

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo



Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

TESIS

**“Diseño, fabricación y validación de un sistema
para evaluación de sensores de gases”**

Para obtener el título de Ingeniero de Materiales

P R E S E N T A

Marcos Iván Hernández Uribe

Directores:

Dra. Ana María Bolarín Miró
Dr. Félix Sánchez De Jesús

Mineral de la Reforma, Hgo., a 24 de marzo de 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 24 de marzo de 2025

Número de control: ICBI-D/439/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado al Egresado de la Licenciatura en Ingeniería en de Materiales **Marcos Iván Hernández Uribe**, quien presenta el trabajo de titulación "**Diseño, fabricación y validación de un sistema para evaluación de sensores de gases**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Félix Sánchez de Jesús

Secretario: Dr. Cristhian Antonio Taboada Moreno

Vocal: Dra. Ana María Bolarín Miró

Suplente: Dra. Claudia A. Cortés Escobedo

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx,
vergarar@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

El presente trabajo de tesis fue desarrollado en el laboratorio de Materiales Particulados del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo dentro de las actividades desarrolladas por el Cuerpo Académico de Procesos Químicos y Físicos del Estado Sólido (CA-UAEH-71).

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de este trabajo de tesis, bajo el proyecto del Fondo de Ciencia Frontera titulado “Inducción del acoplamiento magnetodieléctrico en multiferroicos impropios del tipo ferritas” apoyado en el fondo de Ciencia Frontera de SECIHTI (clave CF-2023-G-76)

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación está dedicado a:

En primer lugar, agradezco profundamente a mis directores de tesis, la Dra. Ana María Bolarín Miró y el Dr. Félix Sánchez De Jesús, además de mis compañeros de investigación en el laboratorio de Materiales Particulados del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, especialmente al Dr. Cristhian Taboada Moreno, quienes con su conocimiento, dedicación y esfuerzo constante me brindaron valiosos aportes a lo largo de esta tesis. Su disposición para compartir ideas, así como su paciencia y apoyo incondicional, han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mis padres, la Sra. Gabriela Uribe Torres y el Sr. Marcos Hernández Ávila, les debo todo mi amor, apoyo y comprensión. Gracias por ser mi pilar en todo momento, por creer en mí y darme fuerzas para seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes. Sin su respaldo, tanto emocional como práctico, este logro no habría sido posible.

A mis amigos, que siempre estuvieron ahí para ofrecerme palabras de aliento y distracción cuando más lo necesité. Gracias por su apoyo constante, por sus risas y por ser una fuente de motivación y energía.

A todos ustedes, les dedico este trabajo como muestra de mi más sincero agradecimiento. Sin su presencia en mi vida, este proyecto no habría sido tan significativo.

Contenido

Agradecimientos	I
Índice de Ecuaciones	VII
Índice de Tablas	VII
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Antecedentes	6
1.1.1 Desarrollo de materiales semiconductores como sensores de gases.	6
1.1.2 Ferritas de lantano.	8
1.1.3 Investigaciones previas sobre sensores de gases basados en LaFeO ₃	9
1.1.4 Diseño y fabricación de sistemas de evaluación de sensores.....	12
1.1.5 Innovaciones en la evaluación de sensores de gases.	12
1.1.6 Necesidad de un nuevo sistema de evaluación.	13
1.2 Justificación	13
Hipótesis	14
1.3	14
1.4 Objetivos	14
1.4.1 Objetivo General.	14
1.4.2 Objetivos Específicos.....	15
Capítulo II. Marco teórico	17
2.1 Introducción a los Gases Tóxicos	17
2.1.1 Definición.....	17
2.1.2 Tipos de gases tóxicos y sus fuentes comunes.	17
2.2 Problemática asociada a la presencia de gases tóxicos	18
2.2.1 Impacto en la salud Humana.....	20
2.2.2 Efectos en el medio ambiente.....	20
2.2.3 Incidentes industriales y riesgos laborales.....	21
2.2.4 Dificultades en la detección y monitoreo.	21
2.2.5 Prevención y control de gases tóxicos.	22
2.3 Métodos de detección de gases	24
2.3.1 Detección Infrarroja.	24
2.3.2 Detección electroquímica.	24
2.3.3 Sensores semiconductores.....	24

2.4 Mecanismos que intervienen en la detección de gases.	25
2.4.1 Adsorción y desorción de gases.	25
2.4.2 Transferencia de carga y formación de zonas de baja densidad de carga.	26
2.4.3 Cambios en la resistencia eléctrica.	27
2.4.4 Reacciones superficiales catalíticas.....	29
2.4.5 Desorción térmica y recuperación.	30
2.4.6 Interacción con el campo eléctrico y polarización de la superficie.	31
2.5 Sensores gases.	34
2.5.1 Definición.....	34
2.5.2 Clasificación.....	35
2.6 Sistemas para evaluar materiales como sensores de gases a base de semiconductores.	36
2.6.1 Partes del sistema de detección de sensores.	36
2.6.2 Cámara de medición.....	37
2.6.3 Suministro de gas.	38
2.6.4 Control de temperatura.	39
2.7 Semiconductores: definición y características.	40
2.7.1 Sensibilidad.....	40
2.7.2 Recuperación.....	41
2.8 Mecanismo de formación del par electrón-hueco.	41
2.8.1 Formación del par electrón hueco en un semiconductor Intrínseco.....	41
2.8.2 Formación del par electrón hueco en un semiconductor extrínseco.	42
2.8.3 Activación de los semiconductores: mecanismos.....	45
2.8.4 Composición química de semiconductores.	46
2.9 Sensibilidad y recuperación.	48
2.10 Funcionamiento del sensor (semiconductor).	48
2.10.1 Principio de operación de sensores semiconductores.....	48
2.10.2 Factores que afectan el rendimiento del censo.....	49
2.11 Ferritas semiconductoras: LaFeO₃.	49
2.11.1 Estructura cristalina.....	50
2.11.2 Propiedades físicas.	51
2.11.3 Aplicaciones.....	52
2.11.4 Uso como sensor de gas.....	53
2.11.5 Uso como sensor de gases.	54
2.12 Métodos de síntesis de ferritas.	56
2.12.1 Métodos físicos.	56

2.12.2 Métodos químicos.....	57
Capítulo III. Desarrollo Experimental.	59
3.1 Diagrama de flujo experimental.	59
3.2 Materiales.	60
3.2.1 Requerimientos de cada parte.	60
3.3 Instrumentos.	62
3.3.1 Instrumentos del prototipo.	62
3.3.2 Candidatos para la selección del material del cuerpo del sensor.....	63
3.3.3 Selección del material del cuerpo de la cámara	66
3.4 Etapa I. Diseño.	68
3.4.1 Cuerpo (Acero Inoxidable).	68
3.4.2 Vidrio de la cámara.....	69
3.4.3 Tapa de Acero Inoxidable con O-Ring.	70
3.4.4 Placa Intermedia (Acero inoxidable).	71
3.4.5 Soportes para el material semiconductor (electrodos).	71
3.5 Componentes no diseñados.....	72
3.5.1 Termopar.	72
3.5.2 Placa de calentamiento.	72
3.5.3 Conexiones para la placa de calentamiento.	73
3.5.4 Controlador de temperatura.....	73
3.5.5 Sistema de Atmósfera.	74
3.6 Identificación de gases.	74
3.7 Selección del material semiconductor.....	76
3.8 Etapa II Fabricación.	77
3.8.1 Base de la cámara.....	78
3.8.2 Vidrio de la cámara.....	79
3.8.3 Tapa de Acero Inoxidable con O-Ring.	80
3.8.4 Placa Intermedia (Acero inoxidable).	81
3.8.5 Placa de calentamiento.	82
3.8.6 Conexiones para la placa de calentamiento.	83
3.8.7 Termopar.	83
3.8.8 Miliómetro.....	84
3.8.9 Sistema de Atmósfera.	85
3.8.10 Planos base de la cámara.	86

3.8.11 Planos placa intermedia.	87
3.8.12 Planos tapa de la cámara.	87
3.8.13 Ensamblaje de la cámara.....	88
Capítulo IV. Resultados.	90
4.1. Fabricación del sensor.	90
4.2 Validación en comparación de un sensor comercial.....	91
4.2.1 Metodología de validación.	91
4.2.2 Comparación de parámetros críticos.....	92
4.2.3 Resultados esperados.....	92
4.3 Evaluación de la sensibilidad y repetividad.	92
4.3.1 Evaluación de Sensibilidad.	92
4.3.1 Metodología de evaluación.....	94
4.3.2 Condiciones de prueba.....	95
4.3.3 Criterios de evaluación.....	96
4.3.5 Curvas de calibración.	97
4.3.6 Gráficos de dispersión.	98
4.3.10 Determinación de ppm (Partes por millón) en el sistema.	100
4.3 Valores de los componentes.....	100
4.3.1 Parámetros del controlador.	100
4.3.2 Validación del sistema calentamiento.	101
4.4 Problemas Potenciales y Soluciones Aplicadas.	102
Conclusión.	105
Bibliografía	106

Índice de Figuras.

<i>Figura 1.1- Formación de par electrón hueco en materiales semiconductores.</i>	2
<i>Figura 1.2- Diagrama esquemático del mecanismo de reacción de un semiconductor tipo N con el gas de la atmósfera (aire), en este caso O₂ y CO₂ (Nikolic et al, 2020).</i>	3
<i>Figura 1.3- Diferentes materiales semiconductores para ser aplicados como sensores de gases (Nikolic et al, 2020).</i>	3
<i>Figura 1.4- Estructura cristalina (tipo perovskita) de la ferrita de lantano.</i>	8
<i>Figura 2.1- Sensor de gas metano - MQ-4.</i>	34
<i>Figura 2.2- Termopar Tipo K.</i>	39
<i>Figura 2.3- Liberación de energía en la formación del par electrón hueco.</i>	42
<i>Figura 2.4- Mecanismo de la formación del par electrón hueco.</i>	42
<i>Figura 2.5- Ejemplo semiconductor tipo p dopado.</i>	43
<i>Figura 2.6- Mecanismo de conducción en semiconductores tipo “n” dopados (a) Al y (b) Sb.</i>	44
<i>Figura 2.7- Comportamiento energético de un semiconductor en función de la temperatura A) ejemplificación de nula conducción de energía, B) ejemplificación de conducción térmica.</i>	45
<i>Figura 2.8- Estructura del Seleniuro de galio de indio y cobre.</i>	48
<i>Figura 2.9- Estructura de una perovskita de fórmula química ABX₃.</i>	50
<i>Figura 2.10- Esquema del proceso de pulverización catódica.</i>	56
<i>Figura 3.1 Diagrama experimental.</i>	59
<i>Figura 3.2- Diagrama de Ashby. Densidad vs módulo de Young.</i>	67
<i>Figura 3.3- Boceto del cuerpo del sensor a) vista general, b) vista planta, c) sección B-B.</i>	69
<i>Figura 3.4- Boceto del vidrio de la cámara.</i>	69
<i>Figura 3.5- Boceto de la tapa del sensor.</i>	70
<i>Figura 3.6- Boceto O-Ring.</i>	70
<i>Figura 3.7- Boceto placa intermedia.</i>	71
<i>Figura 3.8- Bocetos de los posibles soportes de los electrodos.</i>	72
<i>Figura 3. 9- Boceto placa de calentamiento.</i>	73
<i>Figura 3. 10- Válvulas de suministro de gas.</i>	78
<i>Figura 3.11- Vista 3D de la base de la cámara.</i>	79
<i>Figura 3.12- Vidrio vista 3D.</i>	80
<i>Figura 3.13- Tapa del sensor vista 3D.</i>	80
<i>Figura 3.14- O-Ring vista 3D.</i>	81
<i>Figura 3.15- Placa intermedia vista 3D.</i>	82
<i>Figura 3.16- Placa de calentamiento.</i>	82
<i>Figura 3.17- Cables resistentes a alta temperaturas.</i>	83
<i>Figura 3.18- Milióhmetro GW Instek, modelo GOM-804.</i>	84
<i>Figura 3.19 - Flujómetro LZM-6T N₂.</i>	86
<i>Figura 3.20 - Base de la cámara del sensor, a) Sección C-C, b) Vista frontal.</i>	86
<i>Figura 3.21 - Base de la cámara del sensor, vista planta.</i>	87
<i>Figura 3.22- Placa intermedia, vista lateral y vista planta.</i>	87

<i>Figura 3.23- Tapa del sensor, vista planta y sección B-B </i>	88
<i>Figura 3.24 - a) vista frontal, b) sección B-B del ensamblaje.</i>	88
<i>Figura 3.25 - Proyección 3D del ensamblaje.</i>	89
<i>Figura 3.26- Sistema de evaluación de sensor de gases.</i>	89
<i>Figura 4.1- Ensamblaje físico del sensor.</i>	90
<i>Figura 4.2- Pruebas de resistencia contra temperatura sin uso de material semiconductor.</i>	94
<i>Figura 4.3- Pruebas de resistencia contra temperatura sin uso de material semiconductor solo en aire y vacío.</i>	98
<i>Figura 4.4- Pruebas de resistencia contra temperatura con el uso de material semiconductor solo en distintos gases.</i>	99
<i>Figura 4.5- Variación de la resistencia eléctrica con la presencia de temperatura y los gases.</i>	99
<i>Figura 4.6- Rampas de calentamiento del sistema PID.</i>	102

Índice de Ecuaciones.

<i>Ecuación 1. Relación entre portadores en semiconductores intrínsecos</i>	4
<u>Ecuación 2.</u> <i>Oxidación del monóxido de carbono en la superficie del sensor</i>	29
<i>Ecuación 3. Reducción del oxígeno en la superficie del sensor.</i>	29
<i>Ecuación 4. Ecuación de Poisson</i>	32
<i>Ecuación 5. Definición de sensibilidad en sensores de gases</i>	93
<i>Ecuación 6. Sensibilidad en sensores de gases resistivos</i>	96
<i>Ecuación 7. Coeficiente de variación como medida de dispersión relativa</i>	97
<i>Ecuación 8. Cálculo de la concentración de gas en partes por millón (ppm)</i>	100

Índice de Tablas.

<i>Tabla 1. Gases tóxicos comunes, su fuente principal y los problemas de salud asociados</i>	19
<i>Tabla 2. Mecanismos de adsorción y desorción.</i>	33
<i>Tabla 3- Valores de PID de rampa de calentamiento</i>	100

Capítulo I. Introducción.

Los sensores de gases desempeñan un papel crucial en la prevención de incidentes que podrían poner en peligro la vida y la seguridad de las personas cercanas a posibles fugas de gas, es indispensable la utilización de sensores en la automatización de industrias, procesos y manufacturados, ingeniería experimental, en sectores no productivos como son el ahorro energético y control ambiental (Pallás Areny, 2007).

Existen diversos métodos para detectar gases, tales como sensores de gases electroquímicos, catalíticos, infrarrojos, de estado sólido, sin embargo, aquellos que emplean semiconductores como material detector son de gran interés, debido a la elevada sensibilidad en la medición que realizan, haciendo posible la fiable detección, dependiendo del gas, lo cual es especialmente importante cuando se trata de gases nocivos para los seres vivos (López, 2024). En este tipo de sensores, la sensibilidad y recuperación del dispositivo, se basa en las características físico-químicas de los materiales, en este caso, semiconductores.

Como se menciona en el párrafo anterior, uno de los enfoques comunes para la detección de gases es el uso de sensores basados en materiales semiconductores. Estos sensores aprovechan los cambios en las propiedades eléctricas de ciertos materiales cuando están expuestos a diferentes gases. Cuando el gas objetivo interactúa con el material semiconductor, provoca un cambio en la conductividad eléctrica del material, lo que puede detectarse y medirse para determinar la presencia y concentración del gas (Castañeda, 2018).

En los sistemas de detección, los materiales semiconductores desempeñan un papel fundamental como componente principal, los cuales se caracterizan por producir pares electrón-hueco (e^-h^+), usualmente por la incidencia de energía de distintas formas por ejemplo fotones (Luz) con energía igual o superior a la energía de la banda prohibida del semiconductor en su superficie, por la acción de energía térmica (calor) proporcionada al sistema o por la aplicación de un voltaje (campo eléctrico), lo que provoca que los electrones de la banda de valencia se exciten y pasen hacia la banda de conducción, dejando huecos en la banda de valencia, tal como se describe esquemáticamente en la Figura 1.1.

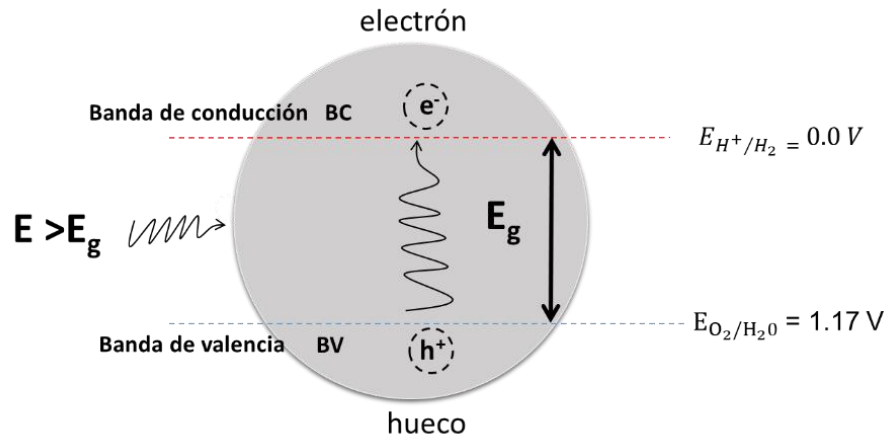


Figura 0.1- Formación de par electrón hueco en materiales semiconductores.

Estos pares $e^- - h^+$ formados, se aprovechan para llevar a cabo reacciones de óxido-reducción y en el caso objeto de estudio, para reaccionar con el gas que se encuentre en la superficie del semiconductor, y así cuantificar indirectamente, la presencia de trazas de los gases a los que son sensibles cada semiconductor de manera específica. Esta reacción de los electrones con el gas, induce una modificación en la conductividad eléctrica, debido a una interacción entre los electrones formados y el gas a detectar como se muestra en la Figura 1.2. Además, el efecto de la reacción de los electrones con el gas a analizar, afecta de un modo muy sensible a la resistividad eléctrica, debido a que los electrones que interactúan química o físicamente con el gas, afectan la cantidad de portadores de carga del semiconductor y, por lo tanto, disminuye su conductividad eléctrica, permitiendo la detección de la presencia de trazas de gases específicos. Una vez calibrado el semiconductor para un gas particular, se puede relacionar con la concentración del gas que se está detectando, y así tener una cuantificación del gas de la atmósfera analizada.

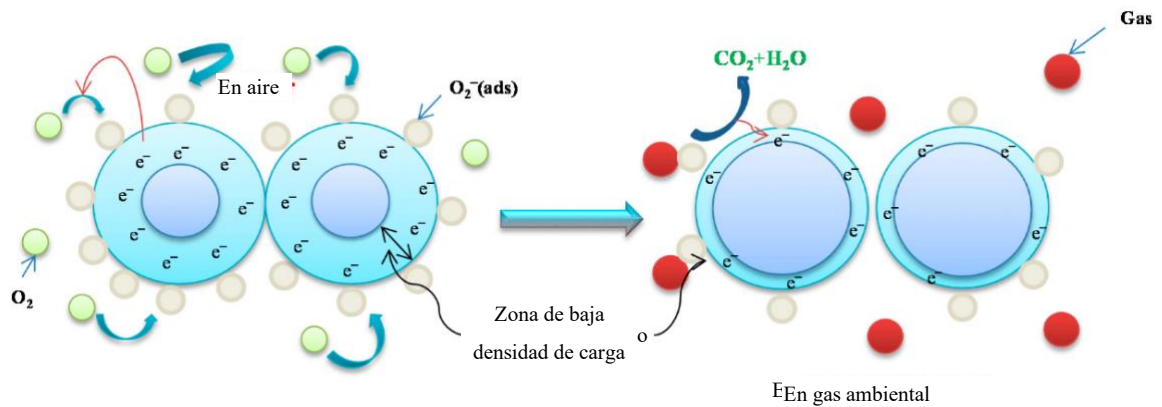


Figura 0.2- Diagrama esquemático del mecanismo de reacción de un semiconductor tipo N con el gas de la atmósfera (aire), en este caso O_2 y CO_2 (Nikolic et al, 2020).

Son numerosos los materiales semiconductores que se pueden emplear como sensores de gases, tal como se presentan en la Figura 1.3, en la que se observa una gran variedad de materiales que van desde los típicos óxidos metálicos, hasta nanotubos de carbono, pasando por polímeros conductores. Lo anterior muestra la gran versatilidad de posibilidades y la relevancia de disponer de un sistema de evaluación de semiconductores para sensores de gases.

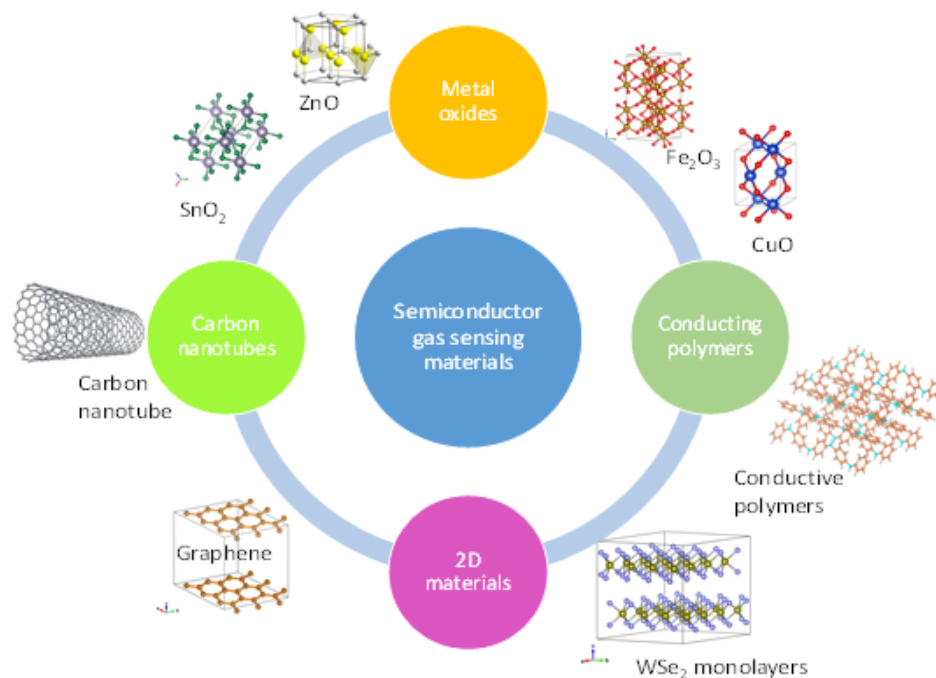


Figura 0.3- Diferentes materiales semiconductores para ser aplicados como sensores de gases (Nikolic et al, 2020).

Para determinar el número de portadores (electrones-huecos) que se generan en un material semiconductor y, por lo tanto, indirectamente su sensibilidad en función de la

temperatura, se debe conocer el tipo de semiconductor utilizado, de tal modo que se pueden distinguir dos tipos:

Semiconductores intrínsecos: En un semiconductor puro a temperatura ambiente, la generación térmica de pares electrón-hueco es un fenómeno importante. A medida que la temperatura aumenta, se incrementa la energía de los átomos en la estructura del semiconductor. Esta energía puede ser suficiente para excitar electrones de los enlaces covalentes, dejando atrás huecos en la red cristalina (banda de valencia). La concentración de portadores intrínsecos (electrones y huecos) en un semiconductor intrínseco sigue la relación de equilibrio definida por la ecuación de masa-acción, que establece que:

$$n_i^2 = n_e \times p \quad \text{Ecuación 1}$$

donde n_i es la concentración de portadores intrínsecos, n_e es la concentración de electrones en la banda de conducción y p es la concentración de huecos en la banda de valencia. Esta relación depende de la temperatura y la energía de la banda prohibida del semiconductor (Altermatt et al., 2003).

Semiconductores extrínsecos: Estos semiconductores son dopados con distintos elementos, en el caso de cerámicos generalmente son cationes, y la concentración de portadores de carga (electrones o huecos) puede ser significativamente mayor que en los semiconductores intrínsecos, debido al valor del estado de oxidación del catión o cationes adicionados. Estos portadores adicionales son introducidos por impurezas dopantes. La concentración de portadores extrínsecos aumenta exponencialmente con la temperatura debido al aumento de la energía térmica disponible para liberar portadores de carga de los cationes dopantes. Este fenómeno se describe mediante la ecuación de ionización de dopantes, que se expresa como:

$$n = N_D \left(\frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \right) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde n es la concentración de electrones en la banda de conducción, N_D es la concentración de átomos dopantes, g es el factor de degeneración del nivel de dopante, E_D es la energía de ionización del dopante, E_F es la energía del nivel de Fermi, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta. Esta ecuación muestra que la eficiencia de ionización de los dopantes aumenta con la

temperatura, lo que resulta en una mayor concentración de portadores de carga disponibles en el semiconductor (Alados, et al., 2006).

Con base en lo anterior, antes de analizar la capacidad de un semiconductor en el proceso de censado de gases, se deberá conocer químicamente el material, para poder interpretar correctamente su función e interacción con los gases de la atmósfera que lo rodea.

Durante la última década las investigaciones acerca de las ferritas como detectores de gases han tenido resultados innovadores como presentan algunos autores (Lozano et al., 2019), quienes muestran aspectos generales de la funcionalidad de las ferritas para esta aplicación, y proporcionan una revisión actualizada sobre la síntesis de nanopartículas de ferrita, sus propiedades magnéticas y sus aplicaciones en sensores, incluyendo información sobre su sensibilidad y selectividad.

En la actualidad existen diferentes tipos de sensores de gases los cuales han tenido resultados satisfactorios, sin embargo, estos no son del todo eficientes principalmente por los materiales utilizados, además de su sensibilidad ante gases específicos; las ferritas son materiales sumamente adecuados para la aplicación en sensores de gases debido a su valor de banda prohibida que con ayuda la aplicación de energía se vuelven los materiales más adecuados.

La sensibilidad de un semiconductor en bulto para detectar un gas específico es crucial para su aplicación como sensor de gases. La sensibilidad se refiere a la capacidad del semiconductor para detectar y responder a cambios en la concentración de un gas. Cuanto mayor sea la sensibilidad, más precisa será la detección del gas objetivo (Castañeda, 2018) Sin embargo, la determinación precisa de la sensibilidad de los semiconductores en bulto para aplicaciones específicas de detección de gases puede ser un desafío.

Actualmente, muchos métodos y dispositivos existentes están diseñados para evaluar la sensibilidad de materiales específicos, con geometrías y diseños particulares, son muy costosos, exige condiciones de preparación de muestra muy concreta y genera mucha dependencia tecnológica de los fabricantes, propiciando poca flexibilidad cuando se desea modificar las variables a analizar para fines de investigación, lo cual limitan su uso. La escasa disponibilidad de dispositivos especializados para determinar la sensibilidad de los semiconductores en bulto puede limitar el desarrollo

y la optimización de sensores de gases específicos y personalizables. Esta situación dificulta el estudio y comprensión precisa de la sensibilidad de los semiconductores en bulto; los diseñadores y fabricantes de sensores pueden enfrentar dificultades para seleccionar los materiales más adecuados y optimizar el rendimiento de los dispositivos, por tal motivo, en este trabajo de tesis se tiene como meta diseñar, fabricar y validar un sistema de detección de gases que sea versátil, para poder modificar y controlar las variables que influyen en el desempeño de nuevos materiales semiconductores y de este modo superar las barreras que representan los sistemas comerciales además de obtener materiales sensores más sensibles ante una variedad de gases más amplia.

1.1 Antecedentes.

El desarrollo de sensores de gases a base de semiconductores ha cobrado relevancia significativa en los últimos años, impulsado por la necesidad de monitorear y controlar la calidad del aire en ambientes industriales, urbanos, y residenciales. La detección precisa de gases tóxicos y nocivos es fundamental para proteger la salud humana y el medio ambiente, así como para optimizar procesos industriales donde se manejen gases combustibles o contaminantes. En este contexto, los semiconductores basados en óxidos metálicos, como la ferrita de lantano (LaFeO_3), han emergido como materiales prometedores para la detección de gases debido a sus propiedades físicas y químicas favorables, como alta sensibilidad, selectividad, estabilidad térmica, química, y su relativo bajo costo de producción.

1.1.1 Desarrollo de materiales semiconductores como sensores de gases.

Década de 1960: En la década de 1960, los primeros estudios sobre el empleo de semiconductores en la detección de gases se enfocaron en materiales como el dióxido de estaño (SnO_2), cuya elevada sensibilidad permitió detectar gases como el monóxido de carbono y el hidrógeno. En este contexto, las investigaciones desarrolladas por Heiland y Kohl marcaron un hito al introducir el uso de óxidos metálicos en aplicaciones de sensores de gases, estableciendo las bases para el desarrollo de tecnologías avanzadas en este campo.

Década de 1980: Investigaciones más avanzadas comenzaron a explorar el comportamiento de los semiconductores frente a diferentes gases. Durante esta

época, SnO₂ y ZnO se consolidaron como los materiales más estudiados debido a su estabilidad y capacidad para detectar una variedad de gases. Se empezó a comprender mejor el rol de la superficie del semiconductor y cómo la adsorción de moléculas de gas influía en la resistencia eléctrica (Tetsuro & Kagaku, 1983).

Década de 1990: Se ampliaron las investigaciones a otros materiales de óxidos metálicos, como WO₃ y TiO₂, para aumentar la selectividad y sensibilidad de los sensores. Durante este periodo, la investigación también se centró en mejorar las propiedades estructurales y electrónicas de los semiconductores, optimizando su capacidad de respuesta a gases específicos (Gerlich et al., 2003).

Década de 2000: La ferrita de lantano (LaFeO₃) emergió como un material prometedor debido a su alta estabilidad térmica, buena respuesta ante gases oxidantes como el NO₂ y CO, y la posibilidad de ajustarse para detectar gases específicos mediante dopado con otros elementos. Se comenzaron a realizar estudios sobre su estructura ortorrómbica y su influencia en la sensibilidad y selectividad de los sensores (Enhessari & Salehabadi, 2016).

Década de 2010 - Presente: Investigaciones recientes han explorado cómo la nanotecnología puede mejorar aún más la superficie activa de semiconductores como LaFeO₃, maximizando su sensibilidad y reduciendo el tiempo de respuesta. La ferrita de lantano dopada con otros metales (como el cobre o el cobalto) ha mostrado resultados prometedores en la detección de gases como el NO₂, H₂S y CO. Un estudio reciente mostró que el dopaje de LaFeO₃ con molibdeno (Mo) mejora significativamente su capacidad para detectar trietilamina (TEA), un compuesto utilizado en la industria y conocido por su impacto ambiental y en la salud. Este dopaje incrementó la cantidad de sitios activos en la superficie del material y facilitó la interacción con moléculas de TEA, resultando en una mayor respuesta y selectividad. Además, se observó una notable disminución en los tiempos de respuesta y recuperación, lo que hace que este material dopado sea ideal para aplicaciones en sensores rápidos y precisos. (Shen et al., 2024). Estas investigaciones siguen expandiendo el conocimiento sobre el uso de este material en sensores de gases, posicionándolo como una opción viable para aplicaciones industriales y domésticas.

1.1.2 Ferritas de lantano.

La ferrita de lantano (LaFeO_3) es un óxido de estructura perovskita como se observa en la Figura 1.4, que se ha investigado ampliamente en los últimos años debido a sus propiedades electrónicas, magnéticas y térmicas, así como su estabilidad química y estructural en diversas condiciones. Este material, que posee una estructura ortorrómbica y puede describirse como un óxido mixto de lantano y hierro, ha demostrado ser interesante para aplicaciones en dispositivos electrónicos, catalizadores y sistemas de almacenamiento de energía, gracias a su particular combinación de características estructurales y electrónicas (de la Luz Mercado, 2023).

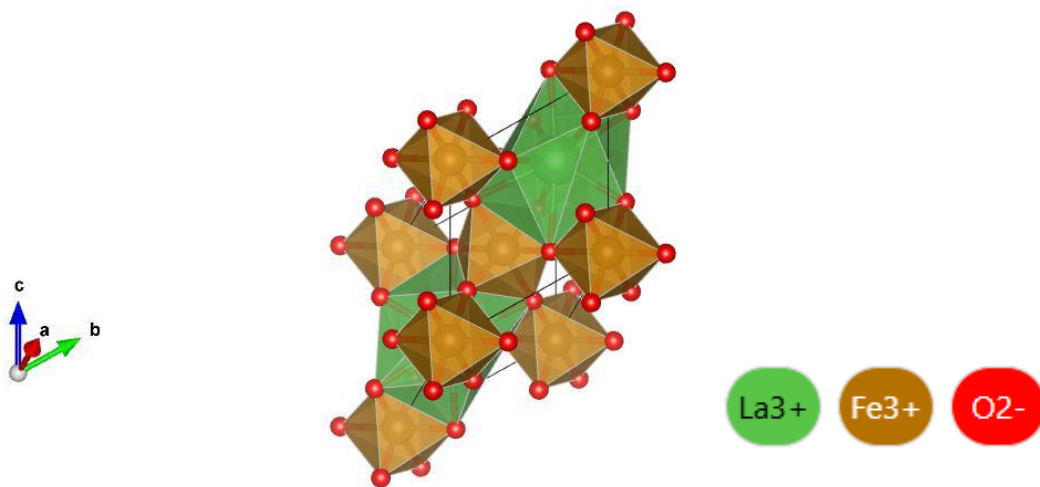


Figura 0.4- Estructura cristalina (tipo perovskita) de la ferrita de lantano (Jain et al., 2013).

Uno de los aspectos clave de LaFeO_3 es su estructura cristalina, en la que los átomos de hierro (Fe^{3+}) se encuentran rodeados de átomos de oxígeno en una configuración de octaedros distorsionados (FeO_6). Esta distorsión genera diferentes longitudes de enlace y ángulos en los enlaces Fe-O, lo cual es relevante para sus propiedades electrónicas y de transporte. La interacción de los orbitales d del hierro con los orbitales p del oxígeno permite la formación de una banda prohibida de energía moderada, que le confiere su naturaleza semiconductor (Escobar, 2020). Esta banda prohibida relativamente ancha hace que el material sea adecuado para aplicaciones de alta temperatura y ambientes extremos.

Históricamente, el interés en la ferrita de lantano creció debido a su estabilidad magnética, presenta un comportamiento antiferromagnético con una temperatura de transición de aproximadamente 740 K. Esta propiedad magnética ha sido fundamental en su estudio para aplicaciones en almacenamiento de datos magnéticos y en el desarrollo de materiales magnetoresistivos (Manchón-Gordón et al., 2023). Además,

investigaciones han demostrado que sus propiedades magnéticas pueden ajustarse mediante dopado, agregando elementos como el cobalto (Co), níquel (Ni) o cobre (Cu), lo cual permite variar la magnitud de la interacción magnética y, en consecuencia, adaptar el material para distintas aplicaciones tecnológicas, por ejemplo, el dopaje con cobalto en LaFeO_3 ha demostrado modificar el orden magnético, induciendo un ferromagnetismo débil. En un estudio, se sintetizó LaFeO_3 dopada con diferentes concentraciones de Co^{2+} mediante molienda mecánica de alta energía y tratamiento térmico, confirmándose la incorporación de Co^{2+} en la estructura cristalina y observándose una modificación en el comportamiento magnético del material (Rubio et al., 2023).

La estabilidad química y térmica de LaFeO_3 también lo hace adecuado para su uso en catalizadores, particularmente en la conversión de gases como el monóxido de carbono (CO) y el óxido nítrico (NO), y en la descomposición de hidrocarburos (M. Sharma et al., 2018). El material muestra una excelente resistencia a la degradación, incluso a altas temperaturas, lo que lo convierte en un candidato prometedor para catalizadores de alta eficiencia y bajo costo, comparado con los metales nobles convencionales. Las investigaciones sobre la reactividad de LaFeO_3 en reacciones catalíticas han permitido descubrir que su actividad catalítica puede mejorarse mediante ajustes en la morfología y el tamaño de partícula, factores que influyen directamente la superficie activa del material y su capacidad de adsorción de reactivos.

En aplicaciones de energía, LaFeO_3 ha sido investigado en la fabricación de celdas de combustible de óxido sólido y en sistemas de almacenamiento de energía térmica. En las celdas de combustible, LaFeO_3 funciona como un electrodo debido a su conductividad iónica y estabilidad a temperaturas de operación superiores a los 800°C . Estos estudios han destacado su eficiencia y durabilidad comparada con otros materiales de perovskita, y se considera una alternativa económica y estable para estos sistemas de conversión de energía (Concustell et al., 2013).

1.1.3 Investigaciones previas sobre sensores de gases basados en LaFeO_3 .

La ferrita de lantano (LaFeO_3), ha despertado el interés de la comunidad científica debido a sus propiedades prometedoras como material para sensores de gases. Esto se refiere a su capacidad de interactuar de manera efectiva con diversas especies gaseosas. La estructura cristalina perovskita de LaFeO_3 garantiza una buena

movilidad de los portadores de carga y una alta capacidad de adsorción de moléculas de gas, lo que se traduce en cambios en la conductividad eléctrica del material a detectables condiciones atmosféricas. Investigaciones recientes han demostrado que LaFeO_3 exhibe una alta sensibilidad y selectividad hacia diversos gases, incluyendo dióxido de nitrógeno (NO_2), amoníaco (NH_3) y monóxido de carbono (CO). Por ejemplo, un estudio publicado en (*Sensors and Actuators B: Chemical*) destaca que LaFeO_3 dopado con plata (Ag) presenta una detección límite de 0.5 ppm para ácido acético, mostrando una mejora de 3.6 veces en la respuesta a 100 ppm en comparación con el material sin dopar (Wu et al., 2024).

1.1.3.1 Propiedades y mecanismos de detección.

El mecanismo de detección de gases en sensores basados en LaFeO_3 se fundamenta en la modulación de la conductividad del material al interactuar con gases de interés. LaFeO_3 es un semiconductor tipo p, lo que significa que su conductividad aumenta en presencia de gases reductores como el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno (H_2), debido a la liberación de electrones atrapados en las vacantes de oxígeno del material. Esta liberación de electrones reduce la densidad de portadores de carga positiva (huecos), incrementando la conductividad del material (Yamazoe, 2005). Por el contrario, en presencia de gases oxidantes como el dióxido de nitrógeno (NO_2), el LaFeO_3 captura electrones de la atmósfera, incrementando las vacantes de oxígeno y disminuyendo la conductividad eléctrica debido al aumento en la densidad de huecos.

1.1.3.2 Síntesis y modificación de LaFeO_3 .

Puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos, tales como la reacción en estado sólido, el método de sol-gel, la síntesis hidrotermal, y la combustión asistida por microondas. Cada método ofrece ventajas específicas en términos de tamaño de partícula, pureza, y propiedades morfológicas. Por ejemplo, el método de sol-gel permite obtener nanopartículas de LaFeO_3 con alta uniformidad y control sobre el tamaño de partícula, lo cual es crucial para maximizar la superficie específica disponible para la adsorción de gases (Gutiérrez et al., 2015). A su vez, la síntesis hidrotermal proporciona un mayor control sobre la morfología, permitiendo obtener estructuras nanométricas con alta porosidad que mejoran la sensibilidad del sensor al incrementar la superficie de interacción con los gases (Castellanos et al., 2016).

Además de la síntesis pura, se han explorado métodos de dopado y sensibilización para mejorar las propiedades de detección de LaFeO_3 . El dopado con metales nobles como platino (Pt), paladio (Pd) o plata (Ag) ha demostrado mejorar la respuesta y la selectividad del material hacia gases específicos. Estos metales pueden actuar como catalizadores que facilitan la disociación de moléculas de gas en la superficie del sensor, aumentando la reactividad y mejorando la sensibilidad (Luo et al., 2021). Por ejemplo, el dopado con Pd ha mostrado una mejora significativa en la detección de hidrógeno, debido a la formación de paladio hidruro en presencia de H_2 , que modifica la conductividad del sensor.

1.1.3.3 Avances recientes en la tecnología de sensores.

Han estado dirigidos a optimizar la selectividad y sensibilidad de los dispositivos basados en LaFeO_3 mediante el control de su microestructura y química superficial. La modificación estructural a nivel atómico, particularmente a través de la generación controlada de vacantes de oxígeno, ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades de detección. Estas vacantes desempeñan un papel fundamental en la adsorción de moléculas de gas y en la modulación de la conductividad eléctrica del material. Un incremento en su concentración en LaFeO_3 puede mejorar significativamente la respuesta del sensor a gases oxidantes como NO_2 y O_3 (Zhu, 2019).

Además, se han desarrollado estrategias de fabricación basadas en la síntesis de películas delgadas y estructuras de nanohilos de LaFeO_3 , las cuales presentan una elevada relación superficie-volumen, contribuyendo a una mayor sensibilidad del sensor.

(Zhu, 2019) Las películas delgadas de LaFeO_3 pueden ser fabricadas mediante técnicas como deposición química en fase vapor (CVD) y pulverización catódica, proporcionando un control preciso sobre el espesor de la película y la morfología de la superficie. Estas estructuras permiten una rápida adsorción y desorción de moléculas de gas, lo que resulta en una mejor respuesta dinámica del sensor, con tiempos de respuesta y recuperación más rápidos (Yaragani et al., 2021).

1.1.3.4 Evaluación y validación del rendimiento del sensor.

El rendimiento de los sensores basados en LaFeO_3 se ha evaluado mediante su exposición a diferentes concentraciones de gases en condiciones controladas de

temperatura y humedad. Diversos estudios han reportado que estos sensores presentan una alta sensibilidad a compuestos como CO, NO₂ y COV en un rango de temperatura de operación entre 200°C y 400°C.

Asimismo, las pruebas de estabilidad a largo plazo han demostrado que los sensores mantienen una alta reproducibilidad y una mínima deriva en la señal de salida, aspecto fundamental para su aplicación en el monitoreo ambiental y la seguridad industrial.

1.1.4 Diseño y fabricación de sistemas de evaluación de sensores.

El diseño de un sistema para la evaluación de sensores de gases implica no solo la selección de materiales y metodologías de síntesis, sino también el desarrollo de un entorno de pruebas controlado que permita la exposición precisa y reproducible de los sensores a diferentes concentraciones de gases. En estudios previos, se han utilizado cámaras de exposición cerradas con control de temperatura y flujo de gas para evaluar el rendimiento de sensores basados en LaFeO₃. Estas cámaras suelen estar equipadas con elementos calefactores y sistemas de control de flujo para simular condiciones ambientales reales y extremas. Sin embargo, la falta de sistemas integrados y estandarizados para la evaluación de sensores de gas ha limitado la comparación directa de resultados entre diferentes estudios y laboratorios (Bolarín et al., 2024).

1.1.5 Innovaciones en la evaluación de sensores de gases.

Recientemente, ha habido un enfoque creciente en el desarrollo de sistemas integrados de evaluación que permiten no solo la medición de la respuesta del sensor ante diferentes gases, sino también la caracterización de parámetros adicionales como la velocidad de respuesta, el tiempo de recuperación, la selectividad, y la estabilidad a largo plazo. Estos sistemas avanzados integran tecnologías de control de temperatura, flujo de gas, y registro de datos, permitiendo una evaluación más exhaustiva y precisa de los sensores (Muñoz et al., 2019). En particular, el uso de controladores de temperatura avanzados, y la implementación de cámaras de prueba con visibilidad mejorada, han sido destacados como componentes clave en la modernización de los sistemas de evaluación de sensores de gases.

1.1.6 Necesidad de un nuevo sistema de evaluación.

A pesar de los avances en la tecnología de sensores de gas y los sistemas de evaluación asociados, persiste la necesidad de desarrollar equipos de prueba más sofisticados y estandarizados que puedan ofrecer resultados reproducibles y comparables. Este proyecto de tesis se enfoca en el diseño, fabricación y validación de un sistema de evaluación que pueda satisfacer estas necesidades, permitiendo no solo la caracterización detallada de sensores a base de LaFeO_3 , sino también la evaluación de nuevos materiales y estructuras de sensores que puedan surgir de la investigación continua en este campo. El objetivo es proporcionar un marco de evaluación robusto que pueda ser adoptado por la industria y la academia para avanzar en la investigación y desarrollo de sensores de gases de próxima generación.

1.2 Justificación.

Los semiconductores son ampliamente utilizados como materiales sensores de gases debido a sus propiedades eléctricas únicas, especialmente su capacidad para modificar la resistencia eléctrica en presencia de diferentes gases. Sin embargo, para evaluar esta propiedad de manera precisa, es necesario contar con sistemas especializados que permitan medir y calibrar su respuesta en diversas condiciones. Actualmente, los dispositivos disponibles en entornos industriales presentan limitaciones importantes, tales como un desarrollo tecnológico limitado, diseños rígidos y una capacidad restringida para manejar múltiples variables, lo que dificulta su uso en investigaciones avanzadas.

Es importante destacar que, según la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, cada año ocurren más de 1,000 accidentes laborales relacionados con la exposición a gases tóxicos en la industria, y en el ámbito doméstico, las intoxicaciones por monóxido de carbono (CO) causan más de 400 muertes al año solo en Estados Unidos (EU-OSHA, 2021). Estos datos subrayan la urgente necesidad de contar con sensores de gases precisos y confiables que puedan detectar concentraciones peligrosas de gases con la suficiente anticipación para evitar tragedias.

Ante esta carencia de sistemas de detección precisos, surge la necesidad de desarrollar un sistema específico que permita evaluar el desempeño de los semiconductores como sensores de gases en atmósferas controladas y variadas. La importancia de medir la variación en la resistencia eléctrica de un semiconductor bajo la exposición a diferentes gases, utilizando inicialmente un sensor comercial para su calibración y posteriormente aplicándolo a la caracterización de ferritas de lantano (LaFeO_3) permitirá el desarrollo de un dispositivo de alta funcionalidad en entornos industriales. Este material ha demostrado una alta sensibilidad y capacidad de interacción con diversas moléculas, haciéndolo un candidato prometedor para la detección de gases.

De este modo, esta investigación aborda no solo la falta de sistemas eficientes para la evaluación de materiales semiconductores, sino que también tiene implicaciones prácticas para mejorar la seguridad en el trabajo y en el hogar, mediante el desarrollo de tecnologías más precisas y confiables para la detección de gases peligrosos.

1.3 Hipótesis.

Se diseñará y desarrollará un sistema de detección de gases, que combine un ambiente controlado de temperatura y composición atmosférica, lo cual permitirá evaluar de manera precisa el desempeño de materiales semiconductores como la ferrita de lantano (LaFeO_3), y su capacidad para detectar gases con alta sensibilidad y selectividad. Se espera que las variaciones en la concentración de gases y la temperatura afecten de manera significativa las propiedades eléctricas y la funcionalidad del material, lo que proporcionará información crucial para optimizar su uso en aplicaciones industriales y domésticas como sensor de gases.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

Diseñar, y validar un sistema de detección de gases que permita evaluar de manera precisa el desempeño de materiales semiconductores, específicamente la ferrita de lantano (LaFeO_3), mediante bajo diferentes condiciones atmosféricas y de temperatura, con el fin de estudiar su capacidad para detectar gases con alta sensibilidad y selectividad.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Diseño de un dispositivo para evaluar la sensibilidad y repetividad de diferentes semiconductores en la detección de gases, considerando la función de cada una de las partes del sistema, y realizando la correcta selección de los materiales y geometrías requeridas.
 - El diseño del dispositivo implicará la creación de un sistema que pueda exponer diferentes semiconductores a gases específicos en condiciones controladas de temperatura y voltaje. Esto podría incluir una cámara de prueba hermética donde se pueda controlar la temperatura y la concentración de gas, así como los electrodos necesarios para medir la respuesta eléctrica del semiconductor.
- Concretar el diseño mediante la fabricación del sistema de detección de gases considerando todas las variables que se requieran controlar: temperatura, gas y voltaje.
 - Una vez completado el diseño, se procederá a la fabricación del dispositivo siguiendo las especificaciones y considerando todas las variables que se requiera controlar.
 - Se realizarán pruebas y ajustes durante el proceso de fabricación para garantizar que el dispositivo funcione correctamente y cumpla con los requisitos de precisión y reproducibilidad.
- Validar el correcto funcionamiento del sistema utilizando un sensor comercial.
 - Antes de utilizar el dispositivo para evaluar los semiconductores sintetizados, se validará su funcionamiento comparándolo con un sensor comercial de referencia. Esto ayudará a confirmar la precisión y confiabilidad del dispositivo de prueba.
- Sintetizar ferritas de lantano con o sin dopaje, para su evaluación como sensor de gases (aire, gas de combustión, oxígeno, nitrógeno, argón).
 - Se llevará a cabo la síntesis de ferritas de lantano con o sin dopaje, utilizando métodos adecuados de síntesis química o física, según sea necesario. El dopaje podría realizarse con diferentes elementos para modular las propiedades magnéticas y eléctricas de las ferritas.
- Evaluar la sensibilidad y la recuperación de los semiconductores sintetizados.

- Una vez sintetizadas las ferritas, se evaluará su sensibilidad y recuperación como sensores de gases utilizando el dispositivo diseñado y fabricado. Las ferritas de lantano se someterán a diferentes gases donde se medirá su respuesta eléctrica y así determinar su capacidad para detectar y recuperarse de la presencia del gas utilizado.

Capítulo II. Marco teórico.

En este capítulo se presentan todos los aspectos teóricos necesarios para comprender el desarrollo de esta tesis. Por lo tanto, se incluye en este apartado información general sobre la situación respecto a la necesidad de uso de sensores para la detección de gases, específicamente los más tóxicos para la vida, dedicando un apartado a los sistemas más comúnmente empleados para su detección. Posteriormente se describen los diferentes métodos de detección de gases, profundizando en aquellos que se basan en el uso de semiconductores, explicando las características y métodos de síntesis de los semiconductores a base de LaFeO_3 .

2.1 Introducción a los Gases Tóxicos.

2.1.1 Definición.

Los gases tóxicos son compuestos en forma gaseosa que, al ser inhalados o absorbidos, pueden provocar efectos adversos en la salud de los seres humanos y otros organismos vivos. Estos efectos varían en gravedad desde irritaciones leves hasta condiciones severas que pueden resultar en daño permanente o la muerte. La toxicidad de un gas depende de su concentración en el ambiente, la duración de la exposición y la susceptibilidad individual, lo que hace fundamental la identificación y control de estos gases en diversas situaciones, incluyendo entornos industriales, domésticos y urbanos (WHO, 2023a).

2.1.2 Tipos de gases tóxicos y sus fuentes comunes.

Los gases tóxicos se pueden clasificar en diferentes categorías según su composición química y su origen. Entre los más comunes se encuentran el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el amoníaco (NH_3), el cloro (Cl_2) y el ozono (O_3). Cada uno de estos gases presenta características y fuentes específicas de emisión. Monóxido de carbono (CO): Este gas incoloro e inodoro es uno de los contaminantes más peligrosos. Se produce principalmente por la combustión incompleta de combustibles fósiles como el gas natural, la gasolina, el carbón y la madera. En el hogar, los calentadores defectuosos y los automóviles en espacios cerrados son fuentes comunes de exposición. La inhalación de CO interfiere

con la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que puede llevar a la asfixia y muerte si no se detecta a tiempo (Zhang & Smith, 2007).

Dióxido de azufre (SO_2): Este gas tiene un olor fuerte e irritante y se libera principalmente durante la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre, como el carbón y el petróleo. Las industrias metalúrgicas y las refinerías de petróleo son fuentes significativas de SO_2 . La exposición puede causar irritación en las vías respiratorias y contribuir a la formación de lluvia ácida, lo que afecta la salud humana y el medio ambiente (WHO, 2023b).

Óxidos de nitrógeno (NO_x): Esta categoría incluye el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2). Se generan en altas temperaturas durante procesos de combustión, como en motores de automóviles y plantas de energía. Estos gases son conocidos por causar problemas respiratorios y contribuir a la formación de ozono troposférico, que es dañino para la salud humana y el medio ambiente (EPA, 2020).

Amoníaco (NH_3): Este gas es conocido por su olor fuerte y penetrante. Se produce principalmente en la agricultura, en el uso de fertilizantes y en la descomposición de materia orgánica. La exposición al amoníaco puede causar irritación en los ojos, la piel y las vías respiratorias, y en altas concentraciones, puede ser fatal (WHO, 2023b).

Cloro (Cl_2): Utilizado en la industria como desinfectante y blanqueador, el cloro es altamente tóxico. La exposición a este gas puede causar irritación en los ojos y en las vías respiratorias, y puede provocar daños pulmonares graves si se inhala en grandes cantidades. Fuentes comunes incluyen procesos de tratamiento de aguas y productos de limpieza domésticos (CDC, 2021).

Ozono (O_3): Aunque el ozono estratosférico protege la Tierra de los rayos ultravioleta, el ozono en la troposfera se convierte en un contaminante peligroso. Se forma a partir de reacciones químicas entre otros contaminantes en presencia de luz solar. La exposición al ozono troposférico puede agravar enfermedades respiratorias y causar problemas pulmonares (Bell, 2004).

2.2 Problemática asociada a la presencia de gases tóxicos.

La sociedad ha tomado conciencia del problema causado por la contaminación del medio ambiente y se busca controlar los susceptibles de afectar en mayor medida a la salud pública. De los cuales el CO_2 es de los gases con mayor interés en la actualidad por el cambio climático y el daño que provoca en el ser humano.

En entornos urbanos e industriales, los gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx), el dióxido de azufre (SO₂), y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) son especialmente prevalentes. Estos gases no solo afectan directamente a la salud humana, sino que también generan contaminantes secundarios, como el ozono troposférico, que agravan las afecciones respiratorias. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), más del 90% de la población mundial respira aire contaminado, lo que resulta en millones de muertes prematuras anuales (EEA, 2020). A continuación, en la Tabla 1, que relaciona algunos gases tóxicos comunes con los problemas de salud que generan en la sociedad:

Tabla 1. Gases tóxicos comunes, su fuente principal y los problemas de salud asociados.

Gas tóxico	Fuente principal	Problemas de salud asociados
Monóxido de carbono (CO)	Combustión incompleta (vehículos, calentadores)	Asfixia, cefaleas, mareos, daño neurológico, muerte
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Motores de combustión, plantas de energía	Irritación respiratoria, bronquitis, asma, cáncer pulmonar
Dióxido de azufre (SO ₂)	Emisiones industriales, quema de combustibles fósiles	Irritación ocular y respiratoria, broncoespasmos
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	Productos químicos, pinturas, combustibles	Problemas hepáticos, daño renal, cáncer
Ozono troposférico (O ₃)	Reacciones químicas de NOx y COVs	Asma, enfermedades respiratorias crónicas, daño pulmonar

Para obtener resultados más consistentes en la detección de este gas, se usan técnicas analíticas como la cromatografía de gases y la espectrometría de masas. Pero estas son técnicas caras y que no pueden ser in situ, la solución son los detectores basados en óxidos metálicos semiconductores, los cuales son baratos y pueden ser puestos en donde esté el problema, cuentan con buena sensibilidad y

pueden durar muchos años. Una gran variedad MOS (metal oxide semiconductor) tales como el SnO₂, MoO₃, TiO₂ y WO₃ LaFe se han estudiado para detectar gases tóxicos y peligrosos (Faudoa Arzate, 2017). Como un MOS de tipo n, el WO₃ es un material prometedor para la detección de gases tóxicos, ya que es altamente sensible a NO_x, H₂S y NH₃. Aunque algunos de los sensores de gas basados MOS han sido comercializados durante años, todavía hay que resolver muchos problemas para mejorar la sensibilidad, la selectividad y la estabilidad.

2.2.1 Impacto en la salud Humana.

La exposición a gases tóxicos representa una amenaza significativa para la salud humana, con efectos que pueden variar desde molestias leves hasta enfermedades graves e incluso la muerte. Sin embargo, el desarrollo de sensores de gases avanzados ofrece una solución poderosa para mitigar estos riesgos, mejorando la detección temprana y permitiendo respuestas más rápidas a situaciones de exposición (Raub et al., 2000).

La integración de sensores de gases en sistemas de gestión de la calidad del aire tiene el potencial de reducir significativamente la incidencia de enfermedades relacionadas con la exposición a gases tóxicos. Al detectar contaminantes en etapas tempranas, es posible prevenir el desarrollo de condiciones crónicas, lo que a su vez reduce los costos sanitarios asociados con el tratamiento a largo plazo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Además, al prevenir incidentes agudos de exposición, los sensores de gases pueden salvar vidas y reducir la carga económica y emocional en las comunidades afectadas (Pope et al., 2004).

2.2.2 Efectos en el medio ambiente.

La liberación de gases tóxicos en el medio ambiente tiene consecuencias devastadoras para los ecosistemas, la biodiversidad y la estabilidad climática global. Sin embargo, el desarrollo y la implementación de sensores de gases avanzados ofrecen herramientas esenciales para mitigar estos efectos, permitiendo una monitorización precisa y una intervención oportuna (Schindler, 1988).

Gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son potentes gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. La acumulación de estos gases en la atmósfera atrapa el calor, alterando los patrones climáticos y provocando fenómenos meteorológicos extremos. El desarrollo de

sensores específicos para estos gases permite una monitorización precisa de sus concentraciones en el aire, lo que es crucial para cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones y para implementar políticas más efectivas de mitigación del cambio climático (Kampa & Castanas, 2008).

2.2.3 Incidentes industriales y riesgos laborales

La industria es una fuente significativa de emisiones de gases tóxicos, y los trabajadores en estos entornos son particularmente vulnerables a la exposición. Incidentes industriales, como fugas de gas y explosiones, pueden tener consecuencias catastróficas no solo para los empleados sino también para el medio ambiente circundante y la comunidad local.

Los trabajadores en plantas químicas, refinerías y otras instalaciones industriales están expuestos a una variedad de gases peligrosos, como el monóxido de carbono (CO), amoníaco (NH₃), y cloro (Cl₂). La inhalación de estos gases puede causar desde irritaciones leves hasta daños severos en el sistema respiratorio, intoxicaciones, y en casos extremos, la muerte. El monitoreo constante del aire mediante sensores de gases puede prevenir estos incidentes al alertar sobre la presencia de gases peligrosos antes de que alcancen niveles críticos (Fu et al., 2020).

Los incidentes industriales no solo afectan a los trabajadores directamente involucrados, sino que también pueden tener un impacto duradero en las comunidades cercanas y en el medio ambiente. Ejemplos históricos, como el desastre de Bhopal en 1984, demuestran las devastadoras consecuencias que pueden resultar de una fuga masiva de gases tóxicos. La implementación de sensores de gases más avanzados y confiables en entornos industriales es esencial para minimizar estos riesgos y proteger tanto a los trabajadores como al entorno circundante.

El desarrollo de sensores de gases con mayor sensibilidad y precisión permite una detección más rápida y eficaz de fugas, reduciendo así el riesgo de incidentes graves. Además, la integración de estos sensores en sistemas de monitoreo y respuesta automática puede mejorar significativamente la seguridad en el lugar de trabajo, minimizando los riesgos laborales y los posibles daños ambientales (Bowonder, 1995).

2.2.4 Dificultades en la detección y monitoreo.

La detección y el monitoreo de gases tóxicos presentan múltiples desafíos técnicos y logísticos. La naturaleza insidiosa de muchos gases tóxicos, que pueden ser incoloros

e inodoros, dificulta su detección sin el equipo adecuado. Además, las fluctuaciones en las concentraciones de gases y las condiciones ambientales complican aún más la capacidad de monitoreo efectivo.

La precisión y sensibilidad de los sensores de gases son cruciales, pero alcanzar estos estándares es un desafío. Algunos gases requieren tecnologías específicas para ser detectados, y la interferencia de otros compuestos presentes en el ambiente puede afectar la lectura. La calibración constante de los sensores es necesaria para asegurar resultados precisos, lo que puede ser costoso y requerir mano de obra especializada (Pérez & Jiménez, 2020).

El entorno en el que se encuentran los sensores también juega un papel crucial en su desempeño. Factores como la temperatura, la humedad, y la presión pueden influir en la precisión de las mediciones. Por ejemplo, en entornos de alta humedad, algunos sensores pueden experimentar fallos o producir lecturas inexactas. Además, la presencia de partículas en el aire, como polvo o aerosoles, puede obstruir los sensores o interferir con sus lecturas (Liu et al., 2015).

A pesar de estas dificultades, el desarrollo continuo de nuevas tecnologías está mejorando la capacidad de los sensores de gases para superar estos desafíos. Los avances en materiales semiconductores, como la ferrita de lantano, ofrecen potencial para la creación de sensores más robustos y precisos. Además, la integración de sistemas de monitoreo remoto y la automatización en tiempo real están facilitando una detección más eficaz, incluso en condiciones adversas. La inversión en investigación y desarrollo de sensores de gases es fundamental para mejorar la detección y el monitoreo de gases tóxicos. Con tecnologías más avanzadas, es posible abordar los desafíos actuales y asegurar que tanto los trabajadores como el medio ambiente estén mejor protegidos frente a los riesgos asociados con la presencia de gases peligrosos (Shan et al., 2019).

2.2.5 Prevención y control de gases tóxicos.

La prevención y el control de gases tóxicos son esenciales para proteger la salud humana, el medio ambiente y la seguridad industrial. Estos esfuerzos requieren un enfoque multifacético que incluye la implementación de tecnologías avanzadas, políticas regulatorias estrictas y la educación continua de los trabajadores y la comunidad.

El uso de sensores de gases avanzados es una de las estrategias más efectivas para la prevención de la liberación de gases tóxicos. Estos sensores pueden detectar la presencia de gases peligrosos en concentraciones extremadamente bajas, permitiendo una intervención temprana antes de que las concentraciones alcancen niveles dañinos. Tecnologías como los sensores basados en semiconductores, incluyendo la ferrita de lantano, han mostrado un gran potencial en la detección precisa de gases como el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), y sulfuro de hidrógeno (H₂S) (Micheli, 2017).

El mantenimiento regular y la supervisión continua de los sistemas de control de emisiones son cruciales para prevenir fugas de gases tóxicos. Esto incluye la revisión y calibración periódica de los sensores, así como la inspección de las infraestructuras de almacenamiento y transporte de gases. Las fallas en el mantenimiento pueden llevar a la acumulación de gases peligrosos y, eventualmente, a su liberación en el ambiente, causando potenciales desastres industriales (Ahirwal & Vishwakarma, 2019).

Los gobiernos y organizaciones internacionales han desarrollado una serie de normativas y estándares para controlar la emisión de gases tóxicos como la Directiva Europea de Emisiones Industriales (IED), ley de Aire Limpio de los Estados Unidos (Clean Air Act, CAA) y protocolo de Kioto sobre el Cambio Climático. Estas regulaciones requieren que las industrias implementen tecnologías adecuadas de control y monitoreo de gases y cumplan con los límites de emisiones permitidos. Además, las inspecciones regulares por parte de agencias reguladoras ayudan a asegurar el cumplimiento de estas normativas, reduciendo así los riesgos asociados con la liberación de gases tóxicos.

La educación y la capacitación continua de los trabajadores y las comunidades cercanas a instalaciones industriales son esenciales para la prevención y el control de gases tóxicos. Los programas de capacitación deben enfocarse en la identificación de riesgos, el uso adecuado de equipos de protección personal (EPP) y la respuesta a emergencias. La sensibilización de las comunidades sobre los riesgos asociados con los gases tóxicos y las medidas preventivas también es clave para la reducción de la exposición y la mejora de la seguridad pública.

2.3 Métodos de detección de gases.

La detección de gases tóxicos es crucial para la seguridad y salud pública, así como para la protección del medio ambiente. Existen diversas tecnologías disponibles para la detección de gases, cada una con sus ventajas y limitaciones. A continuación, se describen algunos de los métodos más comunes, incluyendo la detección por infrarrojos, electroquímica, ultrasónica y semiconductores.

2.3.1 Detección Infrarroja.

Los sensores de gas infrarrojos (IR) utilizan la absorción de radiación infrarroja para identificar la presencia de gases en el ambiente. Cada gas tiene un perfil de absorción único en el espectro infrarrojo, lo que permite que estos sensores detecten y midan la concentración de gases específicos como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). Los sensores IR pueden ser de dos tipos: de transmisión, que requieren una fuente de luz y un detector, y de reflexión, que utilizan un solo dispositivo para medir la luz reflejada. Una ventaja de los sensores infrarrojos es su capacidad para medir concentraciones de gas sin contacto directo, lo que los hace ideales para entornos donde el gas es tóxico o corrosivo. Sin embargo, estos sensores pueden ser costosos y son más efectivos para ciertos tipos de gases, lo que limita su aplicabilidad (L. Wang et al., 2018).

2.3.2 Detección electroquímica.

Los sensores electroquímicos funcionan a través de reacciones químicas que ocurren en electrodos. Cuando un gas objetivo se absorbe en el sensor, provoca una reacción que genera una corriente eléctrica proporcional a la concentración del gas. Estos sensores son particularmente útiles para la detección de gases como el monóxido de carbono (CO), el oxígeno (O_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x).

La principal ventaja de los sensores electroquímicos es su alta sensibilidad y selectividad para gases específicos. Sin embargo, su vida útil puede verse afectada por la contaminación química y la corrosión, lo que puede limitar su uso en ambientes industriales agresivos (Sberveglieri et al., 2009).

2.3.3 Sensores semiconductores.

Los sensores semiconductores, como los basados en óxidos metálicos (MOS), son una opción popular para la detección de gases debido a su bajo costo, alta sensibilidad y tamaño reducido. Estos sensores funcionan mediante la variación de la resistencia

eléctrica del material semiconductor al interactuar con las moléculas de gas. La ferrita de lantano (LaFeO_3) es un ejemplo de material semiconductor que ha demostrado ser eficaz en la detección de gases.

La principal ventaja de los sensores semiconductores es su capacidad para ser miniaturizados y su versatilidad en la detección de múltiples gases. Sin embargo, requieren contacto directo con el gas y pueden ser menos selectivos que otros métodos, lo que puede resultar en interferencias de otros compuestos presentes en el ambiente (Rella, 1999).

2.4 Mecanismos que intervienen en la detección de gases.

Los sensores de gases, especialmente aquellos basados en materiales semiconductores como la ferrita de lantano (LaFeO_3), operan mediante mecanismos físicos y químicos que permiten detectar y cuantificar gases en función de cambios en la resistencia eléctrica, generados por interacciones con el gas objetivo.

2.4.1 Adsorción y desorción de gases.

La adsorción y desorción de gases son mecanismos fundamentales en el funcionamiento de sensores de gases semiconductores. En estos dispositivos, las moléculas de gas interactúan con la superficie del material sensor mediante dos procesos principales: adsorción física y quimisorción.

- Adsorción física- en la adsorción física, las moléculas de gas se adhieren a la superficie del material sensor mediante interacciones de Van der Waals, sin formar enlaces químicos específicos con la superficie. Este tipo de adsorción es característico de gases que no interactúan fuertemente con el material y puede ser reversible al variar la temperatura o presión (Castañeda, 2018).
- Quimisorción- en la quimisorción, las moléculas de gas se unen químicamente a la superficie del semiconductor, formando enlaces que resultan en una transferencia de carga entre el gas y el material sensor. Este fenómeno es crucial para sensores que operan en un rango de temperaturas específico, ya que esta adsorción produce una alteración en la densidad de portadores de carga en la superficie, lo que a su vez cambia la resistencia eléctrica del material. La transferencia de carga afecta la capa de depleción, modificando su espesor y, por tanto, la conductividad del sensor (Barsan & Weimar, 2001).

Los materiales como los óxidos metálicos, entre ellos la ferrita de lantano (LaFeO_3), son altamente eficaces para adsorber gases como O_2 y CO debido a su estructura y propiedades electrónicas, que facilitan la interacción con estas moléculas. En presencia de un gas reductor, como el CO , el gas puede donar electrones al material sensor, disminuyendo la capa de depleción y aumentando la conductividad del sensor. Por otro lado, en presencia de gases oxidantes, el material puede adsorber los electrones de las moléculas de gas, incrementando la capa de depleción y disminuyendo la conductividad (Patil et al., 2024).

- **Desorción térmica y recuperación:** Tras la detección, el sensor suele requerir una recuperación térmica. Al aplicar calor, los gases adsorbidos son liberados de la superficie del semiconductor, permitiendo que el sensor recupere su estado inicial y esté listo para nuevas mediciones. Este proceso es clave para garantizar que el sensor funcione repetidamente sin pérdida de sensibilidad a lo largo del tiempo. (Sanz, 2019).

Este mecanismo de adsorción y desorción de gases, especialmente en sensores basados en semiconductores de óxido de metal como LaFeO_3 , representa una herramienta fundamental en la detección de gases, dado que la respuesta del sensor está directamente relacionada con la interacción entre las moléculas de gas y la superficie del material.

2.4.2 Transferencia de carga y formación de zonas de baja densidad de carga.

La transferencia de carga y la formación de zonas de baja densidad de carga son mecanismos esenciales en el funcionamiento de sensores de gases basados en materiales semiconductores, especialmente en aquellos compuestos por óxidos metálicos

2.4.2.1 Transferencia de carga.

La transferencia de carga se refiere al movimiento de electrones entre las moléculas de gas adsorbidas y la superficie del material semiconductor. Este proceso ocurre principalmente a través de interacciones de quimisorción, en las cuales las moléculas de gas que entran en contacto con la superficie del semiconductor pueden ceder o recibir electrones. Esto genera un cambio en la concentración de portadores de carga (electrones o huecos) en la superficie del material, afectando su conductividad.

- Gases reductores (CO, H₂)- estos gases donan electrones al semiconductor, aumentando la concentración de electrones en la superficie. Como resultado, la conductividad del material se incrementa, ya que la transferencia de electrones disminuye la resistencia del semiconductor.
- Gases oxidantes (Cl₂, O₂, NO₂)- estos gases tienden a aceptar electrones de la superficie del semiconductor, lo que reduce la densidad de portadores de carga disponibles y aumenta la resistencia eléctrica del material (Barsan & Weimar, 2001).

2.4.2.2 Formación de zonas de baja densidad de carga.

La zona empobrecida de portadores es una región en la superficie del semiconductor que se caracteriza por una baja concentración de portadores de carga (electrones en el caso de semiconductores tipo n). La formación de esta región empobrecida es consecuencia de la transferencia de carga que ocurre durante la adsorción de gases oxidantes. En este proceso, los electrones en la superficie del semiconductor se combinan con las moléculas de gas oxidante adsorbidas, creando una zona con déficit de electrones, es decir, una capa empobrecida.

En el caso de un semiconductor tipo n como la ferrita de lantano, la adsorción de un gas oxidante incrementa la zona de depleción, ya que se reduce la concentración de electrones en la superficie. Esto aumenta la resistencia eléctrica del material debido a la menor movilidad de carga a través de esta zona empobrecida.

La zona de depleción afecta la conductividad del semiconductor: al ser mayor la región empobrecida, mayor es la resistencia del material. Esta variación en la resistencia es la base para la detección y cuantificación de gases en sensores semiconductores (Wang et al., 2010).

2.4.3 Cambios en la resistencia eléctrica.

Los cambios en la resistencia eléctrica son el principio operativo central de muchos sensores de gases semiconductores, incluyendo los que utilizan materiales como la ferrita de lantano (LaFeO₃). Estos sensores dependen de la variación en la conductividad del material cuando interactúa con diferentes moléculas de gas en su entorno, permitiendo la detección y, en algunos casos, la cuantificación de estos gases.

2.4.3.1 Mecanismo de cambios en la resistencia.

La resistencia eléctrica de un semiconductor se ve afectada principalmente por la adsorción de moléculas de gas en su superficie. Cuando el gas interactúa con el material semiconductor, ocurre una transferencia de carga entre las moléculas de gas y el semiconductor, lo que altera la densidad de portadores de carga (electrones o huecos) y, en consecuencia, la conductividad del material.

Respuesta a gases reductores:

Cuando un gas reductor, como el monóxido de carbono (CO) o el hidrógeno (H₂), entra en contacto con el semiconductor, las moléculas de gas donan electrones a la superficie del semiconductor, este aumento de electrones incrementa la conductividad, disminuyendo la resistencia eléctrica del material, por lo que el cambio en la resistencia puede medirse y correlacionarse con la concentración del gas reductor presente.

2.4.3.2 Respuesta a gases oxidantes.

En presencia de un gas oxidante, como el oxígeno (O₂) o el dióxido de nitrógeno (NO₂). Las moléculas de gas tienden a tomar electrones de la superficie del semiconductor, al disminuir la cantidad de electrones en la superficie, la conductividad disminuye, lo que resulta en un incremento de la resistencia eléctrica y este aumento de resistencia puede también cuantificarse, proporcionando una respuesta que indica la presencia del gas oxidante (Fraigi et al., 2001).

2.4.3.3 Factores que afectan los cambios en la resistencia.

La magnitud de los cambios en la resistencia está influenciada por varios factores:

Temperatura de operación: La eficiencia de la adsorción y desorción de gases en la superficie del semiconductor depende en gran medida de la temperatura, lo que puede mejorar o reducir la sensibilidad del sensor a ciertos gases,

Concentración del gas: A mayores concentraciones del gas objetivo, los cambios en la resistencia suelen ser más pronunciados, lo que facilita la correlación entre la resistencia y la cantidad de gas.

Estructura y morfología del Material: La porosidad y la superficie activa del semiconductor afectan el número de sitios de adsorción disponibles, lo cual puede influir en la magnitud de los cambios de resistencia (Castañeda Aviña, 2018).

2.4.4 Reacciones superficiales catalíticas.

En estos sensores, las reacciones catalíticas en la superficie del material juegan un papel clave en la adsorción de moléculas de gas y en la transferencia de carga, lo que permite la detección y monitoreo de ciertos gases en el ambiente.

2.4.4.1 Mecanismo de reacciones catalíticas en sensores.

Los materiales semiconductores pueden actuar como catalizadores para la adsorción y descomposición de moléculas de gas en su superficie. Estos procesos pueden involucrar tanto gases reductores como oxidantes, y su resultado suele ser una transferencia de electrones entre las moléculas de gas y el material. Este cambio en la carga superficial afecta la resistencia del semiconductor, proporcionando una señal que puede interpretarse en función de la concentración del gas objetivo.

Gases Reductores (CO, H₂, CH₄): Cuando moléculas de gases reductores alcanzan la superficie del semiconductor, la superficie actúa como catalizador y facilita la reacción de oxidación del gas. Por ejemplo, en la reacción de CO con oxígeno superficial:



Este proceso libera electrones a la red del semiconductor, aumentando la conductividad (disminuyendo la resistencia) del sensor.

Gases Oxidantes (ejemplo, NO₂, O₂): En el caso de gases oxidantes, la superficie del semiconductor cataliza la adsorción del gas, que puede captar electrones de la red del semiconductor. Por ejemplo, el oxígeno en su forma molecular puede adsorberse en la superficie como un ion negativo, atrayendo electrones y aumentando la resistencia del sensor:



Esta reducción de electrones en la superficie disminuye la conductividad del semiconductor (Eranna et al., 2004).

Diferentes factores pueden afectar la capacidad catalítica como lo son:

- Temperatura de operación las temperaturas elevadas suelen favorecer estas reacciones catalíticas, permitiendo una mayor sensibilidad a ciertos gases.

- Área superficial. materiales con alta porosidad y gran superficie específica ofrecen más sitios activos para la adsorción de gases, lo que mejora la sensibilidad y eficiencia del sensor.
- Composición del material- en materiales como la ferrita de lantano, la estructura y tipo de enlaces influye en la actividad catalítica, permitiendo una mayor adsorción y reacción de moléculas de gases.

2.4.5 Desorción térmica y recuperación.

2.4.5.1 Desorción Térmica.

La desorción térmica se refiere al proceso mediante el cual los gases adsorbidos en la superficie del sensor son liberados o expulsados mediante el aumento de la temperatura. Este fenómeno es esencial para restablecer la superficie activa del semiconductor y permitir que el sensor esté listo para detectar nuevas concentraciones de gas. La temperatura a la que ocurre la desorción depende de la energía de enlace entre las moléculas de gas y la superficie del sensor. Los gases que forman enlaces más débiles se liberan a temperaturas más bajas, mientras que aquellos con enlaces más fuertes requieren temperaturas más elevadas (Korotcenkov, 2007).

Al calentar el sensor, se proporciona la energía necesaria para romper los enlaces entre las moléculas de gas y los sitios activos en la superficie del semiconductor. Esto permite la liberación del gas hacia la atmósfera y restablece la superficie del sensor.

2.4.5.2 Recuperación del Sensor.

La recuperación se refiere a la capacidad del sensor para volver a su estado inicial de resistencia eléctrica tras la desorción del gas. Es una etapa crítica para que el sensor pueda ser reutilizado en ciclos de detección continuos. Un sensor que no se recupera completamente puede sufrir efectos de envenenamiento o saturación, lo que afecta su precisión y vida útil.

En los sensores basados en LaFeO_3 , la recuperación suele ser facilitada por el calentamiento controlado del sensor. Durante este proceso:

- La superficie del material vuelve a su estado de equilibrio, eliminando los gases adsorbidos.

- Se restablece la densidad de portadores de carga, regresando a los valores originales de conductividad.

En estudios de sensores a base de ferrita de lantano, se ha demostrado que la recuperación puede mejorarse utilizando técnicas de pulso térmico, donde el sensor se calienta brevemente a temperaturas más altas para acelerar la desorción de moléculas de gas. Sin embargo, esto debe ser manejado con precaución para evitar daños al material o a los elementos electrónicos del sensor.

Estos procesos permiten que el sensor tenga una respuesta repetible y confiable en aplicaciones de monitoreo de gases. Sin una adecuada desorción y recuperación, el sensor puede mostrar una respuesta degradada o una señal de base alterada, afectando la precisión en la detección.

Por ejemplo, para aplicaciones en ambientes industriales, donde los sensores están expuestos a cambios rápidos en la concentración de gases, la capacidad de recuperación rápida es crítica para evitar falsas alarmas o tiempos muertos prolongados (Korotcenkov, 2007).

2.4.6 Interacción con el campo eléctrico y polarización de la superficie.

La interacción con el campo eléctrico y la polarización de la superficie son mecanismos fundamentales que afectan directamente la respuesta del sensor a diferentes gases. Estos procesos influyen en la variación de la resistencia eléctrica del material, un fenómeno clave para la detección de gases.

2.4.6.1 Interacción con el campo eléctrico.

Cuando un semiconductor se expone a un campo eléctrico externo, se genera una redistribución de los portadores de carga en la superficie y el volumen del material. Esta redistribución puede afectar significativamente las propiedades eléctricas del semiconductor. En el caso de LaFeO_3 , un material tipo p o n dependiendo de la atmósfera de gas presente, el campo eléctrico puede inducir una variación en la densidad de portadores de carga, como electrones o huecos.

En presencia de gases reductores (como el hidrógeno), el material puede ganar electrones, lo que incrementa la concentración de portadores de carga y disminuye la resistencia eléctrica. En cambio, en presencia de gases oxidantes (como el oxígeno), el material puede perder electrones, aumentando la resistencia (Barsan & Weimar, 2001).

Este fenómeno se puede describir a través de la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde ∇^2 es el operador laplaciano, que es una medida de la curvatura de un campo escalar, φ es el potencial eléctrico, ρ es la densidad de carga y ε es la permitividad del material. El campo eléctrico influye en la acumulación de carga en la superficie, afectando la conductividad del semiconductor.

2.4.6.2 Efecto de la polarización en la respuesta del sensor

La polarización de la superficie afecta la formación de una capa de depleción, donde la densidad de portadores de carga disminuye cerca de la superficie. En LaFeO_3 , un aumento en la capa de depleción genera un incremento en la resistencia del material, mientras que una disminución de la capa de depleción resulta en una menor resistencia.

Este fenómeno permite que el sensor pueda responder a concentraciones específicas de gases en el ambiente. La interacción con el campo eléctrico y la polarización influyen en la sensibilidad del sensor y su capacidad para distinguir entre gases con diferentes propiedades redox.

2.4.6.3 Importancia en el diseño de sensores.

Comprender la interacción con el campo eléctrico y la polarización de la superficie es esencial para optimizar el diseño de sensores de gases. Modificar la geometría del sensor, la temperatura de operación y la composición química del material puede influir en el grado de polarización y, por ende, en la sensibilidad y selectividad del dispositivo.

Resumiendo, los distintos mecanismos antes mencionados se muestra la Tabla 2 en donde se puede observar una pequeña descripción de cada mecanismo, un ejemplo de cada uno y sus costos relativos.

Tabla 2. Mecanismos de interacción física en la superficie del material.

Mecanismo	Descripción	Ejemplo de aplicación	Costos relativos
Adsorción y desorción de gases	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorción física: moléculas se adhieren por Van der Waals. - Quimisorción: moléculas forman enlaces, transfiriendo carga y cambiando la resistencia del sensor. 	Sensores tipo n (ejemplo, LaFeO ₃ con O ₂ y CO)	Bajo a moderado (materiales de superficie accesibles, pero dependen de la precisión de la temperatura)
Transferencia de carga y zonas de baja densidad de carga	Transferencia de electrones desde el gas, creando una capa de baja densidad de carga y alterando la conductividad.	Sensores de gases oxidantes y reductores	Moderado a alto (necesidad de materiales conductores específicos y control de pureza)
Cambios en la resistencia eléctrica	Cambios en la densidad de portadores generan una señal medible para correlacionar con la concentración de gas.	Sensores resistivos de óxido de metal	Bajo a moderado (requiere materiales adecuados, pero tecnología sencilla)
Reacciones superficiales catalíticas	La ferrita de lantano, entre otros, cataliza la reacción del gas en la superficie, mejorando sensibilidad y selectividad.	Sensores selectivos de NO ₂ y gases de combustión	Moderado a alto (materiales catalíticos pueden elevar los costos)
Desorción térmica y recuperación	Aumento de temperatura desorbe gases adsorbidos, restaurando el estado inicial del sensor para mediciones repetitivas.	Sensores térmicos	Moderado (calefacción requiere energía constante y regulación precisa)
Interacción con campo eléctrico y polarización	Polarización de moléculas mediante campos eléctricos, ajustando la sensibilidad y selectividad en tiempo real.	Sensores avanzados de polarización dinámica	Alto (componentes electrónicos y campos eléctricos complejos)

2.5 Sensores gases.

2.5.1 Definición.

Un sensor de gases comercial Figura. 2.1 es un dispositivo que detecta y mide la presencia de gases específicos en un entorno determinado. Su principal función es transformar la interacción entre el gas objetivo y el sensor en una señal eléctrica que puede ser procesada y analizada para determinar la concentración del gas. Estos dispositivos son fundamentales en aplicaciones industriales, ambientales, de seguridad y en el control de calidad del aire, ya que permiten monitorear gases peligrosos o contaminantes y activar mecanismos de alerta o control cuando las concentraciones exceden límites seguros. (Sberveglieri et al., 2009).



Figura 0.1- Sensor de gas metano - MQ-4.

Dependiendo del tipo de sensor, el proceso de detección puede involucrar diferentes principios físicos y químicos. Entre los más comunes se encuentran los sensores basados en semiconductores, que utilizan materiales sensibles como óxidos metálicos para alterar su conductividad en presencia del gas; los sensores electroquímicos, que generan una corriente eléctrica a partir de una reacción química; y los sensores ópticos, que miden la absorción o emisión de luz cuando un gas interactúa con una fuente luminosa (Craven et al., 1996). La elección del tipo de sensor depende del gas que se quiere detectar, la sensibilidad requerida y las condiciones del entorno en el que se utilizará.

Los sensores de gases funcionan transformando la presencia de un gas específico en una señal eléctrica que puede ser analizada y empleada para tomar decisiones o implementar acciones. Según su diseño y la tecnología empleada, estos dispositivos pueden basarse en diversos principios de detección, como variaciones en la

conductividad eléctrica, reacciones químicas, absorción de luz, entre otros mecanismos.

2.5.2 Clasificación.

Los sensores de gases pueden clasificarse en diferentes categorías según diversos criterios, como el principio de detección, el tipo de tecnología utilizada y la aplicación específica, algunas de las principales clasificaciones son:

- Sensores de gases electroquímicos:

Los sensores electroquímicos son ampliamente utilizados en la detección de gases tóxicos debido a su alta selectividad y sensibilidad, estos sensores operan mediante la generación de corriente eléctrica a través de reacciones electroquímicas que ocurren en electrodos específicos cuando el gas objetivo interactúa con ellos (Röck et al., 2008).

- Sensores de gases de estado sólido:

Los sensores de gases de estado sólido se basan en la modificación de la conductividad eléctrica de un material semiconductor cuando está expuesto a gases específicos (Barsan & Weimar, 2001).

Estos sensores son altamente estables y ofrecen una buena selectividad para diferentes gases, lo que los hace ideales para aplicaciones en entornos industriales.

- Sensores de gases basados en semiconductores:

Los sensores de gases basados en semiconductores son ampliamente utilizados debido a su bajo costo, alta sensibilidad y facilidad de integración en sistemas de detección.

Estos sensores aprovechan los cambios en la conductividad eléctrica de materiales semiconductores cuando están expuestos a gases específicos para detectar la presencia y concentración de dichos gases (Korotcenko, 2019).

- Sensores de gases ópticos:

Los sensores ópticos son capaces de detectar gases utilizando la absorción de luz por parte de los gases en determinadas longitudes de onda (Hodgkinson & Tatam, 2013)

Estos sensores son altamente selectivos y pueden ofrecer una detección rápida y precisa de una amplia gama de gases.

2.6 Sistemas para evaluar materiales como sensores de gases a base de semiconductores.

Los sistemas para evaluar materiales como sensores de gases a base de semiconductores son esenciales para determinar su eficacia, selectividad, estabilidad y sensibilidad bajo diversas condiciones atmosféricas. Estos sistemas de evaluación se componen de varios métodos y técnicas que permiten una caracterización puntual de las propiedades y el rendimiento de los materiales semiconductores utilizados en la detección de gases.

2.6.1 Partes del sistema de detección de sensores.

Cámara de control de atmosfera- La cámara de pruebas es un entorno cerrado donde se pueden controlar con precisión las condiciones de temperatura que permite evaluar la respuesta del material bajo condiciones específicas

Suministro de energía- Para elevar la temperatura en el sensor de gases existen diversos métodos y fuentes de energía que pueden ser utilizados.

- Resistencias Eléctricas (placas de calentamiento), son dispositivos que convierten la energía eléctrica en calor mediante el efecto Joule, sus principales ventajas son el control preciso de la temperatura, rápida respuesta térmica y la integración en sistemas automatizados.
- Lámparas de Infrarrojos, emiten radiación IR que calienta los objetos directamente por absorción de la radiación cuentan con ventajas como el calentamiento rápido y localizado además de ser eficientes para calentar superficies específicas y desventajas puntuales como que no son las más adecuadas para calentar volúmenes grandes de manera uniforme y
- requieren medidas de seguridad para proteger contra la exposición a radiación IR.
- Microondas, calientan los materiales mediante la excitación de las moléculas de agua o dipolos en el material, generando calor por fricción molecular, cuentan con ventajas de calentamiento rápido y volumétrico sumando una alta eficiencia energética y desventajas como la limitación a materiales que contienen agua o dipolos, pueden requerir blindaje especial para seguridad.

Controlador del suministro de energía- es esencial contar con un controlador del suministro de energía para asegurar la precisión y estabilidad de la temperatura, optimizar el desempeño del sensor, prevenir daños, mejorar la eficiencia energética y

contar con velocidades de calentamiento adecuadas en función de la aplicación. El controlador protege los materiales sensibles del sensor contra sobrecalentamientos y permite una operación dentro de límites seguros, además de facilitar la integración en sistemas automatizados (Pérez, 2023).

Sensor de temperatura- un sensor de temperatura es crucial, ya que garantiza que las pruebas se realicen bajo condiciones térmicas controladas y precisas debido a que la temperatura influye directamente en las propiedades eléctricas y la sensibilidad de los semiconductores, permite monitorear y mantener la temperatura óptima durante las pruebas, asegurando la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados. Es importante mencionar que existen distintos tipos de sensores de temperatura enfocados en distintas aplicaciones dependiendo el rango de temperatura a evaluar.

Sistema de vacío/inyección de gas- este sistema permite ajustar la adición de gases y eliminar interferencias de otros componentes gaseosos, lo cual es fundamental para probar la selectividad y sensibilidad del sensor, además el control del vacío y la inyección de gas facilita la evaluación de la respuesta del sensor a cambios específicos en la atmósfera, asegurando que los resultados de las pruebas sean reproducibles y fiables, y ayudando a identificar el comportamiento del sensor bajo diferentes condiciones de presión y composición de gases (G. Korotcenko, 2019).

Flujómetro- permite controlar y medir con precisión el flujo de gas hacia el sensor, asegurando que la concentración de gas sea constante, el control del flujo de gas garantiza que las variaciones en la respuesta del sensor se deban a las propiedades del material y no a fluctuaciones en la cantidad de gas suministrado, además ayuda a mantener condiciones experimentales estables y repetibles, lo que es fundamental para obtener datos confiables y comparables.

Milióhmetro (sistema de recolección de datos)- la resistencia del sensor varía en respuesta a la presencia de gases, estas variaciones pueden ser muy pequeñas, por lo tanto, un Milióhmetro permite detectar estos cambios sutiles con exactitud, proporcionando datos sobre la sensibilidad y el comportamiento del material semiconductor.

2.6.2 Cámara de medición.

La cámara de medición es un componente fundamental Esta cámara es un entorno cerrado y controlado donde se pueden regular y mantener con precisión las

condiciones necesarias (vacío, suministro de gas, incremento de temperatura) para evaluar el rendimiento de los sensores.

Control de Ambiente- la cámara de medición permite controlar variables ambientales críticas como la temperatura, la humedad y la presión. Esto es esencial para simular las condiciones en las que el sensor será utilizado y para evaluar su comportamiento bajo diferentes escenarios.

Inyección de Gases de Prueba- la cámara está equipada con sistemas para la introducción precisa de gases de prueba en concentraciones controladas. Esto permite evaluar la sensibilidad y selectividad del sensor para diferentes gases y sus mezclas.

Monitoreo y Registro de Datos- la cámara de medición está conectada a sistemas de adquisición de datos que registran continuamente las respuestas del sensor de temperatura y los electrodos del Milióhmetro, así como las condiciones ambientales dentro de la cámara, esto permite un análisis detallado y la generación de perfiles de respuesta del sensor de temperatura.

Aislamiento Térmico- la cámara de medición está diseñada con materiales que proporcionan un buen aislamiento térmico, permitiendo mantener la temperatura deseada con precisión y evitando influencias externas.

2.6.3 Suministro de gas.

En cuanto a las fuentes de gas, se emplean cilindros de gas y, en algunos casos, generadores específicos. Los cilindros de gas, utilizados para almacenar gases puros o mezclas de gases a alta presión, están equipados con reguladores que permiten ajustar la presión de salida y garantizar un flujo constante. Por otro lado, los generadores de gas son dispositivos capaces de producir gases específicos, como gases de combustión, a partir de otras sustancias. Este método elimina la necesidad de cilindros adicionales y permite almacenar los gases generados en recipientes apropiados para su posterior utilización.

El transporte de los gases desde las fuentes hasta el sensor se realiza mediante un sistema de tuberías y conectores cuidadosamente diseñados. Las tuberías están fabricadas con materiales inertes, como acero inoxidable, poliuretano o silicona, que no reaccionan con los gases utilizados, asegurando así que el gas llegue al sensor sin alteraciones ni contaminantes. Las conexiones entre los distintos elementos del

sistema se realizan mediante conectores y juntas de alta calidad, que garantizan una unión segura y hermética, evitando fugas que puedan comprometer la precisión y repetitividad de las pruebas.

Este diseño integral del sistema de suministro de gas no solo asegura el correcto funcionamiento del sensor, sino que también proporciona un control riguroso sobre las condiciones experimentales, lo cual es fundamental para obtener resultados confiables y reproducibles.

2.6.4 Control de temperatura.

El control de temperatura en sistemas se lleva a cabo mediante un conjunto de componentes para mantener la temperatura dentro de los rangos deseados.

2.6.4.1 Sensores de temperatura.

Los termopares tipo K, son sensores utilizados para medir temperaturas en un amplio rango (-200°C a 1370°C). Son dispositivos que convierten las diferencias de temperatura en un voltaje que puede ser interpretado por un sistema de control, estos se pueden observar en la Figura. 2.2.



Figura 0.2- Termopar Tipo K.

RTDs (Resistive Temperature Detectors)- estos sensores funcionan basados en la variación de resistencia de un metal con la temperatura. Son precisos y estables, adecuados para mediciones precisas.

2.6.4.2 Controladores de temperatura.

Controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo)- estos controladores ajustan la potencia suministrada a los elementos calefactores para mantener la temperatura estable. Utilizan un algoritmo que toma en cuenta la diferencia entre la temperatura medida y la deseada (error), ajustando la salida para minimizar este error.

Controladores programables- dispositivos como el REX C-100 permiten establecer rangos de temperatura específicos y programar secuencias de control. Estos controladores pueden activar sistemas de calefacción o enfriamiento para mantener la temperatura deseada de forma precisa.

2.6.4.3 Elementos calefactores.

Resistencias eléctricas- convertidores de energía eléctrica en calor mediante el efecto Joule, proporcionando un calentamiento preciso y controlable.

Lámparas de infrarrojos- utilizadas para calentamientos rápidos y localizados, estas lámparas emiten radiación que calienta los objetos directamente.

Calentadores de Inducción- utilizan campos electromagnéticos para calentar materiales conductores mediante corrientes inducidas.

Sistemas de enfriamiento:

Refrigeración por aire- ventiladores y sistemas de circulación de aire pueden ser usados para disipar el calor y mantener la temperatura deseada.

Refrigeración por Líquidos- sistemas de enfriamiento mediante líquidos refrigerantes, que circulan a través de intercambiadores de calor para absorber y disipar el calor.

2.7 Semiconductores: definición y características.

2.7.1 Sensibilidad.

Esta propiedad define la capacidad de un semiconductor para detectar y responder a estímulos externos, como cambios en la temperatura, la luz o la presencia de gases. Es esencial para dispositivos como sensores, donde una alta sensibilidad permite la detección precisa de pequeñas variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, en sensores de gases, una mayor sensibilidad asegura que incluso bajas concentraciones de un gas objetivo sean detectadas rápidamente (Pennisi et al., 2024)

2.7.1.1 Factores que afectan la sensibilidad.

Temperatura- la sensibilidad del sensor puede variar significativamente con la temperatura. LaFeO_3 generalmente muestra una mayor sensibilidad a temperaturas más altas, pero esto también puede afectar la estabilidad y la vida útil del sensor.

Humedad- la presencia de humedad puede influir en la respuesta del sensor, ya que puede interactuar con los gases y con la superficie del LaFeO_3 . Se requieren estrategias para minimizar la interferencia de la humedad.

Concentración de gases Interferentes- la presencia de otros gases en el ambiente puede afectar la precisión del sensor. LaFeO_3 debe ser calibrado para garantizar la selectividad y minimizar las interferencias.

2.7.2 Recuperación.

La capacidad de un semiconductor para regresar a su estado original tras la detección de un estímulo es igualmente importante. Un tiempo de recuperación rápido es crítico para aplicaciones que requieren respuestas rápidas y sucesivas, como en la conmutación de potencia en MOSFETs de SiC. Una recuperación eficiente no solo mejora la velocidad del dispositivo, sino que también minimiza la energía perdida y reduce el riesgo de daños debido a sobrecargas (Ku & Chung, 2023)

2.8 Mecanismo de formación del par electrón-hueco.

2.8.1 Formación del par electrón hueco en un semiconductor Intrínseco.

Los pares electrón-hueco se generan al romperse los enlaces entre los átomos. Este fenómeno ocurre cuando un electrón recibe suficiente energía para excitarse desde la banda de valencia a la banda de conducción, dejando detrás de sí un vacío en la estructura cristalina conocido como hueco. Los huecos actúan como portadores de carga positiva y contribuyen a la conducción eléctrica en el material.

Además, estos pares electrón-hueco no solo se generan, sino que también pueden experimentar procesos de aniquilación. La aniquilación de un par electrón-hueco ocurre cuando un electrón en la banda de conducción pierde energía y realiza una transición hacia la banda de valencia, ocupando el estado vacío dejado por un hueco como se describe en la Figura. 2.3. Este proceso, conocido como recombinación,

resulta en la eliminación del par electrón-hueco y puede liberar energía en forma de luz (fotones) o calor.

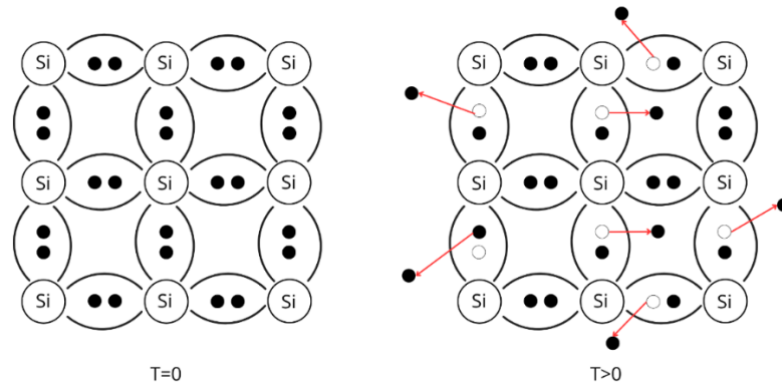


Figura 0.3- Liberación de energía en la formación del par electrón hueco.

Al aplicar una excitación externa a una muestra semiconductor, se induce un flujo ordenado de electrones y huecos. Esta excitación externa puede ser un campo eléctrico aplicado mediante un voltaje, que impulsa a los portadores de carga a moverse a través del material.

En este contexto, aunque son principalmente los electrones libres los que se desplazan físicamente a través del semiconductor, el comportamiento de los huecos también es crucial para la conducción eléctrica. Los huecos, que representan la ausencia de electrones en la banda de valencia, se comportan como portadores de carga positiva y parecen moverse en dirección contraria a los electrones cuando éstos se desplazan para llenar esos vacíos como se observa en la Figura. 2.4.

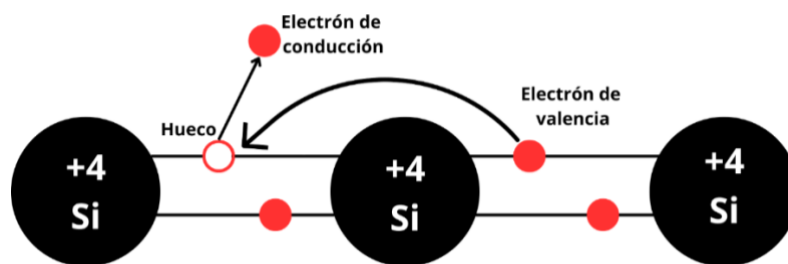


Figura 0.4- Mecanismo de la formación del par electrón hueco.

2.8.2 Formación del par electrón hueco en un semiconductor extrínseco.

El dopaje con elementos del grupo IIIA del sistema periódico, como el aluminio (Al), el galio (Ga) o el indio (In), es una técnica comúnmente utilizada en la ingeniería de semiconductores. Estos elementos, cuando se introducen como impurezas en un semiconductor, aportan tres electrones para formar enlaces con los átomos del

semiconductor anfitrión. Sin embargo, dado que los átomos del semiconductor generalmente requieren cuatro electrones para completar sus enlaces covalentes, la introducción de estos elementos crea un déficit de electrones, conocido como hueco. Debido a esta característica, estos elementos se denominan aceptores.

Los semiconductores dopados con impurezas aceptoras se conocen como "semiconductores tipo p" los cuales se ilustran en la Figura. 2.5. En estos materiales, la concentración de huecos es mayor que la de electrones, lo que significa que los huecos son los portadores de carga mayoritarios. Esta característica es fundamental para el comportamiento eléctrico de los dispositivos semiconductores tipo p.

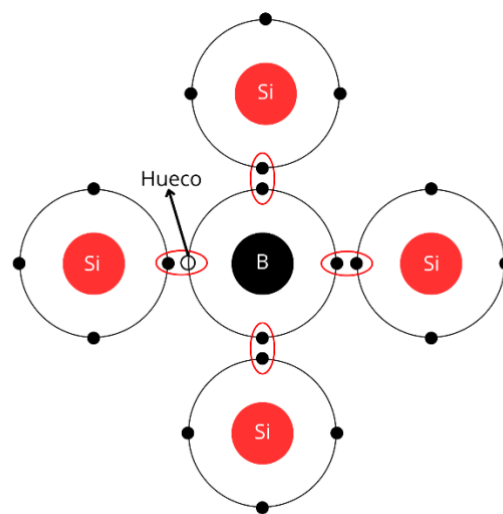


Figura 0.5- Ejemplo semiconductor tipo p dopado.

Cuando se establece un campo eléctrico en una muestra de material tipo p, los huecos juegan un papel crucial en la conducción de la corriente eléctrica. Aunque los huecos representan la ausencia de electrones, actúan como portadores de carga positiva y se mueven desde la región de mayor potencial hacia la de menor potencial dentro del campo eléctrico aplicado. Este movimiento de huecos facilita el flujo de electrones en sentido contrario, desde la región de menor potencial a la de mayor potencial, lo que da lugar a la corriente eléctrica en el circuito.

Este mecanismo de conducción es esencial para el funcionamiento de una variedad de dispositivos electrónicos, incluidos los diodos y transistores, donde la manipulación precisa del flujo de huecos y electrones permite controlar las propiedades eléctricas del dispositivo.

El dopaje con elementos del grupo VA del sistema periódico, como el fósforo (P), el antimonio (Sb) o el arsénico (As), es una práctica común en la ingeniería de semiconductores. Estos elementos, cuando se introducen como impurezas en un semiconductor, aportan cinco electrones de valencia. Cuatro de estos electrones forman enlaces covalentes con los átomos del semiconductor anfitrión, mientras que el quinto electrón queda libre para moverse a través del material. Debido a esta capacidad de donar electrones adicionales, estos elementos se denominan dadores.

Los semiconductores dopados se pueden observar en la Figura. 2.6, los cuales cuentan con impurezas donadoras y se les conocen como semiconductores tipo n. En estos materiales, la concentración de electrones libres es mayor que la de huecos, lo que significa que los electrones son los portadores de carga mayoritarios. Este exceso de electrones libres facilita la conducción eléctrica.

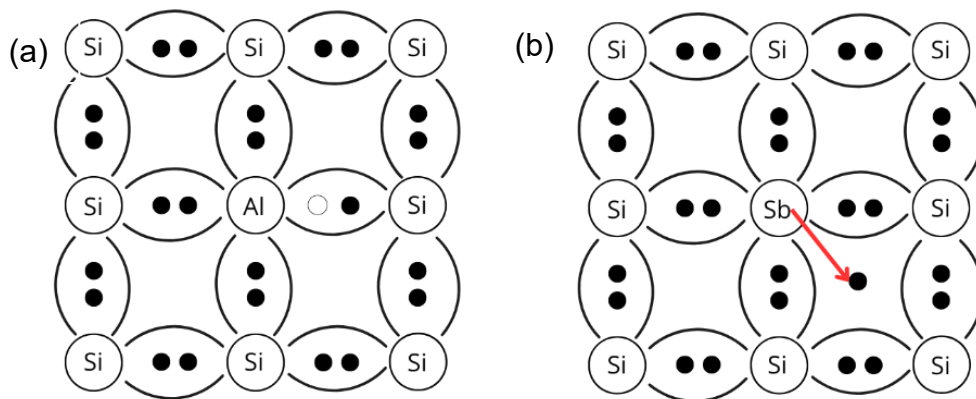


Figura 0.6- Mecanismo de conducción en semiconductores tipo "n" dopados (a) Al y (b) Sb.

Los materiales tipo n se comportan de manera similar a los metales en términos de su capacidad para conducir corriente eléctrica con relativa facilidad. Esto se debe a que los electrones libres introducidos por las impurezas dadoras requieren poca energía para moverse a través del material, permitiendo una conducción eficiente de la corriente eléctrica. Este comportamiento es fundamental para el funcionamiento de una amplia variedad de dispositivos electrónicos, incluyendo transistores y diodos, donde el control preciso del flujo de electrones es crucial para el rendimiento del dispositivo (Sze & Ng, 2006).

2.8.3 Activación de los semiconductores: mecanismos.

La activación de los semiconductores implica diversos mecanismos que mejoran su capacidad para conducir electricidad o participar en reacciones químicas bajo ciertas condiciones.

Excitación térmica- cuando se aplica calor a un semiconductor, la energía térmica aumenta las vibraciones de la red cristalina, elevando la energía de los electrones. Esta energía adicional puede ser suficiente para que los electrones de la banda de valencia salten a la banda de conducción, generando pares electrón-hueco. Este salto ocurre cuando la energía térmica supera la brecha de energía (gap) entre las dos bandas, al incrementarse el número de electrones en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia, se mejora la conductividad eléctrica del semiconductor (Sze & Ng, 2006). Más portadores de carga libres significan una mejor capacidad para conducir corriente eléctrica. La cantidad de portadores de carga generados por excitación térmica es altamente dependiente de la temperatura. A temperaturas más altas, más electrones adquieren la energía necesaria para cruzar la brecha de energía como se muestra en la Figura. 2.7.

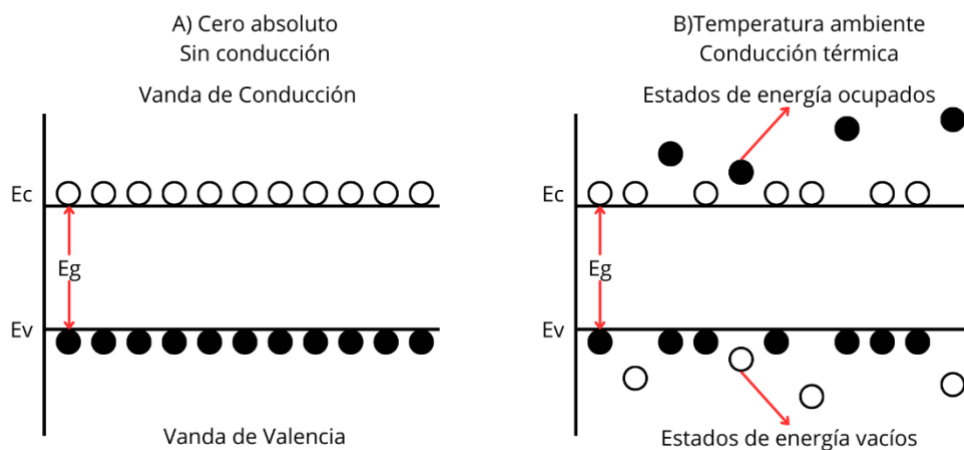


Figura 0.7- Comportamiento energético de un semiconductor en función de la temperatura A) ejemplificación de nula conducción de energía, B) ejemplificación de conducción térmica.

Excitación fotónica- la excitación fotónica es un proceso clave en la activación de semiconductores mediante la absorción de luz. Cuando un semiconductor es expuesto a luz (fotones) con suficiente energía, estos fotones pueden ser absorbidos por los electrones en la banda de valencia del semiconductor, la energía del fotón absorbido

excita a los electrones, permitiéndoles superar la brecha de energía (band gap) entre la banda de valencia y la banda de conducción. Como resultado, los electrones son promovidos a la banda de conducción, dejando huecos en la banda de valencia, este proceso crea pares electrón-hueco, donde los electrones en la banda de conducción y los huecos en la banda de valencia actúan como portadores de carga. Con más electrones libres en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia, la conductividad del semiconductor aumenta, permitiendo el flujo de corriente eléctrica cuando se aplica un campo eléctrico.

2.8.4 Composición química de semiconductores.

La conductividad de los semiconductores puede ser alterada sustancialmente mediante la introducción de impurezas procesadas, fenómeno que se conoce con el nombre de dopaje.

Semiconductores elementales:

Silicio (Si)- es el semiconductor más utilizado, especialmente para la fabricación de dispositivos electrónicos y fotovoltaicos. El silicio puro se dopa con elementos como el fósforo para obtener un material tipo n o con boro para obtener un material tipo p. Sin embargo, es menos común como semiconductor elemental, a pesar de haber sido uno de los primeros materiales en utilizarse para la fabricación de transistores. Pero de la misma manera que el silicio, puede ser dopado para formar materiales tipo n y tipo p.

Germanio (Ge)- el germanio es más más abundante que el silicio. Los transistores fueron posibles gracias a este material en sus primeras etapas. Al igual que el silicio, se puede dopar para crear materiales de tipo n y tipo p. Como el silicio, puede ser dopado para formar materiales tipo n y tipo p.

Semiconductores compuestos:

El arseniuro de galio (GaAs)- el arseniuro de galio (GaAs) es un compuesto semiconductor hecho de galio y arsénico. Es un semiconductor de separación directa III-V con una estructura cristalina de blenda de zinc. El cristal está formado por dos subredes cúbicas centradas en las caras (FCC) que están desplazadas entre sí por la mitad de la diagonal del cubo FCC. Esta configuración también se conoce como esfalerita cúbica.

Fosforo de indio (InP)- es un compuesto semiconductor de fósforo e indio, similar al arseniuro de galio. es uno de los materiales electrónicos y fotónicos más innovadores; es un candidato para reducir costos, proporcionar una buena conductividad térmica y propiedades mecánicas relevantes (Streetman & Banerjee, 2005).

Carburo de silicio (SiC)- compuesto de silicio (Si) y carbono (C), es conocido por su alta resistencia y capacidad para operar a altas temperaturas y voltajes. Se usa en dispositivos de potencia y en aplicaciones automotrices y de energía. es un material base semiconductor que se compone de silicio puro y carbono puro. Puede administrar nitrógeno o fósforo al SiC para formar un semiconductor de tipo n, o administrar berilio, boro, aluminio o galio para formar un semiconductor de tipo p.

Seleniuro de cadmio (CdSe)- compuesto semiconductor II-VI con un ancho de banda de energía prohibida de 1,67 eV (≈ 300 K) y un alto poder de frenado para la radiación nuclear. Su estructura cristalina es hexagonal (wurtzita) y se lo utiliza en celdas solares, transistores, diodos emisores de luz, dispositivos electroluminiscentes, detectores de radiación nuclear a temperatura ambiente y dispositivos ópticos no lineales.

Otros materiales semiconductores:

Telururo de cadmio- compuesto cristalino estable formado a partir de cadmio y telurio. Se utiliza principalmente como material semiconductor en telururo de cadmio fotovoltaico y una ventana óptica de infrarrojos. Suele estar emparedado con sulfuro de cadmio para formar una célula fotovoltaica de unión p-n.

Seleniuro de cobre-indio-galio (CIGS)- El cobre indio (di) seleniuro (CIGS) es un material semiconductor I-III-VI₂ compuesto de cobre, indio, galio y selenio. El material es una solución sólida de seleniuro de cobre e indio (a menudo abreviado «CIS») y seleniuro de galio de cobre. Tiene una fórmula química de $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, donde el valor de x puede variar desde 0 (seleniuro de indio puro de cobre) a 1 (seleniuro de galio de cobre puro). CIGS es un semiconductor unido tetraédricamente como se puede observar en la Figura. 2.8, con la estructura cristalina de calcopirita, y una banda prohibida que varía continuamente con x desde aproximadamente 1,0 eV (para seleniuro de indio y cobre) hasta aproximadamente 1,7 eV (para seleniuro de galio y cobre) (Poortmans & Ivanovich, 2006).

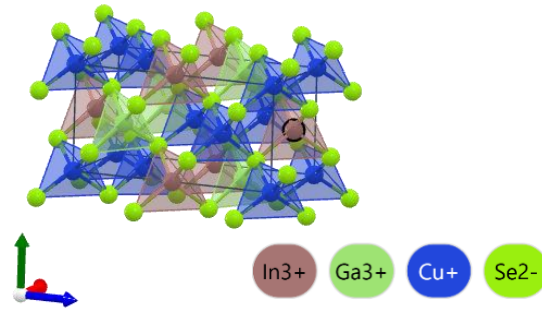


Figura 0.8- Estructura del Seleniuro de cobre, indio y galio (Jain et al., 2013).

2.9 Sensibilidad y recuperación.

Sensibilidad- esta propiedad define la capacidad de un semiconductor para detectar y responder a estímulos externos, como cambios en la temperatura, la luz o la presencia de gases. Es esencial para dispositivos como sensores, donde una alta sensibilidad permite la detección precisa de pequeñas variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, en sensores de gases, una mayor sensibilidad asegura que incluso bajas concentraciones de un gas objetivo sean detectadas rápidamente (Pennisi et al., 2024)

Recuperación- se define como la capacidad de un semiconductor para regresar a su estado original tras la detección de un estímulo es igualmente importante. Un tiempo de recuperación rápido es crítico para aplicaciones que requieren respuestas rápidas y sucesivas, como en la conmutación de potencia en MOSFETs de SiC. Una recuperación eficiente no solo mejora la velocidad del dispositivo, sino que también minimiza la energía perdida y reduce el riesgo de daños debido a sobrecargas (Ku & Chung, 2023).

2.10 Funcionamiento del sensor (semiconductor).

2.10.1 Principio de operación de sensores semiconductores.

El funcionamiento de un sensor de gas basado en semiconductores, como la ferrita de lantano (LaFeO_3), se basa en la interacción entre las moléculas de gas y la superficie del material semiconductor. La ferrita de lantano presenta una estructura tipo perovskita, la cual facilita la adsorción de gases en su superficie. Cuando un gas específico, como el monóxido de carbono (CO) o el dióxido de nitrógeno (NO_2), entra

en contacto con el sensor, las moléculas de gas se adsorben en la superficie del semiconductor. Este proceso de adsorción provoca una transferencia de carga entre las moléculas de gas y el semiconductor, lo que modifica la densidad de portadores de carga en el material (Rella, 1999).

Esta modificación en la densidad de portadores de carga resulta en un cambio en la conductividad eléctrica del semiconductor, que es medido y utilizado para detectar la presencia y concentración del gas. En el caso de LaFeO_3 , su capacidad para operar a temperaturas elevadas y su estabilidad química hacen que sea particularmente efectivo para la detección de gases en ambientes industriales. Además, la respuesta del sensor puede ser ajustada modificando la microestructura del material, lo que permite optimizar su sensibilidad y selectividad para aplicaciones específicas.

2.10.2 Factores que afectan el rendimiento del censo.

El rendimiento de un sensor de gas basado en ferrita de lantano (LaFeO_3) puede verse influenciado por diversos factores, los cuales afectan tanto la sensibilidad como la selectividad del dispositivo. En el caso de LaFeO_3 , la sensibilidad al gas aumenta con la temperatura hasta alcanzar un valor óptimo, debido a la activación térmica de los procesos de adsorción y desorción de moléculas de gas en la superficie del material. Sin embargo, temperaturas demasiado altas pueden provocar la desorción completa de las moléculas de gas, reduciendo la sensibilidad y provocando una respuesta no lineal del sensor; así mismo, La concentración del gas objetivo también afecta la respuesta del sensor. En concentraciones bajas, la relación entre la concentración del gas y el cambio en la conductividad del sensor tiende a ser lineal. Sin embargo, a concentraciones más altas, la respuesta puede saturarse debido a la ocupación completa de los sitios activos en la superficie de LaFeO_3 , lo que limita la sensibilidad del sensor en estas condiciones. (Benali et al., 2021).

2.11 Ferritas semiconductoras: LaFeO_3 .

Las ferritas semiconductoras son una clase de materiales de óxidos metálicos con propiedades electrónicas y magnéticas que las hacen particularmente adecuadas para aplicaciones en sensores de gas. Entre ellas, la ferrita de lantano (LaFeO_3) ha recibido una atención considerable debido a su estructura cristalina única y sus propiedades eléctricas y magnéticas. LaFeO_3 pertenece a la familia de las perovskitas, que son

materiales de fórmula general ABO_3 , donde "A" es un catión de un metal raro o alcalino, y "B" es un catión de un metal de transición.

2.11.1 Estructura cristalina.

La ferrita de lantano ($LaFeO_3$) del tipo ABX_3 cristaliza en una estructura perovskita ortorrómbica, la cual se deriva de la estructura cúbica ideal de las perovskitas ilustrada en la Figura. 2.9. En la estructura perovskita, el ion La^{3+} ocupa el sitio "A", mientras que el ion Fe^{3+} ocupa el sitio "B", y los iones de oxígeno (O^{2-}) forman un octaedro que rodea al ion Fe^{3+} . Esta disposición resulta en una red tridimensional de octaedros FeO_6 compartiendo esquinas, con los iones de La^{3+} situados en los intersticios más grandes entre estos octaedros (J. Wang et al., 2016).

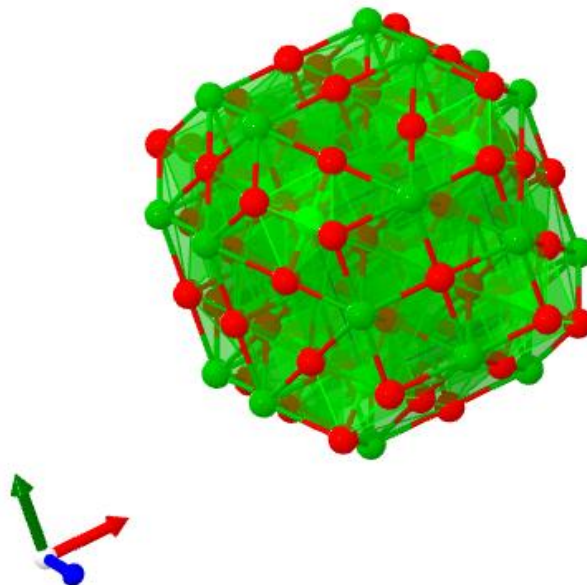


Figura 0.9- Estructura de una perovskita de fórmula química ABX_3 (Jain et al., 2013).

La estructura ortorrómbica de $LaFeO_3$ presenta una distorsión en los octaedros FeO_6 debido a las interacciones entre los iones de lantano, hierro y oxígeno. Esta distorsión da lugar a variaciones en las longitudes de los enlaces Fe-O y en los ángulos O-Fe-O. Dichas variaciones surgen porque los iones de oxígeno no están distribuidos de manera simétrica alrededor del ion de hierro, lo que provoca que algunos enlaces Fe-O sean más cortos o más largos que otros. Esta asimetría estructural es fundamental para las propiedades electrónicas y magnéticas de $LaFeO_3$, ya que influye en la superposición de los orbitales electrónicos del hierro y el oxígeno. La extensión de esta superposición determina cómo los electrones pueden moverse a través del material, afectando tanto su conductividad electrónica como su respuesta a los

campos eléctricos y magnéticos. En resumen, la distorsión del octaedro FeO_6 modula las interacciones electrónicas en el material, lo que es clave para sus propiedades funcionales. Adicionalmente, la estructura cristalina de LaFeO_3 facilita la movilidad de los portadores de carga (electrones y huecos) a través de la red, lo que es esencial para su función como semiconductor. La estabilidad térmica y química de esta estructura hace que LaFeO_3 sea un material ideal para aplicaciones en sensores de gas, especialmente en condiciones operativas a altas temperaturas (Ruud & Beerkens, 2001).

2.11.2 Propiedades físicas.

La ferrita de lantano (LaFeO_3) posee propiedades físicas únicas que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones tecnológicas, incluyendo sensores de gas, dispositivos electrónicos, y catalizadores, las más destacables son mencionadas como:

Estructura cristalina y parámetros de red- cristaliza en una estructura ortorrómbica tipo perovskita, con parámetros de red que influyen en sus propiedades físicas. La distorsión ortorrómbica en LaFeO_3 se manifiesta en diferentes longitudes de enlace Fe-O y ángulos O-Fe-O, afectando su comportamiento eléctrico y magnético.

Propiedades electrónicas- exhibe una banda de energía ancha, con una banda prohibida (gap) de aproximadamente 2.0 a 2.5 eV; Valor de la banda prohibida característico de los semiconductores de óxidos metálicos y está asociado con las transiciones electrónicas entre la banda de valencia, dominada por los orbitales de oxígeno 2p, y la banda de conducción, dominada por los orbitales 3d del hierro (Mejía & Orozco, 2015). Esta banda prohibida permite que LaFeO_3 actúe como un semiconductor. La estructura electrónica de LaFeO_3 es influenciada por la presencia de defectos y la distorsión de la estructura cristalina, lo que afecta su conductividad y capacidad de carga. LaFeO_3 también puede exhibir características de un semiconductor tipo n bajo ciertas condiciones. Esto ocurre cuando el material se dopa o se expone a atmósferas reductoras, como en presencia de gases como el hidrógeno (H_2) o monóxido de carbono (CO). En este caso, los electrones adicionales donados por el dopaje o la reducción actúan como portadores de carga mayoritarios, lo que convierte a LaFeO_3 en un semiconductor tipo n. Este cambio en el tipo de portador de

carga lo hace versátil para aplicaciones en sensores de gases, ya que su respuesta eléctrica puede variar dependiendo de la atmósfera gaseosa circundante.

Propiedades magnéticas- un material antiferromagnético a temperatura ambiente, con un punto de Neel (punto crítico a partir del cual un material antiferromagnético pierde su orden magnético) alrededor de 740 K. En su estado antiferromagnético, los momentos magnéticos de los iones de hierro se alinean en direcciones opuestas, resultando en una cancelación neta de los momentos magnéticos. La Ferrita de lantano muestra un ordenamiento magnético significativo a bajas temperaturas, lo que la hace interesante para aplicaciones en dispositivos magnéticos y de almacenamiento de datos (Moussa, 2011).

Propiedades ópticas- tiene un rango de absorción óptica que se extiende desde el ultravioleta hasta el visible. Su capacidad para absorber luz en diferentes longitudes de onda se debe a la presencia de bandas de energía dentro del material. Esta propiedad óptica puede ser utilizada para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos y fotocatalizadores (Jędrusik et al., 2023).

Propiedades térmicas- tiene una buena estabilidad térmica y puede soportar altas temperaturas sin descomponerse. LaFeO_3 exhibe un coeficiente de expansión térmica relativamente bajo, lo que la hace adecuada para aplicaciones en condiciones de alta temperatura y para la fabricación de materiales compuestos y recubrimientos resistentes al calor (Jędrusik et al., 2023).

Propiedades dieléctricas- con propiedades dieléctricas que son útiles en aplicaciones electrónicas. La constante dieléctrica y la pérdida dieléctrica de LaFeO_3 pueden variar con la frecuencia y la temperatura, lo que influye en su comportamiento en dispositivos de almacenamiento de carga y capacitores.

2.11.3 Aplicaciones.

LaFeO_3 un material versátil con diversas aplicaciones en campos como la electrónica, la catálisis, y la óptica, se detallan algunas de sus principales aplicaciones:

Catalizadores y fotocatalizadores se utiliza en procesos de oxidación y reducción, debido a su capacidad para facilitar reacciones químicas y su estabilidad a altas temperaturas. En particular, se emplea en la eliminación de contaminantes atmosféricos y en la descomposición de compuestos orgánicos tóxicos.

Dispositivos electrónicos y piezoeléctricos- las propiedades dieléctricas y eléctricas lo hacen adecuado para su uso en dispositivos electrónicos y piezoeléctricos. Se utiliza en la fabricación de condensadores y en aplicaciones que requieren materiales con alta constante dieléctrica.

Materiales magnéticos- LaFeO_3 muestra propiedades magnéticas interesantes, como la antiferromagnetismo, que se explora en aplicaciones de almacenamiento magnético y en dispositivos de lectura magnética. Su capacidad para mantener un orden magnético a altas temperaturas lo convierte en un material valioso para tecnología magnética avanzada.

Recubrimientos y materiales compuestos- debido a su estabilidad química y térmica, LaFeO_3 se usa en recubrimientos y materiales compuestos para aplicaciones industriales y en ambientes extremos. Se emplea en recubrimientos protectores y en la mejora de la resistencia a la corrosión y al desgaste de componentes (J. Wang et al., 2016).

Óptica y dispositivos fotónicos- LaFeO_3 tiene aplicaciones en óptica y dispositivos fotónicos debido a sus propiedades ópticas y a su capacidad para interactuar con la luz en un amplio rango de longitudes de onda. Se utiliza en filtros ópticos y en dispositivos que requieren control preciso de la luz.

2.11.4 Uso como sensor de gas

LaFeO_3 se utiliza como catalizador y fotocatalizador en procesos de oxidación y reducción, debido a su capacidad para facilitar reacciones químicas y su estabilidad a altas temperaturas. En particular, se emplea en la eliminación de contaminantes atmosféricos y en la descomposición de compuestos orgánicos tóxicos.

Las propiedades dieléctricas y eléctricas de LaFeO_3 lo hacen adecuado para su uso en dispositivos electrónicos y piezoeléctricos. Se utiliza en la fabricación de condensadores y en aplicaciones que requieren materiales con alta constante dieléctrica.

LaFeO_3 muestra propiedades magnéticas interesantes, como la antiferromagnetismo, que se explora en aplicaciones de almacenamiento magnético y en dispositivos de lectura magnética. Su capacidad para mantener un orden magnético a altas temperaturas lo convierte en un material valioso para tecnología magnética avanzada; Debido a su estabilidad química y térmica, LaFeO_3 se usa en recubrimientos y

materiales compuestos para aplicaciones industriales y en ambientes extremos. Se emplea en recubrimientos protectores y en la mejora de la resistencia a la corrosión y al desgaste de componentes; además, tiene aplicaciones en óptica y dispositivos fotónicos debido a sus propiedades ópticas y a su capacidad para interactuar con la luz en un amplio rango de longitudes de onda. Se utiliza en filtros ópticos y en dispositivos que requieren control preciso de la luz (Vasile & Ghenescu, 2010).

2.11.5 Uso como sensor de gases.

La ferrita de lantano (LaFeO_3) ha demostrado ser un material prometedor para sensores de gases debido a sus propiedades semiconductoras y a su capacidad para interactuar con diferentes moléculas de gas; estas interacciones ocurren principalmente en la superficie del material, donde las moléculas de gas adsorbidas pueden influir en la conductividad eléctrica del semiconductor. Cuando LaFeO_3 entra en contacto con moléculas oxidantes (como O_2 o NO_2), las moléculas tienden a captar electrones de la superficie, incrementando la resistencia eléctrica del material, lo que se detecta como una señal. En contraste, en presencia de gases reductores (como CO , H_2 o CH_4), los gases donan electrones a la superficie del LaFeO_3 , lo que reduce su resistencia. Estos cambios en la conductividad son el principio básico para la detección de gases en sensores semiconductores. Existen distintas aplicaciones, sin embargo, las que se consideran más importantes son las siguientes:

Principio de detección en los sensores basados en LaFeO_3 funcionan mediante la detección de variaciones en la resistencia eléctrica del material cuando este interactúa con moléculas de gas. La adsorción de gases en la superficie del LaFeO_3 modifica la densidad de los portadores de carga (electrones o huecos) y, en consecuencia, altera la conductividad eléctrica del semiconductor. Estas variaciones en la resistencia eléctrica se miden y se correlacionan directamente con la concentración del gas en el entorno (Rella, 1999) Este principio es fundamental para la detección eficiente de diferentes tipos de gases en una variedad de aplicaciones.

Gases detectados- La ferrita de lantano (LaFeO_3) es un material prometedor para la detección de múltiples gases, gracias a sus propiedades semiconductoras y a su capacidad para interactuar con diferentes moléculas de gas. La sensibilidad y selectividad del sensor dependen no solo de las características intrínsecas de LaFeO_3 , como su estructura electrónica y morfología superficial, sino también de las

condiciones de operación, como la temperatura y la concentración de gas. LaFeO_3 ha demostrado ser eficaz para detectar gases como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH_3) y otros gases tóxicos o inflamables, lo que lo convierte en un material versátil para aplicaciones en monitoreo ambiental y seguridad industrial.

Monóxido de carbono (CO):

Mecanismo de detección- el monóxido de carbono es un gas reductor que puede reducir los iones Fe^{3+} a Fe^{2+} en la superficie de la LaFeO_3 . Esta reacción altera la densidad de portadores de carga en el material, provocando un cambio en su resistividad (Rella, 1999).

Dióxido de nitrógeno (NO_2):

Mecanismo de detección- el NO_2 es un gas oxidante que puede interactuar con la superficie del LaFeO_3 , provocando una transferencia de carga que afecta la resistividad del sensor. La reacción de NO_2 con el LaFeO_3 típicamente resulta en la formación de compuestos de nitrato en la superficie (Rella, 1999).

Amoníaco (NH_3):

Mecanismo de detección- el amoníaco es un gas básico que puede adsorberse en la superficie del LaFeO_3 , alterando la química superficial y modificando la resistividad del material. La reacción con NH_3 puede provocar cambios en los sitios de adsorción y la formación de compuestos amónico.

Dióxido de azufre (SO_2):

Mecanismo de detección- el SO_2 , al ser un gas oxidante, puede reaccionar con LaFeO_3 y afectar la conductividad del material. La interacción de SO_2 con LaFeO_3 puede llevar a la formación de sulfatos y cambios en las propiedades eléctricas del sensor.

Ozonos (O_3):

Mecanismo de detección- el ozono es un gas oxidante fuerte que puede alterar la química superficial del LaFeO_3 , afectando su resistividad. La interacción de O_3 con LaFeO_3 resulta en una reacción que modifica las propiedades electrónicas del material (Casimiro et al., 2013).

2.12 Métodos de síntesis de ferritas.

2.12.1 Métodos físicos.

Los métodos físicos para la síntesis de ferritas involucran técnicas que utilizan procesos físicos para formar el material deseado sin recurrir a reacciones químicas directas entre reactivos. Estas técnicas son esenciales para controlar la estructura y propiedades de las ferritas.

Pulverización por Sputtering ilustrada en la Figura. 2.10. es una técnica de deposición de películas delgadas donde un blanco de material es bombardeado con iones acelerados, causando que átomos o moléculas sean eyectados y depositados sobre un sustrato. Esta técnica permite un control preciso sobre el grosor y la composición de las películas, y es comúnmente utilizada en la fabricación de dispositivos electrónicos y sensores (Habermeier, 2007).

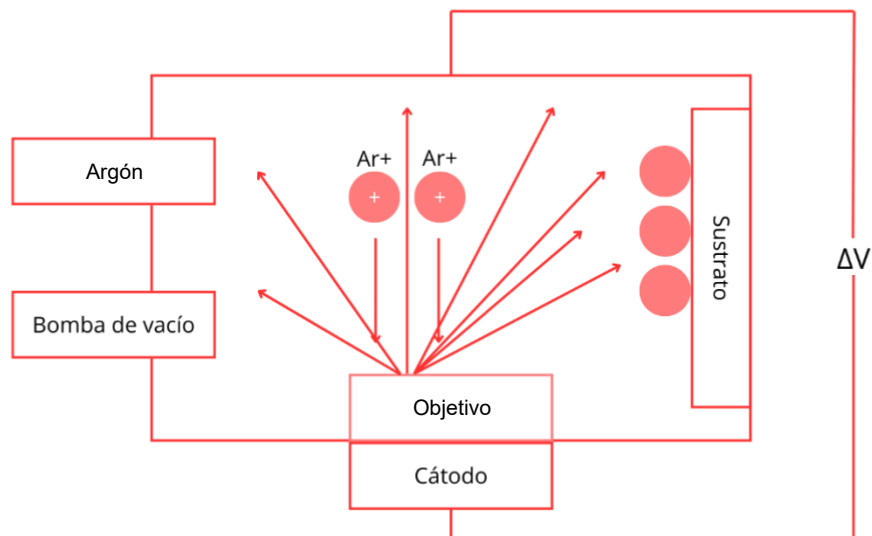


Figura 0.10- Esquema del proceso de pulverización catódica.

Evaporación por termo-fragmentación, implica calentar el material precursor a temperaturas elevadas en una cámara de vacío para convertirlo en vapor, el cual se deposita sobre un sustrato frío. Este método es útil para preparar ferritas en forma de películas finas y es adecuado para aplicaciones en óptica y electrónica debido a su capacidad para obtener capas uniformes y adheridas firmemente.

Co-Pulverización, se realiza utilizando múltiples blancos durante el proceso de pulverización por sputtering para depositar una mezcla de elementos en el sustrato, permitiendo la formación de ferritas con una composición específica. Este método es ideal para preparar ferritas con composiciones personalizadas y se usa en el desarrollo de nuevos materiales.

Sol-Gel, aunque comúnmente asociado con métodos químicos, también puede considerarse un método físico en su fase final, donde un gel se convierte en un sólido mediante calor. Este proceso es útil para la síntesis de ferritas con alta pureza y control de la microestructura, permitiendo la preparación de muestras en diversas formas (Matsuda et al., 2008).

Mecanocatálisis (Mecanofusión) implica la síntesis de ferritas mediante la molienda mecánica de polvos de los óxidos metálicos en un molino de bolas. Esta técnica permite obtener ferritas con una distribución controlada de tamaño de partícula y puede realizarse a temperaturas relativamente bajas, siendo útil para preparar polvos para cerámica y materiales magnéticos (Z. Wang, 2008).

Depósito por Pulso de Láser (PLD) utiliza un láser de alta energía para evaporar material de un blanco y depositarlo en un sustrato. El material depositado puede formar películas delgadas o recubrimientos, ofreciendo un control preciso sobre la composición y estructura del material. Esta técnica es adecuada para la fabricación de películas delgadas de alta calidad en dispositivos electrónicos y recubrimientos avanzados (Andrei et al., 2019).

2.12.2 Métodos químicos.

Los métodos químicos de síntesis son ampliamente utilizados en la producción de ferritas debido a su capacidad para controlar con precisión las propiedades finales del material.

Método de Sol-Gel- uno de los métodos químicos más utilizados para la síntesis de ferritas. Este proceso involucra la formación de un sol (una suspensión coloidal de partículas en un solvente) seguido de la transformación en un gel, donde las partículas se conectan formando una red tridimensional. Finalmente, el gel se seca y se calcinan para obtener la ferrita deseada. Este método permite un control preciso del tamaño de las partículas y la homogeneidad de la composición química, lo que resulta en ferritas con propiedades magnéticas y eléctricas optimizadas (Kim & Lim, 2019).

Síntesis hidrotérmica- la síntesis hidrotérmica es un método que involucra la cristalización de materiales a altas temperaturas y presiones en una solución acuosa. En este método, los precursores químicos se disuelven en un solvente y la solución resultante se calienta en un autoclave. Este proceso promueve la formación de partículas de ferrita bien cristalizadas con tamaños que pueden ser controlados ajustando las condiciones de síntesis. Este método es especialmente útil para la producción de ferritas con morfologías específicas, como nanocristales o nanopartículas.

Co-precipitación- método químico ampliamente utilizado, donde los cationes de hierro y lantano se precipitan simultáneamente a partir de una solución mediante la adición de un agente precipitante, como hidróxido de sodio. La precipitación conjunta permite una distribución homogénea de los iones en la mezcla, lo que resulta en una composición uniforme en la ferrita final. Tras la precipitación, el producto se lava, seca y calcinan para obtener la ferrita de lantano. Este método es simple, económico y puede llevarse a cabo a temperatura ambiente, aunque requiere un control cuidadoso de las condiciones para evitar la formación de fases indeseadas (Gupta & Dutta, 2016).

Método de combustión- es un proceso químico en el cual una mezcla de nitratos de metal y un combustible orgánico (como urea o glicina) se calientan hasta que la reacción de combustión se auto-sostiene. Este método es rápido y eficiente, permitiendo la obtención de ferritas con alta pureza y control sobre el tamaño de las partículas. La combustión genera una gran cantidad de calor, lo que promueve la formación de ferritas bien cristalizadas en un corto período de tiempo.

Capítulo III. Desarrollo Experimental.

En este capítulo se presenta el diseño, la fabricación y validación del sistema para la evaluación de sensores de gases. El diseño propuesto tiene como objetivo realizar un sistema con el cual se pueda simular las condiciones a las cuales se someten los sensores con diversos gases, estudiando su desempeño de sensibilidad, selectividad, tiempo de respuesta y estabilidad a diferentes gases. Con la implementación de este sistema, se busca mejorar los procesos validación de sensores, contribuyendo al desarrollo de nuevos materiales para la detección de gases.

3.1 Diagrama de flujo experimental.

El diseño del sistema integra una serie de componentes clave, incluyendo “base”, “placa intermedia”, “vidrio”, “tapa” así como un sistema de adquisición de datos que facilita el análisis del comportamiento de los materiales seleccionados frente a diferentes concentraciones de gases. Además, se incluye un proceso de validación que verifica la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos, asegurando que el sistema propuesto cumpla con los requisitos técnicos y funcionales necesarios para su aplicación en el campo real, todo este proceso se observa en la Figura. 3.1 donde se detalla en el diagrama de flujo en que consistió cada etapa del proceso.

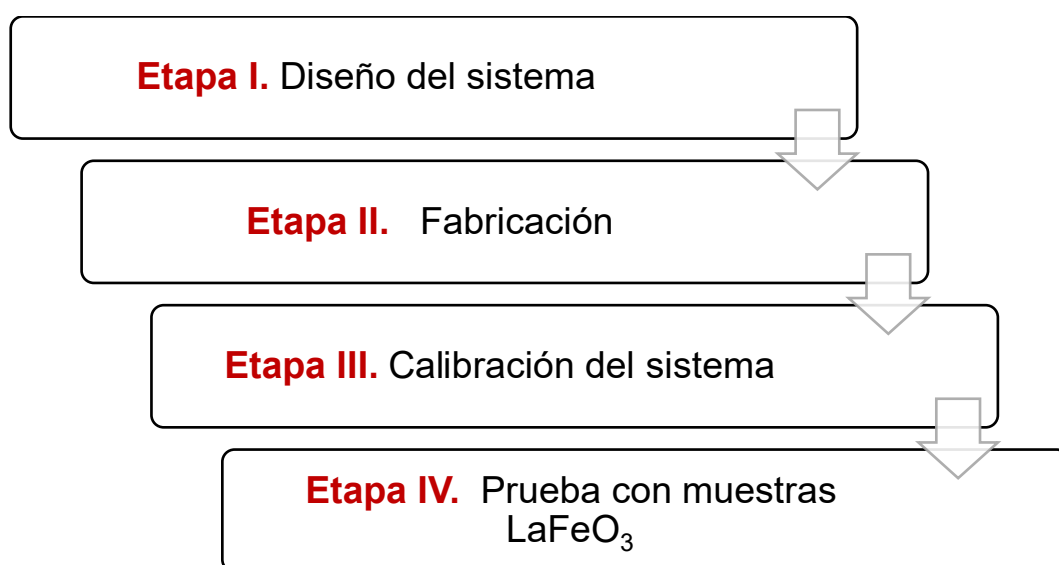


Figura 3.1 Diagrama experimental

3.2 Materiales.

En el proceso de fabricación del sistema de evaluación se ocuparon materiales semiconductores como sensores de gases, en el desarrollo se han identificado diversas problemáticas relacionadas con el diseño y selección de cada uno de los componentes. Es fundamental garantizar que cada componente cumpla con los requisitos técnicos necesarios para la precisión y repetibilidad de las mediciones.

3.2.1 Requerimientos de cada parte.

El sistema de detección se planteó de forma que se pudiera realizar lo más eficiente posible, en especial en geometría, dimensiones, materiales utilizados y número de componentes empleados. Gracias a ello se realizó el diseño de 3 partes principales 1) cuerpo, 2) cámara 3) cubierta; cada una de estas se conforma de componentes adicionales los cuales se diseñaron para dar solución a los problemas que iban presentando.

3.2.1.1 Cuerpo.

El diseño del cuerpo del sensor es un aspecto clave que debe cumplir con diversos requisitos específicos para garantizar su efectividad en la detección de gases y el adecuado desempeño en condiciones experimentales exigentes. Este componente tiene la doble función de albergar los elementos internos del sensor, como la cámara de gas, las válvulas, los sistemas de control y monitoreo, además de proporcionar un entorno controlado para realizar las mediciones. Su diseño debe abordar necesidades como el control de atmósferas, el flujo de gases, la regulación de la temperatura, la integración de dispositivos adicionales y la resistencia tanto a la presión como a la interacción con distintas atmósferas.

Entre las especificaciones identificadas, el material de construcción destaca como un factor primordial. El cuerpo del sensor debe ser resistente a la corrosión para operar en ambientes con gases potencialmente agresivos sin comprometer su durabilidad ni precisión. Asimismo, es esencial que el material proporcione un aislamiento térmico adecuado, asegurando que pueda soportar variaciones de temperatura sin degradarse o afectar los componentes internos. Respecto a las dimensiones, el diseño debe incluir un volumen interno optimizado para permitir un flujo uniforme de gas sin obstrucciones, maximizando así la interacción entre el gas y el material sensor.

El diseño estructural también es crítico. Se prioriza una forma cilíndrica, ya que facilita la distribución uniforme del gas y ofrece una construcción robusta. En casos donde

sea necesario, se pueden incluir refuerzos o soportes internos para garantizar la integridad del cuerpo ante presiones o vibraciones. Además, el sistema debe contar con conexiones y sellos herméticos que eviten fugas de gas y protejan el interior del sensor contra contaminantes externos. La accesibilidad para mantenimiento también es una consideración importante; por ello, el cuerpo del sensor debe incluir puertos de acceso estratégicamente ubicados que permitan realizar calibraciones, limpiezas internas o el reemplazo de componentes sin complicaciones.

Otro aspecto fundamental es el control de temperatura, ya que el cuerpo del sensor puede requerir sistemas de calefacción o refrigeración que mantengan condiciones térmicas óptimas. Estos sistemas deben ser eficientes y estar integrados sin comprometer el diseño general del sensor. Finalmente, el cuerpo debe incluir mecanismos de montaje, como soportes diseñados específicamente para facilitar su instalación y desmontaje en el entorno experimental, garantizando estabilidad durante las pruebas.

3.2.1.2 Cámara.

La cámara del sensor no solo cumple la función de albergar los componentes esenciales del sistema, sino que también debe garantizar una visibilidad óptima para permitir un monitoreo constante y eficaz durante las pruebas. Este diseño asegura que las inspecciones y el mantenimiento puedan realizarse de forma precisa y ágil, maximizando la operatividad del sensor en diversas condiciones.

Para lograr esto, es esencial que la cámara incluya materiales transparentes, como ventanas de vidrio o materiales similares, que permitan observar directamente los componentes internos sin necesidad de desmontar el sistema. Estas ventanas deben ser resistentes a temperaturas elevadas y a la interacción con atmósferas controladas, garantizando su durabilidad y funcionalidad. Adicionalmente, se puede considerar la incorporación de iluminación interna para mejorar la visibilidad en condiciones de baja luz o en entornos con acceso limitado a fuentes externas de iluminación.

El diseño interno de la cámara también juega un papel clave. La disposición de los componentes debe estar cuidadosamente planificada para evitar obstrucciones visuales y optimizar el uso del espacio. Esto no solo facilita la inspección visual, sino que también contribuye al flujo eficiente de gases dentro de la cámara, mejorando el rendimiento general del sensor.

Asimismo, la cámara puede estar equipada con sensores o indicadores adicionales que proporcionen información en tiempo real sobre las condiciones internas, como temperatura, presión o composición atmosférica. Esto no solo permite un monitoreo más preciso, sino que también facilita la detección temprana de posibles anomalías, mejorando la confiabilidad y seguridad del sistema.

3.2.1.3 Cubierta.

La cubierta del sensor, aunque se encuentra físicamente separada, su funcionalidad está intrínsecamente ligada a las operaciones del sistema, especialmente en lo relacionado con la protección de los componentes internos y el acceso controlado para mantenimiento, calibración e inspección.

Para cumplir con estas exigencias, la cubierta debe estar fabricada con materiales que posean las mismas propiedades que el cuerpo del sensor, como alta resistencia a la corrosión, estabilidad térmica y robustez mecánica. Esto asegura que la cubierta pueda soportar las mismas condiciones operativas extremas a las que está expuesto el sensor, incluyendo cambios de temperatura, interacción con atmósferas específicas y potenciales impactos o vibraciones.

3.3 Instrumentos.

Para el correcto desarrollo, se emplearon diversos instrumentos y equipos especializados para garantizar la precisión de las mediciones, la fiabilidad del sistema, y la validación de los resultados experimentales. Estos instrumentos permiten realizar mediciones precisas, ajustar y controlar las variables del sistema y verificar la exactitud de los sensores empleados en el proceso de evaluación. Además, contribuyen al monitoreo de las condiciones experimentales, para poder hacer los ajustes necesarios para obtener resultados confiables y reproducibles.

A continuación, se describen los instrumentos utilizados durante el desarrollo del sistema.

3.3.1 Instrumentos del prototipo.

Una vez analizados los requerimientos necesarios para el sistema se optó por realizar un esbozo de los componentes necesarios para la fabricación del sistema, a continuación, se detallan los requerimientos necesarios y planos a los cuales se llegó después del estudio del sistema. El diseño del sensor de gases requiere un enfoque

modular y flexible que permita modificar y ajustar los parámetros según las necesidades experimentales. Este tipo de sensor debe contar con componentes clave que aseguren precisión en la detección y reproducibilidad en las mediciones.

Este prototipo debe contar con algunos componentes esenciales como:

- Material sensorial
- Electrodo de contacto
- Cámara de detección
- Sistema de control de atmósfera
- Control de temperatura
- Circuito de lectura
- Diseño general
 - Base del sensor
 - Cámara de prueba
 - Sistema de calefacción
 - Entrada y salida de gases
 - Circuito eléctrico

3.3.2 Candidatos para la selección del material del cuerpo del sensor.

La selección del material adecuado para el cuerpo de un sensor de gases es un paso crucial en el diseño de dispositivos de detección eficientes y duraderos. Los materiales deben cumplir con varios criterios estrictos relacionados con la resistencia a la corrosión, estabilidad térmica, propiedades mecánicas, compatibilidad química, y consideraciones económicas. Se presenta un análisis detallado de los posibles materiales que podrían utilizarse para el cuerpo de un sensor de gases, considerando sus ventajas, limitaciones, y aplicaciones específicas.

El acero inoxidable es una de las opciones más comunes y ampliamente utilizadas para el cuerpo de sensores de gases debido a su combinación de propiedades deseables. Este material se destaca por su alta resistencia a la corrosión, derivada de la presencia de cromo en su composición, que forma una capa pasiva de óxido de cromo en la superficie, protegiendo el material incluso en ambientes agresivos (Jiang et al., 2017). Adicionalmente, el acero inoxidable ofrece una excelente estabilidad térmica, lo que le permite soportar temperaturas elevadas sin degradar sus propiedades mecánicas, un factor crucial en aplicaciones donde el sensor debe operar

en condiciones extremas de temperatura. En cuanto a durabilidad, el acero inoxidable es robusto y resistente al desgaste, impactos, y vibraciones, características que son esenciales en entornos industriales donde los sensores están sujetos a condiciones severas. No obstante, el acero inoxidable puede ser más caro y pesado en comparación con otros materiales, lo que podría representar un inconveniente en aplicaciones donde se requiere minimizar el peso o en diseños que se fabrican en masa.

Por otro lado, el aluminio surge como una opción atractiva, especialmente en aplicaciones donde el peso es un factor crítico. Este material es significativamente más ligero que el acero inoxidable, lo que lo hace ideal para sensores portátiles o en sistemas donde el peso es una limitación (Berdar et al., 2006). Aunque no posee la misma resistencia a la corrosión que el acero inoxidable, el aluminio forma una capa de óxido en su superficie que le proporciona una protección considerable en ambientes menos agresivos. Además, el aluminio tiene una buena conductividad térmica, lo que facilita la distribución uniforme del calor, un aspecto beneficioso para sensores que requieren una regulación térmica precisa. Sin embargo, su menor resistencia mecánica y a la abrasión en comparación con el acero inoxidable podría limitar su vida útil en entornos industriales más exigentes.

El titanio se presenta como un material de alto rendimiento, ideal para aplicaciones exigentes. Ofrece una excelente resistencia a la corrosión, siendo altamente resistente a una amplia gama de ambientes corrosivos, incluidos el agua de mar, cloro, y gases ácidos. Además, el titanio tiene una alta relación resistencia-peso, lo que significa que puede ofrecer una resistencia mecánica comparable al acero inoxidable, pero con un peso significativamente menor (Bhattacharya et al., 2020). Esta característica es especialmente útil en aplicaciones donde se necesita un material resistente pero ligero, como en la industria aeroespacial o en sensores médicos. Su biocompatibilidad lo hace también adecuado para aplicaciones donde el sensor puede estar en contacto con tejidos biológicos. Sin embargo, el alto costo del titanio en comparación con otros materiales podría limitar su uso a aplicaciones donde sus propiedades superiores justifican el costo adicional.

Las cerámicas avanzadas, como la alúmina (Al_2O_3) y el nitruro de silicio (Si_3N_4), también representan una opción viable para el cuerpo de sensores de gases, especialmente en aplicaciones específicas. Estos materiales destacan por su

capacidad para soportar temperaturas extremadamente altas, mucho más allá de las capacidades de metales como el acero inoxidable o el aluminio (Berdat et al., 2006). Además, las cerámicas son inertes a la mayoría de los agentes químicos, lo que las hace ideales para su uso en ambientes altamente reactivos. No obstante, una de las desventajas de las cerámicas es su fragilidad, ya que pueden romperse bajo impacto o tensión mecánica, lo que limita su aplicación en entornos donde se espera una alta resistencia a impactos. Además, el procesamiento y fabricación de componentes cerámicos pueden ser costosos y técnicamente complejos, lo que podría ser una barrera para su uso en aplicaciones más comunes.

Finalmente, los polímeros de alta resistencia, como el PEEK (polieteretercetona) y el PTFE (politetrafluoroetileno), han ganado popularidad en la fabricación de sensores de gases debido a sus propiedades únicas. Estos polímeros son significativamente más ligeros que los metales y las cerámicas, lo que es una ventaja en aplicaciones portátiles. Además, materiales como el PTFE son altamente resistentes a una amplia gama de productos químicos agresivos, lo que los hace adecuados para aplicaciones en ambientes menos exigentes en cuanto a temperatura, pero que requieren una alta resistencia química (Jiang et al., 2017). Los polímeros también ofrecen flexibilidad en el diseño, ya que se pueden moldear en formas complejas, permitiendo una mayor adaptabilidad a las necesidades específicas del sensor. Sin embargo, estos materiales presentan limitaciones en su resistencia a la temperatura en comparación con los metales y las cerámicas, lo que los hace inadecuados para aplicaciones de alta temperatura. Además, la menor resistencia mecánica podría ser un factor limitante en aplicaciones industriales donde se espera un desgaste mecánico significativo.

El acero inoxidable se destaca como el mejor candidato para el cuerpo de un sensor de gases debido a su excepcional combinación de propiedades físicas, químicas y mecánicas. Su alta resistencia a la corrosión es una de las características más cruciales, especialmente en ambientes industriales donde los sensores están expuestos a gases agresivos que podrían degradar otros materiales. Este material forma una capa pasiva de óxido de cromo en su superficie, lo que protege de manera efectiva el cuerpo del sensor contra la oxidación y la corrosión, asegurando una larga vida útil incluso en condiciones adversas. Tiene una excelente estabilidad térmica, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde el sensor debe operar a temperaturas elevadas o fluctuantes. Además, su conductividad térmica es suficientemente alta

para permitir una disipación de calor efectiva, lo que ayuda a mantener la estabilidad operativa del sensor y protege los componentes internos sensibles al calor. La capacidad del acero inoxidable para mantener su resistencia mecánica a temperaturas elevadas es esencial para garantizar que el cuerpo del sensor no se deforme o debilite durante el uso; desde un punto de vista mecánico, el acero inoxidable ofrece una resistencia significativa a la deformación y a la fractura bajo cargas mecánicas. Esto es especialmente importante en sensores de gases que pueden estar sujetos a vibraciones, choques o presiones internas y externas. La alta tenacidad del acero inoxidable garantiza que el cuerpo del sensor mantenga su integridad estructural, protegiendo los componentes internos y asegurando un rendimiento fiable a lo largo del tiempo (Callister & Rethwisch, 2016).

En cuanto a propiedades químicas el acero inoxidable es químicamente inerte frente a una amplia gama de gases y sustancias, lo que minimiza la posibilidad de reacciones indeseadas que podrían afectar la precisión y confiabilidad del sensor. Esto es fundamental en aplicaciones donde la presencia de contaminantes o la reactividad química del material del cuerpo podría influir en las mediciones del sensor.

Además de sus propiedades físicas y químicas, el acero inoxidable es relativamente fácil de trabajar y fabricar. Puede ser moldeado, soldado y pulido con precisión, lo que permite la creación de cuerpos de sensores con diseños complejos y acabados de alta calidad. El acabado pulido no solo mejora la estética del sensor, sino que también contribuye a la resistencia a la corrosión al eliminar imperfecciones superficiales donde podría iniciarse la corrosión (Schaffer et al., 1999).

La selección de estos materiales se basó en una combinación de estudios teóricos y experimentales, que confirmaron su idoneidad para aplicaciones en sensores de gases semiconductores.

3.3.3 Selección del material del cuerpo de la cámara

En la elección del material para el cuerpo de la cámara del sensor, una de las principales consideraciones fue garantizar que este fuera completamente inerte y no reactivo frente a los gases utilizados durante las pruebas. Esto es esencial para evitar cualquier interacción química que pueda comprometer la precisión de las mediciones o la integridad del sistema. Entre los materiales analizados, se seleccionó el acero

inoxidable como la opción más adecuada debido a sus sobresalientes propiedades físico-químicas y su capacidad para cumplir con los exigentes requisitos de diseño.

El proceso de selección incluyó un análisis detallado basado en gráficos de Ashby, particularmente en el que correlaciona el módulo elástico con la densidad. Este análisis permitió identificar materiales que combinan alta rigidez estructural con una densidad moderada, logrando un equilibrio óptimo entre resistencia mecánica y peso reducido.

En cuanto a los requisitos de diseño, el material debía ofrecer resistencia a la corrosión para garantizar la longevidad del sensor en ambientes agresivos, estabilidad térmica para soportar un amplio rango de temperaturas sin degradarse, y durabilidad mecánica para resistir impactos y vibraciones sin deformarse. Estas características aseguran que el acero inoxidable sea capaz de mantener la integridad estructural del sensor y su desempeño en condiciones experimentales intensivas.

En el diagrama de Ashby que se representa en la Figura. 3.2 que relaciona el módulo de Young con la densidad, el acero inoxidable se posiciona como una elección óptima para la cámara de un sensor de gases debido a su combinación de propiedades mecánicas, químicas y económicas. Esta familia de metales destaca por su excelente relación entre rigidez (módulo de Young elevado, aproximadamente 200 GPa) y densidad ($7.7\text{--}8.0\text{ g/cm}^3$), lo que asegura un balance adecuado entre resistencia estructural y peso razonable para aplicaciones industriales o portátiles.

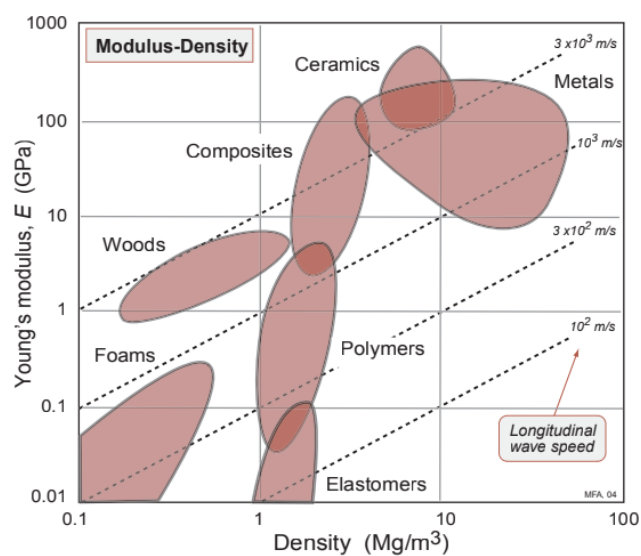


Figura 0.2- Diagrama de Ashby. Densidad vs módulo de Young.

Durante el proceso de selección de materiales para el cuerpo de la cámara del sensor, se consideraron diferentes opciones que cumplieran con los requisitos establecidos. Tras analizar las propiedades de varios candidatos, el acero inoxidable se destacó como la opción más adecuada debido a su sobresaliente desempeño en las siguientes áreas: su alta resistencia a la corrosión, especialmente relevante en entornos con gases potencialmente corrosivos, asegura la integridad del sistema a lo largo del tiempo; su excelente estabilidad térmica permite soportar temperaturas elevadas sin alterar sus propiedades físicas, lo cual es esencial para las pruebas que requieren calentamiento controlado; y su buena relación rigidez-peso garantiza durabilidad estructural sin agregar un peso excesivo al sensor, lo que contribuye al diseño eficiente y funcional.

Selección final:

Después de un análisis exhaustivo basado en los gráficos de Ashby y los requisitos del sistema, el acero inoxidable fue seleccionado como el material ideal para el cuerpo del sensor de gases. Su combinación de resistencia

3.4 Etapa I. Diseño.

3.4.1 Cuerpo (Acero Inoxidable).

El cuerpo del sensor ilustrado en la Figura. 3.3, el acero inoxidable como material preferente, constituye una estructura robusta y resistente a la corrosión, diseñada para soportar todos los componentes esenciales del sistema, como la cámara de gas, la tapa, la placa intermedia y otros elementos críticos. Este diseño asegura la estabilidad del sensor durante las pruebas y garantiza su funcionalidad en condiciones experimentales exigentes. Entre sus características principales, se incluye un soporte que mantiene el vidrio de la cámara en posición, protegiéndolo de posibles desplazamientos o daños causados por vibraciones. Asimismo, el cuerpo cuenta con orificios estratégicos que permiten la instalación de los controladores de temperatura y el milióhmetro, instrumentos fundamentales para medir con precisión la variación de resistencia del sensor. Finalmente, incorpora válvulas que controlan el flujo y la presión de los gases, permitiendo modificar la atmósfera dentro de la cámara según los requerimientos del experimento. Este diseño integral asegura un rendimiento confiable y versátil del sensor.

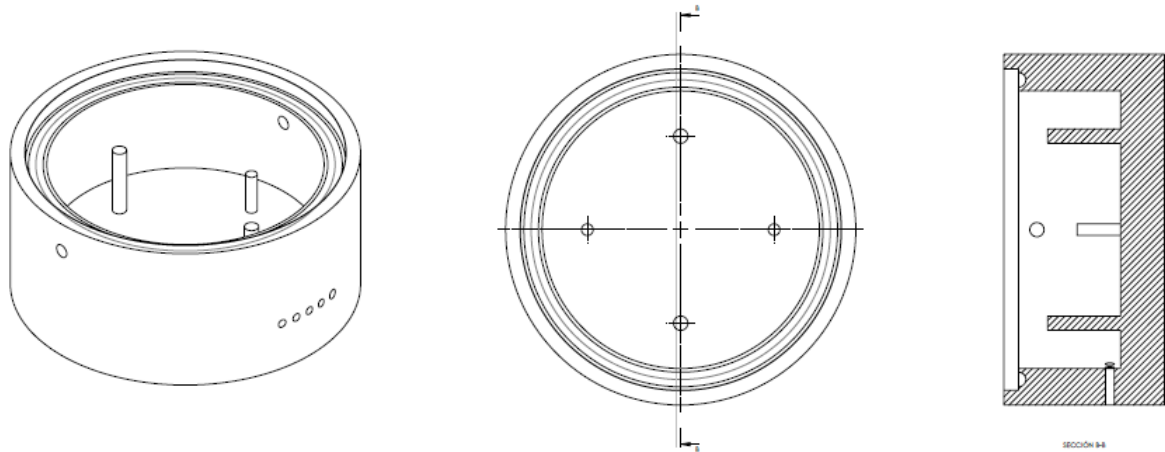


Figura 0.3- Boceto del cuerpo del sensor a) vista general, b) vista planta, c) sección B-B.

3.4.2 Vidrio de la cámara.

La cámara del sensor se ilustra en la Figura. 3.4 se pretende fabricar en vidrio, un material seleccionado por su transparencia, lo cual permite la observación directa de los componentes internos del sensor y facilita la inspección visual durante las pruebas experimentales. Esta característica es fundamental para monitorear en tiempo real las interacciones del sensor con los gases objetivo, garantizando un análisis adecuado de su funcionamiento. Además, el vidrio cuenta con propiedades térmicas que le confieren resistencia a altas temperaturas, soportando sin deformarse los ciclos de calentamiento requeridos durante las pruebas. Su diseño, cuidadosamente optimizado en forma y tamaño, asegura un flujo uniforme de gases en el interior de la cámara, evitando puntos de concentración indeseados y garantizando una interacción eficiente con la superficie del sensor.

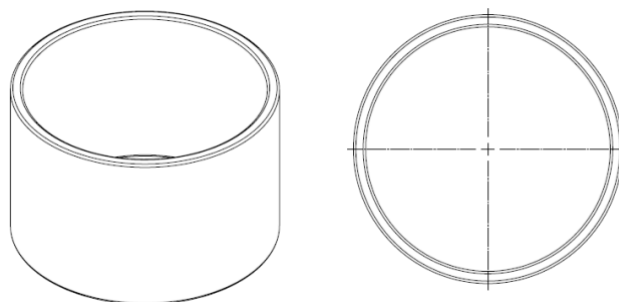


Figura 0.4- Boceto del vidrio de la cámara.

3.4.3 Tapa de Acero Inoxidable con O-Ring.

La tapa del sensor ilustrada en la Figura. 3.5, está diseñada para cubrir y sellar herméticamente la parte superior del cuerpo del sensor, asegurando su robustez y resistencia a la corrosión. Su ajuste firme se logra mediante un O-ring sencillo esbozado en la Figura. 3.6 colocado entre la tapa y el cuerpo, el cual cumple la función de evitar fugas de gas, manteniendo una atmósfera controlada dentro de la cámara del sensor, lo que es esencial para las pruebas experimentales. Además de su función de sellado, la tapa permite un acceso práctico para intervenir en el sistema cuando sea necesario, ya sea para realizar ajustes en los componentes internos, añadir gases o modificar elementos de medición, como el termopar o los cables, asegurando así la versatilidad y funcionalidad del dispositivo durante su operación.

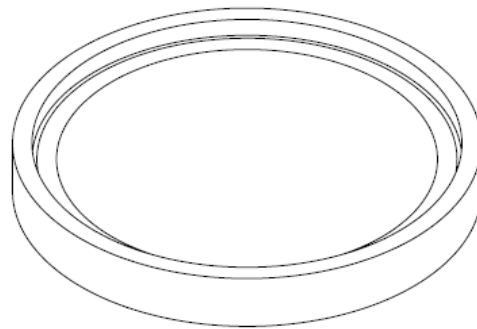


Figura 0.1- Boceto de la tapa del sensor.

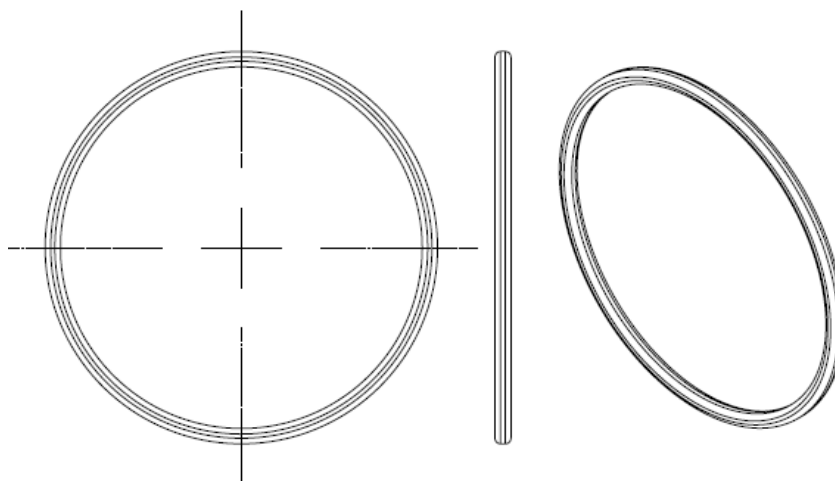


Figura 0.6- Boceto O-Ring.

3.4.4 Placa Intermedia (Acero inoxidable).

La placa intermedia en la Figura. 3.7 de acero inoxidable cumple una función crucial al servir como soporte para la placa de calentamiento, proporcionando una base sólida y estable que asegura una distribución uniforme del calor hacia la superficie del sensor. Esta característica es esencial para mantener el sensor a la temperatura adecuada durante las pruebas, evitando cualquier fluctuación térmica que pudiera afectar los resultados. La placa no solo asegura la eficiencia en la transferencia de calor, sino que también destaca por su resistencia a la corrosión, lo que le otorga una alta durabilidad, su estabilidad térmica le permite mantener su integridad incluso a altas temperaturas, garantizando su desempeño a largo plazo en condiciones exigentes.

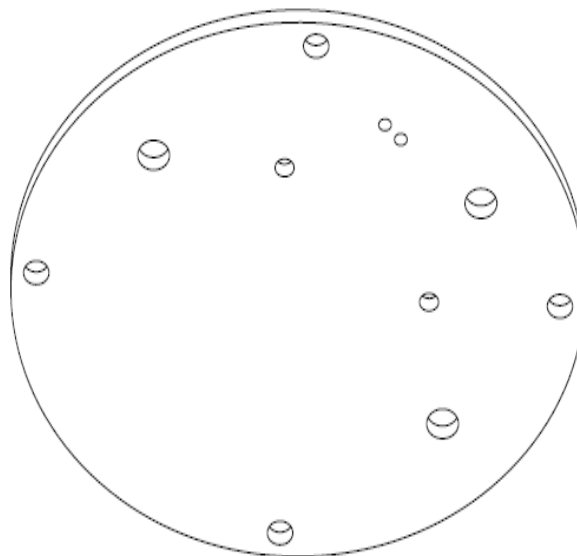


Figura 0.7- Boceto placa intermedia.

3.4.5 Soportes para el material semiconductor (electrodos).

Los cables conectan el sensor (electrodos) al milióhmetro, lo que permite medir la resistencia eléctrica del material cuando se expone a diferentes concentraciones de gas. Están diseñados con conexiones de alta calidad que garantizan una transmisión precisa de las señales entre el sensor y el milióhmetro, lo cual es esencial para obtener lecturas exactas. Estos cables también están fabricados con materiales capaces de soportar altas temperaturas sin perder funcionalidad durante las pruebas. Se pretende

hacer uso de electrodos de cobre, un material con una resistividad ideal, algunos de los bocetos son los mostrados en la Figura. 3.8.

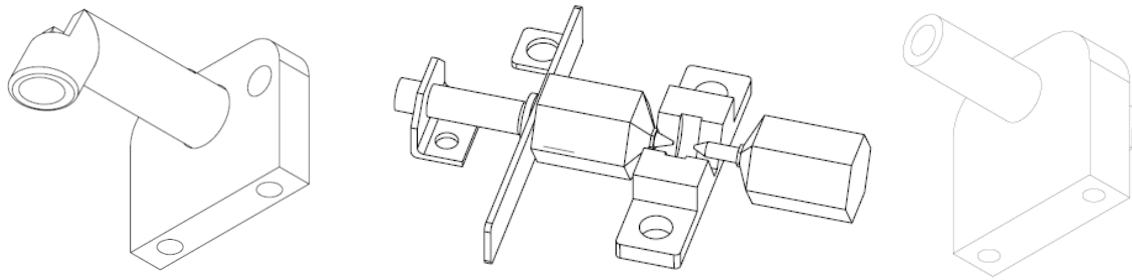


Figura 0.8- Bocetos de los posibles soportes de los electrodos.

3.5 Componentes no diseñados.

3.5.1 Termopar.

El termopar tipo K, se coloca en el sensor con el objetivo de medir la temperatura interna y asegurar que se mantenga dentro de los límites establecidos para un rendimiento adecuado. Este componente ofrece una alta precisión en la medición de la temperatura, lo cual es esencial para garantizar que el sensor opere dentro de los rangos de temperatura óptimos y que las condiciones experimentales sean controladas con exactitud. El termopar tiene una rápida respuesta a los cambios de temperatura, lo que permite realizar ajustes inmediatos en el sistema de calentamiento, asegurando que el sensor se mantenga en su estado de operación ideal en todo momento.

3.5.2 Placa de calentamiento.

La placa de calentamiento ilustrada en la Figura. 3.9, tiene un papel fundamental en el funcionamiento del sensor, ya que es la encargada de generar el calor necesario para mantener la temperatura ideal de operación. Esta placa está diseñada para distribuir el calor de manera eficiente, evitando la formación de puntos calientes que pudieran interferir con la respuesta del sensor, lo que asegura mediciones precisas. Además, está conectada a un controlador de temperatura que permite ajustar con precisión la temperatura de la placa en función de las necesidades experimentales, lo que garantiza que el sensor se mantenga en condiciones óptimas de funcionamiento a lo largo del proceso de prueba. Se esbozo una placa de calentamiento, sin embargo,

lo ideal es adquirir alguna disponible del mercado y adecuar los componentes clave, como la placa intermedia y las dimensiones de algunos otros componentes.

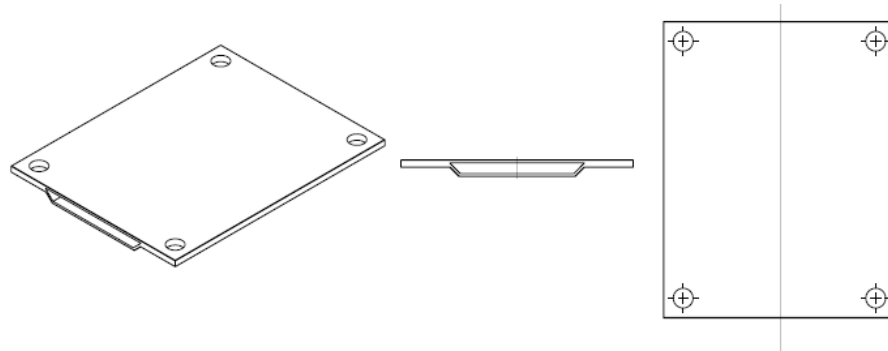


Figura 0. 9- Boceto placa de calentamiento.

3.5.3 Conexiones para la placa de calentamiento.

Se emplean cables que soporten las altas temperaturas para conectar la placa de calentamiento al sistema de control de temperatura, lo que permite una regulación precisa del calor en el sensor. Estos cables están diseñados para soportar las altas temperaturas sin degradarse, garantizando su funcionalidad a lo largo del proceso de prueba, las conexiones de los cables son seguras y herméticas, lo que evita cualquier interferencia o pérdida de calor que podría afectar tanto el control de la temperatura como el funcionamiento general del sensor, asegurando la estabilidad del sistema y la precisión de las mediciones.

3.5.4 Controlador de temperatura.

La elección del controlador de temperatura adecuado para la placa de calentamiento es esencial para garantizar el funcionamiento preciso del sensor. El controlador debe tener un rango de temperatura adecuado que cubra las necesidades del sensor, asegurando que se mantenga dentro de las condiciones de operación ideales. La precisión del controlador debe ser alta, con tolerancias mínimas, como $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, para evitar fluctuaciones que puedan afectar las mediciones. Además, el tiempo de respuesta debe ser rápido para ajustar la temperatura de forma inmediata, manteniendo la estabilidad del sistema.

Es crucial que el controlador tenga entradas compatibles con los sensores de temperatura empleados, como termopares tipo K, y salidas que puedan controlar adecuadamente la placa calefactora, mediante relés o TRIACs. Un controlador con capacidad PID es ideal para mantener la temperatura constante, eliminando

fluctuaciones. Asimismo, debe contar con funciones de seguridad como límites de temperatura para evitar sobrecalentamientos y garantizar la protección del sistema. Por último, el controlador debe ser fácil de calibrar y configurar, permitiendo ajustes rápidos según las condiciones experimentales, lo que optimiza su integración con el sensor.

3.5.5 Sistema de Atmósfera.

El sistema de atmósfera está compuesto por válvulas, bombas, controladores y otros componentes que gestionan el flujo de gases dentro de la cámara, asegurando que la atmósfera interna sea la adecuada para cada prueba. Se hace uso de una bomba de vacío para crear condiciones de presión controlada en la cámara, lo que permite eliminar cualquier gas residual y garantizar la pureza de las mezclas gaseosas. Los tanques suministradores de gas proporcionan las fuentes necesarias para las pruebas, mientras que las mangueras de conexión aseguran la correcta distribución de los gases hacia la cámara. Las válvulas de entrada regulan el flujo de los gases, permitiendo ajustar la cantidad que se introduce en el sistema. Además, el flujómetro integrado mide con precisión la tasa de flujo de los gases, lo que garantiza que se mantengan las condiciones experimentales deseadas. Cada uno de estos componentes fue seleccionado para asegurar el control preciso de la atmósfera dentro del sensor, lo que optimiza el rendimiento y la precisión de las mediciones. El diseño integral permite evaluar la respuesta del sensor a los gases de interés bajo condiciones controladas, asegurando estabilidad, durabilidad y exactitud en las pruebas realizadas.

3.6 Identificación de gases.

Para seleccionar los gases que un sensor de ferrita de lantano (LaFeO_3) detectará con mayor eficiencia, es fundamental considerar las características de interacción entre las moléculas del gas y la superficie del material. LaFeO_3 es conocido por sus propiedades semiconductoras, particularmente su capacidad para cambiar de resistencia eléctrica en presencia de ciertas moléculas de gases oxidantes y reductores, lo cual es una base crucial para su sensibilidad como sensor de gases.

Los gases que pueden ser detectados con mayor sensibilidad en sensores de LaFeO_3 generalmente incluyen tanto gases oxidantes (como NO_2 y O_2) como gases reductores

(como CO, H₂, y CH₄). Este rango de detección depende de cómo la superficie de LaFeO₃ responde a cada tipo de gas. Los gases oxidantes, al adsorberse en la superficie, tienden a captar electrones del material, lo que aumenta la resistencia del sensor. Por el contrario, los gases reductores pueden donar electrones a la ferrita de lantano, disminuyendo su resistencia. Estos cambios en la resistencia pueden ser medidos y correlacionados con la concentración del gas objetivo.

Para optimizar la selectividad del sensor hacia un gas específico, se pueden realizar modificaciones en el material, como el dopado con otros elementos (por ejemplo, Co, Ni o Mn) que alteren las propiedades electrónicas y la afinidad del LaFeO₃ con ciertos gases. Además, el control de parámetros de operación, como la temperatura, permite una mayor selectividad; al modificar la temperatura de trabajo del sensor, se favorece la adsorción de ciertos gases en la superficie sobre otros. Por ejemplo, la LaFeO₃ dopada y operando a temperaturas entre 200°C y 400°C ha mostrado mayor sensibilidad hacia el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno (H₂) debido a que estas temperaturas facilitan la reactividad de estos gases en la superficie del sensor (Vasile & Ghenescu, 2010).

Teniendo en cuenta los gases propuestos además de la disponibilidad de los mismos se decidieron los siguientes gases:

Nitrógeno (N₂)- el nitrógeno es un gas inerte que se utiliza comúnmente como gas de referencia o ambiente base en pruebas de sensores de gases debido a su falta de reactividad. Su presencia permite establecer condiciones de referencia y comparativas, minimizando posibles reacciones químicas en la superficie del material. En este caso, el nitrógeno proporcionará un ambiente neutro que ayuda a evaluar cómo responde el LaFeO₃ en comparación con atmósferas que contienen gases más reactivos, permitiendo una mejor interpretación de los cambios en la resistencia eléctrica del sensor (Fraigi et al., 2001).

Oxígeno (O₂)- el oxígeno es un gas oxidante de gran relevancia en la detección de gases, ya que su interacción con materiales semiconductores como LaFeO₃ tiende a influir significativamente en la resistencia eléctrica del material. La presencia de oxígeno es fundamental para simular atmósferas naturales o industriales donde este gas está presente en abundancia y desempeña un papel activo en reacciones de combustión y procesos de corrosión. La ferrita de lantano es particularmente sensible

a gases oxidantes, y al incluir oxígeno en las pruebas, se podrán estudiar los cambios en sus propiedades eléctricas en función de diferentes concentraciones, así como su posible impacto en la sensibilidad y selectividad del sensor (Hodgkinson & Tatam, 2013).

Argón (Ar)- al igual que el nitrógeno, el argón es un gas inerte y se emplea en muchas aplicaciones de detección de gases debido a su estabilidad y su mínima interacción con los materiales semiconductores. Argón puede servir como gas de purga o de dilución en sistemas de detección y, en este contexto, su inclusión permitirá comprobar la estabilidad del sensor bajo condiciones inertes y estudiar cómo responde LaFeO_3 en un ambiente libre de oxígeno y sin reactividad significativa. Además, el argón es útil en la preparación de mezclas de gases y en la generación de atmósferas controladas para investigar la influencia de otros gases específicos sin interferencias.

Dióxido de Carbono (CO_2)- el dióxido de carbono es un gas ampliamente presente en aplicaciones industriales y ambientales. Su interacción con materiales como LaFeO_3 es importante para evaluar la respuesta del sensor en contextos que requieren la detección o monitoreo de CO_2 , como en el control de calidad del aire, en industrias de procesamiento, y en sistemas de ventilación. El CO_2 tiene propiedades que pueden alterar la resistencia del semiconductor a través de procesos de adsorción y posibles reacciones en la superficie del sensor. Evaluar el desempeño del sensor en presencia de CO_2 permitirá no solo ampliar el rango de detección del sistema, sino también simular escenarios reales donde el monitoreo de este gas es esencial (Barsan & Weimar, 2001).

3.7 Selección del material semiconductor.

Durante el desarrollo del proyecto de tesis se ha dejado en claro la importancia y lo estratégico que es el uso de la ferrita de lantano LaFeO_3 . Es importante mencionar que una de las principales razones por las cuales este sensor se desarrolló con este material en particular es porque el Laboratorio de Cerámicos Avanzados ya trabajaba en proyectos con este material viendo sus posibles aplicaciones y una de ellas fue un sensor a base de la ferrita de lantano. Sin embargo, para fundamentar su aplicación es importante mencionar:

Propiedades semiconductoras favorables debido a que es un material semiconductor del tipo p, que exhibe una banda prohibida (band gap) relativamente amplia, lo que le permite operar de manera eficiente en un rango de temperaturas intermedias (200-400°C), donde la sensibilidad de los sensores de gases suele ser mayor. Esta propiedad es crucial, ya que permite que LaFeO_3 responda de manera significativa a la presencia de gases oxidantes y reductores en el ambiente.

Alta capacidad de interacción con gases debido a la estructura perovskita de LaFeO_3 , con su geometría ortorrómbica, permite una alta densidad de sitios activos en la superficie, facilitando la adsorción de diferentes moléculas de gas. Esta característica es esencial para su uso como sensor, ya que la respuesta del material se basa en la interacción directa entre la superficie del semiconductor y las moléculas de gas objetivo. La adsorción y desorción de gases modifican la conductividad eléctrica del material, proporcionando una señal medible que se correlaciona con la concentración del gas.

Estabilidad térmica y química lo que la hace adecuada para aplicaciones en condiciones de operación exigentes, como altas temperaturas o atmósferas cambiantes. Esta propiedad es particularmente ventajosa para la detección de gases industriales y de combustión, donde las fluctuaciones de temperatura pueden afectar significativamente el rendimiento de otros materiales menos estables. Además, su estructura cerámica le proporciona resistencia a la corrosión, ampliando la vida útil del sensor.

3.8 Etapa II Fabricación.

El cuerpo del sensor fue fabricado en acero inoxidable, material seleccionado por su alta resistencia a la corrosión y su robustez estructural, cualidades esenciales para garantizar la durabilidad y estabilidad del sistema durante las pruebas experimentales. Este cuerpo actúa como soporte principal para todos los componentes del sensor, incluyendo la cámara de gas, la tapa, placa intermedia y otros sistemas críticos. Además, el diseño integra un soporte específico para el vidrio de la cámara, asegurando que este se mantenga firmemente en su lugar y esté protegido contra posibles desplazamientos o daños provocados por vibraciones o movimientos, lo que asegura un funcionamiento confiable y seguro del sensor.

El cuerpo del sensor fue diseñado con orificios específicos para la instalación de los controladores de temperatura y sistemas de medición, como el milióhmetro, que permite una lectura precisa de la variación de resistencia del sensor. Asimismo, incorpora válvulas que controlan el flujo ilustradas en la Figura. 3.10. y la presión de los gases que circulan dentro de la cámara del sensor, lo que facilita la modificación de la atmósfera interna según las necesidades experimentales.



Figura 0. 10- Válvulas de suministro de gas.

3.8.1 Base de la cámara.

Encargada no solo de proporcionar soporte estructural, sino también de almacenar y proteger los componentes internos del sensor. Esta base alberga elementos clave como la placa de calentamiento, la placa intermedia, el soporte del semiconductor (electrodos) y los cables necesarios para las conexiones eléctricas y térmicas. Al ser fabricada en acero inoxidable, cumple con las propiedades excepcionales que garantizan su durabilidad y fiabilidad en condiciones extremas.

El acero inoxidable es una elección ideal debido a su alta resistencia a la corrosión, lo que asegura que la base mantenga su integridad incluso en ambientes agresivos y de alta humedad. Esto es crucial, ya que los componentes internos, incluidos los cables y electrodos, deben permanecer protegidos de cualquier posible daño o interferencia ambiental. La resistencia a la corrosión también garantiza que la base del sensor tenga una vida útil prolongada, minimizando el riesgo de desgaste prematuro o fallos en el sistema. Además, el acero inoxidable es conocido por su estabilidad térmica, lo que significa que puede soportar un rango amplio de temperaturas sin perder sus propiedades mecánicas. Esto es particularmente importante, ya que la base del sensor debe mantener su estructura firme y funcional bajo condiciones de calentamiento intenso generadas por la placa de calentamiento y las variaciones

térmicas en el entorno de trabajo. De esta manera, la base asegura que los componentes internos, como la placa intermedia y los electrodos del semiconductor, se mantengan en su lugar y en condiciones óptimas para su funcionamiento.

La base ilustrada en la Figura. 3.11 a), también está diseñada para alojar de manera eficiente los cables necesarios para la conexión de los distintos sistemas del sensor, incluyendo los cables de alta temperatura que se conectan a la placa de calentamiento y los cables de señal que facilitan la transmisión de datos entre los componentes eléctricos y el sistema de control. La capacidad de la base para albergar estos componentes de manera organizada y segura es esencial para evitar interferencias y garantizar el buen funcionamiento del sensor.

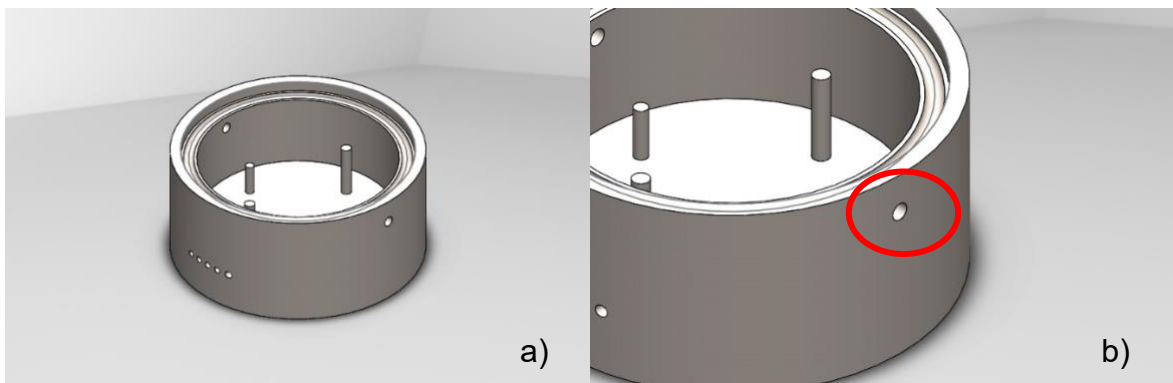


Figura 0.11- Vista 3D de la base de la cámara.

En la Figura. 3.11 b), se muestra un orificio que se proyecta en la cara posterior y es el encargado del suministro de gas por medio de válvulas manuales Figura. 3.10, este orificio lleva un roscado M10 que se realiza en los mecanizados posteriores.

En términos de diseño, la base debe ser lo suficientemente robusta para resistir impactos, vibraciones y las condiciones de operación severas sin deformarse. La fabricación en acero inoxidable no solo proporciona una excelente resistencia mecánica, sino también una gran flexibilidad en cuanto a diseño, permitiendo personalizar la base para cumplir con las especificaciones técnicas requeridas por el sensor.

3.8.2 Vidrio de la cámara

La cámara del sensor ilustrada en la Figura. 3.12 está fabricada en vidrio, un material transparente y químicamente inerte, que ofrece múltiples ventajas en un entorno de

investigación. Su transparencia permite la observación directa de los componentes internos y de los procesos que ocurren en el sensor, facilitando la inspección visual durante las pruebas y el monitoreo en tiempo real de las reacciones entre los gases y el material sensor.

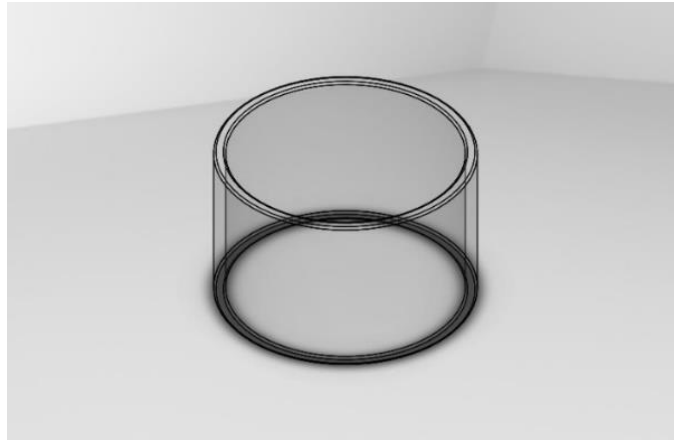


Figura 0.12- Vidrio vista 3D.

3.8.3 Tapa de Acero Inoxidable con O-Ring.

La tapa del sensor en la Figura. 3.13, fabricada en acero inoxidable, cumple una función esencial al cubrir la parte superior del cuerpo del sensor y garantizar un cierre hermético.

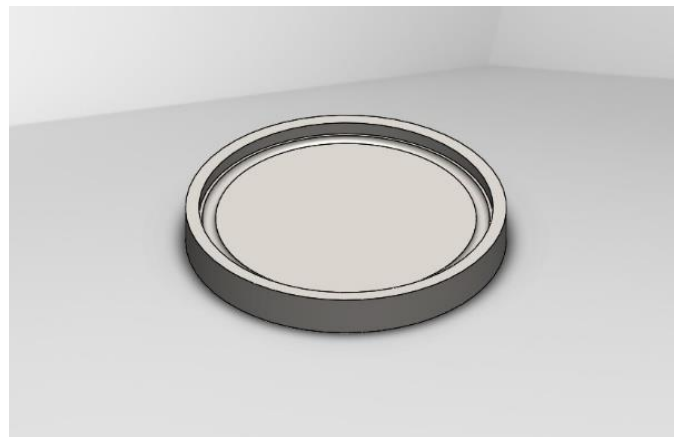


Figura 0.13- Tapa del sensor vista 3D.

Se ajusta firmemente al cuerpo mediante un O-ring de sellado ilustrado en la Figura. 3.14, un componente clave que previene cualquier fuga de gas dentro de la cámara y asegura que la atmósfera interna permanezca controlada durante las pruebas.

Además, la tapa está diseñada para proporcionar acceso directo al interior del sensor, lo que permite realizar intervenciones rápidas, como la sustitución de componentes,

la introducción de nuevos gases o el ajuste de sistemas de medición, como termopares o cables de conexión.

Esta combinación de sellado confiable y accesibilidad práctica hace que la tapa sea un elemento indispensable para el correcto funcionamiento y mantenimiento del sensor en un entorno de investigación.

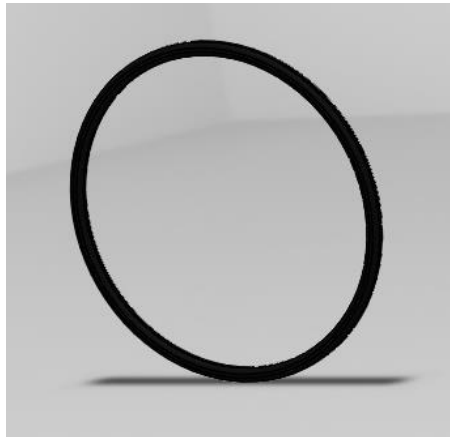


Figura 0.14- O-Ring vista 3D.

3.8.4 Placa Intermedia (Acero inoxidable).

La placa intermedia, así mismo fabricada en acero inoxidable, desempeña un papel crucial al servir como soporte para la placa de calentamiento dentro del sensor. Su función principal es proporcionar una base sólida que permita la distribución uniforme del calor hacia la superficie del sensor, asegurando así un control térmico preciso y estable durante las pruebas. Este diseño garantiza que el calor se transmita de manera eficiente, evitando gradientes de temperatura que puedan afectar el rendimiento del sensor. Además, gracias a las propiedades del acero inoxidable, la placa intermedia ofrece una alta resistencia a la corrosión y mantiene su estabilidad estructural incluso a temperaturas elevadas, lo que la convierte en un componente indispensable para garantizar la durabilidad y fiabilidad del sistema en aplicaciones de investigación exigentes. Esta placa intermedia como se ve en la Figura. 3.15 cuenta con los orificios necesarios para cada componente antes diseñado, tanto para las conexiones de componentes internos como orificios que brinden un soporte adecuado.

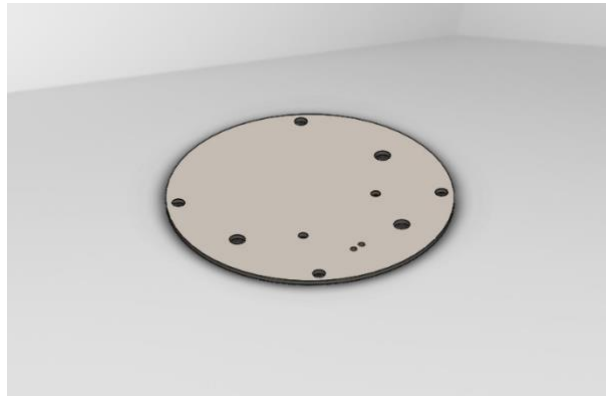


Figura 0.15- Placa intermedia vista 3D.

3.8.5 Placa de calentamiento.

La placa de calentamiento es un componente esencial en el diseño del sensor, ya que es la responsable de generar y distribuir el calor necesario para mantener el sensor a la temperatura de operación ideal. En este caso, se ha optado por una placa calefactora PTC LUXIANZI ilustrada en la Figura. 3.16, que es conocida por su alta eficiencia en la distribución del calor y su capacidad de autorregulación en función de la temperatura.

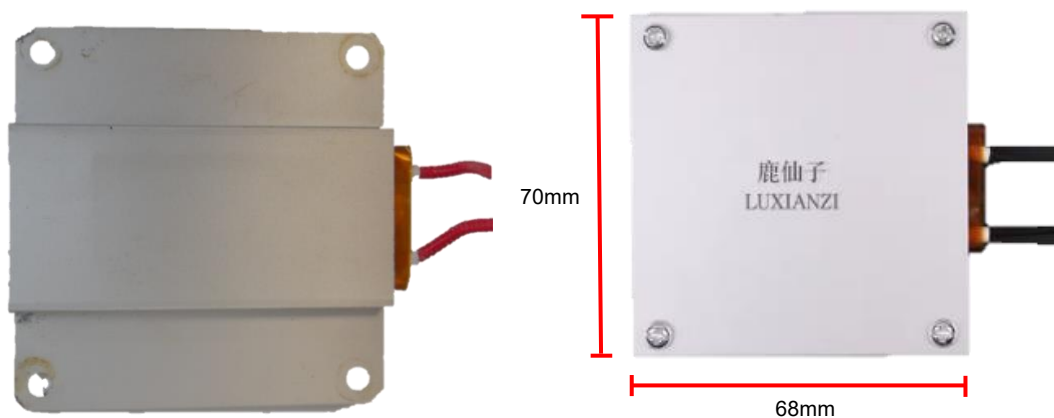


Figura 0.16- Placa de calentamiento.

Características:

Material adecuado para calentamiento- la placa PTC (Coeficiente de Temperatura Positiva) está diseñada para distribuir el calor de manera eficiente y uniforme. El material utilizado permite que la placa se ajuste automáticamente a la temperatura de funcionamiento sin necesidad de control externo adicional, reduciendo el riesgo de puntos calientes que pudieran alterar la respuesta del sensor.

Control de temperatura- conectada a un controlador de temperatura, la placa mantiene la temperatura del sensor dentro de los límites óptimos para su funcionamiento. La placa PTC tiene la capacidad de autorregulación, lo que significa que, a medida que la temperatura aumenta, la resistencia del material también aumenta, lo que limita el flujo de corriente y estabiliza la temperatura, garantizando que el sensor no se sobrecaliente. Este sistema de control integrado permite ajustar la temperatura de la placa según las necesidades experimentales, asegurando condiciones óptimas de operación sin sobrepasar los valores críticos para el sensor.

3.8.6 Conexiones para la placa de calentamiento.

Para garantizar el correcto funcionamiento de la placa de calentamiento, se emplean cables de alta temperatura como en la Figura. 3.17, que la conectan al sistema de control de temperatura, permitiendo una regulación precisa del calor en el sensor. Estos cables están fabricados con materiales capaces de soportar altas temperaturas sin degradarse, como el silicón reforzado o la fibra de vidrio recubierta, lo que asegura su desempeño incluso en condiciones extremas. Además, las conexiones de los cables son herméticas, lo que evita filtraciones de aire o gas y previene interferencias electromagnéticas, asegurando que el sensor mantenga una temperatura constante y funcione de manera confiable durante las pruebas.

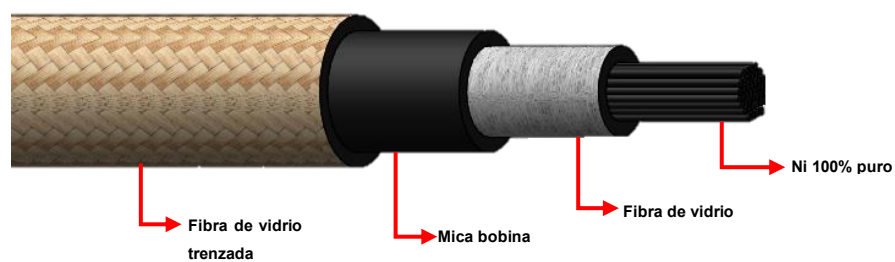


Figura 0.17- Cables resistentes a alta temperaturas.

3.8.7 Termopar.

El termopar seleccionado para el sensor es un componente crucial para garantizar que la temperatura interna se mantenga dentro de los límites establecidos. Este dispositivo, al estar conectado al sistema de control de temperatura, permite la medición precisa y continua de la temperatura del sensor. El termopar ofrece alta precisión en medición, lo que es fundamental para asegurar que el sensor opere dentro de los rangos de temperatura óptimos, evitando fluctuaciones que puedan

afectar su rendimiento. Además, presenta una rápida respuesta a los cambios de temperatura, lo que permite al sistema de control ajustar de manera eficiente la temperatura en tiempo real, asegurando así que el sensor mantenga condiciones estables durante las pruebas. Con su capacidad para realizar mediciones confiables y rápidas, el termopar contribuye significativamente a la estabilidad y fiabilidad del sistema de calefacción del sensor.

3.8.8 Milióhmetro.

Los cables conectan el sensor con el milióhmetro para medir la resistencia eléctrica del material mientras se expone a diferentes concentraciones de gas. Para este propósito, se ha seleccionado el milióhmetro GW Instek GOM-804 ilustrado en la Figura. 3.18, un dispositivo preciso y confiable ideal para medir la resistencia del sensor. Este modelo es particularmente adecuado para la evaluación de materiales semiconductores, ya que puede medir con exactitud las variaciones de resistencia en condiciones de alta temperatura y exposición a gases. Las conexiones precisas son de alta calidad, garantizando una transmisión exacta de señales entre el sensor y el milióhmetro, lo cual es crucial para obtener datos confiables sobre el comportamiento del sensor. Adicionalmente, los cables que conectan estos dos elementos están recubiertos con un material polimérico resistente al calor, lo que les permite soportar las altas temperaturas generadas en el sensor durante las pruebas sin comprometer la fiabilidad de las mediciones.



Figura 0.18- Milióhmetro GW Instek, modelo GOM-804.

3.8.9 Sistema de Atmósfera.

El sistema de atmósfera desempeña un papel fundamental en el control de las condiciones dentro de la cámara del sensor, permitiendo crear y mantener un entorno atmosférico específico para cada prueba.

3.8.9.1 Bomba de vacío.

La bomba de vacío Leroy Somer LS71P se encarga de generar un vacío en la cámara, eliminando el aire y otros gases no deseados, lo que permite que el sistema introduzca solo los gases necesarios para la prueba. Su motor de alto rendimiento asegura una evacuación eficaz, proporcionando un vacío adecuado para crear condiciones controladas en el interior de la cámara. Esto es crucial para obtener resultados precisos, especialmente cuando se trabaja con concentraciones específicas de gases en pruebas de sensores.

3.8.9.2 Tanques almacenadores de gas.

Los tanques de gas Infra almacenan los gases que se utilizarán durante las pruebas. Estos tanques están diseñados para contener diferentes tipos de gases a alta presión y asegurarse de que estén disponibles cuando sea necesario. La selección de los tanques adecuados es vital para mantener la pureza de los gases, lo que a su vez asegura la precisión de los resultados de las pruebas.

3.8.9.3 Flujoímetro.

El flujoímetro LZM-6T N2 es otro componente esencial en el sistema de atmósfera. Este dispositivo mide y controla el flujo de gas dentro de la cámara, permitiendo la introducción precisa de cantidades específicas de gases. El flujoímetro es especialmente importante para garantizar que la mezcla de gases se ajuste correctamente, lo que puede ser necesario para simular diferentes condiciones atmosféricas durante las pruebas. El LZM-6T N2 mostrado en la Figura. 3.19, diseñado para trabajar con gases como el nitrógeno, proporciona mediciones exactas y asegura que el flujo de gas no varíe, lo cual es fundamental para mantener un entorno constante dentro de la cámara.



Figura 0.19 - Flujómetro LZM-6T N2.

3.8.10 Planos base de la cámara.

Dentro de esta estructura cilíndrica, se incorporaron estratégicamente postes de soporte como en la Figura. 3.20 a), que sirven como puntos de anclaje para una placa intermedia donde se montarán los sistemas del sensor. Esta disposición interna es fundamental para mantener la alineación precisa de los componentes del sensor y garantizar un funcionamiento estable durante la operación.

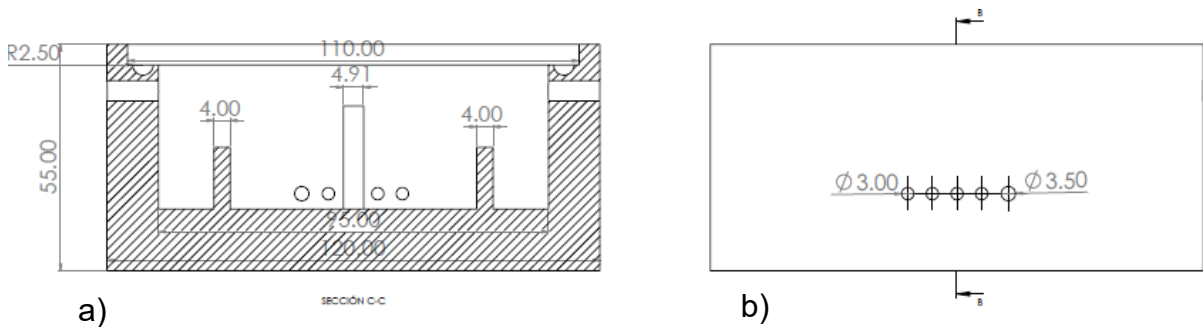


Figura 0.20 - Base de la cámara del sensor, a) Sección C-C, b) Vista frontal.

En la Figura. 3.20 b), se observan los orificios necesarios para el correcto funcionamiento de los componentes internos, cabe mencionar que uno de los cinco orificios es de mayor diámetro, diseñado así para dejar un margen óptimo en cuanto a las dimensiones del cable del termopar, ya que es más ancho que los cables de alimentación de la placa de calentamiento o los electrodos. En la Figura. 3.21, se observa la disposición de los postes de soporte.

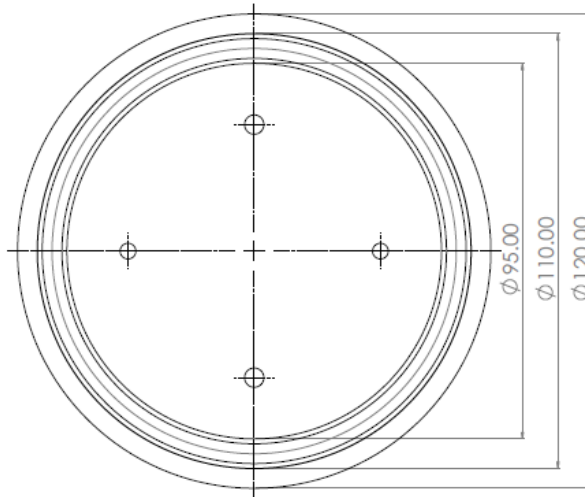


Figura 0.21 - Base de la cámara del sensor, vista planta.

3.8.11 Planos placa intermedia.

La función de esta placa es brindar un soporte a los componentes internos del sensor teniendo en cuenta la distribución correcta de los orificios en función del cableado y tornillos de fijación, los planos y proyección 3D se muestran en la Figura. 3.22, donde se muestran las cotas de cada orificio.

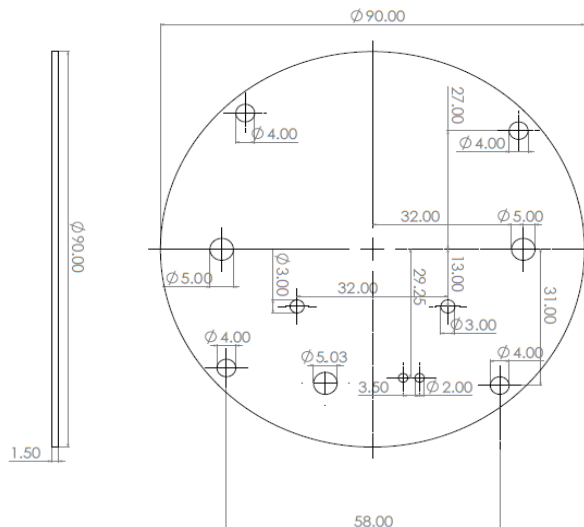


Figura 0.22- Placa intermedia, vista lateral y vista planta.

3.8.12 Planos tapa de la cámara.

Esta parte de la cámara es una proyección de la parte superior del cuerpo, ya que es la misma geometría para tener un sello con el vidrio, también cuenta con los biselados necesarios para introducir un O-ring. Los planos en la Figura. 3.23, y la proyección en

3D nos ayudan a comprender la geometría y la función de esta parte del sensor.

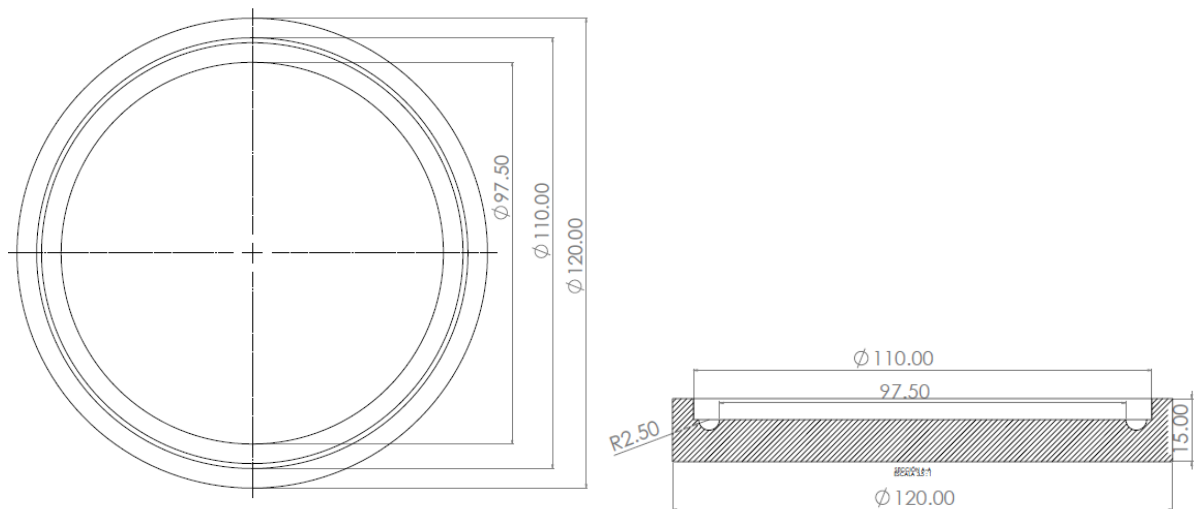


Figura 0.23- Tapa del sensor, vista planta y sección B-B]

3.8.13 Ensamblaje de la cámara.

Cada una de las partes mencionadas en el diseño del cuerpo de la cámara cumple una función específica, contribuyendo de manera integral a la creación de una cámara óptima para las pruebas de detección de gases ilustrada en los planos en la Figura. 3.24.

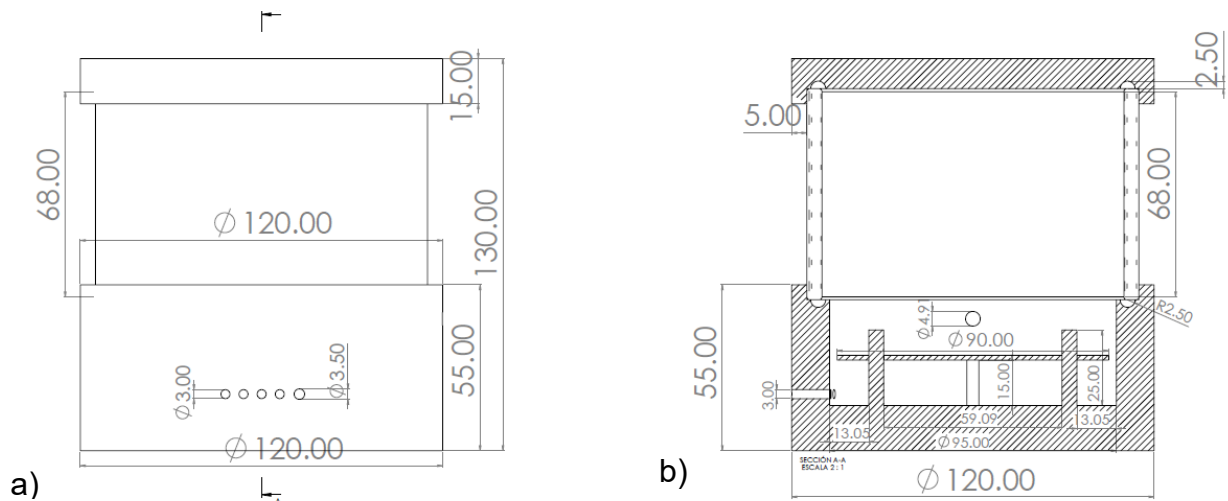


Figura 0.24 - a) vista frontal, b) sección B-B del ensamblaje.

La proyección en 3D ilustrada en la Figura. 3.25, facilita la visualización detallada del diseño y de cómo cada componente se integra dentro de la cámara. Además, permite identificar cualquier ajuste o mejora que se pueda requerir antes de la fabricación final.

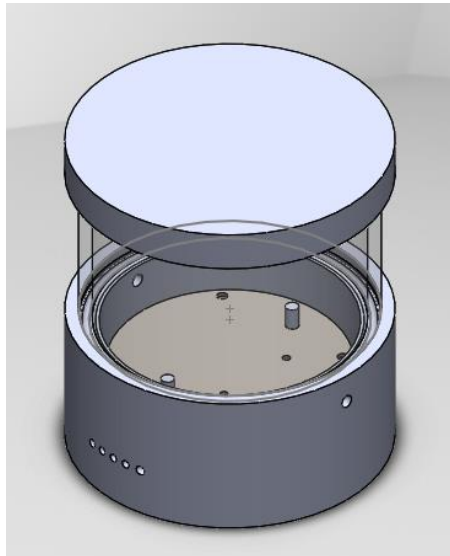


Figura 0.25 - Proyección 3D del ensamblaje.

El diseño final de la estación de experimentación se ilustra en la Figura 3.26, teniendo dos principales estaciones divididas en a) sensor y sistemas adicionales, y b) sistema de medición de resistencia.

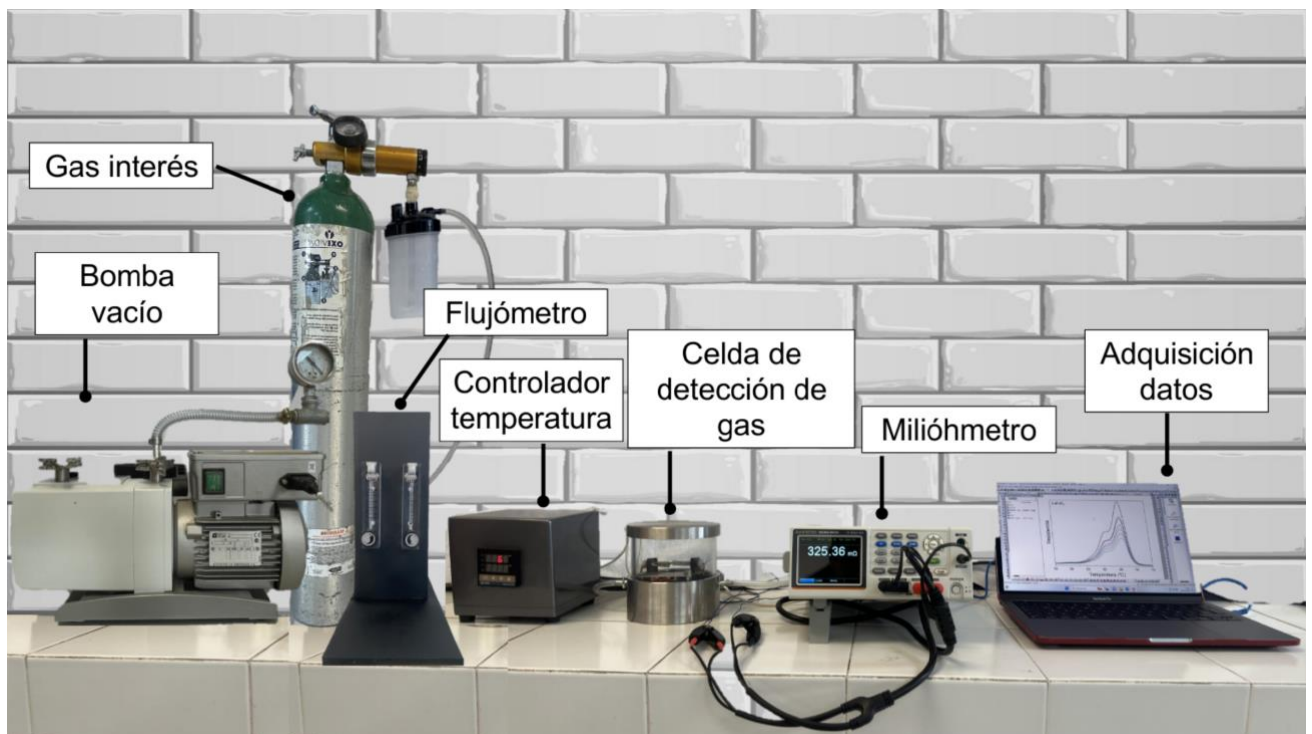


Figura 0.26- Sistema de evaluación de sensor de gases.

Capítulo IV. Resultados.

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de fabricación de una cámara de detección de gases, así como el proceso de validación para la caracterización de ferritas de lantano como sensores.

4.1. Fabricación del sensor.

El sensor fue fabricado con acero inoxidable AISI 316L, seleccionado por su elevada resistencia a la corrosión frente a los gases analizados. En la Figura 4.1 se presentan sus componentes principales, destacando en la parte superior de la celda la incorporación de vidrio Pyrex, material reconocido por su excelente resistencia a los choques térmicos, lo que permite un acceso visual directo para la observación de los fenómenos experimentales en tiempo real. En su interior, se integró un sistema de sujeción compuesto por cables de cobre de 5 mm de diámetro, los cuales desempeñan una doble función: servir como soporte estructural y actuar como electrodos de medición para el semiconductor. Este último, conformado en forma de pellet con dimensiones aproximadas de 10 a 15 mm de diámetro y un espesor de 2 a 5 mm, se encuentra conectado a los electrodos de cobre, los cuales están aislados mediante un polímero dieléctrico para prevenir cortocircuitos.

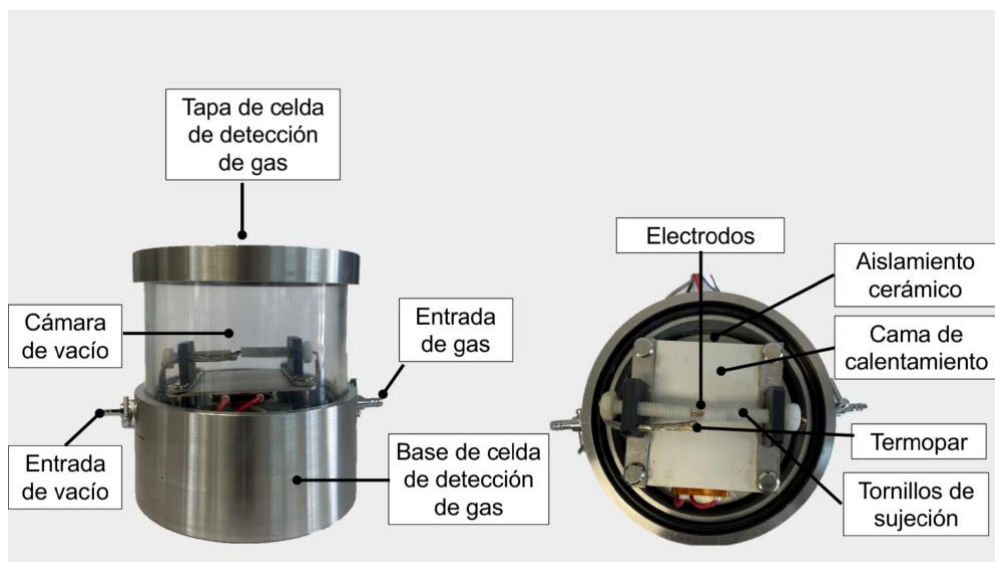


Figura 0.1- Ensamblaje físico del sensor.

La celda cuenta con un sistema de control de atmósfera que permite la regulación precisa de la concentración del gas de interés. Para ello, está equipada con una bomba de vacío modelo LEROY SOMER TEFC IP 44, capaz de alcanzar niveles de

vacío de hasta 20 mBar antes de la introducción del gas a analizar. Además, incluye una placa de calentamiento de aluminio de la marca PTC Heating Plate, controlada mediante un sistema PID REX-C100, que permite operar en un rango de temperaturas entre 20 °C y 450 °C. Este diseño integral asegura condiciones óptimas de operación y precisión en la evaluación del material semiconductor.

4.2 Validación en comparación de un sensor comercial.

En esta sección se presenta la validación del desempeño del sensor desarrollado mediante la comparación de sus resultados con valores ya reportados en la literatura para un sensor comercial. Este enfoque permite evaluar la sensibilidad, repetibilidad y demás parámetros de operación del sensor propuesto, utilizando como referencia un dispositivo ampliamente estudiado y aceptado en aplicaciones de detección de gases.

Se seleccionó como referencia el sensor de gases MQ-135, fabricado por Hanwei Electronics, debido a su amplia disponibilidad, reconocimiento en investigaciones científicas y su capacidad para detectar múltiples gases, incluyendo amoníaco (NH_3), óxidos de nitrógeno (NO_x), alcoholes, benceno, y dióxido de carbono (CO_2). Según la literatura, este sensor presenta un rango de detección de 10 a 1000 ppm, con un tiempo de respuesta típico de 10 a 30 segundos (R. Sharma et al., 2022).

4.2.1 Metodología de validación.

Obtención de datos del sensor comercial: Los valores de sensibilidad, tiempo de respuesta y repetibilidad del MQ-135 fueron extraídos de estudios previamente publicados. Se seleccionaron artículos que proporcionaran datos experimentales detallados bajo condiciones similares a las aplicadas en las pruebas del sensor desarrollado.

Simulación de condiciones de prueba:

Se utilizó una cámara de análisis conectada a un sistema de control de atmósfera capaz de suministrar concentraciones de gas dentro del rango operativo del MQ-135 y del sensor desarrollado. Las condiciones de prueba incluyeron concentraciones de gases en intervalos de 10, 50, 100, 200, y 500 ppm, controladas con un flujómetro modelo LZM-6T N2 y usando gas de alta pureza mayor al 99% (Infra).

4.2.2 Comparación de parámetros críticos.

Sensibilidad: Se evaluó el cambio relativo en la señal del sensor en función de la concentración del gas ($\Delta R/R_0$ para el sensor desarrollado y variaciones de voltaje para el MQ-135).

Repetibilidad: Se realizaron ciclos repetidos de exposición al gas para comparar la desviación estándar de las mediciones reportadas en la literatura con las obtenidas experimentalmente.

Tiempo de respuesta: Se registró el tiempo requerido por ambos sensores para estabilizar su señal al alcanzar una nueva concentración de gas.

4.2.3 Resultados esperados.

El MQ-135 reporta una sensibilidad moderada a concentraciones de amoníaco y dióxido de carbono, pero presenta ciertas limitaciones para detectar concentraciones inferiores a 10 ppm, según lo informado por Yang et al. (Yang et al., 2021). En comparación, se espera que el sensor desarrollado, basado en materiales semiconductores avanzados como LaFeO_3 , pueda superar estos valores en términos de sensibilidad a bajas concentraciones y tiempos de recuperación.

4.3 Evaluación de la sensibilidad y repetividad.

4.3.1 Evaluación de Sensibilidad.

La sensibilidad se refiere a la capacidad del sensor de detectar pequeñas variaciones en la concentración del gas. La evaluación de la sensibilidad implica exponer el sensor a concentraciones conocidas de gas y medir su respuesta.

Para llevar a cabo la evaluación de la sensibilidad se realizan los siguientes pasos:

Exposición a diferentes concentraciones de gas- el sensor se expone a una serie de concentraciones de gas en un rango específico. Este rango debe cubrir las concentraciones mínimas y máximas que el sensor necesita detectar en condiciones operativas reales.

Medición de la señal de salida. durante la exposición, se mide la respuesta del sensor, que puede ser en términos de resistencia, voltaje, corriente, o cualquier otra variable asociada a la detección de gas.

Cálculo de la sensibilidad- la sensibilidad se calcula evaluando el cambio en la señal de salida del sensor en función de la concentración del gas. Se obtiene una curva de calibración que muestra cómo cambia la señal del sensor con las concentraciones de gas.

La sensibilidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta S}{\Delta C} \qquad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

ΔS : Cambio en la señal de salida, en ohmios (Ω).

ΔC : Cambio en la concentración del gas, en ppm.

Esta ecuación está directamente relacionada con el cálculo de la sensibilidad del sensor, que se refiere a la capacidad del sensor para responder a un cambio en la concentración de un gas.

Usualmente la variación de la señal de salida en función a la concentración del gas tenía una tendencia ideal, es decir, sin valores fuera del rango esperado, obteniendo resultados más influenciados por el incremento de temperatura.

Para el correcto funcionamiento del sistema se realiza la prueba de medición de blanco, el cual consiste en hacer un análisis del sistema solo en presencia de los gases de interés, sin ningún tipo de material semiconductor o sensor, esto para validar que el sistema funciona y que no se tenga contribución a la medición los electrodos y la parte eléctrica, como se observa en la Figura. 4.2, se tiene una gráfica que es típica de un material metálico, en el cual se observa un incremento en la conductividad con el aumento de la temperatura, para la validación del sistema se realizó una medición sin la presencia de gas, en la cual se observa el comportamiento de un material metálico, con la incorporación de diferentes tipos de gases se observa un decaimiento de la resistencia, el cual se atribuye a que al estar en constante flujo el gas, el sistema tiene una variación de temperatura, ya que el gas no se calienta previamente pudiendo tener una diferencia de temperatura que se ve en la disminución de la resistencia, en comparación con el oxígeno, que es un gas de grado médico, este por si naturaleza

puede calentar de más el sistema y es por ello que se observa un incremento de la resistencia pasando de un promedio de 225 a 230 mΩ y con el aumento de la temperatura pasar a tener 245 mΩ, estas mediciones nos sirven para poder calibrar el sistema y a mediciones con un material semiconductor, poder restarles las contribuciones que hace cada gas y los electrodos.

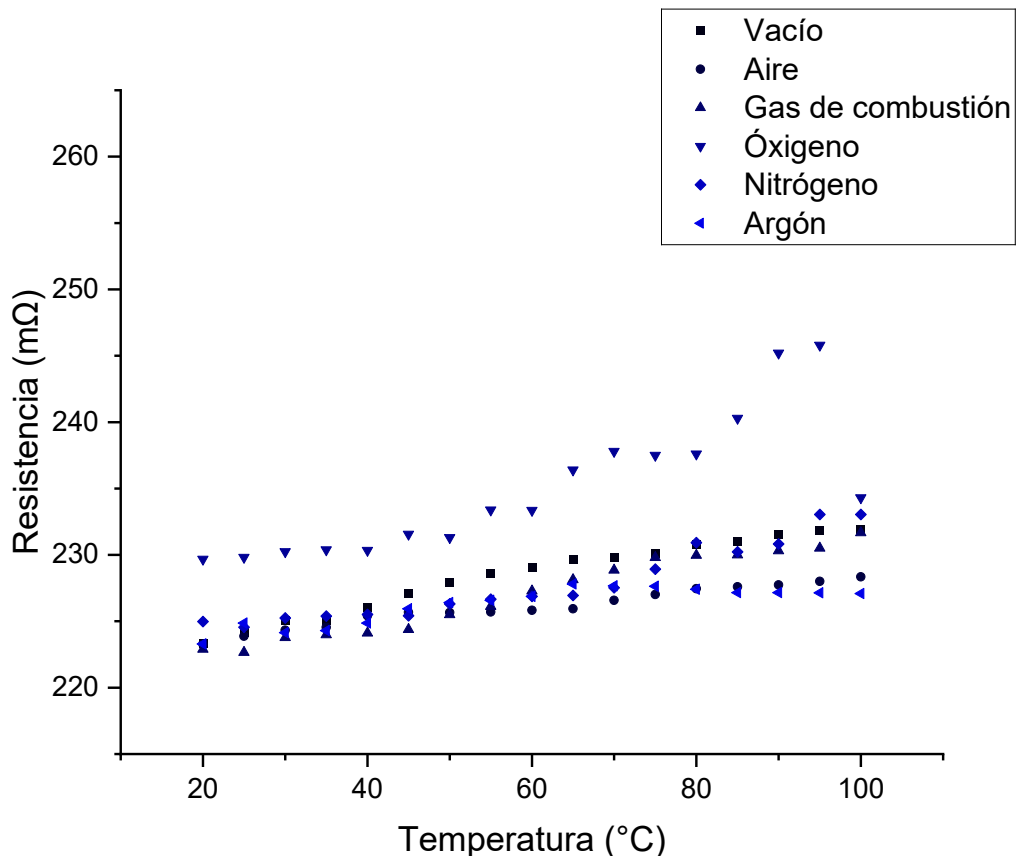


Figura 0.2- Pruebas de resistencia contra temperatura sin uso de material semiconductor.

Una alta sensibilidad se refleja en una curva de calibración pronunciada o casi lineal, lo que indica que el material del electrodo responde eficientemente a los cambios en la variación de temperatura.

4.3.1 Metodología de evaluación.

La metodología de evaluación de la sensibilidad y repetibilidad de un sensor de gas se basa en un enfoque experimental que incluye la exposición controlada del sensor a diferentes concentraciones de gas, la medición de su respuesta y el análisis de la consistencia de esas mediciones bajo condiciones idénticas. Se presenta una

metodología detallada que puedes seguir para evaluar estos la sensibilidad y repetividad:

Preparación y calibración- antes de comenzar las evaluaciones, es fundamental preparar adecuadamente el sensor y realizar la calibración inicial. Esto garantiza que las mediciones sean precisas y se ajusten a los valores de concentración del gas.

Pasos:

Calibración del sensor- se debe calibrar el sensor usando gases de referencia con concentraciones conocidas. Para ello, se utiliza un equipo de calibración que introduce las concentraciones conocidas de gas en la cámara de medición. En algunas ocasiones se hace una prueba sin ninguna atmosfera en específico, solo con aire para tener una referencia más fiable.

Verificación de la estabilidad- asegúrate de que el sensor esté operando a temperatura y presión constantes. Los sensores de gas son sensibles a las fluctuaciones en estas variables, lo que podría afectar su rendimiento.

4.3.2 Condiciones de prueba.

Estas condiciones deben establecerse de manera rigurosa y controlada para simular los escenarios reales de operación y minimizar la influencia de factores externos en las mediciones.

Para las pruebas realizadas en esta investigación, se definieron parámetros específicos que incluyen:

1. **Atmósfera Controlada:** Se empleó una celda experimental equipada con un sistema de atmósfera controlada que permite regular la concentración de los gases de interés. El sistema incluye una bomba de vacío (Leroy Somer LS71P) para evacuar el aire antes de la introducción del gas, garantizando que las mediciones se realicen en un entorno libre de contaminantes externos.
2. **Rangos de Concentración de Gas:** Las pruebas se realizaron utilizando concentraciones específicas de gases objetivo (H_2 , CO_2 , NH_3), abarcando un rango de 100 ppm a 250 ppm.
3. **Control de Temperatura:** La temperatura dentro de la celda fue controlada mediante una placa de calentamiento (LUXIANZI PTC Heating Plate) conectada a un controlador PID (REX-C100). El rango de temperaturas

evaluado osciló entre 30 °C y 250 °C, según las necesidades del sensor y las características del material semiconductor.

4. Tiempo de Exposición: Cada medición se realizó manteniendo el sensor expuesto a una concentración constante de gas durante un tiempo definido, generalmente de 5 a 10 minutos, para garantizar que el material semiconductor alcanzara un estado estacionario antes de registrar los datos.
5. Ciclo de Operación: Para evaluar la repetitividad, se implementaron ciclos consecutivos de exposición al gas y purga con aire limpio. Este procedimiento permitió observar la estabilidad de la respuesta del sensor en múltiples repeticiones y detectar posibles efectos de histéresis.
6. Equipos de Monitoreo: Se utilizó un milióhmetro GW Instek GOM-804 para registrar con precisión la resistencia eléctrica del material en tiempo real. Este dispositivo ofrece una alta resolución y estabilidad, lo que lo hace ideal para la evaluación de sensores basados en semiconductores.

4.3.3 Criterios de evaluación.

Para evaluar la sensibilidad y repetitividad del sensor desarrollado, se establecieron criterios específicos que permiten analizar su desempeño bajo diferentes condiciones de operación. En esta prueba, se mantuvo constante la concentración del gas objetivo, mientras que la temperatura fue la variable controlada, con valores ajustados desde 30 °C hasta 100 °C. Este enfoque permite evaluar la respuesta térmica del sensor y determinar la influencia de la temperatura en su rendimiento.

Sensibilidad- la sensibilidad se evalúa observando la relación entre la variación en la resistencia eléctrica (R_g) del material semiconductor y la temperatura. En este caso, la sensibilidad se calcula a partir de la fórmula:

$$S = \frac{R_g - R_a}{R_a} \times 100 \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde R_g es la resistencia medida en presencia del gas a una temperatura específica y R_a es la resistencia base a 30 °C en atmósfera limpia. Este criterio permite determinar cómo responde el sensor al gas bajo diferentes temperaturas, lo que es fundamental para aplicaciones donde las condiciones térmicas pueden variar.

Repetitividad- la repetitividad se analiza sometiendo al sensor a ciclos repetidos de calentamiento desde 30 °C hasta 100 °C, con mediciones en las mismas condiciones

de concentración del gas. Se calcula el coeficiente de variación (CV) de las mediciones de resistencia para evaluar la consistencia de las respuestas:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde σ es la desviación estándar y μ es la media de las resistencias medidas. Un CV bajo asegura que el sensor mantiene una respuesta confiable en múltiples pruebas.

Influencia de la Temperatura:

Se analiza cómo varía la sensibilidad del sensor en función de la temperatura. Esto se representa gráficamente, mostrando si el sensor presenta un pico óptimo de sensibilidad a una temperatura específica. Este análisis es clave para determinar la temperatura de operación ideal del sensor.

Estabilidad Térmica:

Se evalúa si las variaciones de temperatura afectan negativamente la estabilidad del sensor. La estabilidad se mide comparando las respuestas obtenidas a temperaturas extremas dentro del rango evaluado.

Tiempo de Respuesta y Recuperación

Se registran los tiempos requeridos para alcanzar el 90 % de la resistencia máxima (t_{resp}) y para regresar al 90 % de la resistencia base (t_{resp}) al variar la temperatura en presencia del gas. Estos tiempos indican qué tan rápido responde el sensor a los cambios en la temperatura.

Linealidad de la Respuesta:

La linealidad de la respuesta se determina graficando la sensibilidad frente a la temperatura. Se calcula el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar si la relación entre sensibilidad y temperatura sigue un patrón predecible.

4.3.5 Curvas de calibración.

Para tener un control más fiable se realizaron pruebas de calibración con y sin material semiconductor en vacío y aire, en la Figura. 4.3

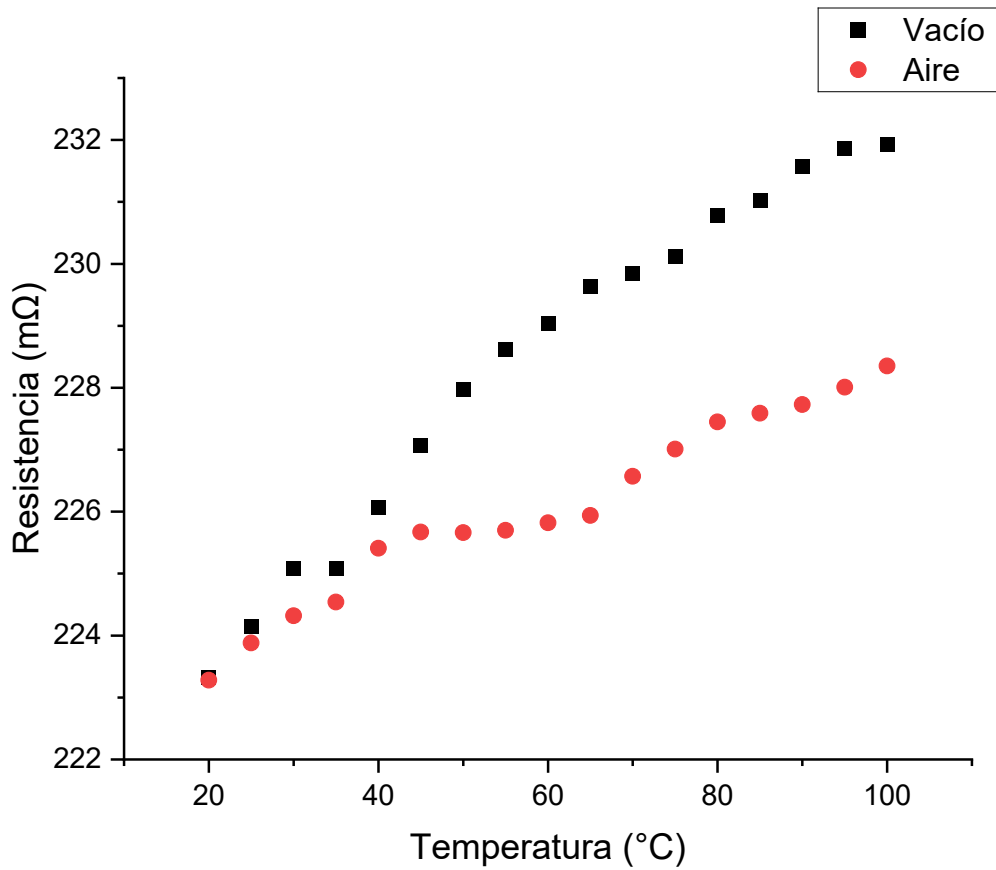


Figura 0.3- Pruebas de resistencia contra temperatura sin uso de material semiconductor solo en aire y vacío.

4.3.6 Gráficos de dispersión.

En la Figura 4.4 se puede observar el grafico de dispersión de las pruebas haciendo uso del material semiconductor LaFeO_3 , en el cual podemos identificar una clara ten

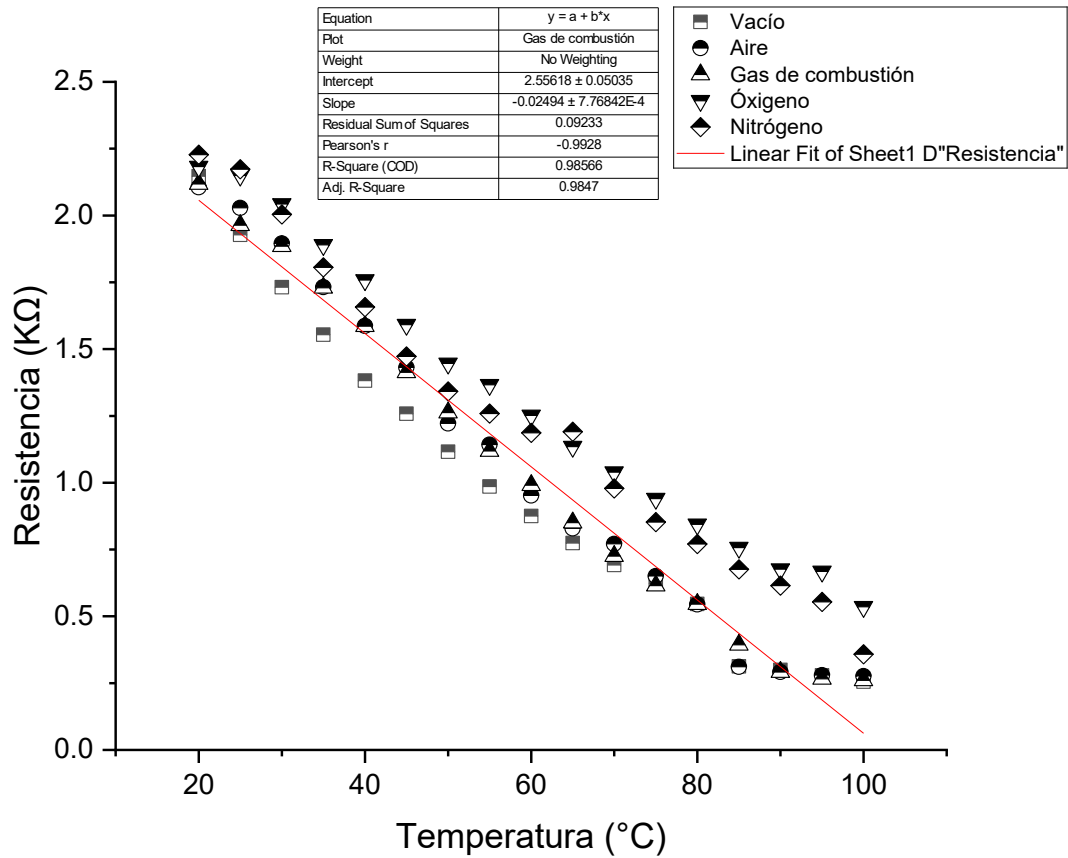


Figura 0.4- Pruebas de resistencia contra temperatura con el uso de material semiconductor solo en distintos gases.

Tras verificar el correcto funcionamiento del sensor, se procedió a evaluar su capacidad de recuperación, definida como el tiempo requerido por el material para retornar a sus condiciones iniciales una vez que el gas de interés ha sido removido del entorno de análisis.

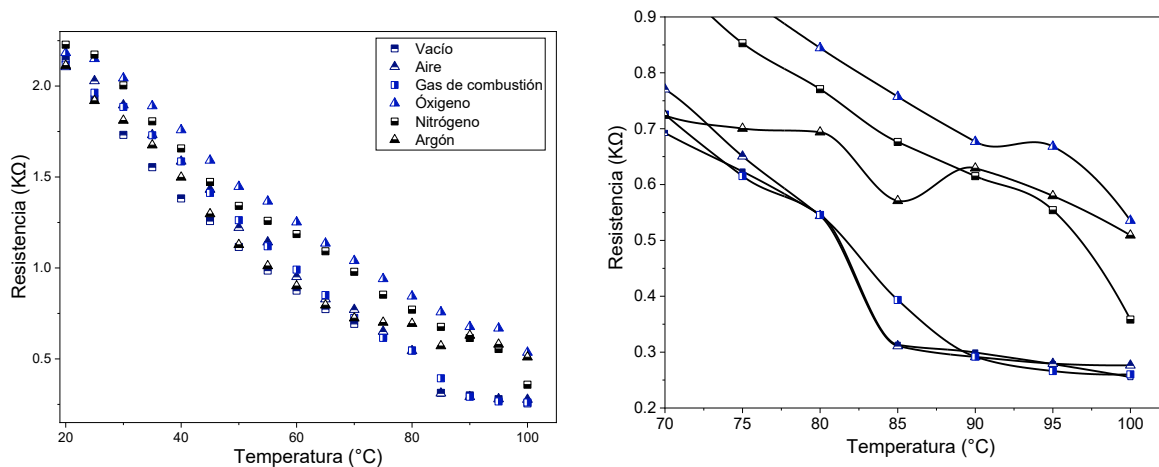


Figura 0.5- Variación de la resistencia eléctrica con la presencia de temperatura y los gases.

4.3.10 Determinación de ppm (Partes por millón) en el sistema.

Para evaluar la sensibilidad del sensor, se determinó la concentración de gas en ppm mediante el control del flujo de cada gas. La ecuación utilizada fue:

$$ppm = \frac{Q_{gas}}{Q_{total}} \times 10^6 \quad \text{Ecuación 9.}$$

donde Q_{gas} correspondió al flujo del gas específico y Q_{total} al flujo total de gases.

4.3 Valores de los componentes.

4.3.1 Parámetros del controlador.

\overline{AL} / Alarma 1 valor de ajuste (ALM1): La alarma de límite alto 1 se configura para activarse cuando la temperatura medida alcanza o supera un umbral predefinido, indicando que el proceso ha alcanzado una temperatura peligrosamente alta. Voltaje / entradas de corriente: 5.0

\overline{P} Este parámetro determina la magnitud de la acción correctiva que el controlador tomará en respuesta al error actual entre la temperatura medida y la temperatura deseada (consigna). Entrada de temperatura: 30 (30.0) Tensión / entradas de corriente: 3.0

\overline{I} Tiempo integral: Ajuste el tiempo de acción integral para eliminar desviaciones que ocurren en un control proporcional. Un valor alto de I aumentará la corrección del error acumulado, lo que es útil para corregir errores persistentes o para eliminar el error en estado estacionario: 240

\overline{d} La acción derivativa anticipa la tendencia futura del error basándose en su velocidad de cambio actual: 60

\overline{Ar} Este parámetro determina el tiempo de retardo antes de que se active la alarma después de que se alcance el valor límite: 100

\overline{F} La histéresis es la diferencia entre los puntos de activación y desactivación de la alarma. Esto evita la activación y desactivación frecuente de la alarma debido a fluctuaciones normales en la temperatura alrededor del límite: 2

[[[Este parámetro es una función de seguridad diseñada para evitar cambios no autorizados en la configuración del controlador: 0100

4.3.2 Validación del sistema calentamiento.

Se realizaron distintas pruebas modificando los parámetros anteriormente descritos. Se obtuvieron distintas rampas de calentamiento, iniciando desde los 01.00 °C/min hasta 15°C/min ubicando distintas problemáticas para las distintas rampas.

Rampa más baja (1°C/min): Esta rampa ofrece una precisión notable, especialmente en pruebas que demandan un aumento gradual de la temperatura. Su capacidad para calentar de manera gradual permite obtener mediciones más fieles y consistentes con la temperatura reportada por el termopar reportando una de sus principales ventajas es que se presenta nula variación al llegar a la temperatura requerida, sin embargo, en situaciones donde se necesita alcanzar una temperatura final considerablemente alta, la rampa se caracteriza por su ritmo más pausado. Esta particularidad puede representar un desafío en escenarios donde la rapidez es esencial, ya sea por requisitos de tiempo o por la naturaleza dinámica del proceso, todo esto se hace mediante la manipulación de los parámetros PID del sistema, los mejores valores fueron de P 20, I 260, d 60, estos parámetros fueron los que mejores resultados mostraron en las pruebas realizadas y los cuales se ocuparon durante todas las pruebas.

La rampa con velocidad de calentamiento de (15°C/min) ilustrada en la Figura. 4.6: exhibe una notable velocidad de calentamiento, lo cual la hace ideal para aplicaciones donde el tiempo de calentamiento es crítico, sin embargo, es importante tener en cuenta que esta rapidez viene acompañada de un factor de error significativo. Esta alta tasa de error puede generar una desviación considerable en la temperatura final

medida. Se han registrado desviaciones de hasta +20°C en comparación con la temperatura deseada.

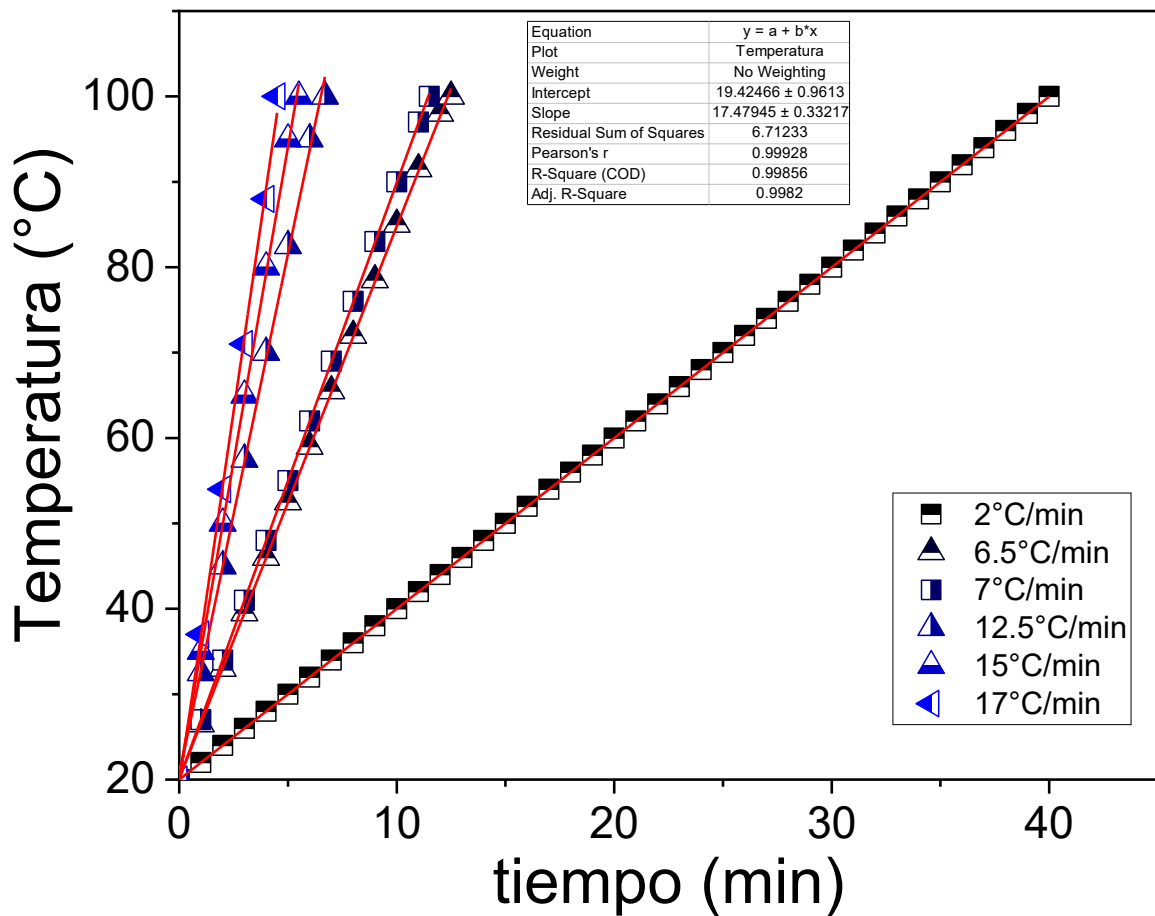


Figura 0.6- Rampas de calentamiento del sistema PID.

En resumen, se llegó a la conclusión de que la selección de la rampa de calentamiento ideal depende en gran medida del tipo específico de prueba que se esté llevando a cabo, sin embargo, tras analizar los resultados de una amplia variedad de pruebas, se observó un patrón consistente en el que se utilizó una rampa de calentamiento de 6.5°C/minuto. Esta velocidad demostró ser adecuada y efectiva para la mayoría de las pruebas realizadas, ya que proporcionó un equilibrio óptimo entre la rapidez del proceso y la precisión de las mediciones. Los datos recopilados durante estas pruebas revelaron una desviación mínima de apenas +2-3°C.

4.4 Problemas Potenciales y Soluciones Aplicadas.

Durante el proceso de fabricación del sensor, se identificaron y enfrentaron diversas problemáticas técnicas que impactaron tanto el desarrollo como el desempeño del

sistema. Estos desafíos abarcaron aspectos relacionados con el diseño mecánico, la selección de materiales, la programación de parámetros operativos, y la interacción entre los componentes durante las pruebas iniciales.

Una de las problemáticas más relevantes fue la dilatación térmica del soporte del semiconductor. Dado que el sensor opera a temperaturas elevadas, los materiales utilizados en el soporte del semiconductor, como los electrodos y la base de sujeción, experimentaron dilatación térmica diferencial. Esto ocasionó fluctuaciones en la lectura de la resistencia eléctrica del material, ya que los cambios en la geometría del soporte afectaron la presión ejercida sobre el semiconductor y la estabilidad de los contactos eléctricos. Para mitigar este problema, se realizó un análisis detallado de los coeficientes de expansión térmica de los materiales seleccionados y se implementaron elementos de compensación mecánica, como soportes flexibles o aislantes térmicos.

Otro desafío significativo fue la programación de las rampas de calentamiento en el controlador de temperatura PID. Inicialmente, las rampas de calentamiento mostraron oscilaciones significativas en la temperatura objetivo debido a la falta de un ajuste óptimo de los parámetros del controlador (P, I, D). Estas oscilaciones afectaron directamente la estabilidad térmica del sistema, lo que generó inconsistencias en los resultados experimentales. Para solucionar este inconveniente, se llevó a cabo un proceso iterativo de ajuste de parámetros, acompañado de simulaciones y pruebas experimentales, hasta alcanzar una respuesta estable y precisa en las rampas de calentamiento y enfriamiento.

La fabricación de los electrodos de cobre también presentó dificultades, ya que, al trabajar como conductores principales y puntos de contacto eléctrico, requerían un aislamiento efectivo para prevenir cortocircuitos. Sin embargo, durante las pruebas iniciales, se observó que el polímero aislante empleado no soportaba adecuadamente las temperaturas máximas alcanzadas en el sensor. Esto llevó al desarrollo de un recubrimiento aislante alternativo basado en polímeros de alta temperatura, que ofreció mayor resistencia térmica y estabilidad mecánica.

Asimismo, el diseño y ensamblaje de la cámara o celda del sensor planteó desafíos específicos. Aunque se seleccionaron materiales adecuados, como el acero inoxidable AISI 316L y el vidrio Pyrex, las uniones entre estos componentes resultaron ser puntos críticos. En las pruebas iniciales, algunas juntas mostraron fugas menores

de gas debido a una mala aplicación de selladores o diferencias en la expansión térmica de los materiales. Esto fue resuelto mediante el uso de sellos herméticos de silicona de alta temperatura y técnicas de ensamblaje más precisas para minimizar desajustes.

Otro desafío significativo fue la fabricación de piezas pequeñas, como los componentes del soporte y los electrodos de medición. Estas piezas, esenciales para garantizar un contacto eléctrico confiable, requirieron maquinados de alta precisión para cumplir con las tolerancias específicas. Sin embargo, la manipulación y el mecanizado de estos componentes presentaron dificultades debido a su tamaño reducido y la necesidad de mantener acabados precisos. Estas complicaciones se resolvieron mediante la implementación de técnicas de mecanizado avanzado, como el uso de fresadoras CNC de alta precisión y la supervisión constante del proceso.

Finalmente, se enfrentaron complicaciones relacionadas con la integración del sistema de suministro de gas y el control de flujo. Durante las primeras pruebas, las válvulas y reguladores mostraron variaciones en la presión de entrada, lo que dificultó mantener una atmósfera constante en la cámara del sensor. Además, las fluctuaciones en el flujo de gas introdujeron errores en la medición de la sensibilidad del semiconductor. Para resolver este problema, se ajustaron los reguladores de presión y se implementaron filtros en las líneas de gas para garantizar un suministro estable.

Conclusión.

Se ha diseñado, fabricado y evaluado un sensor de gases basado en materiales semiconductores, lo que ha representado un avance significativo en la implementación de tecnologías accesibles y eficientes para la detección de compuestos gaseosos. Este sensor tiene aplicaciones potenciales en diversos sectores industriales y ambientales, contribuyendo a la mejora de procesos de monitoreo y control.

Las pruebas de sensibilidad que permitió detectar pequeñas variaciones en la concentración del gas y repetitividad que otorgó la consistencia de las mediciones al realizar múltiples pruebas realizadas, demostraron que el sensor es capaz de detectar variaciones mínimas en la concentración del gas objetivo con alta precisión, incluso bajo condiciones térmicas controladas. Estos resultados validan la viabilidad del diseño y confirman la idoneidad de la ferrita de lantano como material base, destacando su estabilidad y capacidad de respuesta frente a estímulos gaseosos.

La evaluación comparativa con sensores comerciales reveló que el diseño propuesto no solo alcanzar desempeños comparables, sino que en algunos casos supera las capacidades de los sensores comerciales, particularmente en términos de sensibilidad y tiempo de respuesta, la selección adecuada de componentes, como el milióhmetro GW Instek GOM-804 y la placa calefactora PTC Heating Plate, permitió optimizar la funcionalidad del sistema y garantizar mediciones confiables.

Finalmente, este proyecto establece las bases para futuras investigaciones en el campo de la detección de gases, abriendo la posibilidad de implementar materiales avanzados, mejorar la miniaturización del sistema y explorar aplicaciones en escenarios más complejos. Así, se sientan las bases para una tecnología más eficiente y accesible que contribuya significativamente al monitoreo ambiental, la seguridad industrial y el control de procesos.

Bibliografía

- Ahirwal, B., & Vishwakarma, R. K. (2019). Study of temperature classification, spark ignition and drop test assessment on secondary cells for intrinsically safe equipment for explosive atmospheres. *Process Safety Progress*, 38(4). <https://doi.org/10.1002/prs.12055>
- Alados Arboledas, I., Liger Pérez, E., & Peula García, J. M. (2006). *Curso de Fundamentos Físicos de la Informática*. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga.
- Altermatt, P. P., Schenk, A., Geelhaar, F., & Heiser, G. (2003). Reassessment of the intrinsic carrier density in crystalline silicon in view of band-gap narrowing. *Journal of Applied Physics*, 93(3), 1598–1604. <https://doi.org/10.1063/1.1529297>
- Andrei, F., Boerasu, I., Birjega, R., Moldovan, A., Dinescu, M., Ion, V., Mihailescu, C., Scarisoreanu, N. D., & Leca, V. (2019). The effects of the oxygen content on the photoelectrochemical properties of LaFeO₃ perovskite thin films obtained by pulsed laser deposition. *Applied Physics A*, 125(11), 807. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3089-4>
- Barsan, N., & Weimar, U. (2001). Conduction Model of Metal Oxide Gas Sensors. *Journal of Electroceramics*, 7(3), 143–167. <https://doi.org/10.1023/A:1014405811371>
- Bell, M. L. (2004). Ozone and Short-term Mortality in 95 US Urban Communities, 1987-2000. *JAMA*, 292(19), 2372. <https://doi.org/10.1001/jama.292.19.2372>
- Benali, E. M., Benali, A., Bejar, M., Dhahri, E., Khomchenko, V. A., Peng, L., Wu, J., & Costa, B. F. O. (2021). Structural, morphological and excellent gas sensing properties of La_{1-2x}BaxBixFeO₃ (0.00 ≤ x ≤ 0.20) nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 883, 160856. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160856>
- Berdat, D., Marin, A., Herrera, F., & Gijs, M. A. M. (2006). DNA biosensor using fluorescence microscopy and impedance spectroscopy. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 118(1–2), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.04.064>

- "Bhattacharya, S. ", "Chatterjee, R. S. ", & "Patra P. P. ". (2020). Material considerations for gas sensors: Recent advances and developments. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03035-4>
- Bolarín, A., Taboada, C., Sánchez, F., Hernández, M., Barba, A., & Cortés, C. (2024). Diseño y fabricación de un sistema para la evaluación de materiales sensores de gases . *SOMIM*.
- "Bowonder, B. (1995). Industrial risk assessment of hazardous installations: Bhopal as a case study. *International Journal of Environment and Pollution*, 5. <https://doi.org/10.1504/IJEP.1995.027812>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2016). *Materials Science and Engineering* (Reverté, Ed.; 9a ed.).
- Casimiro, M. H., Corvo, M. C., Ramos, A. M., Cabrita, E. J., Ramos, A. M., & Ferreira, L. M. (2013). Synthesis and characterization of novel γ -induced porous PHEMA–IL composites. *Materials Chemistry and Physics*, 138(1), 11–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.11.061>
- Castañeda Aviña, L. (2018, agosto). Sensores de gases basados en semiconductores. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-97532018000300004
- Castellanos, B., Gómez, C., & Vera-López. (2016). SINTESIS SOLVOTERMAL DE ORTOFERRITA DE LANTANO (LaFeO₃) . *XI ENCUENTRO FACULTAD DE CIENCIAS-UPTC III ENCUENTRO NACIONAL*.
- CDC. (2021). *Chlorine: What you need to know*. Centers for Disease Control and Prevention.
- Concustell, A., Cano, I., Guilemany, J. M., & Orera, V. M. (2013). Celdas de Combustible de Óxido Sólido Producidas por Tecnologías de Proyección Térmica. *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (SECV)*.
- Craven, M. A., Gardner, J. W., & Bartlett, P. N. (1996). Electronic noses — development and future prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*,

15(9), 486–493. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(96\)00061-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-9936(96)00061-1)

de la Luz Mercado, M. (2023). *Propiedades físicas de la heteroestructura ((Bi_{1-x}La_{0.10}GdxFeO₃/Si (100) depositada por erosión iónica en radio frecuencia con magnetrón*. CICESE.

EEA. (2020). *Air Quality in Europe*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu>

Enhessari, M., & Salehabadi, A. (2016). Perovskites-Based Nanomaterials for Chemical Sensors. En *Progresses in Chemical Sensor*. InTech. <https://doi.org/10.5772/62559>

EPA. (2020). *Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/no2-pollution>

Eranna, G., Joshi, B. C., Runthala, D. P., & Gupta, R. P. (2004). Oxide Materials for Development of Integrated Gas Sensors—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29(3–4), 111–188. <https://doi.org/10.1080/10408430490888977>

Escobar, X. (2020). *Estudio de las propiedades estructurales de películas delgadas de SmFeO, sintetizadas por RPU*. UNAM.

EU-OSHA. (2021). *Informe anual sobre la seguridad y salud en el trabajo en Europa*. EU-OSHA. <https://osha.europa.eu>

"Faudoa Arzate, A. (2017). *Películas delgadas de WO₃ para sensado del gas CO₂*. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S. C.

Fraigi, L., Baluk, S., Roberti, M., Menajovsky, S., & Tomalino, A. (2001). *Sensores de gases semiconductores y electroquímicos: un estudio comparativo*.

Fu, Q., Ke, Y., Jiang, D., & Jin, Y. (2020). Chemical separation and characterization of complex samples with herbal medicine. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 124, 115775. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115775>

G. Korotcenko. (2019). *Cerium Oxide (CeO₂): Synthesis, Properties and Applications* (L. P. S. Scirè, Ed.).

- Gerlich, M., Kornely, S., Fleischer, M., Meixner, H., & Kassing, R. (2003). Selectivity enhancement of a WO₃/TiO₂ gas sensor by the use of a four-point electrode structure. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 93(1–3), 503–508. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00187-4)
- Gupta, R., & Dutta, A. K. (2016). Co-precipitation technique for the synthesis of nanomaterials. *International Journal of Science and Research*, 5. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17366.24648>
- Gutiérrez, M. P., Castellanos, M. A., & Castellanos, M. A. (2015). Síntesis por el método sol-gel aplicado al estudio del polimorfismo en nanopartículas de TiO₂. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 4(1). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2011.1.50990>
- Habermeier, H.-U. (2007). Thin films of perovskite-type complex oxides. *Materials Today*, 10(10), 34–43. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70243-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70243-2)
- Hodgkinson, J., & Tatam, R. P. (2013). Optical gas sensing: a review. *Measurement Science and Technology*, 24(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012004>
- Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., Cholia, S., Gunter, D., Skinner, D., Ceder, G., & Persson, K. A. (2013). Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL Materials*, 1(1). <https://doi.org/10.1063/1.4812323>
- Jędrusik, M., Turquat, Ch., Eyméoud, P., Merlen, A., Arab, M., Cempura, G., Cieniek, L., Kopia, A., & Leroux, Ch. (2023). LaFeO₃ thin films on Ytria Stabilized Zirconia flexible substrate. *Thin Solid Films*, 780, 139951. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139951>
- Jiang, C., Chu, D., Field, R. L., & Zhang, H. (2017). Review on gas sensing technologies: Future, challenges, and opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15.

- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kim, M., & Lim, S. H. (2019). Magnetic behavior of amorphous Fe–Zr thin films sputtered at different Ar pressures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.030>
- Korotcenkov, G. (2007). Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? *Materials Science and Engineering: B*, 139(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.044>
- Ku, C.-A., & Chung, C.-K. (2023). Advances in Humidity Nanosensors and Their Application: Review. *Sensors*, 23(4), 2328. <https://doi.org/10.3390/s23042328>
- Liu, F., Guan, Y., Dai, M., Zhang, H., Guan, Y., Sun, R., Liang, X., Sun, P., Liu, F., & Lu, G. (2015). High performance mixed-potential type NO₂ sensors based on three-dimensional TPB and Co₃V₂O₈ sensing electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 216, 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.048>
- López, A. (2024, marzo 7). *Sensores de gases: definición, características, aplicaciones, tipos y beneficios*. MANUFACTURA LATAM. <https://www.manufactura-latam.com/es/noticias/explorando-los-sensores-de-gases-definicion-caracteristicas-aplicaciones-tipos-y>
- Lozano, R., Farías, L., Rosales, L., & Gonzáles, R. (2019, enero). REVISIÓN DE FERRITAS HÍBRIDAS DE METALES PESADOS. *Revista Iberoamericana de Polímeros y Materiales*.
- Luo, S., Zhang, Y., Huang, G., Situ, B., Ye, X., Tao, M., Huang, Y., Li, B., Jiang, X., Wang, Q., & Zheng, L. (2021). Noble metal-doped LaFeO₃ for enhanced gas sensing performance. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129857>
- Manchón-Gordón, A. F., Sánchez-Jiménez, P. E., Blázquez, J. S., Perejón, A., & Pérez-Maqueda, L. A. (2023). Structural, Vibrational, and Magnetic

- Characterization of Orthoferrite LaFeO₃ Ceramic Prepared by Reaction Flash Sintering. *Materials*, 16(3), 1019. <https://doi.org/10.3390/ma16031019>
- Matsuda, M., Isozaki, H., & Tajima, H. (2008). Reproducible on–off switching of the light emission from the electroluminescent device containing a spin crossover complex. *Thin Solid Films*, 517(4), 1465–1467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.09.034>
- Mejia, J., & Orozco, S. (2015). Electronic properties of LaFeO₃ and its application as gas sensors. *Journal of Materials Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.01.012>
- "Micheli, L. ". (2017). Advanced gas sensors and electronic noses for industrial monitoring. *Chemical Engineering Transactions*, 58. <https://doi.org/10.3303/CET1758003>
- Moussa, M. (2011). Structural and electronic properties of LaFeO₃: A comprehensive study. *Journal of Applied Physics*, 110. <https://doi.org/10.1063/1.3667950>
- Muñoz-Mata, J. L., Rojas-Garnica, J. C., Muñoz-Aguirre, S., & Cervantes-De La Rosa, J. P. (2019). Diseño e implementación de un sistema de medición de respuesta de sensores de gas. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 26–34. <https://doi.org/10.35429/JEA.2019.20.6.26.34>
- Pallás Areny, R. (2007). *Sensores y acondicionadores de señal* (4a ed.). MARCOMBO, S. A.
- Patil, S. S., Babar, B. M., Nadargi, D. Y., Shaikh, F. I., Nadargi, J. D., Sankapal, B. R., Mulla, I. S., Tamboli, M. S., Nguyen Truong, N. T., & Suryavanshi, S. S. (2024). La-Fe-O Perovskite Based Gas Sensors: Recent Advances and Future Challenges. *ACS Omega*, 9(28), 29994–30014. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00334>
- Pennisi, G., Pulvirenti, M., Salvo, L., Sciacca, A. G., Cascino, S., Laudani, A., Salerno, N., & Rizzo, S. A. (2024). Investigation of SiC MOSFET Body Diode Reverse Recovery and Snappy Recovery Conditions. *Energies*, 17(11), 2651. <https://doi.org/10.3390/en17112651>

- Pérez, C. (2023, mayo 10). *La Importancia del aislamiento térmico en la eficiencia energética y reducción de costos*. NUTEC. <https://nutec.com/es/newsroom/articulos/aislamiento-termico-eficiencia-energetica-reduccion-costos>
- "Pérez, N. ", & "Jiménez, J. L. ". (2020). Challenges in gas sensor deployment: Overview and trends. *Journal of Sensors*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4675829>
- Poortmans, J., & Ivanovich, V. (2006). *Thin Film Solar Cells* (J. Poortmans & V. Arkhipov, Eds.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470091282>
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., & Godleski, J. J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution. *Circulation*, 109(1), 71–77. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F>
- Raub, J. A., Mathieu-Nolf, M., Hampson, N. B., & Thom, S. R. (2000). Carbon monoxide poisoning — a public health perspective. *Toxicology*, 145(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(99\)00217-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(99)00217-6)
- Rella, R. (1999). LaFeO₃ perovskite thin films for gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 58, 283–288. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00072-1)
- Röck, F., Barsan, N., & Weimar, U. (2008). Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chemical Reviews*, 108(2), 705–725. <https://doi.org/10.1021/cr068121q>
- Rubio-Lopez, R., Félix-Bernabé, J. A., Bolarín-Miró, A. M., Rosales-González, O., Sánchez-De-Jesús, F., & Cortes-Escobedo, C. A. (2023). Mejora del orden ferromagnético de LaFeO₃ mediante dopaje con Co. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(Especial5), 12–16. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial5.11732>
- Ruud, G., & Beerkens, C. (2001). Modeling the Kinetics of Volatilization from Glass Melts. *J. Am. Ceram. Soc*, 84. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00942.x>

- Sberveglieri, G., Faglia, G., & Comini, E. (2009). *Solid State Gas Sensing* (E. Comini, G. Faglia, & G. Sberveglieri, Eds.). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09665-0>
- Schaffer, J. P., Saxena, A., Antolovich, S. D., Sanders, T. H., & Warner, S. B. (1999). *The Science and Design of Engineering Materials* (2a ed.). McGraw-Hill.
- Schindler, D. W. (1988). Effects of Acid Rain on Freshwater Ecosystems. *Science*, 239(4836), 149–157. <https://doi.org/10.1126/science.239.4836.149>
- Shan, X., Zhao, D., Pan, M., Wang, D., & Zhao, L. (2019). Sea–Sky Line and Its Nearby Ships Detection Based on the Motion Attitude of Visible Light Sensors. *Sensors*, 19(18), 4004. <https://doi.org/10.3390/s19184004>
- Sharma, M., Sahu, S., & Kumar, S. (2018). Catalytic performance of LaFeO₃-based materials for CO and NO oxidation reactions. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*.
- Sharma, R., Singh, A., & Kumar, P. (2022). Sensitivity analysis of gas sensors under varying environmental conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 891–905. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13369-021-06088-5>
- Shen, C., Liang, H., Zhao, Z., Guo, S., Chen, Y., Tan, Z., Song, X.-Z., & Wang, X. (2024). Mo-Doped LaFeO₃ Gas Sensors with Enhanced Sensing Performance for Triethylamine Gas. *Sensors*, 24(15), 4851. <https://doi.org/10.3390/s24154851>
- Streetman, B., & Banerjee, S. (2005). *Solis State Electronic Devices* (6th ed.). Pearson .
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
- Tetsuro, S., & Kagaku, D. (1983). Chemical sensors. *International Meeting on Chemical Sensors*.
- Vasile, E., & Ghenescu, M. (2010). Optical properties of LaFeO₃ and its potential in photonic applications. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/12/2/022>

- Wang, J., Lin, W., Wu, X., Yang, Y., Wu, F., & Yan, X. (2016). Preparation and oxidation behavior of a double-layer coating for three-dimensional braided carbon fiber. *Surface and Coatings Technology*, 298, 58–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.01.060>
- Wang, L., Zhuo, S., Tang, H., & Cao, D. (2018). A near-infrared turn on fluorescent probe for cysteine based on organic nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 277, 437–444. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.09.038>
- Wang, Z. (2008). Mechanochemical synthesis of LaFeO₃ powders for catalytic applications. *American Ceramic Society*, 91. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02591.x>
- WHO. (2023a). *Ambient (outdoor) air pollution*. World Health Organization.
- WHO. (2023b). *Ambient (outdoor) air pollution*. World Health Organization.
- Wu, J., Wan, Y., Wang, Z., Wang, Y., Luo, Q., Feng, C., & Yoshinobu, T. (2024). Loose Ag-Doped LaFeO₃ Nanotubes-Based Gas Sensor for Excellent Acetic Acid Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 24(5), 5821–5829. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3350873>
- Yamazoe, N. (2005). Toward innovations of gas sensor technology. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 108(1–2), 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.12.075>
- Yang, Z., Wang, T., & Chen, Y. (2021). Investigation on the sensing properties of MQ-135 gas sensor for low ppm gases. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129893>
- Yaragani, V., Kamatam, H., Deva Arun Kumar, K., Mele, P., Christy, A., Gunavathy, K., Alomairy, S., & Al-Buriah, M. (2021). Structural, Magnetic and Gas Sensing Activity of Pure and Cr Doped In₂O₃ Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition. *Coatings*, 11(5), 588. <https://doi.org/10.3390/coatings11050588>
- Zhang, J. (Jim), & Smith, K. R. (2007). Household Air Pollution from Coal and Biomass Fuels in China: Measurements, Health Impacts, and Interventions. *Environmental Health Perspectives*, 115(6), 848–855. <https://doi.org/10.1289/ehp.9479>