, MQ7 y MQ135. Para comparar el funcionamiento y la eficiencia de los diversos sensores tanto comerciales como no comerciales se examinó su comportamiento resistivo ante la exposición de tres tipos de gases diferentes, los gases a los que se expusieron fueron: Dióxido de carbono de exhalar, humo de cigarro, y humo de madera.

El exhalar es un proceso natural de los animales en la tierra el cual permite sustraer energía del oxígeno en el ambiente, la cual se obtiene mediante un proceso químico que se realiza en nuestro interior, el oxígeno utilizado es a su vez producto de la fotosíntesis de las plantas, el proceso químico que se lleva a cabo es:



La energía es la utilizada por el cuerpo, pero como podemos observar también se obtienen otros 2 compuestos, uno de ellos es agua la cual se exhala como vapor de agua y el segundo es dióxido de carbono, por lo cual podemos ver cómo es que el único agente contaminante en este proceso es el dióxido de carbono.

El humo de madera es una sustancia un poco más compleja, se puede decir que este compuesto tiene aproximadamente más de 200 compuestos químicos, pero los que posee en mayor cantidad son 3: hidrocarburos, monóxido de carbono y partículas volátiles. Para este caso en particular se consideró que los sensores por sus características se centran solamente en el monóxido de carbono, debido a que las películas delgadas utilizadas son más sensibles ante este factor que ante los demás compuestos que posee el humo de madera.

Mientras que el humo de cigarro tiene al igual que el humo de madera una muy extensa cantidad de componentes sus componentes principales se pueden clasificar en: Sustancias carcinógenas como lo son los alquitranes, cloruro de vinilo, polonio 210, benceno, formaldheido entre otras. También tiene algunos gases venenosos como es el caso del monóxido de carbono, ácido clorhídrico, butano, metano, amoniaco algunos disolventes, etc. El humo de cigarro tiene a su vez una gran cantidad de elementos oxidantes entre los que destacan los radicales tóxicos del oxígeno, el monóxido de nitrógeno y el óxido de azufre.

Para facilitar la recopilación de los datos los gases utilizados fueron nombrados como se muestra en la tabla tabla 3.1, en la cual se muestran los tres gases ocupados y los nombres que se les darán en las gráficas y tablas posteriores.

**Tabla 3.1:** Abreviaciones de los compuestos gaseosos

Nombre del Gas	Abreviación
Exhalación Humana	Gas 1
Humo de Cigarro	Gas 2
Humo de Madera	Gas 3

La medición de la resistencia se tomó a partir del encendido del sensor de gas, con el fin de ver su comportamiento resistivo de establecimiento de inicio, esto estando en un sistema cerrado en el cual se insertó una cierta cantidad de gas para medir el comportamiento de los sensores con respecto al paso del tiempo. Después de que el valor resistivo disminuyo y se estableció a un nuevo valor correspondiente a la temperatura interna del sensor, una vez establecido el valor normal de resistencia se introdujo el primer gas hasta que el valor resistivo se estableciera en relación a la cantidad de gas alojado en el contenedor, posteriormente se depura el sistema con el fin de reestablecer los valores resistivos normales lo que indica que la presencia del gas se ha eliminado, una vez depurado el sistema se repetirá el proceso para los dos gases restantes.

Debido a que los sensores no comerciales no cuentan con un módulo propio de regulación de temperatura interna, por lo cual se medirán estos sensores de formas diferentes que, en el caso de los sensores comerciales, la forma de realizar las mediciones para este caso se explicara de forma más detallada en la sección 3.2.

## 3.2. Sensores no comerciales

Para el caso de los sensores no comerciales, la medición de la respuesta del sensado se realizó de forma diferente, la medición se realizó en exposición ante los mismos gases que en el caso de los sensores comerciales, lo que cambia es el sistema de medición, además de algunas condiciones de estado en el sistema. Esto se explicara de forma más detallada en la sección 3.2.3 . Los sensores que se estudiaron en este caso son dos sensores de óxido de zinc mientras que de los segundos que se hablara de los sensores de base de óxido de estaño que se explicaran en las secciones 3.2.1 y 3.2.2 correspondientemente.

### 3.2.1. Deposito de película delgada de óxido de Zinc

El óxido de zinc es un compuesto del que se habló previamente en la sección 2.2.4, el cual presenta como en todos los óxidos metálicos características semiconductoras sensibles a la presencia de compuestos químicos. Este sensor se presenta en forma de película delgada, la cual está construida por el método de spin coating en el cual se usó un precursor de acetato de zinc acuoso con 0.2 molar en un sustrato de vidrio limpio con variación de 8 y de 10 inmersiones.

Después de cada inmersión se realizó una calcinación a  $100^{\circ}\text{C}$  por 5 minutos con el fin de que el compuesto se estabilizara y se vaporizaran los compuestos. Una vez terminada la última inmersión la calcinación final se realizó a una temperatura de  $400^{\circ}\text{C}$  por un total de 2hrs.

Con esto se formó la película sensora en el sustrato de vidrio, para poder detectar los valores resistivos medidos en la película se agregaron dos terminales con pintura de plata “acetilacetato de plata”, la cual ayuda a hacer un contacto metálico para el semiconductor formado por el óxido de zinc.

### 3.2.2. Deposito de pastilla de óxido de estaño

Los siguientes sensores que se estudiaron fueron dos sensores en base de óxido de estaño en forma de pastilla, el primero de estos sensores esta dopado con plata y el segundo dopado con cobre.

Para el desarrollo de estas pastillas, se realizaron mediante un método distinto al explicada en el apartado anterior, en este método se utilizó el precursor de cloruro de cobre, el cual se utiliza conjunto con el cloruro de estaño con 0.2 mol y se mezcla con agua, en el momento de homogeneizarse se le agrega 0.2 mol de Urea con 1% peso de cobre, toda la solución se agita hasta hacerse transparente y se eleva su temperatura hasta  $90^{\circ}\text{C}$  donde se forman precipitantes después de dos horas al momento de que se forman los sedimentos se realiza un proceso de centrifugado a 4000 rpm por una duración de 30 minutos, posteriormente se realizó un proceso de calcinación a  $800^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas, con lo cual se forma el compuesto final, para tener el compuesto en forma de pastilla se sometió a una presión de 8 toneladas de forma homogénea durante 15 minutos.

Al igual que en las películas delgadas de óxido de zinc las pastillas de óxido de estaño, también necesitan tener contactos los cuales se colocan de la misma forma los cuales al igual que en las películas delgadas, estos están formados por pintura de acetilacetato de plata.

### 3.2.3. Metodología de medición de respuesta a sensor

Para la medición de la respuesta del sensado tanto de las películas delgadas como de las pastillas, se realizó en respuesta a los mismos gases a los que expusieron los sensores comerciales, los cuales son nombrados de la misma forma como en la tabla 3.1 de la sección 3.1.4.

Para la medición de la respuesta al sensor, se consideró que a diferencia de los sensores comerciales este tipo de sensores no cuenta con un calentador integrado, por lo cual fue necesario utilizar un sistema de calentado basado en una resistencia de micromel, la cual controla la temperatura con el fin de poder medir a resistencia presentada ante distintas condiciones y así poder conocer sus mejores condiciones de operación.

También se miden las respuestas del sensor en un entorno cerrado, con extracción de gas con el fin de depurar el contenedor al agregar los compuestos gaseosos, para así realizar la medición de resistencia de forma puntual, para cada determinada temperatura y cada sensor. Los valores para los cuales se realizaron las mediciones fueron las temperaturas de  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$  y  $300^{\circ}\text{C}$ . Con el fin de poder simplificar las explicaciones, gráficas y tablas se utilizaron las abreviaciones realizadas

en la 3.2.

**Tabla 3.2:** Abreviaciones de nombres de las películas delgadas

Tipo de Películas	Inmersiones o dopante	Abreviación
Óxido de Zinc (ZnO)	8 inmersiones	ZnO 8 inm
Óxido de Zinc (ZnO)	10 inmersiones	ZnO 10 inm
Dióxido de Estaño (SnO <sub>2</sub> )	Cobre	$SnO_2 - Cu$
Dióxido de Estaño (SnO <sub>2</sub> )	Platino	$SnO_2 - Pt$

Para obtener los valores de la respuesta al sensor, a partir de los valores resistivos, se calculará a partir de la razón en relación del cambio, esto dependiendo si los valores resistivos aumenten o disminuyen en relación a la exposición de los gases. Se tienen que la respuesta del sensor cuando la resistencia sube debido a la exposición de un agente gaseoso se calcula de la siguiente forma:

$$respuesta\ del\ sensor = \frac{R_g}{R_o} \quad (3.9)$$

Considerando a  $R_g$  como el valor resistivo al cambio y  $R_o$  como el valor resistivo normal. Para el caso en que el valor resistivo normal sea mayor que el valor resistivo al cambio, la razón de la respuesta del sensor se calcula de forma inversa, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$respuesta\ del\ sensor = \frac{R_o}{R_g} \quad (3.10)$$

Con esta metodología se obtuvieron los valores que se muestran en el capítulo 4, los cuales se estudiarían y analizaran con el fin de determinar como es el comportamiento de estos sensores ante la misma presencia de compuestos gaseosos, y así poder comparar el funcionamiento de los sensores de óxido de zinc, con los sensores de gas mas comunes comerciales.

Los sensores son analizados ante 3 tipos diferentes de compuestos gaseosos, el primer gas estudiado fue la exhalación humana, el segundo gas es el humo generado por un cigarro común, el tercer gas es el humo generado por la quema de madera, en general estos 3 gases para facilitar el manejo de datos serán llamados como se muestra en la tabla

**Tabla 3.3:** Nombre de etiqueta de gases

Etiqueta	Gas	Óxido carbónico presente
Gas 1	Exhalación humana	$CO_2$
Gas 2	Humo de cigarro	$CO$
Gas 3	Humo de madera	$CO$

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

Los resultados se dividen en dos partes, en la primera se muestran los valores obtenidos por los sensores comerciales sobre la respuesta del sensor ante la exposición de gas, los tres gases de estudios fueron: exhalación humana, humo de cigarro, y humo de madera. La exposición se realizó ante cada uno de los cuatros sensores comerciales que se estudiaron.

La segunda parte se centran en los sensores no comerciales, en los cuales se obtuvieron al igual que en los comerciales la respuesta al sensado ante los tres gases a los que se estudiaron, además en las tres temperaturas distintas con el fin de poder determinar la mejor temperatura de operación.

### 4.1. Resultados experimentales de sensores comerciales

Los resultados obtenidos de los sensores comerciales fueron mediante gráficas, las cuales, presentan la respuesta ante cada uno de las distintas exposiciones estudiadas, los valores obtenidos por cada uno de sensores esta dado en voltaje, esto se debe a que cada uno de los señores de gas utilizados tienen una resistencia interna diferente, por lo cual sería necesario reconfigurar el sistema para cada una de ellas si la respuesta que se busca estaría en resistividad. Por lo cual la respuesta al sensado se obtiene mediante los valeres obtenidos de voltaje, que se muestran en las gráficas contenidas en esta sección.

#### 4.1.1. Respuesta al sensado de MQ2

Para la respuesta de los sensores comerciales tenemos que los resultados están en forma gráfica, obtenidos mediante el sistema de monitoreo, esto en conjunto con los tiempos aproximados de exposición, así como como el orden en que se introdujeron los gases, se utiliza para el análisis del comportamiento del cambio de voltaje ante los diversos tipos de gases. Las gráficas se dividen en 4 segmentos, que van de izquierda a derecha, el primer segmento representa el valor de establecimiento del sensor hasta alcanzar su valor normal. El segundo segmento representa el valor resistivo generado por la exposición al primer gas, el tercer segmento representa el valor resistivo al segundo gas, mientras que el último segmento representa el cambio resistivo ante la exposición del tercer gas.

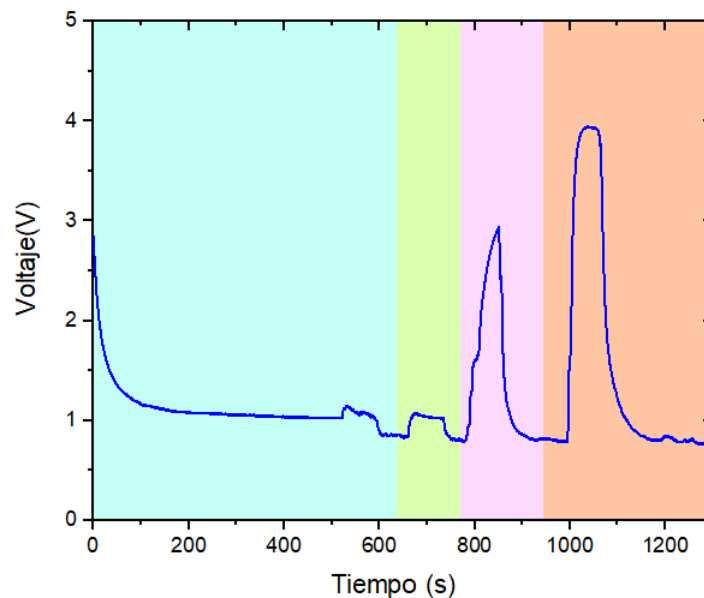


Figura 4.1: Gráfica de comportamiento del sensor MQ2

La primera parte de la gráfica muestra el tiempo de estabilización del sensor, que llega hasta los 500s lo que son aproximadamente 8.3 min, este tiempo es el tiempo que necesitamos para poder adaptarse al medio y temperatura en la que se encuentra. Después de un tiempo fue expuesto ante la presencia del primer gas, para medir su reacción ante los tres gases de los cuales podemos calcular la respuesta del sensor mediante la ecuación 4.1.

$$Respuesta\ del\ sensor = \frac{Voltaje\ de\ respuesta}{Voltaje\ normal} \quad (4.1)$$

El cual es un valor sin unidades que indica que tanto responde el sensor ante la exposición de un gas, los resultados obtenidos se ven agrupados en la tabla 4.1, la cual se utilizara posteriormente para poder comparar los resultados de cada uno de los sensores estudiados.

Tabla 4.1: Comportamiento de sensor MQ2

Gases	Voltaje normal	Voltaje de respuesta	Respuesta del sensor
Gas 1 Exhalación humana	0.83 V	1.07 V	1.28
Gas 2 Humo de cigarro	0.83 V	2.94 V	3.54
Gas 3 Humo de madera	0.83 V	3.91 V	4.71

En la tabla 4.1 se puede ver cómo es que la respuesta al sensor ante el tercer gas es mucho mayor que ante los otros dos gases, esto indica que responde más ante el humo de madera, este sensor en particular tiene muy baja respuesta ante el primer gas. Los valores serán comparados en la sección 4.1.5 con el fin de poder determinar cuál sensor presenta una mejor respuesta, y ante que gases.

#### 4.1.2. Respuesta al sensado de MQ3

La gráfica que se obtuvo para el caso del segundo sensor el MQ3, es la gráfica mostrada en la figura 4.2, en la cual se tienen los mismos cuatro segmentos que en el caso anterior, con lo cual se buscara poder calcular la respuesta del sensor, mediante la ecuación 4.1, y utilizando los valores del voltaje normal así como del voltaje ante cada una de las respuestas.

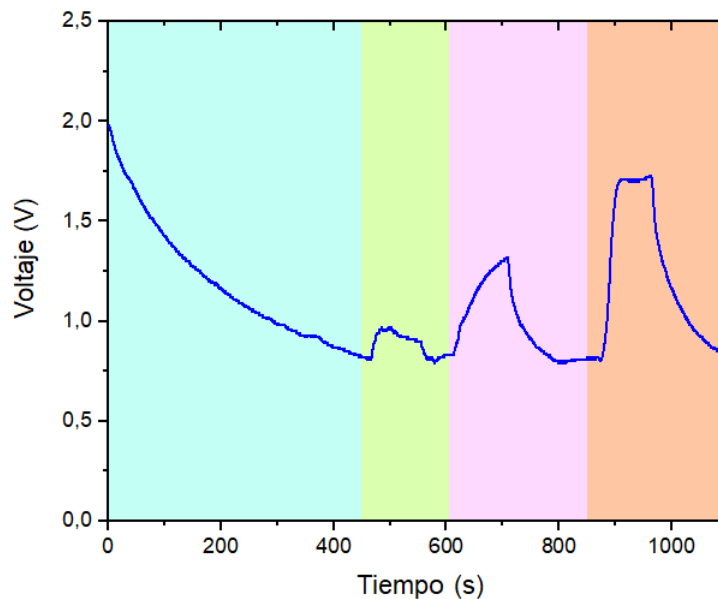


Figura 4.2: Gráfica de comportamiento del sensor MQ3

En la gráfica 4.2 se puede observar que se tiene un tiempo de establecimiento de 450s lo que es equivalente a 7.5 min aproximadamente hasta llegar a un voltaje cercano de 0.81v, el cual es el voltaje normal del sensor, para calcular la respuesta al sensor, es necesario la obtención de los valores en relación de la exposición de los gases, por lo cual se buscan los valores característicos de voltaje de los máximos ocasionados por las gráficas, los cuales están descritos en la tabla 4.2.

Como se pueden ver en la tabla 4.2, la respuesta del sensor en los casos del primer y del segundo gas es muy baja en comparación con el tercer gas, el cual tiene una respuesta notoriamente mejor, esto también indica que el sensor MQ3 es menos sensible al dióxido de carbono, en comparación con otros compuestos, en este caso se encuentra una mejor sensibilidad ante la respuesta solo del tercer gas, lo que indica que responde mejor al monóxido de carbono.

Tabla 4.2: Comportamiento de Sensor MQ3

Gases	Voltaje Normal	Voltaje de Respuesta	Respuesta del Sensor
Gas 1 Exhalación humana	0.81 V	0.93 V	1.14
Gas 2 Humo de cigarro	0.81 V	1.31 V	1.61
Gas 3 Humo de madera	0.81 V	1.72 V	2.12

### 4.1.3. Respuesta al sensado de MQ7

En el sensor comercial MQ7 se realizaron las pruebas ante las mismas exposiciones de los compuestos gaseosos, estas pruebas dieron como resultado la gráfica 4.3, en la cual se ve el comportamiento del sensor, la cual presenta las mismas 4 curvas características que en las gráficas de las figuras 4.1 y 4.2, la diferencia es el tiempo que se toma de establecimiento para el valor resistivo de comportamiento, además de tener diferentes valores de voltaje normal y voltaje de respuesta, lo cual por ende da una diferencia en la respuesta del sensor.

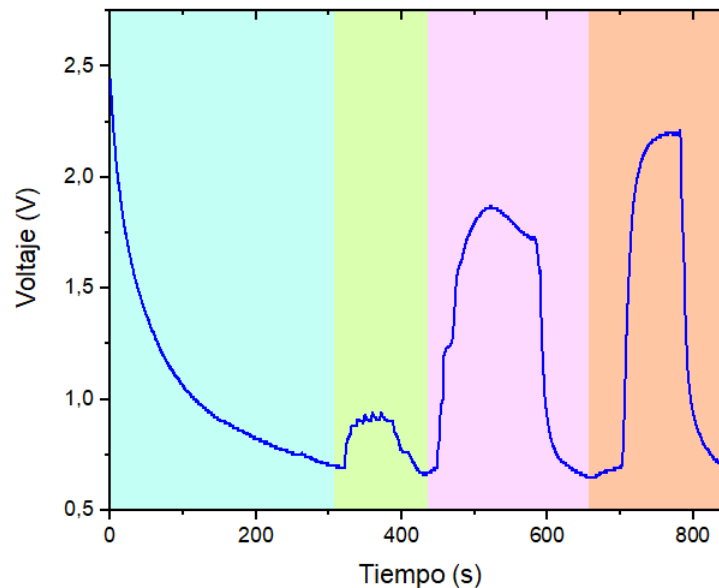


Figura 4.3: Gráfica de comportamiento del sensor MQ7

Como se ve en la gráfica 4.3 se tiene que el voltaje se establece en un tiempo mucho menor en el que en los sensores MQ2 y en el sensor MQ3. El cual se establece en un tiempo cercano a los 300s lo cual es alrededor de los 5 min, pero visiblemente la respuesta del sensor ante las exposiciones de algunos gases es mayor, y ante un tiempo mucho menor. Los valores de mínimos y máximo obtenidos estos contenidos en la tabla 4.3.



Tabla 4.3: Comportamiento de Sensor MQ7

Gases	Voltaje Normal	Voltaje de Respuesta	Respuesta del Sensor
Gas 1 Exhalación humana	0.68 V	0.91 V	1.33
Gas 2 Humo de cigarro	0.68 V	1.86 V	2.73
Gas 3 Humo de madera	0.68 V	2.2 V	3.23

Como se puede ver en este sensor se presenta una mejor respuesta ante la exposición del tercer gas, y la respuesta al sensor para el caso de la exposición del primer gas, tiene una mucho mejor respuesta que para el caso de sensor MQ2 y el sensor MQ3.

#### 4.1.4. Respuesta al sensado de MQ135

El último sensor comercial que fue estudiado fue el MQ135, se realizaron las mismas muestras y los mismos estudios, con el fin de obtener la gráfica de comportamiento que describe el funcionamiento del sensor ante la exposición de los gases analizados, en los cuales se tiene que la gráfica 4.4 representa el comportamiento del sensor MQ135.

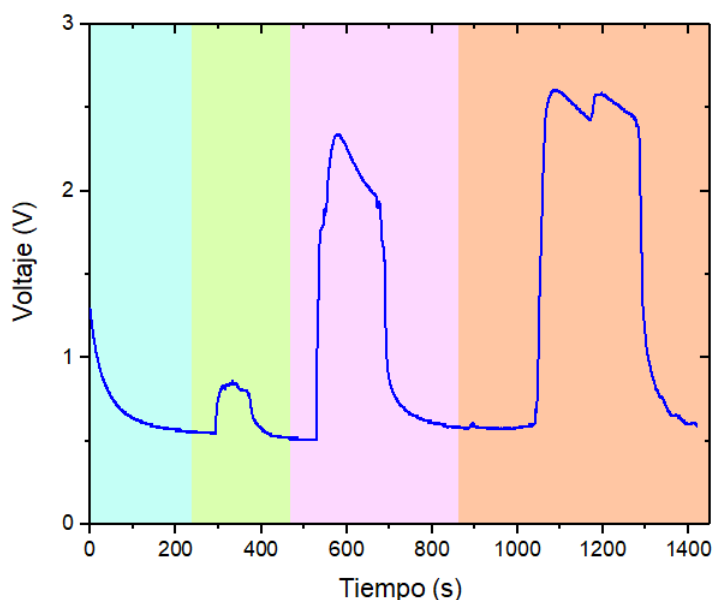


Figura 4.4: Gráfica de comportamiento del sensor MQ135

En este caso el tiempo de estabilización es muy cercano a los 200 segundos es decir 3.2 minutos aproximadamente lo que indica que hay un tiempo de estabilización mucho menor que en los otros casos teniendo una mejor velocidad de respuesta, los valores de respuesta del sensor se muestran en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4:** Comportamiento de Sensor MQ135

Gases	Voltaje Normal	Voltaje de Respuesta	Respuesta del Sensor
Gas 1 Exhalación humana	0.55 V	0.85 V	1.54
Gas 2 Humo de cigarro	0.55 V	2.33 V	4.23
Gas 3 Humo de madera	0.55 V	2.61 V	4.72

En este caso al igual que en los casos de los sensores anteriores tenemos que la respuesta al sensor para la exposición del primer gas es mucho menor que para su exposición con los otros gases, esto indica cómo estos sensores no son buenos para medir la cantidad de dióxido de carbono, o que son mejores para medir otros tipos de gases.

#### 4.1.5. Comparación de respuesta de los sensores comerciales

Con los datos recabados de todos los sensores se pudo comparar la respuesta al sentido, esto con el fin de poder determinar cuál de los sensores utilizados presenta una mejor respuesta, ante cada uno de los gases analizados. Si teniendo en cuenta que cada uno de los sensores puede determinar de mejor forma un gas en específico con mejor eficiencia que el resto de los gases. En la tabla 4.5 se tiene una comparativa de todos los valores de las respuestas al sentido obtenidas de los sensores comerciales ante la exposición de cada uno de los determinados gases.

**Tabla 4.5:** Tabla comparativa de los valores de respuesta al sentido de cada uno de los distintos sensores

Sensor	Gas 1	Gas 2	Gas 3
MQ2	1.28	3.51	4.71
MQ3	1.14	1.61	2.12
MQ7	1.33	2.73	3.23
MQ135	1.54	4.23	4.74

En la tabla 4.5 se puede observar una mejor respuesta en el sentido obtenido mediante el sensor MQ135. Teniendo en cuenta que a pesar de que este sensor tenga una mejor respuesta ante la exposición del primer gas que el resto de los sensores, se tiene que la respuesta es muy baja en comparación con la respuesta que se tiene ante los otros gases, esto se puede deber a los niveles de concentración bajo, o la baja sensibilidad ante este gas.

Otro motivo para la baja sensibilidad que se presenta ante la respuesta del primer gas, es decir de dióxido de carbono, puede deberse a que los otros dos gases estudiados no son gases de una sola composición, como se explico anteriormente tanto el humo de cigarro, como para el humo de madera, tienen cientos de composiciones diversas. Que pueden que estas composiciones intervengan en la detección de los óxidos carbónicos generando una mejor respuesta ante estos gases.

Los datos obtenidos por este experimento serán comparados con los datos de las respuestas de los sensores no comerciales, con el fin de poder analizar cuál de estos sensores presentan una mejor respuesta, y así observar cómo es el comportamiento de los sensores de óxido de zinc fabricados en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en comparación con los sensores que son comerciales.

## 4.2. Resultados experimentales de sensores no comerciales

Los sensores no comerciales, no tienen integrado un sistema de control de temperatura interna por lo cual se buscará su respuesta del sensado de los cuatro sensores, cada uno para los cuales se medirá ante tres temperaturas distintas las cuales fueron de 100°C, 200°C y 300°C. Los resultados medidos fueron resultados puntuales de resistencia medidos mediante un multímetro de banco, el cual permite determinar la resistencia en un instante del tiempo, esto implica que no se determinó la resistencia de forma gráfica similar a la obtenida por los sensores comerciales. Sin embargo, de igual forma que los sensores comerciales se obtendrá la respuesta al sensado.

En este caso se tiene que se mide en lugar del voltaje la resistencia que se genera de las dos terminales de la placa. Para la respuesta al sensado se calcula con respecto a la resistencia del sensor en lugar del voltaje como fue en caso del sensor comercial, en este caso como se tiene el cambio de resistencia al momento de dividir se tendrá lo mismo que en el otro caso, y seguimos calculando la razón de cambio el cual es un valor sin unidades.

Para la medición de la respuesta del sensor, primeramente, se estudió el comportamiento de los sensores ante distintas temperaturas, con el fin de poder determinar la resistencia normal del sensor y el comportamiento ante el cambio de temperatura. La medición se realizó midiendo la resistencia superficial de los sensores, para poder medir el cambio de resistencia fue necesario aumentar la temperatura del sensor, esto se realizó mediante una resistencia de micromel que permite elevar la temperatura fácilmente.

La medición del cambio de resistencia ante un gas, se realizó en un sistema cerrado, con el fin de controlar los niveles de los gases que se medirán, la medición se realizara en una campana cerrada que solo contendrá el sensor y el calentador con el fin de tener un aislante térmico entre el sensor y el sistema de medición para evitar que la temperatura afecte el funcionamiento de sistema de monitorización.

El primer sensor que se estudio fue el sensor de película delgada de óxido de zinc, esta película está fabricada con 8 inmersiones del material, se obtendrán las gráficas de comportamiento de temperatura en subida y bajada, también se medirán la respuesta ante la exposición de los gases estudiados, para determinar cuál de los sensores no comerciales presenta una mejor característica de sensibilidad.

### 4.2.1. Película delgada de óxido de zinc de 8 inmersiones

La variación de la resistencia en las películas delgadas se analizó cuando la temperatura subía y cuando bajaba, esto con el fin de poder ver el valor de estabilización del sensor, los resultados obtenidos son los que podemos ver plasmados en la siguiente gráfica.

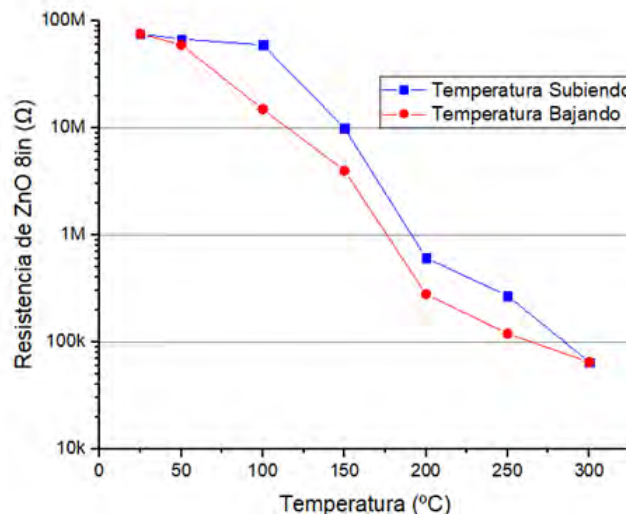


Figura 4.5: Gráfica de comportamiento resistivo de película delgada de ZnO a 8 inmersiones en relación a la temperatura

En la gráfica anterior se observó cómo es que la resistencia en todo punto de temperatura, la cual es mayor si la temperatura está subiendo que si está bajando, esto se debe a que la resistencia necesita más tiempo para restablecerse de una temperatura más alta. Como se puede observar en la gráfica de la figura 4.5, la resistencia de la película tiene una caída muy significativa en sus valores finales que en sus valores iniciales, lo que indica una disminución sustancial resistiva en función con el aumento de la temperatura, esto debido a que la temperatura acelera el proceso que se lleva a cabo en la capa superficial de las películas que genera iones de oxígeno.

Sin embargo, el hecho de que entre a mayor temperatura se tenga una menor resistencia no indica directamente que se tenga también una menor sensibilidad, puesto que esto es una condición que depende solamente del cambio ante la exposición de un agente externo y no del valor resistivo, es decir es un valor porcentual del cambio relativo de la resistencia.

Para medir esta sensibilidad las películas delgadas fueron expuestas a tres condiciones para medir el cambio que presenta su resistencia. Las condiciones a las que fueron expuestas fueron los tres gases que se mencionan en la Tabla 3.2. La variación que presenta en esta película ante la exposición de los gases fue analizada en tres estados de temperatura que se analizaron para todas las muestras ante todas las exposiciones, las temperaturas a las que se analizaron las muestras fueron a 100, 200 y 300 grados Celsius. Los resultados obtenidos de la exposición ante los tres gases son las mostradas en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Respuesta del Sensor en relación a la exposición de las muestras en ZnO 8 inmersiones.

Gas	Temperatura	Resistencia normal $R_0$	Resistencia en presencia de gas $R_g$	Respuesta del Sensor
Gas 1 Exhalación humana	100°C	57 MΩ	62 MΩ	1.08
	200°C	820 KΩ	980 KΩ	1.19
	300°C	59 KΩ	75 KΩ	1.27
Gas 2 Humo de cigarro	100°C	57 MΩ	51 MΩ	1.11
	200°C	820 KΩ	720 KΩ	1.13
	300°C	59 KΩ	43.1 KΩ	1.36
Gas 3 Humo de madera	100°C	57 MΩ	53 MΩ	1.07
	200°C	820 KΩ	720 KΩ	1.13
	300°C	59 KΩ	34.9 KΩ	1.69

Con los valores de esta tabla se realiza una gráfica de comportamiento de la sensibilidad en porcentaje esto con el fin de poder analizar mejor el comportamiento y la tendencia de los valores que se obtuvieron de resultado del experimento.

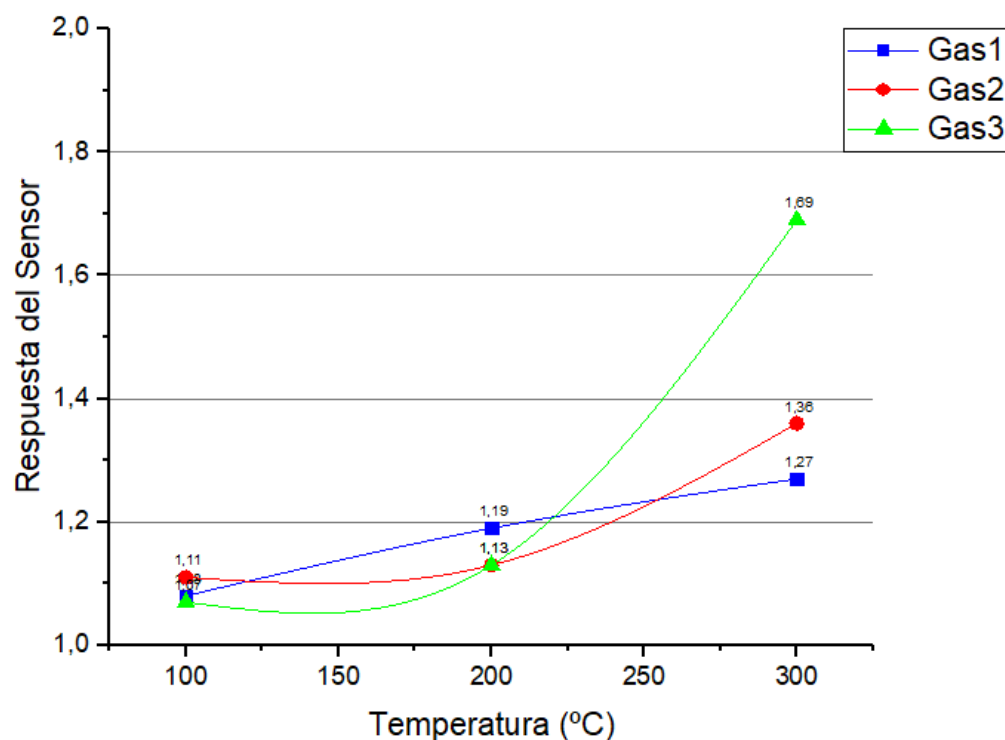


Figura 4.6: Gráfica de comportamiento de la película ZnO 8 inmersiones ante muestras

Como se puede ver en la gráfica 4.6 este sensor de película delgada es más sensible al estar en contacto con el gas número 3, y menos sensible al contacto con el gas número 1, lo que indica que esta película delgada es mucho más sensible a los monóxidos de carbono que al dióxido de carbono. Otro punto a tomar en cuenta es el hecho que a mayor temperatura la sensibilidad de la película mejoro considerablemente, lo que demuestra cómo es que la temperatura mejora la sensibilidad química del material.

Además otra cosa que debemos de tomar en cuenta es el hecho de que al exponer el sensor al gas 1 la resistencia sube, mientras que para la exposición con los gases 2 y 3 la resistencia baja en todo momento, esto se debe a la naturaleza de la reacción, como la reacción en el caso del gas 1 se debe a la interacción del ZnO con de dióxido de carbono que componen la exhalación, mientras que para los gases 2 y 3 tienen una mayor presencia de monóxido de carbono que provoca que se reduzca el material en lugar que se oxide.

#### 4.2.2. Película delgada de óxido de zinc a 10 inmersiones

La segunda película delgada que se estudió fue al igual que en caso anterior, una película delgada de óxido de zinc, pero está fabricada a 10 inmersiones, con lo que se esperaba que mejoraran sus características y tener un tiempo de vida más largo en relación a la película de 8 inmersiones. Como en el caso anterior primero se analizó su comportamiento sin exposición a ningún compuesto midiendo su resistencia a diferentes temperaturas, mientras la temperatura subía y luego bajaba.

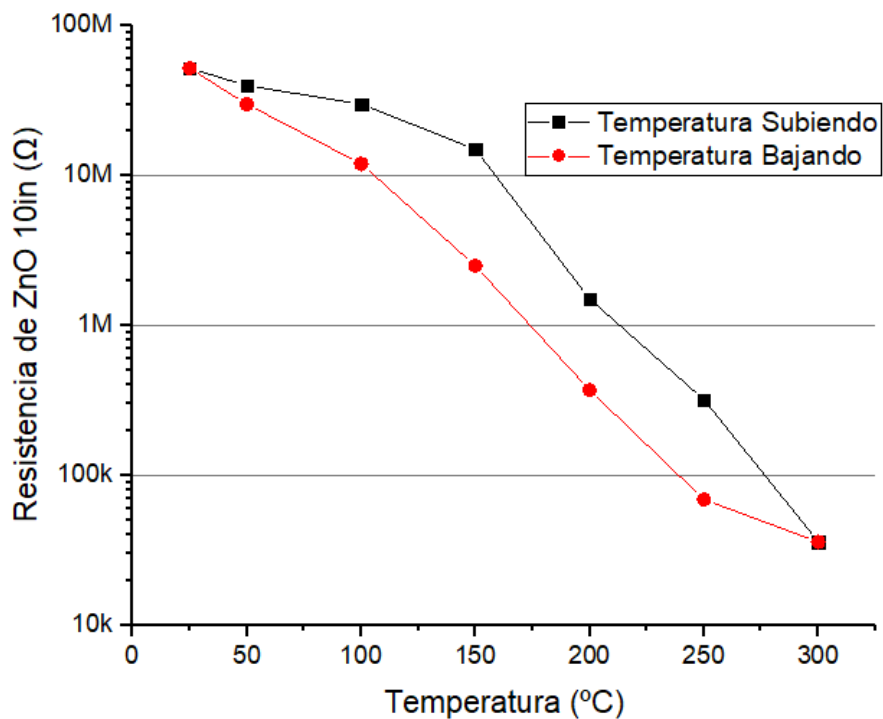


Figura 4.7: Gráfica de comportamiento resistivo de película delgada de ZnO a 10 inmersiones en relación a la temperatura.

Como se puede ver en la gráfica de la figura 4.7 se ve que el comportamiento de la resistencia es muy similar al comportamiento presentado en la primera película analizada, es decir que su resistencia cambia más cuando la temperatura baja que cuando la temperatura sube, además que vemos cómo es que la resistencia a mayor temperatura es mucho menor, esto se debe a que el valor resistivo del sensor tarda más en estabilizar sus valores cuando su temperatura es mayor y disminuye lo que provoca que conserve sus características conductivas más tiempo.

**Tabla 4.7:** Respuesta del sensor en relación a la exposición de las muestras en ZnO 10 inmersiones

Gas	Temperatura (°C)	Resistencia normal $R_0$	Resistencia en presencia de gas $R_g$	Respuesta del Sensor
Gas 1 Exhalación humana	100	64 MΩ	70 MΩ	1.09
	200	1.1 MΩ	1.5MΩ	1.36
	300	43 KΩ	61 KΩ	1.41
Gas 2 Humo de cigarro	100	64 MΩ	61 MΩ	1.04
	200	1.1 MΩ	990 KΩ	1.11
	300	43 KΩ	36 KΩ	1.19
Gas 3 Humo de madera	100	64 MΩ	62 MΩ	1.03
	200	1.1 MΩ	900 KΩ	1.22
	300	43 KΩ	32 KΩ	1.34

La tabla 4.7 muestra cómo es que varía la sensibilidad en relación al cambio de temperatura y ante el cambio de muestra, esta variación muestra que entre mayor sea la temperatura, la reacción de la película delgada será mayor ante la exposición de un gas. Para poder analizar los valores obtenidos se representará mediante la gráfica 4.8.

Como se puede ver en la gráfica de la figura 4.8 se tiene que en la película delgada ZnO a 10 inmersiones, es mucho más sensible al primer gas, que a los otros dos a diferencia de lo que fue la película delgada de ZnO a 8 inmersiones, en este caso el sensor presentaba una mayor sensibilidad ante el dióxido de carbono en todo momento, mientras que presentaba una menor sensibilidad para los otros dos gases, como se puede observar también tenemos un aumento de resistencia ante la presencia del primer gas esto se debe a que el primer gas se conforma en su mayoría por dióxido de carbono el cual al estar en contacto con el metal, lo oxida lo que provoca el aumento en el oxígeno de las moléculas de ZnO y da como resultado una disminución de conductividad que se puede interpretar como un aumento resistivo.

Para el caso de la exposición de los gases 2 y 3 tenemos que la resistencia baja lo que indica que el gas está provocando un proceso de reducción, debido a que el gas con el que este en contacto interactúa con los oxígenos del ZnO provocando que algunos de estos formen enlaces con los gases, en este caso con el monóxido de carbono, en el cual el carbono busca a completar su último nivel energético, provocando que en la película delgada se reduzcan los oxígenos y esto provoca que la conducción del material aumente debido a las propiedades metálicas del zinc lo que se puede traducir como una disminución de resistencia.

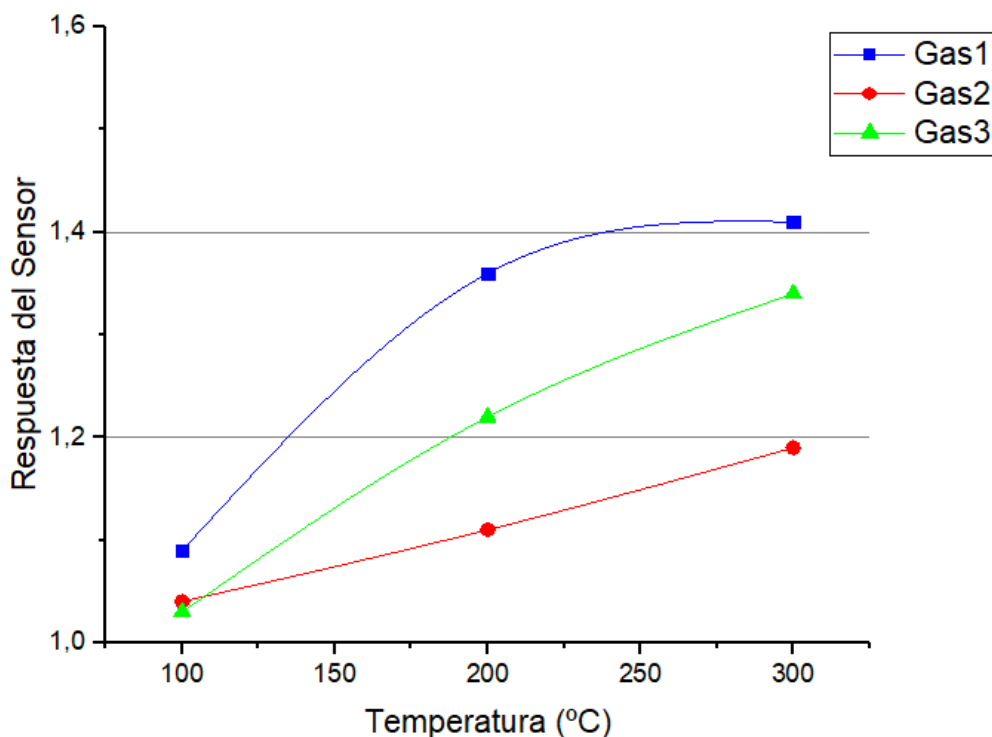


Figura 4.8: Gráfica de comportamiento de la película ZnO 10 inmersiones ante muestras

### 4.2.3. Pastilla de óxido de estaño dopada con cobre

También se estudió el comportamiento de dos pastillas de óxido de estaño cada una dopada con diferentes materiales, la primera de estas pastillas estaba dopada con cobre, la cual fue sometida a los mismo experimentos las películas delgadas de óxido de zinc, el primero de estos fue el estudio de la resistencia normal sin ser sometida a ningún compuesto, solo variando la temperatura de exposición, con lo cual se obtuvieron los resultados plasmados en la gráfica de la figura 4.9.

En la gráfica de la figura 4.9 se puede observar cómo es la resistencia cuando sube la temperatura, debido al tiempo de establecimiento tarda en aumentar sus proceso químico lo que provoca que tarde más en bajar la resistencia que en subir, por lo cual cuando se midió la resistencia mientras se bajaba la temperatura la resistencia fue menor que en caso opuesto, sin embargo, su temperatura final y su temperatura inicial son las misma, ya que en después de un tipo se establece un valor de resistencia fija que es la resistencia características de un material a una temperatura determinada.

Para la metodología de medición de este tipo de sensores, sensores de tipo pastilla comprimida, se realiza de forma similar a la de la metodología utilizada en la medición de las películas delgadas de óxido de zinc. En las pastillas de óxido de estaño se tiene que al igual que los sensores de ZnO el cambio resistivo ocurre debido al cambio en la corriente superficial del material, este cambio se debe al igual que en el ZnO por procesos de óxido reducción, en la superficie del material.



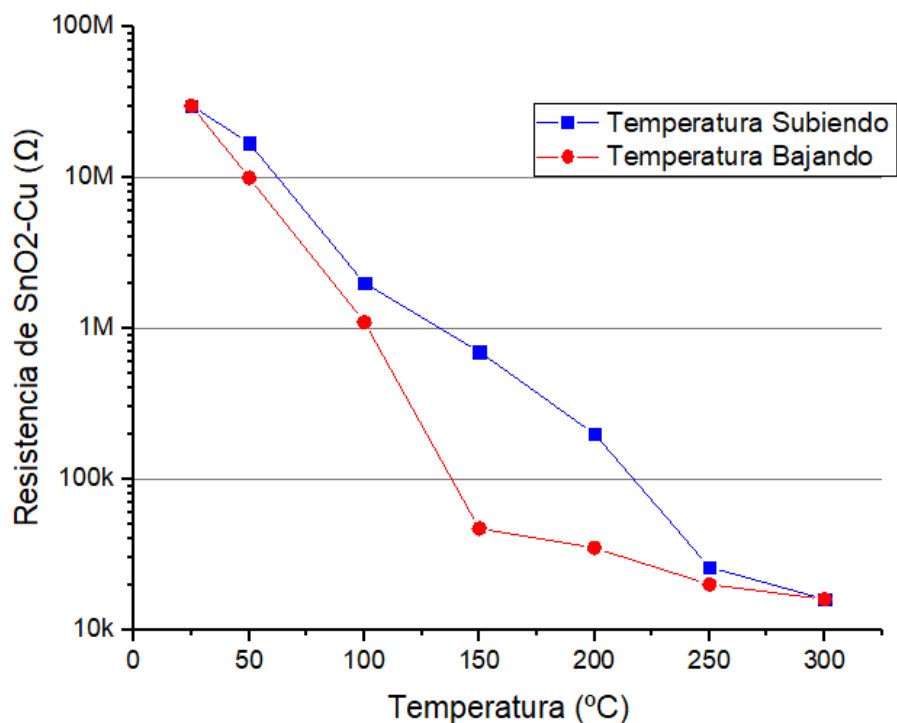


Figura 4.9: Gráfica de comportamiento resistivo de pastilla de  $SnO_2 - Cu$  en relación a la temperatura

También se obtuvieron los resultados de los valores resistivos para la exposición de esta película delgada ante la presencia de los tres gases, esto con el fin de poder compara la eficiencia de las pastillas de óxido de estaño con respecto a la eficiencia de las películas delgadas de óxido de zinc estudiadas, con lo cual se obtuvieron los resultados expuestos en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Respuesta al sensor en relación a la exposición de las muestras en  $SnO_2 - Cu$

Gas	Temperatura (°C)	Resistencia normal $R_0$	Resistencia en presencia de gas $R_g$	Respuesta del Sensor
Gas 1 Exhalación humana	100	2.2 MΩ	3.2 MΩ	1.45
	200	250 KΩ	500 KΩ	2
	300	16 KΩ	37 KΩ	2.31
Gas 2 Humo de cigarro	100	2.2 MΩ	3.5 MΩ	1.5
	200	250 KΩ	180 KΩ	1.38
	300	16 KΩ	9.3 KΩ	1.7
Gas 3 Humo de madera	100	2.2 MΩ	3.4 MΩ	1.54
	200	250 KΩ	210 KΩ	1.19
	300	16 KΩ	3.8 KΩ	4.2

Los valores representados en la tabla 4.8, muestran cómo es que en este caso la resistencia no sube en todo momento, como es el caso de las películas delgadas de óxido de zinc de las que se habló en las secciones anteriores. Para su exposición con el primer gas la película reacciona de la misma manera subiendo en relación de la temperatura, lo que indica que la pastilla de óxido de estaño reacciona de la misma manera ante el dióxido de carbono. Sin embargo, para el caso de la exposición de esta pastilla ante los gases 2 y 3 se comportó de manera diferente, ya que en este caso para temperaturas bajas la resistencia tubo un mejor comportamiento, que para temperaturas de 200°C, sin embargo, aun así se presentó un mejor comportamiento para rangos de temperaturas de 300°C.

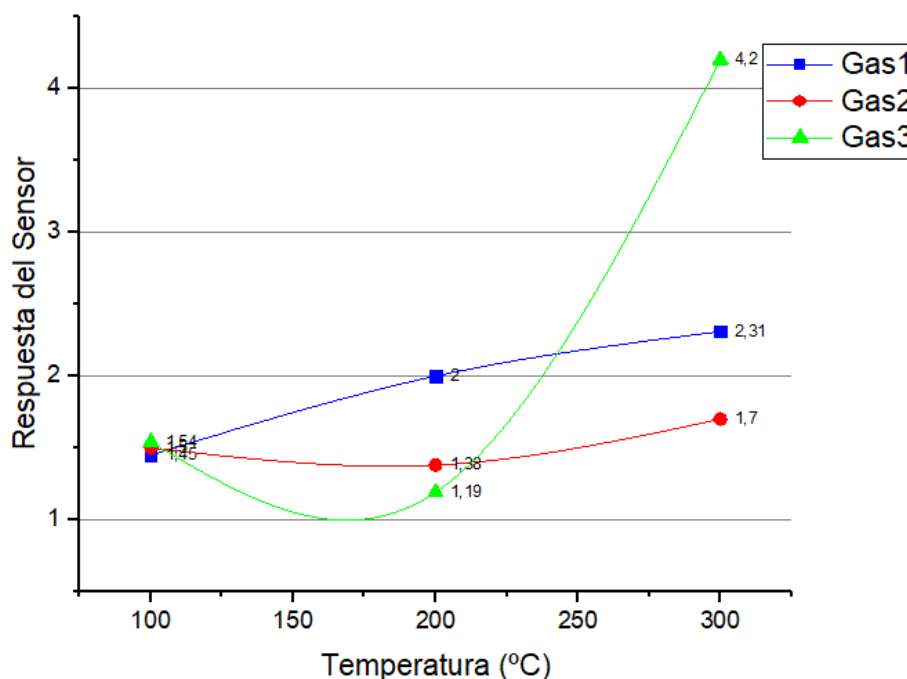


Figura 4.10: Gráfica de comportamiento de pastilla de  $SnO_2$  dopada con cobre ante muestras.

Como se puede observar en la gráfica de la figura 4.10, que a pesar de que la resistencia tenga una mejor sensibilidad en 100°C, para el caso de los gases 2 y 3 que para casos de temperaturas más elevadas, sin embargo, con forme aumenta la temperatura la sensibilidad sube nuevamente para temperaturas mayores.

Como se puede observar en la gráfica de la figura 4.10, este sensor tiene una mejor respuesta en porcentaje de sensibilidad para el caso del tercer gas que para el caso del primero, lo que indica que tiene una mejor respuesta ante los compuestos que componen el humo de madera. Sin embargo, tiene una menor respuesta para el tercer gas que para los dos primeros, esto puede deberse a la interacción química del cobre con los muchos compuestos que se encuentran en el humo de cigarro.

#### 4.2.4. Pastilla de óxido de estaño dopada con platino

El ultimo sensor analizado fue la pastilla de óxido de estaño, al igual que en este caso también está compuesta por oxido de estaño la diferencia está en que el ultimo sensor esta dopado con platino, el cual será estudiado para los mismo casos de exposición de los mismos gases y se analizara su comportamiento resistivo ante el cambio de temperatura. La respuesta ante el cambio de temperatura se ve representada por la gráfica de la figura 4.11 la cual tiene una respuesta muy similar a la mostrada en las otras tres películas delgadas ya que también posee una mayor resistencia cuando la temperatura está subiendo que cuando está bajando.

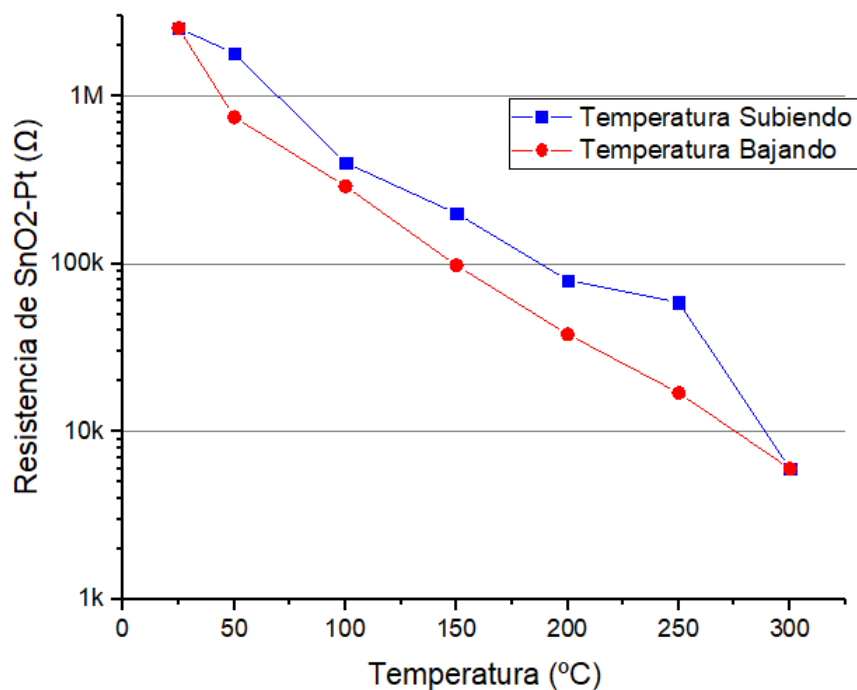


Figura 4.11: Gráfica de comportamiento resistivo de pastilla de  $SnO_2 - Pt$  en relación a la temperatura.

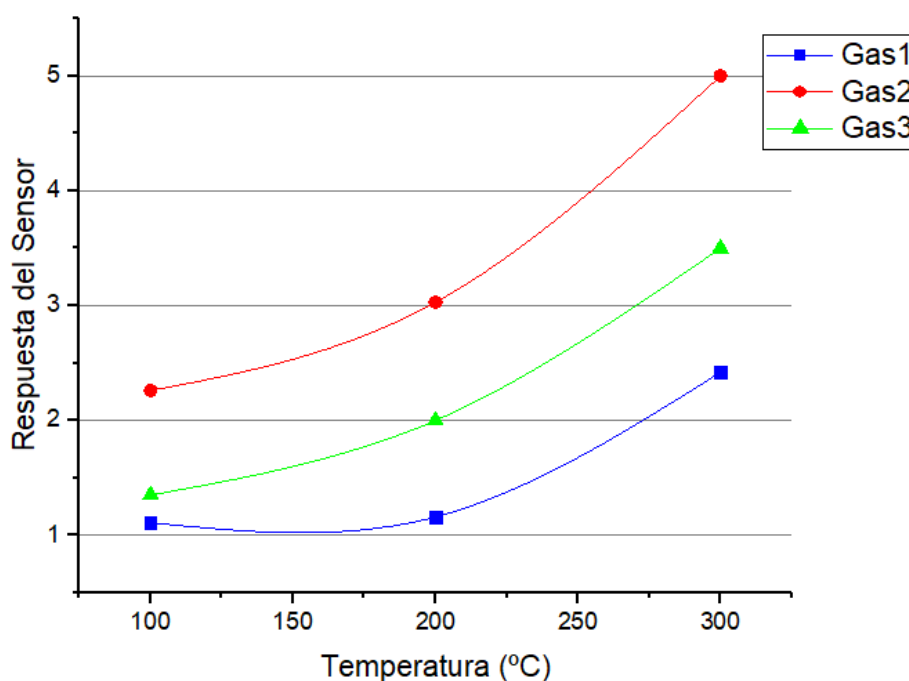
Como se puede observar en la gráfica de la figura 4.11, la cual posee la característica del cambio resistivo que se presenta en las otras películas delgadas debido a que también la resistencia es mayor cuando la temperatura es alta que cuando la temperatura es baja, y aunque en algunos momentos los valores son muy cercanos, solo llegan a ser iguales en el momento en el que la resistencia está en su valor mínimo y su valor máximo, debido a que en estos puntos la resistencia llega a establecerse.

Al igual que en los casos anteriores esta película fue estudiada para su comportamiento ante la exposición de los tres gases, para así analizar el comportamiento resistivo de esta película para posteriormente poder comparar su respuesta del sensor entre cada uno de los gases de cada una de las películas delgadas. Los resultados obtenidos de esta película delgada ante la exposición de los gases son los que se encuentran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Respuesta del sensor en relación a la exposición de las muestras en SnO-Pt.

Gas	Temperatura (°C)	Resistencia normal $R_0$	Resistencia en presencia de gas $R_g$	Respuesta del sensor
Gas 1 Exhalación humana	100	270 K $\Omega$	300 K $\Omega$	1.11
	200	100 K $\Omega$	160 K $\Omega$	1.16
	300	7 K $\Omega$	17 K $\Omega$	2.42
Gas 2 Humo de cigarro	100	270 K $\Omega$	119 K $\Omega$	2.26
	200	100 K $\Omega$	33 K $\Omega$	3.03
	300	5 K $\Omega$	1 K $\Omega$	5
Gas 3 Humo de Madera	100	270 K $\Omega$	200 K $\Omega$	1.35
	200	100 K $\Omega$	50 K $\Omega$	2
	300	7 K $\Omega$	2 K $\Omega$	3.5

Como se puede ver en la tabla 4.9, se tiene que los valores resistivos en general son mucho menores que los valores resistivos en las otras películas delgadas, esto se debe a que en este caso la película delgada esta dopada con platino, el cual es un mejor conductor que el cobre, lo que indica que tendrá una disminución de la resistencia del material. Pero esto no necesariamente implica que la respuesta del sensor sea mejor, debido a que es un factor que depende de la tasa de cambio y no necesariamente del valor de la resistencia, para este análisis se realizó una gráfica que represente los valores obtenidos en esta tabla para poder analizar mejor.

Figura 4.12: Gráfica de comportamiento de pastilla de  $SnO_2$  dopada con platino ante muestras.

Como se puede ver en la figura 4.12 se tiene que los valores de la respuesta del sensor van en aumento en todo momento, mejorando la respuesta del sensor en relación a la resistencia, teniendo en cuenta que el valor de la respuesta del sensor para el primer gas es el menor, esto indica que este sensor tiene un mejor comportamiento ante los gases 2 y 3, lo que implica que es más eficiente para los monóxidos de carbono que para los dióxidos de carbono.

Una vez habiendo obtenido estos resultados, en las siguientes secciones del documento se dedicarán a comprar los resultados obtenidos de estos 4 sensores, para saber cuál presenta la mejor sensibilidad ante cada uno de los gases estudiados.

#### 4.2.5. Comportamiento de sensores no comerciales expuestos ante exhalación

Como sabemos tenemos que el primer gas analizado fue la exhalación humana, la cual se compone en su mayor parte de dióxido de carbono y vapor de agua, en este caso los sensores miden solamente la cantidad de dióxido de carbono, por lo que en la medición de los tres gases este es el que indica la reacción de los sensores ante el dióxido de carbono de forma directa.

Los resultados resistivos obtenidos de la exposición de los sensores ante el primer gas son los que se encuentran en las tablas 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9. Los cuales ayudan para poder comparar la sensibilidad de cada película ante el dióxido de carbono, provocado por la exhalación humana, los resultados obtenidos de esta comparación están representados en la gráfica de la figura 4.13.

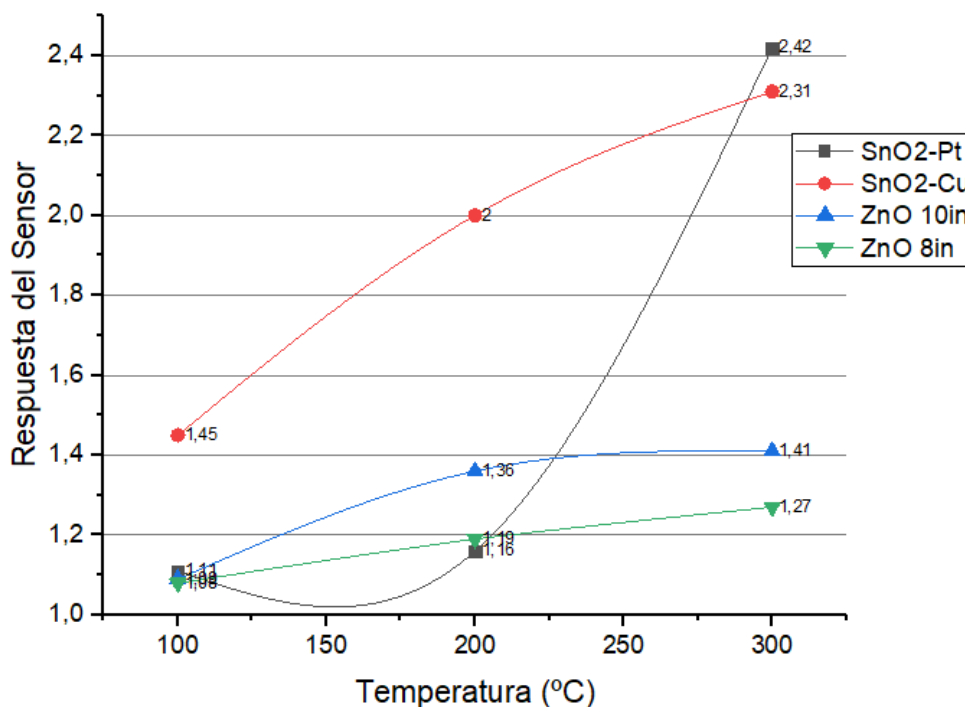


Figura 4.13: Gráfica comparativa de sensibilidad de las películas ante la exposición de exhalación.

Como se puede observar en la gráfica de la figura 4.13 se muestra que la sensibilidad siempre aumenta en relación al aumento de la temperatura para cualquiera de los sensores no comerciales, lo que indica que la temperatura ayuda a mejorar las interacciones químicas de las películas delgadas, por lo cual se puede ver que a mayor temperatura se mejora la sensibilidad del sensor.

En la gráfica de la figura 4.13 se puede ver cómo es que la respuesta del sensor en las películas delgadas de óxido de zinc es menor que en las pastillas de óxido de estaño. Las películas de ZnO además de tener una respuesta del sensor menor también tienen una resistencia mayor que las películas de  $SnO_2$ .

Con lo cual podemos ver cómo es que los sensores que muestra una mejor sensibilidad ante el cambio por exposición de exhalación humana en altas temperaturas, es el sensor compuesto por óxido de estaño dopado con platino ( $SnO_2 - Pt$ ), sin embargo, no tiene una buena sensibilidad comparada con el sensor del mismo material dopado con cobre para valores de temperatura más bajos, y conserva valores de sensibilidad más altos, la diferencia es que el sensor de  $SnO_2 - Pt$  tiene una sensibilidad que es más afectada con el cambio de temperatura, pasando de ser de las más bajas de sensibilidad a una temperatura de  $100^\circ C$  a la más alta a la temperatura de  $300^\circ C$ .

La película delgada que presenta una menor respuesta del sensor, ante la exposición del primer gas, es la película de ZnO 8 nm, teniendo un comportamiento similar que en la película de ZnO 10 nm lo cual es un comportamiento esperado debido a que son películas compuestas por los mismos materiales, la diferencia es que a la película de ZnO 10nm tiene dos aplicaciones de material más que indica que tiene una mejor respuesta y un tiempo de vida mayor.

#### 4.2.6. Comportamiento de las películas delgas expuestas ante humo de cigarro

Como se mencionó en la sección 3.1.4 el humo de cigarro que tiene más de 4000 sustancias, de las cuales muchas de ellas reaccionan ante los sensores de gas, uno de estos muchos compuestos es el monóxido de carbono que genera la combustión incompleta, con lo cual se tiene que es uno de los gases que más se producen lo que da un buen motivo para tener una buena respuesta ante la exposición de este gas.

Como se puede ver en la gráfica de la figura 4.14 se tiene que de los sensores utilizados, el que mejor tiene características ante la exposición del humo de cigarro es el sensor  $SnO_2 - pt$ , siendo este sensor mucho mejor que los demás para la medición de los valores.

Además, tenemos que para las dos películas delgas de óxido de zinc son las que presentan peor respuesta ante la exposición del humo de cigarro, con lo cual se tiene que el óxido de zinc no es el mejor material para el sensado de este compuesto gaseoso.

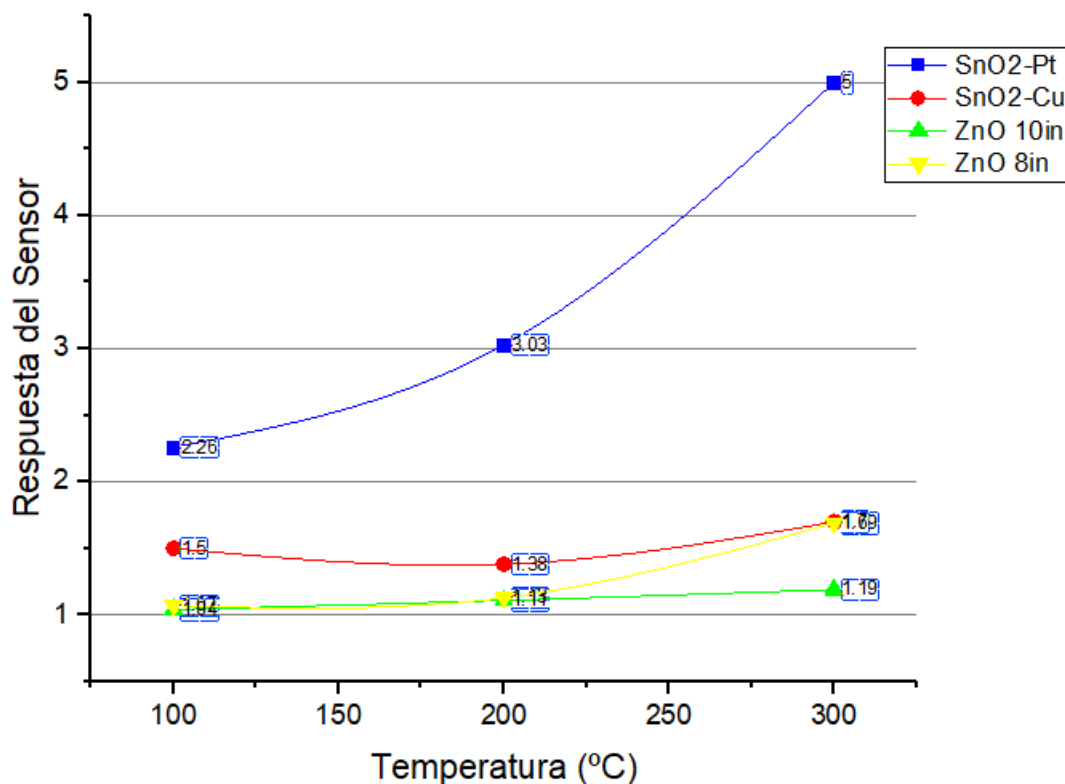


Figura 4.14: Gráfica comparativa de sensibilidad de las películas ante la exposición de humo de cigarro

Como se puede ver en la gráfica de la figura 4.14, el sensor que representa una mayor respuesta es el sensor de óxido de estaño dopado con platino, lo que indica que este es mucho mejor para medir este tipo de gas, esto se puede deber a que puede formar enlaces con mayor facilidad con este elemento gaseoso, no necesariamente con óxidos carbónicos, el elemento dopante puede llegar a ser el causante de la alta reacción a este gas.

Sin embargo, la baja respuesta del resto de los sensores ante la exposición de este gas es algo esperado, debido a que al ser el humo de cigarro un compuesto muy complejo y con una gran variedad de compuestos, muchos de estos no reaccionaran con la superficie del sensor y no serán detectados, los únicos elementos que podrían ayudar a generar una respuesta son los elementos de este gas, que tengan características oxidantes o reductoras fuertes.

#### 4.2.7. Comportamiento de las películas delgas expuestas ante humo de madera

Como se mencionó en la sección 3.1.4 el humo de madera está compuesto por más de 200 moléculas diferentes, entre los que se destacan hidrocarburos y los monóxidos de carbonos, siendo estos a los que más reaccionan con los sensores estudiados. Sin embargo, la concentración de monóxido de carbono varía dependiendo de las condiciones ambientales, y del tipo de madera que está produciendo el humo.

Por lo cual se busca que todos los sensores estuvieran expuestos ante humo de madera en las mismas condiciones y producido por el mismo tipo de madera, los datos obtenidos están expuestos en las tablas 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9. Estos datos están mostrados en la gráfica de la figura 4.15, en la cual se pueden exponer la comparativa de funcionamiento y sensibilidad de las películas ante la exposición del humo de madera.

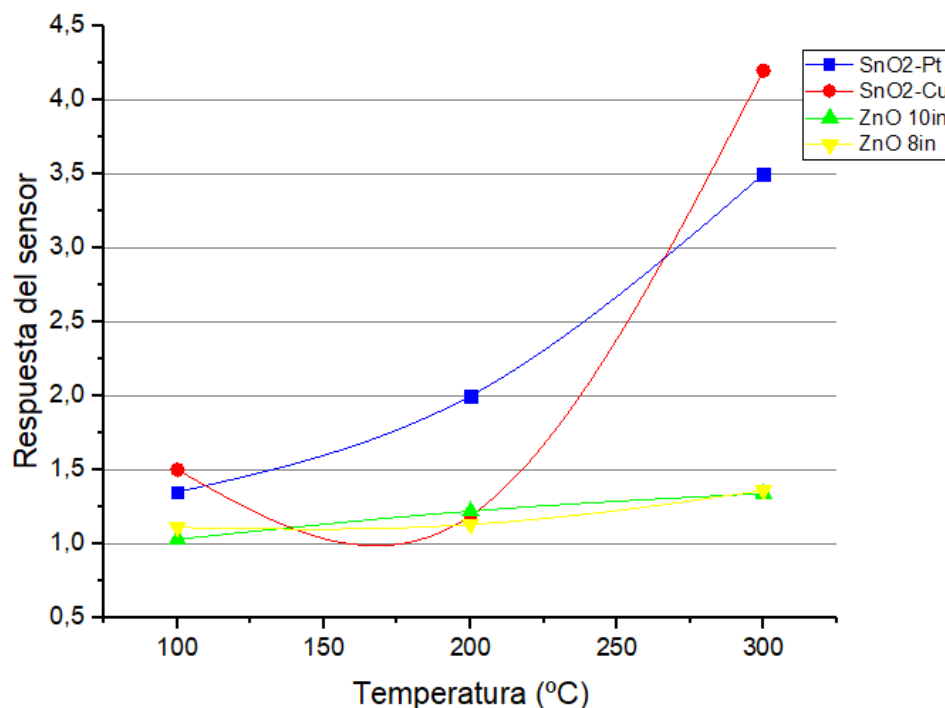


Figura 4.15: Gráfica comparativa de sensibilidad de las películas ante la exposición de humo de cigarro

En la gráfica de la figura 4.15 se puede observar cómo es que en el sensor de  $SnO_2-Cu$ , es el único en la que la resistencia no aumenta en todo momento, en función del aumento de temperatura, en este caso la sensibilidad disminuye antes de aumentar, pese a esto su mejor respuesta del sentido se encuentra en los 300°, los demás gases siempre aumenten conforme aumente la temperatura.

El sensores de  $SnO_2 - Pt$  es el que tiene una mejor respuesta en promedio y aunque no en todo momento sea la película con mejor respuesta al sentido, al no tener caída de su respuesta del sensor se tiene que es una buena opción para trabajar con temperaturas dinámicas, ya que esta es la película en la que se mantienen valores altos de sensibilidad para el rango de temperatura de 100°C a 300°C.

En este caso tenemos que la respuesta del sensor en la película de ZnO 10 nm es la que tiene una menor respuesta del sentido en promedio en relación a las otras mientras que la película ZnO 8 nm tiene una respuesta del sentido mayor que en la de 10 nm ante la exposición del compuesto gaseoso.



### 4.3. Discusión general

Midiendo la respuesta al sensado de tanto los sensores comerciales como los sensores no comerciales diseñados en la universidad tenemos que la respuesta al sensado, varía mucho dependiendo del tipo de sensor, si bien no todos los sensores comerciales utilizados eran especializados para el reconocimientos de óxidos de carbono como es el caso del sensor MQ3 que es un sensor de óxido de estaño al igual que las pastillas analizadas solo que en este caso está caracterizado para la detección de alcohol, a pesar de ello presenta una detección de los gases estudiados aunque en menor medida que los otros sensores comerciales.

Para el caso del gas que se genera por la exhalación humana es el que presento menor respuesta al sensado, en relación con la presentada por los otros gases, esto se debe a que el componente principal del primer gas es la exhalación humana la cual está compuesta por dióxido de zinc, mientras que para los gases 2 y 3 se tiene que en su composición presentan monóxido de carbono el cual interacciona de manera opuesta en la capa superficial de los sensores lo que implica que la respuesta sea muy diferente para este caso. Lo que indica que los materiales de los sensores reaccionaron en menor cantidad al dióxido de carbono que al monóxido de carbono.

También se pudo observar cómo es que el sensor que presento mejores características de respuesta al sensado fue la pastilla de óxido de estaño dopada con platino, ya que esta pastilla es la que presenta la mejor respuesta ante la exposición del gas 1 y el gas 3, incluso mejor que los sensores comerciales ya caracterizados. Sin embargo, para el segundo gas se tiene que el sensor que mide de mejor forma es el sensor comercial MQ135, el cual es un sensor que se diseña específicamente para la medición de humos contaminantes como son los que componen al segundo gas, el humo de cigarro.

En todos los sensores no comerciales, la respuesta al sensado mejoró considerablemente, siendo que la respuesta en casos de tener una temperatura de 100° fue mucho menor que la respuesta al sensado al momento de tener una tempera de 300°, lo que indica cómo es que la respuesta al sensado mejora mucho para los sensores conforme aumenta la temperatura superficial. Sin embargo, la temperatura superficial es un factor cambiante debido a que algunos gases como el dióxido de carbono está a una temperatura mucho menor que la temperatura que superficial que tendría lo que implica que al entrar en contacto, la temperatura menor del gas puede producir que se disminuya la temperatura superficial del sensor lo que puede provocar que se disminuya la sensibilidad del sensor.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Después del desarrollo del presente trabajo se generaron las siguientes conclusiones:

- Se fabricaron sensores de gas basados en el depósito de películas delgadas semiconductores de óxido de zinc por primera vez en la UAEH.
- Se estudiaron los sensores fabricados variando el tiempo de exposición al gas y la temperatura. Con la finalidad de establecer una referencia, se estudiaron 3 sensores comerciales: MQ2, MQ3, MQ7 y MQ135, siendo este último el que mostró mejor desempeño.
- Con la finalidad de monitorear en tiempo real el desempeño del sensor se incorporó al sistema una base de datos que permitió realizar esta tarea.
- Los sensores fabricados en la UAEH funcionan correctamente, esto se comprobó utilizando como referencia los comerciales y fue el diseñado con estas características: pastilla de óxido de estaño con dopaje de platino el que presentó mejor respuesta ante las variables estudiadas.

# Glosario

**Aislante:** El comportamiento de los aislantes se debe a la barrera de potencial que se establece entre las bandas de valencia y conducción que dificulta la existencia de electrones libres capaces de conducir la electricidad a través del material.

**Analito:** En química analítica, analito es un componente (elemento, compuesto o ion) de interés analítico de una muestra. Es una especie química cuya presencia o contenido se desea conocer.

**Banda de conducción:** Los electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica. La banda de conducción: está ocupada por los electrones libres, es decir, aquellos que se han desligado de sus átomos y pueden moverse fácilmente.

**Banda de valencia:** En la teoría de sólidos, se denomina banda de valencia al más alto de los intervalos de energías electrónicas (o bandas) que se encuentra ocupado por electrones en el cero absoluto.

**Banda prohibida:** brecha de bandas o brecha energética, en la física del estado sólido y otros campos relacionados, es la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción.

**Caída de Tensión:** es la diferencia de potencial que existe entre los extremos de cualquier conductor, semiconductor o aislante. Este valor se mide en voltios y representa el gasto de fuerza que implica el paso de la corriente por el mismo.

**Conductor:** Se define un conductor eléctrico como aquel material que en el momento en el cual se pone en contacto con un cuerpo cargado eléctricamente, transmite la electricidad a todos los puntos de su superficie. Los conductores eléctricos son elementos que contienen electrones libres en su interior por lo que facilitan el desplazamiento de las cargas en el material.

**Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ):** Es un gas incoloro, inodoro. Este compuesto químico se encuentra en la naturaleza y está compuesto de un átomo de carbono unido con sendos enlaces covalentes dobles a dos átomos de oxígeno.

**Electrones:** Es la partícula elemental más ligera que constituye a los Átomos y que presenta la mínima carga posible de electricidad negativa. Se trata de una partícula subatómica que rodea al Núcleo del átomo.

**Fotosíntesis:** es la conversión de materia inorgánica en materia orgánica gracias a la energía que aporta la luz. En este proceso la energía lumínica se transforma en energía química estable.

**Gas:** es el estado de agregación de la materia en el cual, bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, sus moléculas interaccionan solo débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares, adoptando la forma y el volumen del recipiente que las contiene y tendiendo a separarse, esto es, expandirse, todo lo posible por su alta concentración de energía cinética. Los gases son fluidos altamente compresibles, que experimentan grandes cambios de densidad con la presión y la temperatura.

**Inmersión:** El sustrato es metido dentro de la solución del material de recubrimiento a una velocidad constante (preferiblemente sin sacudidas).

**Microcontrolador:** Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.

**Monóxido de Carbono: (CO)** Es un gas sin olor ni color pero muy peligroso. Puede causar súbitamente una enfermedad y la muerte. El CO se encuentra en el humo de la combustión, como lo es el expulsado por automóviles y camiones, candelabros, estufas, fogones de gas y sistemas de calefacción.

**Óxido de Zinc (ZnO):** Es un compuesto inorgánico, insoluble y comúnmente usado como aditivo de diversos materiales entre ellos plásticos.

**Película delgada:** la capa de material en el rango de fracciones de nanómetro hasta varios micrómetros de espesor. Con el cual se han desarrollado varios componentes electrónicos y ópticos de la actualidad.

**Reactividad:** En química es la capacidad de una sustancia de reaccionar en presencia de otras sustancias.

**Semiconductor:** es un elemento que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

**Sensor:** Dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, etc.) u otras alteraciones de su entorno y las transforma en variaciones eléctricas.

**Silicio:** Elemento químico de número atómico 14, masa atómica 28,086 y símbolo Si; es un no metal sólido, de color amarillento, que se extrae del cuarzo y otros minerales y es el segundo elemento más abundante en la Tierra después del oxígeno.

**Transductor:** Es un dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente a la salida.

# Bibliografía

- Acuña-Avila, P. E., and Viguera Santiago, E. Estudio de la formación de ZnO por tratamiento térmico a partir de películas nanoestructuradas de Zn con aplicaciones al sensado de vapores de etanol.
- Aguilar, L., Maldonado, A., and Olvera, M. (2012). Aplicación de películas delgadas de  $SnO_2$  como sensores de propano. SEES, *Departamento de Ingeniería Eléctrica*, CINVESTAV-IPN, (25):117-121.
- Alcántara, I., Soto, C., Susana, B., Ortega, J., Antonio, L., Cabañas, T., ... and Flores, C. (2008). Películas de ZnO piezoeléctricas depositadas por Spray Pírolisis US. *Superficies y vacío*, 21(4), 6-9.
- Albert, L. A. (1997). Contaminación ambiental. origen, clases, fuentes y efectos. *Xalapa: Sociedad Mexicana de Toxicología*. Obtenido de: <http://www.bvsde.paho.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf>.
- Alim, K., Fonoberov, V., Shamsa, M., and Balandin, A. (2005). Physical. *Phys.*, (97):401-519.
- Areny, R. P. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.
- Asimov, I., Cruz, A., and Villena, M. I. (1975). *Breve historia de la química*. Alianza.
- Beatty, J. S. (2017). Uso de nanopartículas para el diagnóstico y tratamiento de la diabetes. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, (26), 13.
- Bing, Y., Zeng, Y., Liu, C., Qiao, L., and Zheng, W. (2015). *Nanoscale*. page 3276.
- Candal, R., Bilmes, S. A., and Blesa, M. A. (2001). Semiconductores con actividad fotocatalítica. *En Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea*. M. Blesa, Ed. La Plata (Argentina): CYTED, pages 79-101.
- CCSSO (1997). Dióxido de carbono, efectos en la salud. *Canadian Centre for Occupational Health and Safety*.
- Dogan, I. (2006). *Microcontroller Based Applied Digital Control*.
- Echeverría, G. (2005). Estados de la materia. *Cultura de los cuidados, a no IX, no 17, 1. semestre 2005; pp. 11-15*.
- Eranna, G. (2011). *Metal oxide nanostructures as gas sensing devices*. CRC Press.
- Guerra, S. T., Cázares, J. M., and Maldonado, A. Películas de óxido de zinc impurificadas con Ti y preparadas por el método de Sol-Gel.

- Katiyar, R. (1970). C: Solid state phys. *J. Phys.*
- Kim, D., HO, S., and Lee, J. (1999). Preparation of ultra ne nanodispersed indium-tin oxide particles in aot-based resersed microemulsions as nanoreactors. *Langmuir*, pages 1599-1603.
- Köfalusi, G. K. and Aguilar, G. E. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta ecológica*, (79):39-51.
- Lladó Verdejo, A. A., Marengo Juárez, J. M., and Borbolla Sala, M. E. (2000). Contingencia ambiental por contaminación atmosférica y su asociación con síntomas y signos respiratorios y oculares.  
*Artículos originales factores asociados al uso de métodos anticonceptivos durante la primera experiencia sexual. Mario*, 6(1):299.
- López Acuña, D., Leon, D. G. d., and Moreno Sanchez, A. R. (1987). La salud ambiental en México. In *La salud ambiental en México*. Universo Veintiuno.
- Maioco, S., Vera, C., Rajchenberg, N., and Aragón, R. (2013). Síntesis de óxidos conductores transparentes de óxido de zinc dopado con aluminio por coprecipitación química. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4).
- Makeenkov, A., Lapitskiy, I., Somov, A., and Baranov, A. (2015). Flammable gases and vapors of ammable liquids. *monitoring with infrared sensor node*, pages 1102-1107.
- Martínez G, E., Flores, J., and PÉREZ T, E. (2010). Depósito de películas ultradelgadas de óxido de zinc (ZnO) por ald. pages 247-250.
- Matsuura, Y. and Takahata, K. (1991). Sens. actuators. B: *Chem.*, pages 205-209.
- McAleer, J., Moseley, P., Norris, J., and Williams, D. (1987). *Faraday trans. J. Chem. Soc.*, page 1323-1346.
- Oliu, G., Nogué, S., and Miró, Ó. (2010). Intoxicación por monóxido de carbono: claves fisiopatológicas para un buen tratamiento. *Emergencias*, 22(6):451-59.
- OMS (2017). La OMS establece parámetros para reducir los daños para la salud. División de Información de la Organización Mundial de la Salud.
- Paria, R., López, A., and Solís, J. Fabricación de sensores de gas natural (GN) y gas licuado de petróleo (GLP), basados en nanopartículas de ZnO. ECIPERU-2010, 25.
- Pérez, F. E. V. and Areny, R. P. (2007). *Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC*, volume 1149. Marcombo.
- Pérez, J. A., Gallego, J. L., Roman, W. S., Landázuri, H. R. (2008). *Películas nanoestructuradas de óxido de zinc (ZnO)*, voluen 39, Scientia et technica.
- Pour, M., Martin, N., Monsifrot, E., Briois, P., and Billard, A. (2015). ZnO nano-tree active layer as heavy hydrocarbon sensor. *Thin Solid Films*, 113(596):128-134.
- Raynaud, D., Jouzel, J., Barnola, J., Chappellaz, J., Delmas, R., and Lorius, C. (1993). *The ice core record of greenhouse gases. Science*, 259:926-934.

Serna Ruiz, A., Ros García, F., and Rico Noguera, J. (2010). *Guía Practica de Sensores*.

Traylor, J., Smith, H., Nicklow, R., and Wilkinson, M. (1971). Phys. rev. b.

Venkata K, K. (2015). *Síntesis y caracterización de sensores químicos basados en pastillas cerámicas de nanopartículas de óxido de estaño activadas con Cu, Pd y Pt*. PhD thesis, Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politecnico nacional.

Willard, H. and Tang J, N. (1937). Am. chem. soc. (59):1190-1196.

Xu, G., Wang Liu, Y., Zheng, C., and Wang, C. (2002). Synthesis. j. Appl. Phys. 92, page 2740-2742.

Zhang, Y., Xu, J., Xiang, Q., Li, H., Pan, Q., Xu, P., *et al.* (2009). Brush-like hierarchical ZnO nanostructures: synthesis, photoluminescence and gas sensor properties. *The journal of physical chemistry. C, Nanomaterials and interfaces*, 113(9):3430.