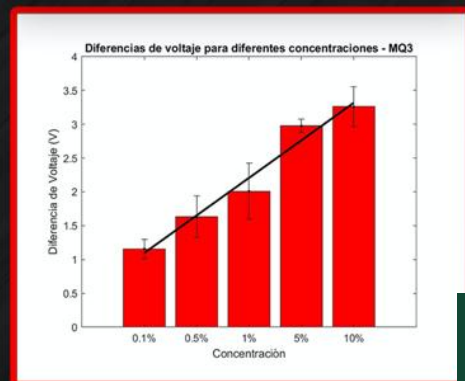
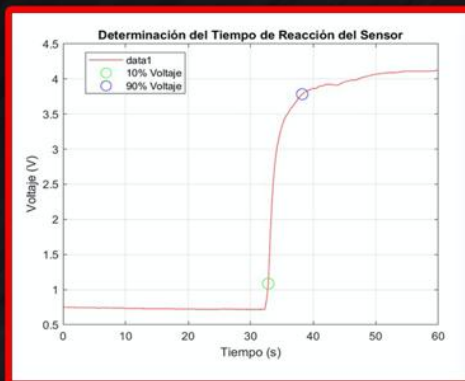


Sistema de adquisición de datos de bajo costo para la detección de alcohol en sangre a través del aliento

José Raúl Conde Tánchez



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Sistema de adquisición de datos de bajo costo para la
detección de alcohol en sangre a través del aliento**

Trabajo de graduación presentado por José Raúl Conde Tánchez para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Biomédica

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Sistema de adquisición de datos de bajo costo para la
detección de alcohol en sangre a través del aliento**

Trabajo de graduación presentado por José Raúl Conde Tánchez para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Biomédica


Guatemala,


2024

Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de febrero de 2025.

Este proyecto ha sido un proceso de aprendizaje y descubrimiento que comenzó con mi deseo de desarrollar una herramienta práctica que pudiera tener un impacto positivo en la sociedad. Varias experiencias personales me motivaron a llevar a cabo este proyecto, especialmente después de observar la falta de educación vial y la falta de dispositivos para uso de todas las personas, no solamente de las autoridades. Desde el inicio de mi formación académica, me ha apasionado la aplicación de la tecnología para resolver problemas cotidianos, y esta tesis representa el esfuerzo de varios años enfocados en alcanzar ese objetivo. Es por eso que desarrollar un sistema de bajo costo y preciso para la detección de alcohol en sangre a través del aliento no solo responde a una necesidad social, sino que es un testimonio de lo que se puede lograr con dedicación y esfuerzo.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a lo largo de este recorrido. En primer lugar, agradezco a mi asesor, el Dr.-Ing. José Andrés Leal Ordoñez, por su apoyo, orientación, tiempo y compromiso en la realización de este trabajo. Su guía fue esencial para mantenerme enfocado en cada etapa del desarrollo del proyecto. De igual manera, agradezco al Dr. Luis Diego Archila Díaz y a la Dra. Vanessa Wilma Junbluth, por su invaluable apoyo con los materiales y la orientación necesaria para la preparación de las concentraciones requeridas en las pruebas, así como por su disposición de tiempo para contribuir al avance del trabajo.

Asimismo, extiendo un especial agradecimiento al MBA. Pablo Daniel Mazariegos de la Cerda, cuyo apoyo fue fundamental al facilitar la fabricación de la PCB, un componente crucial en este proyecto. Su colaboración y disposición fueron determinantes para el éxito de esta etapa. También quisiera expresar mi agradecimiento a la Universidad del Valle, por permitirme ser parte de su comunidad y brindarme la mejor formación profesional posible. Los conocimientos y habilidades adquiridos durante estos años han sido fundamentales para hacer realidad este proyecto.

Por último, agradezco profundamente a mi familia por su apoyo incondicional. A pesar de las adversidades que hemos atravesado como familia, siempre me han puesto a mí y a mi hermano como prioridad, dándonos la mejor preparación posible tanto en el ámbito personal como en el profesional. Su fortaleza y amor han sido la base que me permitió llegar hasta aquí.

Prefacio	v
Lista de figuras	ix
Lista de cuadros	x
Resumen	xi
Abstract	xii
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Justificación	4
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo general	6
4.2. Objetivos específicos	6
5. Alcance	7
6. Marco teórico	8
6.1. ¿Qué es el alcohol?	8
6.2. Porcentaje de alcohol por volumen	10
6.3. Metabolización en el cuerpo	10
6.4. Efectos del alcohol en el cuerpo	12
6.5. Transporte de la sangre al aliento	13
6.6. ¿Qué es un aerosol?	13
6.7. ¿Qué es un gas?	14
6.8. Sensores de gas	15

7. Metodología	18
7.1. MQ3	18
7.2. ULPSM 968-007	19
7.3. Prueba de datos iniciales	19
7.4. Calibración de sensores	20
7.5. Adquisición de parámetros fundamentales del sensor MQ3	22
7.6. Fabricación del sistema de evaporación de alcohol	23
7.7. Diseño y fabricación del prototipo final	23
7.8. Comparativa con dispositivo comercial	27
8. Resultados	28
8.1. Prueba de datos iniciales	28
8.2. Pruebas de <i>baseline</i> y saturación de alcohol	29
8.3. Pruebas de dinamismo	29
8.4. Prueba de concentraciones bajas	30
8.5. Adquisición de parámetros fundamentales	31
8.6. Diseño y fabricación del prototipo final	34
9. Discusión	37
10. Conclusiones	40
11. Recomendaciones	42
12. Bibliografía	44
13. Anexos	49
13.1. Configuración de pines	49

Lista de figuras

1.	Estructura molecular del agua y metanol con ángulos de enlace. Adaptado de: [22]	8
2.	Metabolización del metanol y etanol a partir de la enzima alcohol deshidrogenasa [40]	12
3.	Problemas de salud asociados al consumo prolongado del alcohol [43]	13
4.	Proceso de difusión de gases y etanol, desde los capilares sanguíneos hacia los alvéolos pulmonares [46]	14
5.	Composición interna del sensor electroquímico [50]	16
6.	Composición interna del sensor químico-resistivo moderno [51]	17
7.	Sensor MQ3 y distribución de pines [52]	18
8.	Sensor ULPSM 968-007 y distribución de pines [53]	19
9.	Posicionamiento de los sensores de alcohol y el algodón con las concentraciones de alcohol 35 % y 70 % respectivamente	21
10.	Montaje del sistema de evaporación, compuesto por un tubo de PVC de 20 cm de largo y 1 pulgada de diámetro, con un orificio central para enroscar el tubo Falcon de 15 mL, el sensor MQ3 acoplado en un extremo y un ventilador pequeño en el otro extremo para asegurar la circulación de aire dentro del tubo	23
11.	Diagrama esquemático del circuito del proyecto, mostrando la disposición de los componentes y sus conexiones en EasyEDA	25
12.	Diagrama de PCB con las conexiones en la BottomLayer (color azul), mostrando la disposición de los componentes y las conexiones eléctricas en el diseño final de la placa	26
13.	Estructura final de la carcasa del dispositivo, mostrando las dimensiones internas de 75 x 71 mm y la adaptación de la boquilla de 17 mm de diámetro para la entrada las boquillas de diámetro de 16.5 mm	27
14.	Comparativa de la desviación estándar de las mediciones para concentraciones de alcohol al 35 % y 70 % en los sensores 968-007 y MQ3	28
15.	Comparativa de los promedios de voltaje en los sensores 968-007 y MQ3 para las condiciones de línea base y concentraciones de alcohol al 35 % y 70 %, durante un periodo de 60 segundos	29

16.	Voltaje promedio medido por los sensores 968-007 y MQ3 a concentraciones de alcohol del 35 % y 70 %, con barras de error que indican la desviación estándar de cada conjunto de mediciones. El sensor MQ3 muestra mayor voltaje promedio y mayor variabilidad en comparación con el sensor 968-007 .	30
17.	Comparación de las diferencias de voltaje para diferentes concentraciones de alcohol utilizando los sensores 968-007 (izquierda, azul) y MQ3 (derecha, rojo). Cada barra representa el voltaje promedio de diferencia entre los valores iniciales y finales en diferentes concentraciones de alcohol (%), con barras de error que indican la desviación estándar de cada conjunto de mediciones. En el caso del sensor MQ3, se observa una línea de tendencia lineal que muestra un incremento casi constante de la diferencia de voltaje conforme aumenta la concentración de alcohol. En contraste, el sensor 968-007 muestra una respuesta menos pronunciada y más dispersa en concentraciones elevadas, especialmente a 5 % y 10 %	31
18.	Relación entre la concentración de alcohol (%) y la diferencia de voltaje (V), mostrando la tendencia lineal obtenida mediante regresión lineal	32
19.	Diferencia entre voltaje teórico y voltaje práctico en función de la concentración de alcohol. La diferencia de voltaje se incrementa con el aumento en la concentración de alcohol, indicando una mayor discrepancia a concentraciones más altas	32
20.	Porcentaje de precisión del sensor MQ3 en función de la concentración de alcohol. La precisión promedio es de 97.65 %, mostrando una tendencia a disminuir levemente conforme aumentan las concentraciones de alcohol	33
21.	Curva de voltaje en función del tiempo para la determinación del tiempo de reacción del sensor MQ3, indicando los puntos correspondientes al 10 % y al 90 % de la señal	33
22.	Relación entre % de alcohol (0.1 a 0.5 %) y la diferencia de voltaje en el sensor MQ3, mostrando una regresión lineal con pendiente pronunciada y buen ajuste ($R^2 = 0.884$)	34
23.	Prototipo final con housing que alberga la electrónica. Se observan el sensor MQ3, un botón para interacción del usuario, la placa Arduino Nano, y una pantalla OLED destinada a mostrar los resultados del porcentaje de alcohol en el aliento (/BAC). El dispositivo incluye una boquilla que facilita al usuario tomar las mediciones de manera más cómoda	35
24.	Comparación de las mediciones de BAC entre el sensor MQ3 y el dispositivo comercial Steren, mostrando la línea de identidad	36
25.	Pinout de microcontrolador Arduino Uno [56]	50

Lista de cuadros

1. Descripción y la distribución de pines del sensor MQ3. Adaptado de [52] . . . 49
2. Descripción y la distribución de pines del sensor ULPSM 968-007. Adaptado de [53] 50

El alcoholismo es una enfermedad que afecta a miles de personas a nivel mundial. En Guatemala, los accidentes viales vinculados al alcohol aumentaron un 19%. Esto se atribuye principalmente al consumo irresponsable de estas sustancias por parte de los conductores. Además, las autoridades de tránsito no muestran interés ni implementan un sistema de control riguroso para reducir este tipo de accidentes. Por lo que una alternativa que sea colocada en puntos estratégicos para aumentar la accesibilidad de la población consumidora y que, a su vez, fomente una mayor implicación de estas hacia la concienciación sobre el tema, es necesaria.

El propósito de este proyecto es el desarrollo de un sistema de bajo costo para detectar alcohol en sangre (BAC), con el fin de mejorar la seguridad vial mediante una herramienta precisa y fácil de usar. El prototipo integra un sensor de alcohol MQ3, un microcontrolador y un sistema de adquisición de datos que permite una operación rápida y eficiente. La validación del funcionamiento se llevó a cabo mediante pruebas comparativas con dispositivos comerciales estándar, logrando demostrar la similitud en los resultados obtenidos, en términos de precisión y consistencia. El dispositivo está diseñado para ser portátil y facilitar la medición rápida de los niveles de alcohol en el aliento, mostrando los resultados de forma clara. Con el desarrollo futuro del proyecto, se espera mejorar la portabilidad y precisión del dispositivo, demostrando así el potencial que tiene para ser utilizado como una herramienta de seguridad vial en la vida cotidiana.

Alcoholism is a disease affecting thousands of people worldwide. In Guatemala, alcohol-related traffic accidents have increased by 19%. This is primarily attributed to drivers irresponsible consumption of alcohol. Additionally, traffic authorities show no interest in implementing rigorous control systems to reduce such accidents. Therefore, it is necessary to deploy an alternative solution in strategic locations to improve accessibility for the affected population and encourage greater engagement in awareness-raising efforts.

The purpose of this project is to develop a low-cost blood alcohol content (BAC) detection system to enhance road safety through a precise and user-friendly tool. The prototype integrates an MQ3 alcohol sensor, a microcontroller, and a data acquisition system for fast and efficient operation. Its functionality was validated through comparative testing with standard commercial devices, demonstrating similarity in results regarding accuracy and consistency. The portable design facilitates rapid breath alcohol level measurements, displaying results clearly. Future development aims to improve the device's portability and precision, highlighting its potential as an everyday road safety tool.

La seguridad vial ha sido afectada de manera significativa debido a la falta de educación y al uso irresponsable de sustancias como el alcohol, lo cual contribuye a un alto porcentaje de accidentes de tránsito. Las cifras a nivel mundial y nacional incluyen miles de muertes y graves lesiones cada año, y son un claro indicativo de la necesidad de contar con herramientas que permitan la reducción de los riesgos asociados a la conducción bajo los efectos del alcohol. A pesar de que existen dispositivos comerciales para medir el nivel de alcohol en sangre a través del aliento, su elevado costo y la falta de acceso los hacen poco viables para su uso cotidiano por parte de la población en general.

Como solución a este problema, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de bajo costo para la detección de alcohol en sangre a través del aliento. El sistema se basa en el uso del sensor MQ3, el cual permite realizar mediciones precisas de la concentración de alcohol. Para la validación del dispositivo, se realizaron comparativas con dispositivos comerciales, logrando demostrar resultados similares en cuanto a la consistencia y la precisión. Además, el dispositivo cuenta con un diseño que facilita su operabilidad, incluyendo una pantalla que muestra de forma clara los resultados y un housing que asegura durabilidad y portabilidad al dispositivo.

En los primeros capítulos de este trabajo se presentan los antecedentes y la justificación para desarrollar el prototipo (Capítulo 2 y 3). A continuación, se expone tanto el objetivo general como los específicos del proyecto (Capítulo 4), así como el alcance del trabajo (Capítulo 5). En el capítulo 6 se desarrolla el marco teórico, incluyendo información sobre la fisiología del alcohol en el cuerpo, la tecnología de sensores utilizada y otros conceptos necesarios para comprender el funcionamiento del sistema. La metodología empleada se detalla en el capítulo 7, donde se describe el proceso de desarrollo y validación del dispositivo, seguido de los resultados obtenidos en el capítulo 8. Finalmente, se presentan la discusión de los resultados (Capítulo 9), las conclusiones del proyecto (Capítulo 10) y las recomendaciones para trabajos futuros (Capítulo 11).

En 1963, la Organización Mundial de la Salud clasificó el alcoholismo como una enfermedad progresiva y letal [1]. Según la OMS, “el consumo perjudicial de alcohol es un factor causal en más de 200 enfermedades y es responsable del 5.1 % de las muertes a nivel mundial” [2, Sección. 3], afectando desproporcionadamente a individuos jóvenes, entre los 20 y 35 años de edad . Esta alarmante estadística ha impulsado a diversos países a implementar medidas para mitigar el impacto del alcohol en la sociedad. Como respuesta a esta problemática, distintas iniciativas se han desarrollado globalmente, incluyendo políticas de edad mínima para el consumo de alcohol, establecidas en 21 años en la mayoría de los estados de EE. UU. [3]. Además, muchos locales que venden bebidas alcohólicas supervisan activamente el comportamiento de los clientes para decidir si continúan sirviendo alcohol.

La reacción al alcohol no es igual en todos los organismos; por eso, no todos mostrarán los mismos efectos con la misma cantidad de alcohol en la sangre [4]. Las capacidades para moverse y pensar claramente pueden empezar a disminuir con niveles de alcoholemia de 0.2 a 0.5 g/L [5]. A medida que la cantidad de alcohol en la sangre sube, estas capacidades se reducen aún más [6]. Entre 0.5 y 0.8 g/L, una persona puede sentirse eufórica y demasiado confiada, lo que puede llevar a decisiones impulsivas y peligrosas, sobre todo si se está manejando [5]. Y en niveles de 1.2 a 2.0 g/L, se pierden casi por completo las habilidades motrices y cognitivas, existiendo incluso el riesgo de caer en un coma por intoxicación alcohólica [5]. Es precisamente esta variabilidad en la respuesta al alcohol lo que hace tan valiosos a los dispositivos de detección.

Actualmente existen diferentes dispositivos para prevenir y mitigar los accidentes por conducir ebrio. Dentro de estos se encuentran los alcoholímetros digitales con boquilla intercambiable (ALP-1/003) [7] utilizados normalmente por agentes de tránsito en puestos de control. Además, existen alternativas aún no desarrolladas por completo como el *In-Vehicle Alcohol Detection*. El cual no ha sido experimentado con humanos, pero con las pruebas realizadas en laboratorio se concluye que “funciona correctamente la detección pasiva de alcohol dentro del vehículo” [8, p. 3]. También existen otras aplicaciones como la medición de metabolitos en el aliento, cuyo análisis va más orientado a la identificación de compuestos

orgánicos volátiles (VOCs) relacionados con diversas patologías, de una forma no invasiva [9]. Por último, existen los dispositivos de bloqueo IID, “los cuales son un mecanismo de seguridad para prevenir la conducción bajo influencias de alcohol si se detecta un resultado de BAC superior a los límites establecidos por los dispositivos”[10, p. 81-87], generalmente entre 0.02 a 0.04 % BAC . Estas tecnologías representan un avance significativo en la seguridad vial, al permitir una detección temprana y precisa del nivel de alcohol, ayudando así a prevenir posibles tragedias en las carreteras.

A nivel mundial, “se estima que ocurren alrededor de 1.25 millones de muertes en carretera cada año, de las cuales 273,000 están estrechamente relacionadas con la conducción bajo los efectos del alcohol” [11, p. 11-12]. Sin embargo, estos datos pueden no ser totalmente precisos, ya que muchos accidentes a nivel mundial no se reportan, y a menudo no se toman en cuenta los accidentes que involucran a peatones y ciclistas. Estas cifras alarmantes detallan la importancia de comprender cómo el consumo de alcohol afecta la capacidad de conducción.

“La habilidad de conducción se ve afectada de manera significativa por el consumo de alcohol, y los efectos varían dependiendo del nivel de alcohol en sangre” [5, Sección. 4] . Con niveles bajos de 0.3 a 0.5 g/l, los conductores pueden experimentar excitabilidad emocional, disminución de la agudeza mental y capacidad de juicio, y deterioro de los movimientos oculares [5]. A medida que el nivel de alcohol en sangre aumenta de 0.5 a 0.8 g/l, los conductores pueden experimentar una reacción lenta, pérdida de concentración, falta de coordinación y un estado de euforia que puede llevar a decisiones de conducción peligrosas [5]. Este rango de niveles de alcohol en sangre es particularmente preocupante en Guatemala, donde la conducción en estado de ebriedad es un problema grave que causa la muerte de alrededor de 10,000 personas cada año [12]. Los accidentes viales más mortales suelen ocurrir cuando los niveles de alcohol en sangre de los conductores se encuentran entre 0.5 y 0.8 g/l. Es especialmente alarmante que la mayoría de estas muertes sean causadas por jóvenes de entre 15 y 30 años, lo que subraya la necesidad de políticas y programas de educación efectivos para prevenir la conducción en estado de ebriedad en este y otros grupos de edad [13].

En Guatemala, a pesar de que la edad legal mínima para el consumo de alcohol es de 18 años, muchos jóvenes comienzan a consumir este tipo de bebidas a partir de los 15 años. Esto es un fenómeno mayormente observado en el interior del país. Esta situación plantea serias preocupaciones relacionadas con la seguridad vial, debido a que la edad donde muchos de los jóvenes comienzan a obtener licencias de conducir es entre los 15-16 años y estos pueden verse tentados a conducir bajo efectos de alcohol, especialmente debido a las limitaciones del

sistema de transporte público del país [14]. Dichas limitaciones incluyen la falta de un sistema de transporte público seguro y confiable para el uso cotidiano. Los servicios de transporte público existentes operan principalmente en áreas céntricas de la ciudad capital y tienen horarios limitados, generalmente desde las 5:30 a.m. hasta las 7 u 8 p.m., dependiendo de si es entre semana o fines de semana [15]. Esta falta de opciones de transporte alternativas puede llevar a más personas a optar por conducir, incluso después de consumir alcohol. Esta situación empeora más debido a la falta de una cultura sólida de manejo responsable cuando se ingiere este tipo de bebidas.

Agravando aún más el problema se encuentra la corrupción. La cual es un factor prevalente en Guatemala, no solo en el ámbito político, sino también en la vida cotidiana [16]. Algunas entidades policiales pueden pasar por alto las infracciones viales a cambio de sobornos, lo que puede contribuir a la falta de responsabilidad y al aumento de la conducción peligrosa. Este problema de corrupción agrava aún más los desafíos asociados con la conducción bajo los efectos del alcohol en el país.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha puesto en marcha medidas para contrarrestar el consumo irresponsable de alcohol en los países de América Latina. Dentro de su Plan de Acción Mundial para la Prevención y Control de las Enfermedades No Transmisibles 2013-2023, “se propone el incremento de los impuestos sobre las bebidas alcohólicas y la limitación de su disponibilidad al por menor” [17, Sección. 4], estrategias que han sido seleccionadas por su eficiencia en términos de costos. Además, se están desarrollando tecnologías como los dispositivos de detección de alcohol en vehículos (*In-Vehicle Alcohol Detection*), que son considerados una alternativa valiosa por entidades como las aseguradoras de salud y vehículos [18]. Aunque estas tecnologías son altamente útiles, su costo elevado impulsa la búsqueda de alternativas más asequibles que ofrecen una utilidad similar.

En respuesta a esta necesidad se busca desarrollar un sistema económico y preciso, capaz de medir de manera correcta el nivel de alcohol en sangre a través del aliento. Este dispositivo podría ser implementado en lugares donde se venden bebidas alcohólicas, con el propósito de prevenir accidentes al proporcionar a las personas información sobre su nivel de alcohol en sangre a través de los resultados obtenidos. Se buscará mantener la facilidad de uso por parte del usuario mediante la implementación de una interfaz física capaz de ser accesible e interactiva.

4.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema de adquisición de datos de bajo costo para la detección de alcohol en sangre a través del aliento, que sea eficiente y comparable con dispositivos comerciales existentes.

4.2. Objetivos específicos

- Evaluar y adquirir todos los componentes necesarios para el sistema de medición, incluyendo 2 tipos de sensores de alcohol, un sistema de conversión análogo a digital y un microcontrolador.
- Crear un sistema de evaporación de alcohol que simule el aliento humano y permita la evaluación de diversos tipos de sensores para realizar una calibración precisa de ellos.
- Desarrollar un prototipo del sistema de medición que facilite la recolección de datos en humanos y cuente con una boquilla para el aliento, un PCB para toda la electrónica, una carcasa y una pantalla para mostrar resultados.
- Comparar y validar el rendimiento del dispositivo de medición desarrollado contra dispositivos de medición de alcohol comerciales utilizados por agentes de tránsito.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y validar un sistema de detección de alcohol en sangre a través del aliento, utilizando el sensor MQ3 como núcleo principal. La implementación incluye la integración de un microcontrolador, un sistema de adquisición de datos y la construcción de un prototipo funcional que facilite la detección de alcohol de forma práctica y accesible.

El alcance de esta tesis está limitado a la validación del prototipo en condiciones controladas de laboratorio y con muestras simuladas, sin pruebas con usuarios finales o en entornos reales. Se busca demostrar la viabilidad técnica del prototipo con un sensor de bajo costo, su precisión, y evaluar su funcionamiento a través de comparaciones con dispositivos comerciales. No se implementará algún algoritmo avanzado para la transmisión de datos, ya que el enfoque de este proyecto es exclusivamente la viabilidad del sistema en cuanto a la adquisición y procesamiento de datos.

Los resultados mostrados reflejan la efectividad del sistema bajo las condiciones descritas, dejando fuera de alcance la aplicación en escenarios clínicos o de campo, los cuales requieren de una evaluación más profunda y pruebas más amplias. Las aplicaciones prácticas y la evaluación a gran escala se contemplan como recomendaciones para desarrollos futuros, que podrían incluir mejoras en la calibración del dispositivo y pruebas en entornos reales para alcanzar un nivel de confiabilidad comparable al de los alcoholímetros comerciales.

6.1.1. Metanol

El metanol o alcohol metílico (CH_3OH) es una sustancia altamente tóxica y, siendo alcohol primario, se le considera de los más simples. Tiene diversos usos, como aditivo para combustibles, desnaturalización de alcohol y producción de formaldehído (CH_2O), entre otros [23]. En el organismo humano, el metanol se forma como resultado de la digestión de dulces que contienen pectinas, edulcorantes o conservantes como el dimetil dicarbonato ($C_4H_6O_5$), produciendo entre 0.3 g a 0.6 g al día de esta sustancia [5]. La intoxicación por metanol ocurre por ingestión, contacto con la piel o inhalación de vapores. Es importante destacar que el daño no proviene del metanol en sí, sino de los productos de su degradación en el hígado por la enzima hepática alcohol deshidrogenasa. “Un ejemplo de estos metabolitos es el formaldehído (CH_2O) y el ácido fórmico (CH_2O_2), que causan una acidosis letal y cuyos síntomas comienzan a aparecer pasadas las 12 horas de la ingestión” [24, p. 70-71]. Aunque no se ha determinado con precisión la dosis letal de metanol, se sabe que la dosis tóxica comienza a partir de 10 a 30 *mL*, y se han registrado casos de ceguera con dosis menores [25].

6.1.2. Etanol

El etanol o alcohol etílico (C_2H_6O) es el más común y conocido de los alcoholes, debido a que es “una sustancia que proviene de la fermentación anaerobia de hidratos de carbono” [26, p.253]. Además de su utilización como ingrediente principal en bebidas alcohólicas, tiene diversos usos en diferentes industrias, como antiséptico luego de ser desnaturalizado, en perfumería, entre otros [27]. Luego de su consumo, su absorción tiene lugar principalmente en el intestino delgado, pero es dependiente del ritmo de vaciamiento del estómago, de la absorción intestinal y de la presencia de alimentos en el estómago, por lo que, “únicamente alrededor del 2% del etanol consumido se elimina sin necesidad de metabolización hepática, principalmente por la orina y por los pulmones” [28, p. 59]. Una vez absorbido, el etanol se distribuye rápidamente por todo el cuerpo, alcanzando su máxima concentración en los tejidos ricos en agua y lípidos. “Su metabolización principal ocurre en el hígado, donde la enzima alcohol deshidrogenasa lo convierte en acetaldehído, una sustancia tóxica que es responsable de varios de los efectos nocivos del alcohol” [28, p. 62]. Posteriormente, el acetaldehído se transforma en ácido acético gracias a la enzima acetaldehído deshidrogenasa; posteriormente, el ácido acético se integra en diversas rutas metabólicas, incluyendo la síntesis de lípidos y la producción de energía [29].

6.1.3. Isopropanol

El isopropanol o alcohol isopropílico (C_3H_8O) es conocido debido a su alta volatilidad [30]. Esta característica le ha atribuido varios usos como la limpieza de componentes electrónicos, desinfectantes, aditivos de combustibles, entre otros [31]. La forma más común de exposición a esta sustancia es la ingesta, debido a su rapidez de absorción. Según estudios, “es metabolizado a nivel hepático por la enzima alcohol-deshidrogenasa, produciendo acetona como principal metabolito, que es principalmente excretado por los riñones” [31, p. 227-228]. Los síntomas de una intoxicación aguda son principalmente digestivos, “pero en casos graves

pueden aparecer manifestaciones neurológicas, hipotermia, hipotensión y arritmias, y a diferencia de otros alcoholes” [31, p. 228], la ingestión de alcohol isopropílico rara vez produce acidosis metabólica.

6.2. Porcentaje de alcohol por volumen

El porcentaje de alcohol por volumen (ABV, por sus siglas en inglés) es una medida estándar para informar sobre la cantidad, en mililitros, de alcohol etílico presente en 100 mililitros de la bebida total [32]. Comúnmente “se calcula mediante el uso de un refractómetro o hidrómetro para medir la densidad del líquido antes y después de la fermentación” [33, Sección. 3]. Inicialmente, el líquido es mucho más denso, debido a la presencia de azúcares, y al final del proceso de fermentación disminuye la densidad debido a que los azúcares fueron convertidos en alcohol a causa de la fermentación [34]. Finalmente, se calcula el porcentaje de alcohol por volumen mediante la diferencia entre las dos lecturas de densidad.

Las diferentes bebidas alcohólicas conocidas varían su porcentaje de alcohol por volumen [32]:

- Los licores suelen tener un porcentaje de alcohol por volumen mucho mayor a las demás bebidas alcohólicas, generalmente entre 14 y 55 %.
- Los vinos suelen tener un porcentaje de alcohol por volumen entre el 7 y el 15 %, con los vinos blancos como en el rango más bajo (10-13 %) y con los vinos tintos normalmente en lo alto del rango (13-15 %).
- Generalmente el porcentaje de alcohol por volumen de las cervezas varían entre el 2 y 15 %, siendo el más común el rango de 5 a 8 %. Las cervezas artesanales pueden llegar hasta el 15 %, mientras que algunas cervezas ligeras pueden llegar hasta 0.5 % de ABV.

Conocer el porcentaje de alcohol por volumen de una bebida es importante para entender su potencia y efectos. Pues un mayor porcentaje indica una mayor concentración de alcohol, lo que puede afectar significativamente la ingesta y el nivel de intoxicación. En cuanto al contexto del consumo responsable, este dato permite a los consumidores tomar decisiones informadas sobre su ingesta de alcohol, ayudando a prevenir el abuso y la dependencia.

6.3. Metabolización en el cuerpo

6.3.1. Absorción y distribución

La absorción de esta sustancia comienza en el tracto digestivo superior, donde aproximadamente el 20 % del alcohol ingerido es absorbido. El resto se absorbe en su mayoría en el intestino delgado, desde donde ingresa directamente al torrente sanguíneo [35]. Cabe destacar que la velocidad de absorción del alcohol depende de las características individuales de cada persona; factores como el sexo, el peso, el estado anímico y la salud influyen en

dicha velocidad [36]. “Las mujeres tienden a presentar concentraciones más altas de alcohol en sangre debido a menores niveles de alcohol deshidrogenasa (*ADH*) en el estómago y a una menor proporción de agua corporal” [35, Sección. 2]. Otro factor a considerar es el estado del estómago, especialmente si la persona ha ingerido recientemente alimentos ricos en carbohidratos. Un estómago vacío favorece una absorción más rápida y puede llevar a que las concentraciones de alcohol en sangre sean mayores [36]. La velocidad de absorción también depende de la concentración de alcohol por volumen de la bebida. Generalmente, las bebidas con un porcentaje de alcohol por volumen (ABV) superior al 40% tienden a absorberse más lentamente que aquellas con porcentajes más bajos [36]. Esto se debe a que concentraciones más altas afectan directamente la velocidad de vaciamiento gástrico.

Una vez que el alcohol se encuentra en el torrente sanguíneo, se dispersa uniformemente a las cavidades acuosas del organismo gracias a la solubilidad del etanol en agua [37]. Esto provoca que existan concentraciones similares de alcohol en la mayoría de los tejidos, con excepción de los tejidos grasos, debido a que estos poseen una menor cantidad de agua [37]. Los niveles de alcohol en sangre, dependiendo de los factores ya mencionados, alcanzan su pico más alto entre los 30 y 90 minutos después de la ingesta, momento en el que se comienzan a manifestar signos de intoxicación etílica aguda debido a que el etanol atraviesa fácilmente la barrera hematoencefálica, afectando directamente al sistema nervioso central [36].

6.3.2. Metabolización hepática

El etanol se descompone en el hígado mediante un proceso que involucra a las enzimas alcohol deshidrogenasa (*ADH*) y aldehído deshidrogenasa (*ALDH*) (Figura 2). Primero, el etanol es descompuesto por la *ADH* para dar como resultado acetaldehído, el cual es un compuesto altamente nocivo para la salud [38]. Inmediatamente, el acetaldehído es descompuesto por la enzima *ALDH*, obteniendo acetato, el cual es menos nocivo para el organismo y puede ser convertido en dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), compuestos que pueden ser eliminados con mayor facilidad del cuerpo [39]. Según estudios, “además de este proceso principal, cuando las concentraciones de alcohol en sangre son demasiado altas, se activa el Sistema Microsomal de Oxidación del Etanol (*MEOS*), en el cual la enzima *CYP2E1* juega un papel crucial” [38, p. 15]. Paralelamente, “la enzima catalasa convierte etanol en acetaldehído utilizando peróxido de hidrógeno, contribuyendo en menor medida a los procesos del *ADH* y *MEOS*” [38, p. 17].

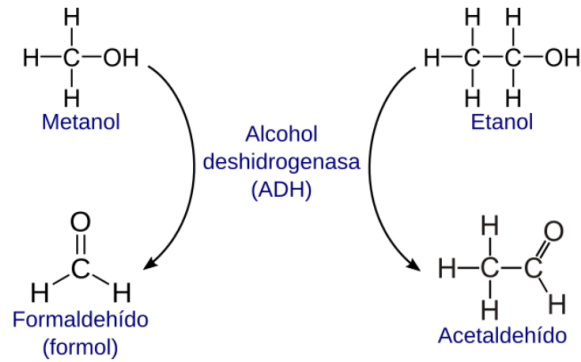


Figura 2: Metabolización del metanol y etanol a partir de la enzima alcohol deshidrogenasa [40]

6.4. Efectos del alcohol en el cuerpo

Como se ha mencionado anteriormente, muchos de los efectos inmediatos dependen de la cantidad ingerida y la tolerancia que varía dependiendo de las características físicas de cada individuo. Para el Sistema Nervioso Central (SNC), niveles leves de alcohol en sangre podrían derivar en desinhibición del sistema nervioso central, afectando principalmente el habla, pensamiento, juicio y coordinación [41]. Con niveles altos de alcohol en sangre se puede derivar una intoxicación por alcohol, lo que conlleva a confusión, sedación profunda y coma etílico, que en su mayoría puede llevar a la muerte por depresión respiratoria [41]. En cuanto al Sistema Cardiovascular, niveles moderados de alcohol en sangre derivan problemas en los cambios de la frecuencia cardíaca, como la disminución de esta debido a la dilatación de los vasos sanguíneos [42]. El consumo prolongado de esta sustancia tiene graves repercusiones en diferentes sistemas del cuerpo humano (Figura 3).

El consumo en exceso y prolongado de alcohol deriva múltiples consecuencias en varios sistemas del cuerpo. En el sistema hepático, “enfermedades como cirrosis, fibrosis, hepatitis alcohólica y esteatosis se hacen presentes, resultado de la acumulación de desechos tóxicos que el hígado debe procesar” [44, Sección. 1]. En el sistema cardiovascular “se presentan enfermedades como miocardiopatías, hipertensión, arritmias y riesgo a padecer problemas cerebrovasculares” [44, Sección. 1]. En cuanto al Sistema Nervioso Central (SNC), varios trastornos neurológicos como el deterioro cognitivo, neuropatía alcohólica y condiciones de severidad que comprometen las habilidades cognitivas y fomentan la pérdida de memoria se hacen presentes [44]. Además, el alcohol está relacionado con la predisposición a varios tipos de cáncer, como el de cuello, esófago, hígado, colorrectal y de mama, aumentando proporcionalmente a la cantidad y duración del consumo de bebidas alcohólicas [44]. Entre otros efectos a largo plazo que causa el consumo prolongado de esta sustancia se encuentra el deterioro del sistema inmunológico; “esto conlleva a una mayor susceptibilidad hacia enfermedades crónicas e infecciones, así como gastritis y pancreatitis por la constante irritación del tracto digestivo” [44, Sección. 1].

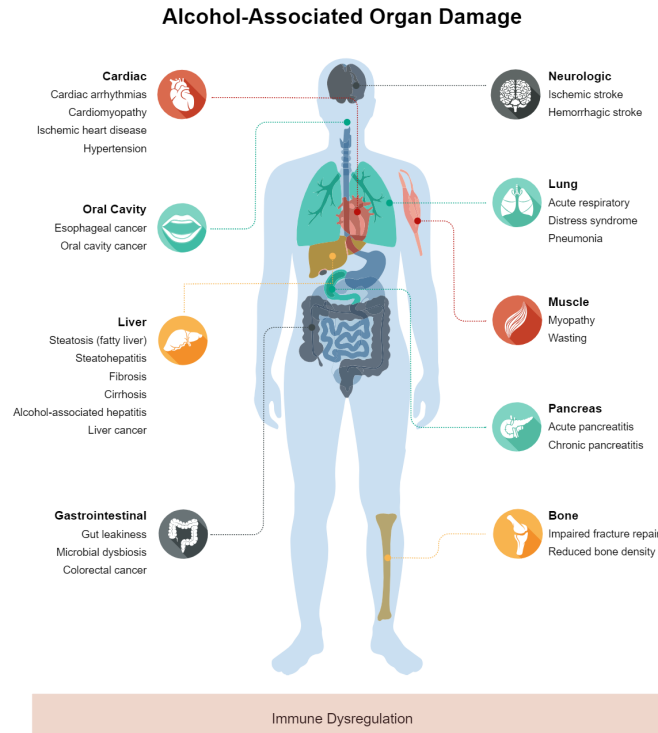


Figura 3: Problemas de salud asociados al consumo prolongado del alcohol [43]

6.5. Transporte de la sangre al aliento

El transporte del alcohol desde la sangre hacia el aliento es un proceso que depende en su totalidad de las propiedades volátiles del etanol y su interacción con el sistema respiratorio [45]. Como se mencionó con anterioridad, esta sustancia se absorbe principalmente en el tracto digestivo superior y posteriormente ingresa al torrente sanguíneo. La difusión de esta sustancia sigue el mismo principio que el intercambio gaseoso en una respiración normal debido a la volatilidad del etanol (Figura 4) [45]. Cabe destacar que solamente una pequeña fracción del etanol no metabolizado llega a los alvéolos pulmonares, donde ocurre el intercambio gaseoso mediante difusión, y “la relación entre el aire alveolar y la concentración de alcohol en sangre (*BAC*) se estima que es 2100 : 1 mililitros, respectivamente” [45, p. 1820].

6.6. ¿Qué es un aerosol?

A diferencia de un gas, “un aerosol es una mezcla de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas” [47, p. 143-144]. Además, “las partículas en un aerosol permanecen suspendidas en el aire debido a su pequeño tamaño y a la dinámica del flujo de aire” [47, p. 144]. Mientras que las moléculas de un gas se mueven independientemente, “las partículas de un aerosol pueden interactuar entre sí y con el gas circundante, mostrando una complejidad mayor en su comportamiento y distribución” [47, p. 144]. Estas características hacen que los aerosoles sean relevantes en contextos como la transmisión de enfermedades respiratorias, debido a su facilidad para transportar patógenos a largas distancias [47].

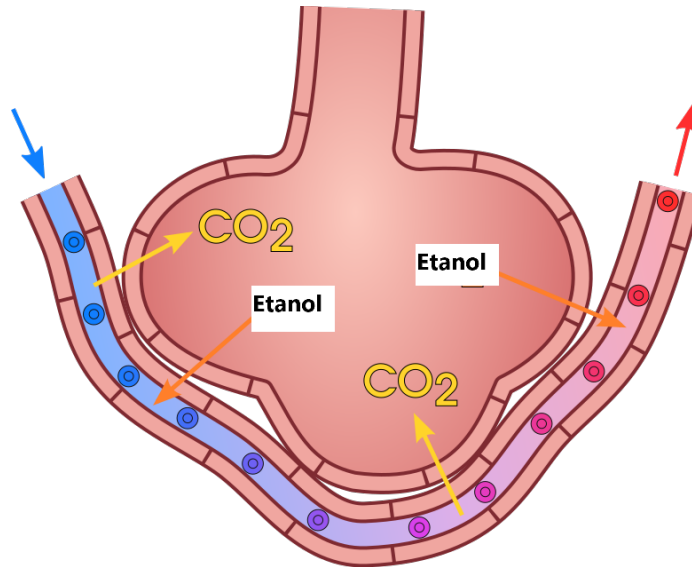


Figura 4: Proceso de difusión de gases y etanol, desde los capilares sanguíneos hacia los alvéolos pulmonares [46]

6.6.1. Proceso de aerosolización en la respiración

Durante la espiración, el aire expulsado lleva consigo pequeñas gotas de fluidos de las vías respiratorias, creando de esta manera un aerosol. Este proceso se ve influenciado por factores como la velocidad del flujo, un flujo de aire más rápido tiende a generar partículas más pequeñas debido a una mayor cantidad de energía cinética y turbulencia en el flujo [48]. El diámetro y presencia de bifurcaciones en las vías respiratorias influyen en cómo se generan y transportan las partículas de aerosol, debido a que afecta a la distribución de las partículas y al flujo del aire [48]. Por último, hay que tomar en consideración las propiedades del líquido de las vías respiratorias; pues, tanto la tensión superficial como la viscosidad de estas pueden afectar a la cantidad de partículas formadas en el aerosol [48].

Otros mecanismos contribuyentes en la creación de aerosoles en el sistema respiratorio incluyen el desprendimiento de partículas, donde las partículas líquidas adheridas a las superficies de las vías respiratorias se separan debido a la fuerza del flujo de aire exhalado. Además, la fragmentación de gotas ocurre cuando el aire exhalado pasa a alta velocidad a través de las vías respiratorias, fragmentando las gotas de líquido en partículas más pequeñas y formando un aerosol más homogéneo [48]. En ciertos casos, el vapor de agua presente en el aire exhalado puede condensarse al salir del cuerpo, en especial cuando la temperatura del aire exhalado disminuye al mezclarse con el aire ambiental más frío [48]. Esta condensación forma nuevas partículas líquidas, contribuyendo a la mezcla del aerosol.

6.7. ¿Qué es un gas?

Físicamente los gases son descritos como un conjunto de partículas en movimiento aleatorio y continuo. En este estado, las moléculas tienen suficiente energía cinética para superar

las fuerzas de atracción entre ellas, “lo que resulta en un comportamiento único caracterizado por la baja densidad y la capacidad de llenar cualquier recipiente debido a su expansión indefinida” [48, p. 15-16]. La teoría cinética de los gases es crucial para comprender el comportamiento de estos, a causa de las propiedades macroscópicas de sus partículas.

6.7.1. Teoría cinética de los gases

La teoría cinética de los gases establece que las moléculas de gas se encuentran en movimiento constante y las colisiones son perfectamente elásticas. Según Chang y Overby:

«Los principales supuestos en los que se basa son: primero, las moléculas de gas se mueven aleatoriamente en todas direcciones; segundo, las colisiones entre moléculas y las paredes del recipiente no existe pérdida de energía, es decir, son perfectamente elásticas; tercero, el volumen ocupado por las moléculas de gas es insignificante en comparación con el volumen total del gas; y por último, no existen fuerzas de repulsión o atracción significativas entre las moléculas de gas, exceptuando las colisiones» [47, p. 50].

. Las suposiciones mencionadas permiten explicar otras leyes relacionadas y obtener la ecuación de estado de los gases ideales [47].

6.7.2. Ley de los gases ideales

La ley de los gases ideales “es una ecuación que relaciona el volumen (V), la presión (P), la cantidad de gas (n), la temperatura (T) y la constante de los gases ideales (R), la ecuación se expresa tal que, $PV = nRT$ ” [47, p. 41-42]. Se aplica para condiciones de baja presión y temperatura, porque las interacciones moleculares del gas son despreciables. Esta ley es fundamental para poder calcular y predecir el comportamiento de los gases en diferentes condiciones, además de tener diversos usos industriales, científicos y educativos. A partir de esta ecuación, se pueden derivar otras leyes de los gases, como la ley de Boyle, la ley de Charles y la ley de Avogadro, que describen el comportamiento de los gases bajo diferentes condiciones específicas [47].

6.8. Sensores de gas

Los sensores de gas se utilizan para la detección de la presencia y concentración de un gas en específico en el ambiente, monitoreo de la calidad del aire y a prevenir riesgos asociados con la utilización de gases tóxicos e inflamables [49]. Estos sensores son ampliamente utilizados en la industria, la investigación y la seguridad doméstica. Existen diferentes tipos de sensores de gas, entre los cuales se encuentran los sensores electroquímicos, que miden gases mediante reacciones químicas internas; los sensores de semiconductor, que responden a cambios en la conductividad cuando se exponen a gases específicos, y los sensores catalíticos, que son utilizados para la detección de gases inflamables, entre otros.

6.8.1. Sensores de nanomateriales

Estos sensores emplean materiales como nanotubos de carbono que tienen una alta relación superficie-volumen, lo que les proporciona una alta sensibilidad y poder de selectividad para la detección únicamente de compuestos como el etanol [49]. Cabe destacar que pueden operar a temperaturas bajas y son mucho más precisos que los sensores que utilizan una superficie de un óxido metálico para variar la resistencia eléctrica (*MOX*).

6.8.2. Sensores electroquímicos

La detección de gases en este tipo de sensores funciona mediante reacciones de oxidación-reducción (redox) que comúnmente ocurren en la superficie del electrodo de trabajo, lo que genera una corriente eléctrica en proporción a la concentración del gas [49]. Comúnmente suelen tener 2 o 3 electrodos: el de referencia, el de trabajo y el auxiliar, junto con un electrolito que fomenta la transferencia de iones [49]. Este tipo de sensores ofrece linealidad y alta precisión en sus mediciones, bajo consumo de energía y estabilidad a largo plazo; sin embargo, se pueden presentar problemas en cuanto al agotamiento del electrolito a lo largo del tiempo e interferencias cruzadas debido a otros gases [49].

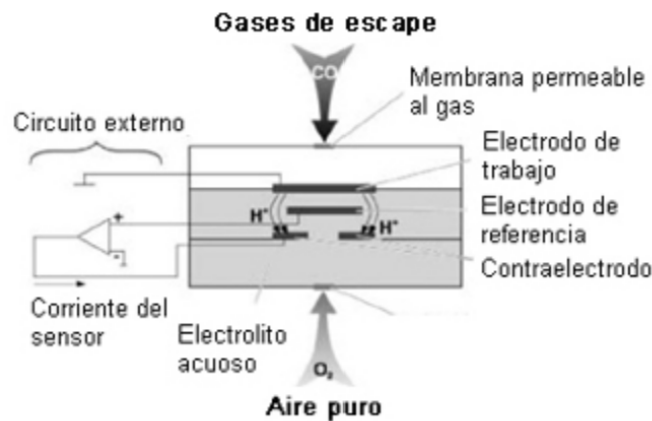


Figura 5: Composición interna del sensor electroquímico [50]

6.8.3. Sensores químico-resistivos

La detección de gases en este tipo de sensores se basa en el cambio de la resistencia eléctrica del material que interactúa con el gas de preferencia (Figura 6). Comúnmente se utilizan semiconductores de óxidos metálicos como óxido de estaño (SnO_2), óxido de níquel (NiO) y óxido de zinc (ZnO). Cuando el gas se adhiere a la superficie del material, interactúa con los oxígenos absorbidos, provocando una transferencia de electrones que altera la resistencia eléctrica [49]. Este tipo de sensores es altamente sensible y puede detectar concentraciones de gas en el rango de partes por millón (ppm). Además, son fáciles de integrar en sistemas electrónicos, aunque presentan desafíos como la selectividad y la influencia de la temperatura y humedad [49].

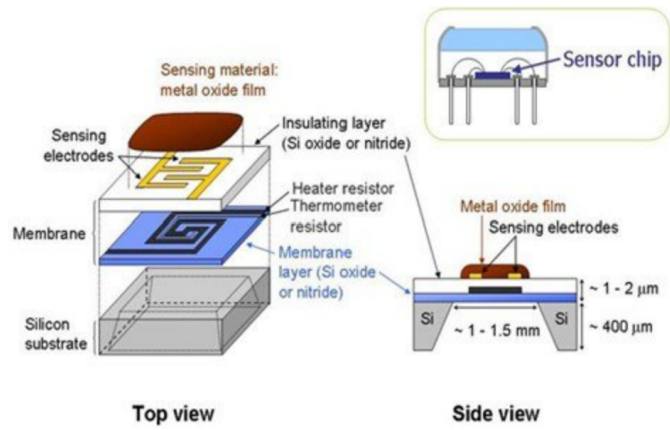


Figura 6: Composición interna del sensor químico-resistivo moderno [51]

7.1. MQ3

Este es un sensor perteneciente a la familia de sensores químico-resistivos, y comúnmente se utiliza para la detección de alcohol en el aire. El semiconductor que utiliza es el dióxido de estaño (SnO_2), el cual le permite tener un rango de detección de 0.05 a 10 mg/L y consumir cerca de 165 mA encendido [52]. Sus salidas incluyen una salida analógica (AO) que proporciona una señal de voltaje proporcional a la concentración de alcohol y una salida digital (DO) ajustable mediante un potenciómetro para establecer un umbral de concentración (Figura 7). La estructura interna del sensor incluye un tubo microcerámico de óxido de aluminio (Al_2O_3), un electrodo de medición, una capa sensible de dióxido de estaño (SnO_2) y un calentador, cubiertos por una malla para protección y filtrado de materiales no deseados [52].

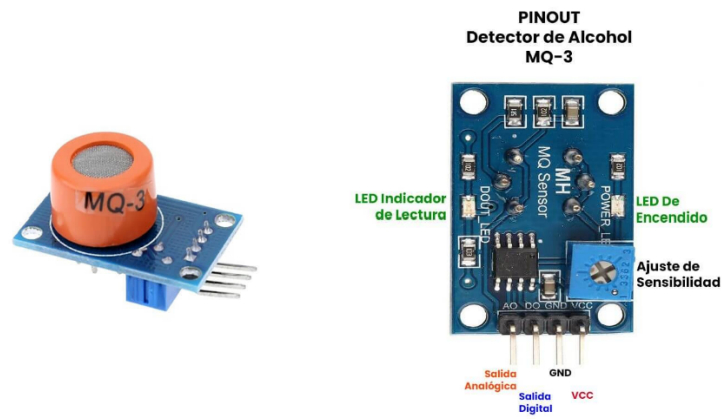


Figura 7: Sensor MQ3 y distribución de pines [52]

7.2. ULPSM 968-007

Este sensor pertenece a la familia de sensores electroquímicos de bajo consumo diseñados para la detección precisa del etanol. Obtiene valores de voltaje lineal dependiendo de la cantidad de etanol a la que sus electrodos son expuestos. El rango de medición de este sensor VA es de 0 a 200 partículas por millón (ppm), una resolución de $0,2 ppm$ y una precisión de al menos 2% de la lectura [53]. Además, características como su bajo consumo de energía, menos de $45W$, su tiempo de respuesta menor a 60 segundos y la integración de un sensor de temperatura para la compensación ambiental, lo convierten en un dispositivo ideal para aplicaciones portátiles (Figura 8)[53].

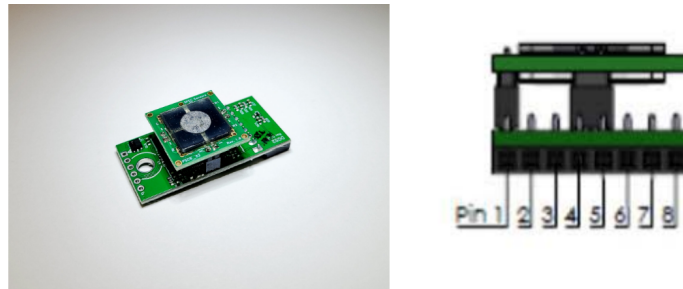


Figura 8: Sensor ULPSM 968-007 y distribución de pines [53]

7.3. Prueba de datos iniciales

Se utiliza el microcontrolador Arduino Uno (Uno, Arduino LLC, Ivrea, Italia) para conectar el sensor MQ3 (gas sensor, Hanwei Electronics CO, Zhengzhou, China). Es importante destacar que se requiere un voltaje de suministro de $5 V$ y una conexión a tierra (GND) referenciada al microcontrolador. El sistema se deja encendido durante aproximadamente 24 horas, o más, dependiendo de la precisión deseada en los datos. Cabe mencionar que el microcontrolador no debe tener ningún programa precargado y debe estar ubicado en un espacio con suficiente flujo de aire. Tras completar el tiempo de precalentamiento del sensor, se desarrolla un programa en Arduino IDE (Uno, Arduino LLC, Ivrea, Italia) para la adquisición de datos preliminares. Esta adquisición se realiza a través de las salidas digital (D0) y analógica (A0) del sensor, conectadas a las entradas correspondientes del microcontrolador. Cualquier entrada de D2 a D13 puede usarse para los datos digitales y cualquier entrada de A0 a A5 para los datos analógicos.

Posteriormente, se llevan a cabo pruebas preliminares para observar las variaciones en los valores analógicos y digitales, así como para verificar el funcionamiento del sensor MQ3. En primer lugar, se monitorean los valores de los pines analógicos durante un minuto en condiciones de 0% de alcohol, seguido de un periodo de reposo de dos minutos. Luego, se acerca un algodón humedecido con alcohol etílico (etanol) al 70% durante un minuto, sin que el algodón toque el sensor, con el objetivo de verificar su correcto funcionamiento bajo estas condiciones. Los valores obtenidos se imprimen en el monitor serial, asegurando una configuración de 115200 baudios tanto en el monitor como en la comunicación serial. El mismo procedimiento se repite para el sensor ULPSM 968-007 (sensor, Digkey, CA, USA),

con la diferencia de que el voltaje de suministro requerido es de 2.7 V a 3.3 V. Además, para la obtención de datos analógicos, se conecta el pin de entrada analógico 1.

Es necesario utilizar un paquete de soporte de Arduino en MATLAB (Mathworks Inc, CA, USA) para llevar a cabo las mediciones descritas a continuación. Es importante configurar directamente el microcontrolador en los complementos (Add-Ons) de MATLAB para luego simplemente instanciar la variable tipo Arduino en el código de MATLAB.

7.4. Calibración de sensores

7.4.1. Medición de *baseline* sin alcohol

Es necesario utilizar un paquete de soporte de Arduino en MATLAB (Mathworks Inc, CA, USA) para llevar a cabo las mediciones descritas a continuación. Es importante configurar directamente el microcontrolador en los complementos (Add-Ons) de MATLAB para luego simplemente instanciar la variable tipo Arduino en el código de MATLAB.

Utilizando las mismas conexiones descritas anteriormente tanto para el sensor MQ3 como para el ULPSM 968-007, se realizan un total de cinco mediciones de 0% de alcohol, con una duración de un minuto cada una, dejando un período de descanso de dos minutos y medio entre cada medición. Es necesario guardar tanto los gráficos de cada medición de voltaje versus tiempo en formato png, como los archivos csv correspondientes, identificándolos correctamente según el número de medición y el sensor utilizado.

Finalmente, se desarrolla un código adicional al ya utilizado para obtener las mediciones, con el objetivo de procesar los datos de los archivos csv de ambos sensores. Es fundamental tener en cuenta el nombre asignado a las columnas en los archivos csv para que el código pueda leerlos correctamente. Dado que los valores fluctúan a lo largo del minuto de medición, se calcula un promedio de todos los valores de voltaje para cada sensor y se grafican ambas señales en una sola gráfica para comparar el comportamiento base de los sensores. Las señales se identifican mediante el color y la forma de la línea, incluyendo una leyenda en el gráfico, y el gráfico final se guarda en formato png y se nombra adecuadamente.

7.4.2. Prueba de saturación de alcohol

Para esta prueba, es necesario contar con dos concentraciones de alcohol. Para ello, se preparan dos recipientes: uno contiene 2 ml de alcohol al 70%, y el otro se prepara mezclando 1 ml de agua con 1 ml de alcohol, obteniendo así una solución 1:1 de 2 ml. Además, se utiliza un recipiente transparente con dimensiones interiores de 13x17x6 cm. Los sensores se colocan en la mitad del largo del recipiente, es decir, a 8.5 cm de un extremo y a una altura de 2 cm desde el borde del recipiente (Figura 9).



Figura 9: Posicionamiento de los sensores de alcohol y el algodón con las concentraciones de alcohol 35 % y 70 % respectivamente

Se humedece un algodón con alcohol al 70 % y se introduce en el recipiente durante 15 segundos. Pasado este tiempo, se ingresa inmediatamente el sensor de alcohol en el recipiente y se inician las mediciones durante un minuto. Luego, se deja reposar el sensor durante aproximadamente 2 minutos y medio, repitiendo el proceso cuatro veces más para obtener un total de cinco mediciones. Una vez finalizado, se repite el mismo procedimiento utilizando la solución al 35 % de alcohol.

7.4.3. Prueba de dinamismo

Para las mediciones, se realizan 5 pruebas para cada concentración de etanol, al 35 % y al 70 %, respectivamente. El sensor se introduce dentro del recipiente antes de iniciar el proceso. Las mediciones comienzan a los 15 segundos, momento en el cual se coloca un algodón humedecido con alcohol en la concentración correspondiente dentro del recipiente. Al finalizar cada medición, se deja un período de reposo de dos minutos y medio antes de proceder con la siguiente prueba.

7.4.4. Prueba de dinamismo a concentraciones bajas

El procedimiento se realizó utilizando micropipetas (micropipeta, Eppendorf AG, Hamburgo, Alemania) de 1000 μL , 100 μL y 10 μL , y tubos Falcon de 15 mL (tubos, VWR, Pennsylvania, USA). Para garantizar la pureza de las diluciones, se empleó agua destilada como diluyente y un método de dilución en cadena, diseñado para minimizar errores sistemáticos en las concentraciones. La secuencia comenzó con la preparación de la dilución inicial: adición de 2.143 mL de alcohol al 70 % a 12.857 mL de agua destilada (relación 1:6). Posteriormente, se transfirieron 7.5 mL de esta solución al siguiente tubo, previamente cargado con 7.5 mL de agua destilada, generando una dilución 1:1 (5 % de concentración). De esta segunda dilución, se extrajeron 3 mL y se mezclaron con 27 mL de agua destilada para obtener la concentración al 1 %. Este patrón se repitió escalonadamente para las siguientes concentraciones, asegurando que cada tubo contuviera primero el volumen de agua requerido

antes de la transferencia de la alícuota correspondiente, lo que garantizó la precisión de las concentraciones finales.

7.5. Adquisición de parámetros fundamentales del sensor MQ3

7.5.1. Relación entre porcentaje de etanol y diferencia de voltaje

Se preparan 10 concentraciones diferentes (0.5, 1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 30 %) empleando alcohol etílico 95 % (alcohol etílico, Distribuidora del Caribe, Guatemala, Guatemala). Realizar las mediciones únicamente con el sensor MQ3, tomar las mediciones de la menor concentración hacia la mayor, tomando descansos de 2 minutos entre cada medición. Este procedimiento se lleva a cabo en tres momentos diferentes del día—mañana, tarde y noche—y se repite durante tres días consecutivos. Finalmente, se realiza el análisis en MATLAB, que consiste en la utilización de una regresión lineal para definir una ecuación que describa el comportamiento entre la diferencia de voltaje (*baseline* sin alcohol y saturación) y las concentraciones de alcohol.

7.5.2. Precisión

Utilizando el gráfico de la regresión lineal y la ecuación de la recta que describe la relación entre el porcentaje de alcohol y la diferencia de voltaje (*baseline* y saturación) se procede a escoger 6 concentraciones de interés, preferiblemente que estén separadas de igual forma entre ellas, por ejemplo, 5 % - 30 % con intervalos de 5. Luego se obtiene el valor de voltaje correlacionado para cada concentración seleccionada. Utilizando el sensor MQ3 y la ecuación encontrada anteriormente, se mide el valor de voltaje correspondiente a cada concentración y se realiza una comparativa entre el valor teórico y el valor práctico de voltaje para determinar el porcentaje de error promedio para todas las mediciones. Seguidamente, el porcentaje de error promedio obtenido se le resta al 100 % para obtener el porcentaje de precisión promedio del sensor MQ3.

7.5.3. Tiempo de reacción

Se utilizan los datos de la prueba de dinamismo del sensor para posteriormente determinar el valor de tiempo para cuando la señal de voltaje estuviera en el 10 %, y otro momento cuando esta se encuentre en el 90 %. Posteriormente, se realiza una diferencia entre el valor de tiempo para el 90 % del voltaje y el valor de tiempo para el 10 % de voltaje para los 20 archivos de pruebas de dinamismo. Se promedian los valores resultantes de estas diferencias de tiempo, obteniendo así el tiempo de reacción del sensor.

7.6. Fabricación del sistema de evaporación de alcohol

Se corta un tramo de 20 centímetros de un tubo de PVC de 1 pulgada de diámetro y se realiza un orificio de 1.5 centímetros de diámetro en la mitad (exactamente a los 10 centímetros), de manera que los tubos Falcon de 15 mL puedan ser enroscados correctamente. Posteriormente, se acopla el sensor MQ3 a un extremo del tubo, asegurando que no quede ningún orificio por el cual pueda escaparse el gas. En el otro extremo, se coloca un ventilador pequeño; no es necesario que tenga el mismo diámetro que el tubo, pero debe ser lo suficientemente pequeño para que el flujo de aire que genere circule principalmente dentro del tubo. Para un mejor entendimiento del montaje descrito anteriormente, se puede observar de forma más detallada en la Figura 10.

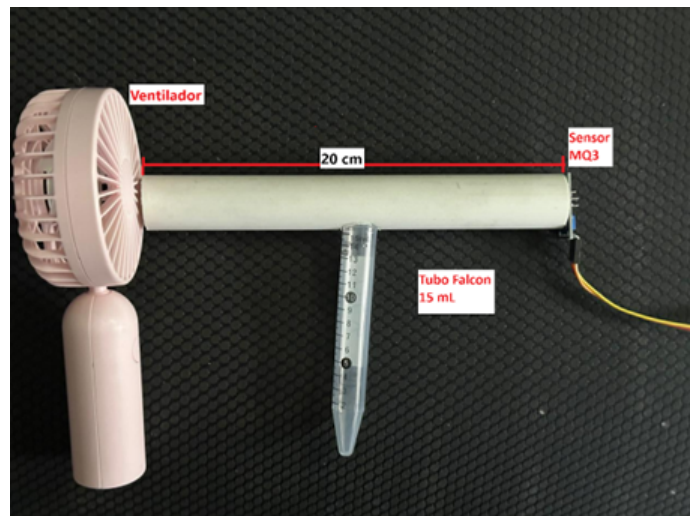


Figura 10: Montaje del sistema de evaporación, compuesto por un tubo de PVC de 20 cm de largo y 1 pulgada de diámetro, con un orificio central para enroscar el tubo Falcon de 15 mL, el sensor MQ3 acoplado en un extremo y un ventilador pequeño en el otro extremo para asegurar la circulación de aire dentro del tubo

7.7. Diseño y fabricación del prototipo final

7.7.1. Regresión lineal con concentraciones bajas

Preparar concentraciones menores que las anteriores, a partir de una concentración madre de 10%, obtener concentraciones por debajo del 1%, en este caso se utilizan de 0.5 a 0.1%. Refrigerar las muestras y sacarlas únicamente cuando se utilicen, pues la concentración de la muestra es muy pequeña, siendo muy fácil su evaporación. Utilizando el sistema de evaporación fabricado, capturar 2 minutos de registro: 30 segundos destinados a capturar la línea base del sensor en ese momento del día, y 1 minuto y 30 segundos para mantener la lectura de saturación a la concentración deseada. Se toman 5 mediciones para cada concentración en un solo día, pero las mediciones deben estar espaciadas por un tiempo de descanso para el sensor de exactamente 2 horas entre cada grupo, dando como resultado un total de 25 conjuntos de datos. Posteriormente, obtener el promedio de la diferencia entre

el voltaje de saturación y el de *baseline* sin alcohol para todos los archivos por concentración. Se utilizan estos datos para encontrar la relación entre el porcentaje de alcohol y el promedio de la diferencia de voltaje, mediante una regresión lineal, y verificar si, en efecto, el comportamiento del sensor MQ3 es de tipo lineal.

7.7.2. Relación entre BrAC y concentraciones realizadas

Los valores obtenidos anteriormente no pueden relacionarse directamente con el aliento de una persona; por lo tanto, se deben traducir correctamente a BrAC (mg/L). Para relacionar la concentración de alcohol en una solución acuosa con la concentración de alcohol en el aire, se utiliza la Ley de Raoult, la cual establece que la presión parcial de un componente en una solución ideal es igual al producto de la presión de vapor del componente puro y su fracción molar en la solución.

Se determina la fracción molar de las diferentes concentraciones mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$F_p = \frac{\#mol_{etanol}}{\#mol_{etanol} + \#mol_{agua}} \quad (1)$$

El resultado anterior se utiliza para determinar la presión parcial del etanol a 25°C, obteniéndola de la siguiente forma:

$$P_p = P_{eth\ 25^\circ C} * F_p \quad (2)$$

Finalmente, este resultado se utiliza para encontrar el BrAC para cada concentración y poder relacionarlo directamente con cada valor de voltaje según la ecuación del comportamiento lineal del sensor. Se debe tomar en cuenta que el resultado obtenido deberá ajustarse según las unidades deseadas; en este caso, se necesitaba convertir de valores de mol/L a mg/L. Nuevamente, se realiza una nueva regresión lineal, pero ahora con los valores “traducidos” de concentraciones, correlacionándolos según el voltaje de la concentración anterior.

Adicionalmente, se debe combinar tanto la toma de datos como el cálculo de las concentraciones de BrAC, pero ahora en tiempo real. Cuando el sensor detecta directamente una señal de alcohol, se obtiene el valor promedio de la diferencia de voltaje de *baseline* y la saturación, para posteriormente aplicar una regresión lineal y traducir el valor de voltaje a BrAC. Dado que los alcoholímetros en Latinoamérica utilizan como referencia la medida de BAC, se calcula el valor de BAC (concentración de alcohol en sangre) multiplicando por 0.21 el resultado de BrAC en mg/L. Este factor de conversión se basa en el principio de que 2,100 mL de aliento contienen la misma cantidad de alcohol que 1 mL de sangre.

7.7.3. Diseño y fabricación de PCB

Para el diseño de la PCB, se utilizó el software EasyEDA en su versión *online* (Software, EasyEDA, Shenzhen, China). El primer paso consiste en buscar los componentes necesarios para el proyecto en las librerías de EasyEDA, que contienen una amplia variedad de componentes. En este caso, los componentes requeridos incluyen un sensor MQ3, una pantalla OLED de 0.96 in con comunicación I2C, un Arduino Nano y un botón de 4 pines, los cuales todos se encontraban en las librerías. Cabe destacar que el Arduino Uno utilizado en las experimentaciones previas se sustituye por un Arduino Nano debido a la facilidad de manipulación y su tamaño mucho más compacto.

Una vez seleccionados los componentes, se diseña el diagrama esquemático, colocando los footprints de cada uno y estableciendo las conexiones necesarias entre ellos. Es importante recordar etiquetar como "NC"(No Conectar) aquellos pines que no se utilizarán, lo cual facilita la comprensión del diagrama. Para una referencia visual de este paso, consulte la Figura 11.

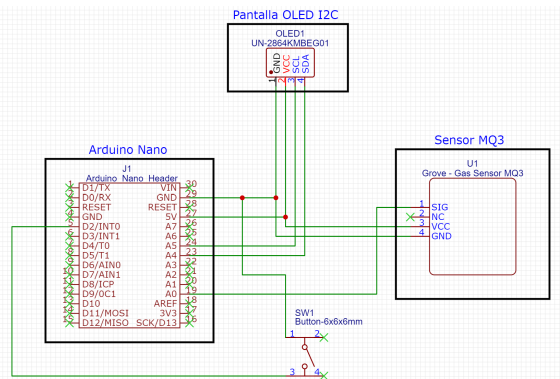


Figura 11: Diagrama esquemático del circuito del proyecto, mostrando la disposición de los componentes y sus conexiones en EasyEDA

Con el diagrama esquemático terminado, transformar el diseño en un modelo de PCB utilizando las herramientas de EasyEDA. Al hacer esto, se deben considerar las dimensiones requeridas para la placa; en este proyecto, se optó por una PCB de 75x71 mm, con una capa de cobre en un solo lado. En las configuraciones de la placa, es fundamental tomar en cuenta que, si todos los componentes son de tipo Through Hole (TH), las conexiones deben realizarse en el lado opuesto al que se colocaron los componentes. Para una visualización más clara de esta configuración, ver la figura 12.

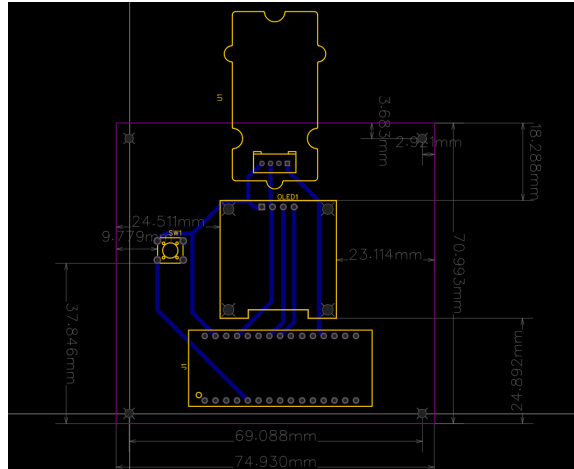


Figura 12: Diagrama de PCB con las conexiones en la BottomLayer (color azul), mostrando la disposición de los componentes y las conexiones eléctricas en el diseño final de la placa

Finalmente, se realizan las modificaciones necesarias para adaptarse a las especificaciones de la máquina fresadora que se utilizará para perforar la placa. Una vez finalizado el diseño, se descargan los archivos Gerber correspondientes, que son necesarios para la fabricación de la PCB.

7.7.4. Diseño y fabricación del Housing

Se utiliza el software Inventor (Software, Autodesk Inc, California, USA), para la creación del modelo 2D y 3D del housing del dispositivo. En primer lugar, se realiza un modelo en Inventor con las dimensiones reales de la PCB, lo cual permite adecuar y dimensionar correctamente la carcasa que se va a diseñar. A continuación, se comienza a crear la carcasa, dejando un espacio de aproximadamente 1.5 mm entre las paredes internas de la carcasa y la PCB, lo cual asegura un ajuste adecuado. Las dimensiones finales de la carcasa del dispositivo son de 84x36x80 mm, considerando la tapa de la caja pero sin incluir la adaptación de la boquilla, que mide aproximadamente 27x17 mm.

Se diseñan soportes internos para fijar la PCB y los sensores, tomando en cuenta las características de cada componente y su posición y orientación en el dispositivo. Se incorpora una ranura específica para la pantalla OLED, para el cable de USB mini y para el botón, y se añaden soportes que van desde la tapa de la carcasa hasta el fondo de esta, asegurando una estructura estable. Todas las dimensiones y distribuciones están alineadas con el diseño de los componentes en la PCB. Para una mejor interpretación de lo descrito, ver la Figura 13.

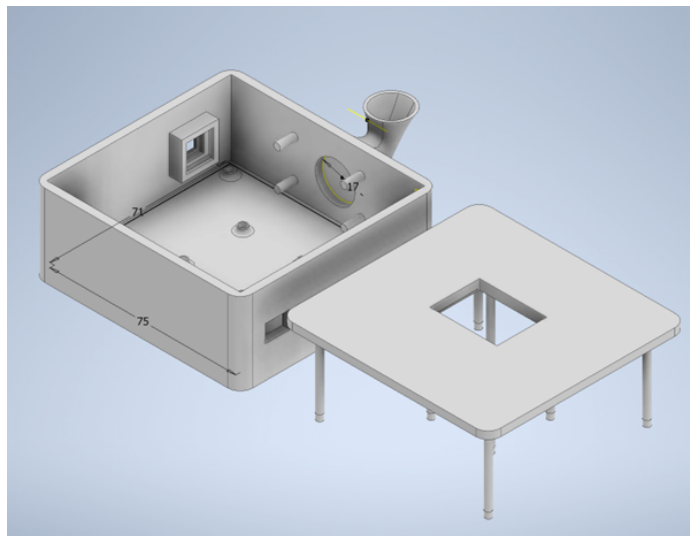


Figura 13: Estructura final de la carcasa del dispositivo, mostrando las dimensiones internas de 75 x 71 mm y la adaptación de la boquilla de 17 mm de diámetro para la entrada las boquillas de diámetro de 16.5 mm

Finalmente, se descargan los archivos necesarios para la fabricación del housing. Esto dependerá de la impresora 3D utilizada; en este caso, se generaron archivos en formato STL para la impresión.

7.8. Comparativa con dispositivo comercial

Se preparan un total de 5 muestras de 2 onzas de ron blanco XL (ron, Ron Botrán, Guatemala, Guatemala) con un grado de 25% de alc/vol, con el propósito de tomar 5 muestras tanto con el dispositivo comercial como con el dispositivo desarrollado. Tomar una de las muestras preparadas, ingerirla e inmediatamente comenzar un cronómetro de 30 minutos para indicar cuándo se deben realizar las mediciones con ambos dispositivos. Tras completar la medición de la primera muestra, ingerir la segunda muestra y repetir el proceso de forma consecutiva para las demás muestras. Al finalizar, se elabora una tabla con los resultados obtenidos para ambos dispositivos y se realiza una comparativa entre ellos.

8.1. Prueba de datos iniciales

Para el sensor MQ3 (Figura 14a) se observa una menor variación en todos los puntos de medición en comparación con el sensor 968-007 (Figura 14b). Además, el sensor MQ3 muestra una respuesta más rápida a los estímulos de alcohol, tanto para concentraciones de 70 % como de 35 % en comparación con el sensor ULPSM 968-007. Para el sensor 968-007, el voltaje de saturación es de 3.3V para la concentración de 70 % y de 3.1V para la concentración de 35 %, con una desviación estándar promedio de 7.13 % y 32.23 %, respectivamente. Por otro lado, en el sensor MQ3, el voltaje de saturación alcanza 4.6V para el 70 % y 4.4V para el 35 %, con una desviación estándar promedio de 2.54 % y 7.35 %, respectivamente.

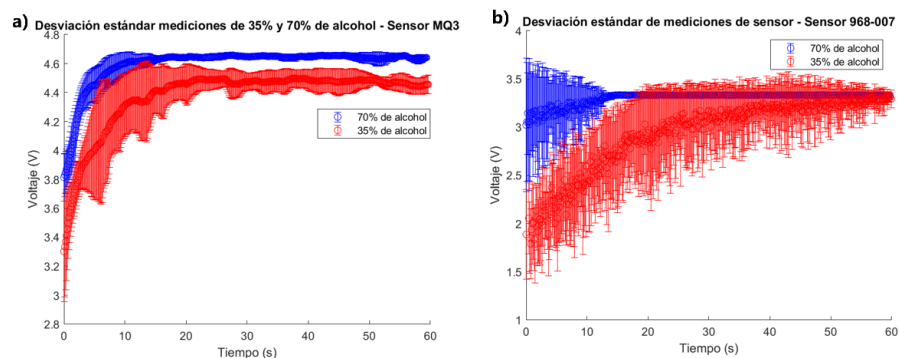


Figura 14: Comparativa de la desviación estándar de las mediciones para concentraciones de alcohol al 35 % y 70 % en los sensores 968-007 y MQ3

8.2. Pruebas de *baseline* y saturación de alcohol

Para el sensor MQ3, se observa un voltaje de 4.54 V, para la concentración del 70 % y para la concentración del 35 % se muestra un valor de 4.53 V, lo que indica que los valores de voltaje de saturación para ambas concentraciones son muy cercanos (Figura 15), siendo altamente sensible a niveles elevados de alcohol. En el caso del sensor 968-007, la línea de voltaje de saturación para ambas concentraciones es la misma, teniendo un voltaje de 3.3 V (Figura 15). Es importante destacar que los valores de la línea de *baseline* sin etanol obtenidos para el sensor 968-007 son significativamente altos, con un valor de 1.7 V.

En este experimento, se utilizó un tiempo de precalentamiento para el sensor MQ3 de aproximadamente 24 horas, lo que resultó en una línea de base con valor de 0.989 V (Figura 15). Sin embargo, en pruebas posteriores con un tiempo de precalentamiento extendido a más de 48 horas, se registró un decremento en la línea de base de aproximadamente 0.5 V (Figura 15). Este comportamiento resalta la importancia del tiempo de acondicionamiento del sensor para obtener lecturas más precisas y estables.

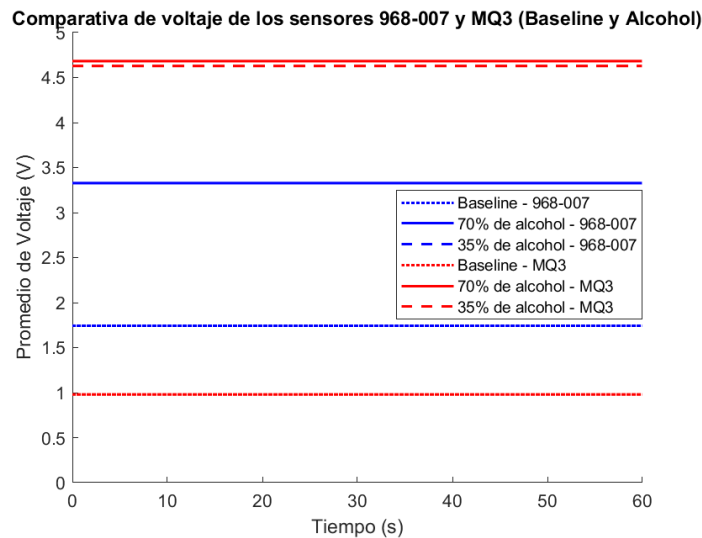


Figura 15: Comparativa de los promedios de voltaje en los sensores 968-007 y MQ3 para las condiciones de línea base y concentraciones de alcohol al 35 % y 70 %, durante un periodo de 60 segundos

8.3. Pruebas de dinamismo

El voltaje promedio para el sensor 968-007 a una concentración del 35 % de etanol fue de 2.87 V, mientras que para la concentración del 70 % el promedio del voltaje fue de 2.69 V (Figura 16). En el caso del sensor MQ3, el voltaje promedio para una concentración del 35 % de etanol fue de 3.58 V y, para la concentración del 70 % fue de 3.64 V (Figura 16). Comparando ambos sensores, se observa que los valores de voltaje promedio son relativamente cercanos, aunque el sensor MQ3 muestra un voltaje promedio consistentemente superior al sensor 968-007 en ambas concentraciones. La diferencia en el voltaje promedio entre ambos sensores es de 0.70 V para la concentración del 35 % y de 0.94 V para la concentración del 70 %.

Comparando ambos sensores, se observa que el sensor MQ3 tiene un coeficiente de variación significativamente mayor en ambas concentraciones (39.53 % para la concentración del 35 % y 42.07 % para el 70 %) en comparación con el sensor 968-007 (20.44 % para la concentración del 35 % y 24.76 % para el 70 %). Esto implica que las mediciones del sensor MQ3 presentan una mayor variabilidad relativa respecto a sus valores promedio, mientras que el sensor 968-007 ofrece mediciones con menor dispersión relativa en ambas concentraciones de alcohol (Figura 16).

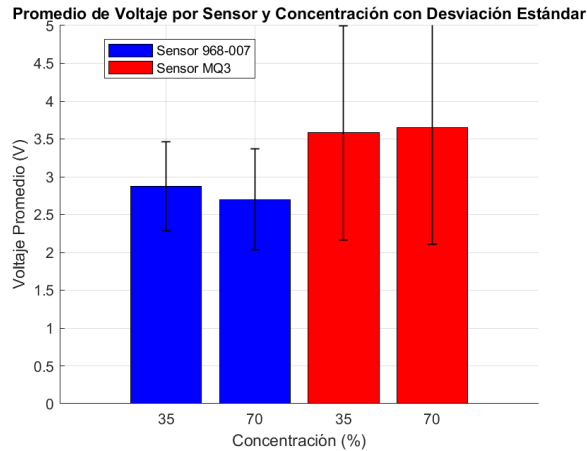


Figura 16: Voltaje promedio medido por los sensores 968-007 y MQ3 a concentraciones de alcohol del 35 % y 70 %, con barras de error que indican la desviación estándar de cada conjunto de mediciones. El sensor MQ3 muestra mayor voltaje promedio y mayor variabilidad en comparación con el sensor 968-007

8.4. Prueba de concentraciones bajas

Los valores promedio de la diferencia de voltaje (saturación y *baseline* sin etanol) para el sensor MQ3 muestran un aumento progresivo conforme aumenta la concentración de etanol, con valores de 1.15 V para la concentración de 0.1 %, 1.63 V para 0.5 %, 2.01 V para 1 %, 2.97 V para 5 %, y 3.26 V para 10 %. Esta tendencia sugiere una relación directamente proporcional entre la concentración de etanol y la respuesta del voltaje para este sensor (Figura 17a). En contraste, los valores promedio de la diferencia de voltaje para el sensor 968-007 presentan una respuesta menos sensible y más dispersa en concentraciones bajas de etanol, con valores de diferencia de voltaje de 0.05 V para 0.1 %, 0.02 V para 0.5 %, y 0.03 V para 1 %. Sin embargo, a concentraciones más altas, el sensor 968-007 muestra un incremento en la diferencia de voltaje, alcanzando 0.47 V para la concentración de 5 % y 0.60 V para 10 %. Esta tendencia sugiere que, aunque el sensor 968-007 es menos sensible a cambios en concentraciones bajas, responde con una diferencia de voltaje más significativa a concentraciones mayores de alcohol, aunque sin la misma linealidad observada en el sensor MQ3 (Figura 17b).

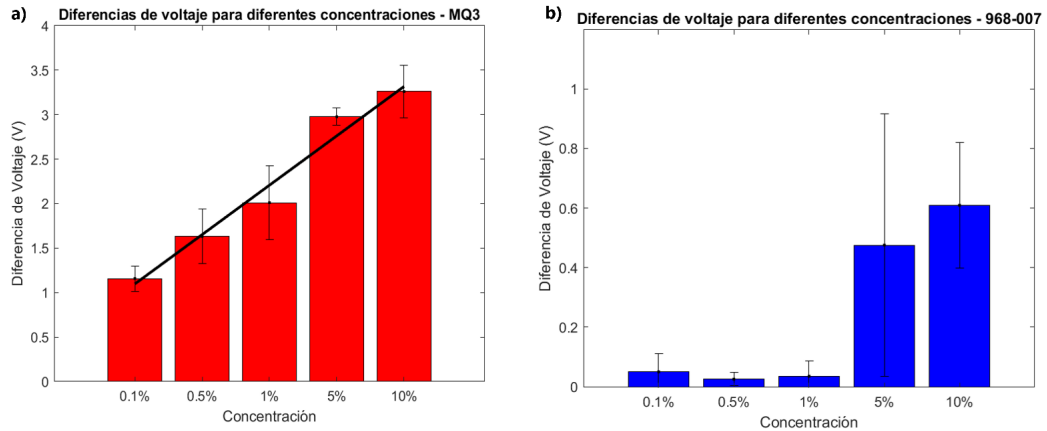


Figura 17: Comparación de las diferencias de voltaje para diferentes concentraciones de alcohol utilizando los sensores 968-007 (izquierda, azul) y MQ3 (derecha, rojo). Cada barra representa el voltaje promedio de diferencia entre los valores iniciales y finales en diferentes concentraciones de alcohol (%), con barras de error que indican la desviación estándar de cada conjunto de mediciones. En el caso del sensor MQ3, se observa una línea de tendencia lineal que muestra un incremento casi constante de la diferencia de voltaje conforme aumenta la concentración de alcohol. En contraste, el sensor 968-007 muestra una respuesta menos pronunciada y más dispersa en concentraciones elevadas, especialmente a 5 % y 10 %

8.5. Adquisición de parámetros fundamentales

8.5.1. Relación entre porcentaje de alcohol y diferencia de voltaje

A medida que incrementa la concentración de alcohol, la diferencia de voltaje aumenta a la misma tasa, indicando una tendencia lineal positiva entre ambas variables. La ecuación de la recta encontrada mediante la regresión lineal aplicada es $Y = 0.037X + 1.94$, donde X representa la concentración de alcohol en porcentaje y Y representa la diferencia de voltaje en voltios. El modelo describe que por cada incremento unitario en el porcentaje de alcohol, la diferencia de voltaje aumenta en aproximadamente 0.037 V. Además, el coeficiente de determinación R^2 respalda la linealidad del modelo para describir la relación de las variables descritas, a pesar de que estas presenten cierta variabilidad alrededor de la línea de tendencia. Para un mejor entendimiento de lo descrito con anterioridad, consúltese la Figura 18.

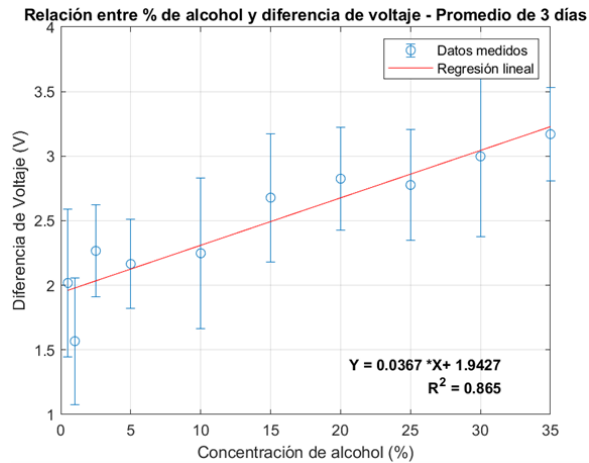


Figura 18: Relación entre la concentración de alcohol (%) y la diferencia de voltaje (V), mostrando la tendencia lineal obtenida mediante regresión lineal

8.5.2. Precisión

Conforme las concentraciones de alcohol aumentan, se observa que la diferencia entre el voltaje teórico y el voltaje práctico también incrementa, lo cual eleva el porcentaje de error entre estas mediciones (Figura 19). Esto impacta directamente en la precisión del sensor, especialmente notable a partir del 20% de concentración de alcohol. Sin embargo, el sensor MQ3 demuestra una precisión promedio de 97.65% en el rango de concentraciones estudiado, siendo más preciso en concentraciones bajas en comparación con concentraciones más altas, como se ilustra en la Figura 20.

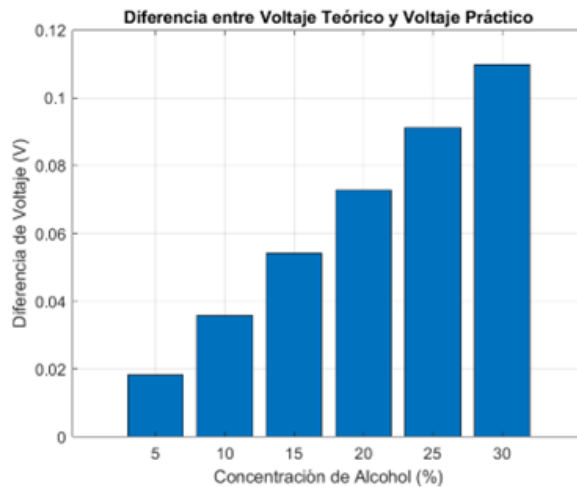


Figura 19: Diferencia entre voltaje teórico y voltaje práctico en función de la concentración de alcohol. La diferencia de voltaje se incrementa con el aumento en la concentración de alcohol, indicando una mayor discrepancia a concentraciones más altas

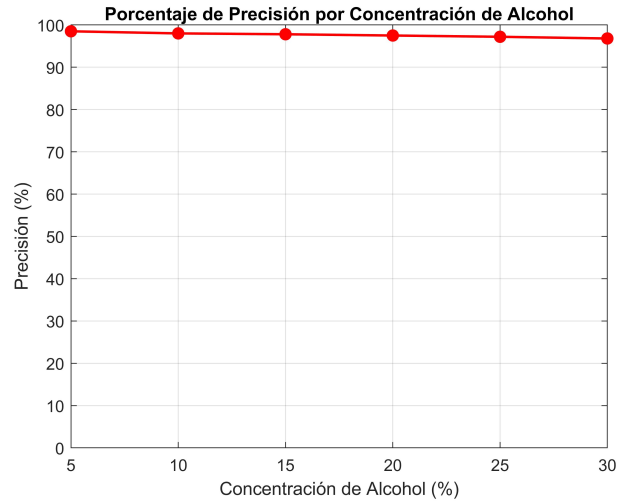


Figura 20: Porcentaje de precisión del sensor MQ3 en función de la concentración de alcohol. La precisión promedio es de 97.65 %, mostrando una tendencia a disminuir levemente conforme aumentan las concentraciones de alcohol

8.5.3. Tiempo de reacción

El tiempo de reacción promedio del sensor MQ3, calculado para un conjunto de cinco concentraciones de alcohol (0.1 %, 1 %, 5 %, y 10 %), fue de 10.82 segundos. Este valor representa el tiempo promedio en el cual la señal pasa del 10 % al 90 % de su respuesta total ante la exposición a diferentes concentraciones de alcohol (Figura 21).

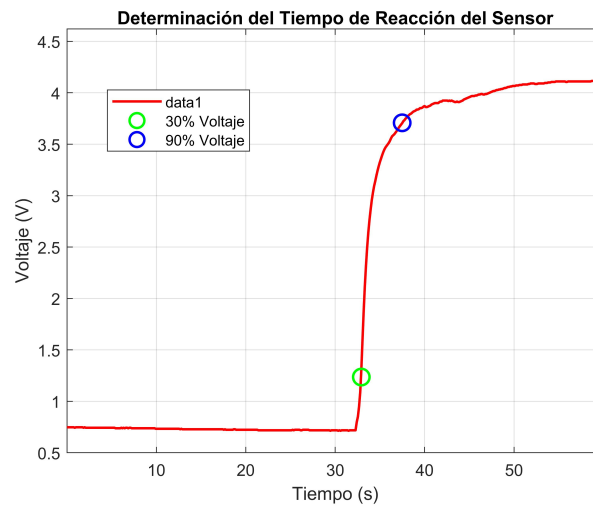


Figura 21: Curva de voltaje en función del tiempo para la determinación del tiempo de reacción del sensor MQ3, indicando los puntos correspondientes al 10 % y al 90 % de la señal

8.6. Diseño y fabricación del prototipo final

8.6.1. Regresión lineal con concentraciones bajas

En comparación con la prueba que utilizó concentraciones de alcohol en el rango de 5 % a 35 %, el nuevo conjunto de datos revela la relación entre concentraciones significativamente menores, específicamente de 0.1 % a 0.5 % de alcohol. Es evidente que, en este caso, la pendiente es considerablemente mayor (3.17 en esta prueba, frente a 0.037 en la prueba anterior), y el coeficiente de determinación R^2 indica un buen ajuste de los datos, con un valor de 0.88. La respuesta del sensor en este rango de concentraciones muestra una tendencia lineal similar a la observada en concentraciones más altas, pero con una pendiente más pronunciada, lo que refleja un cambio de voltaje más sensible ante incrementos pequeños en el porcentaje de alcohol (Figura 22). Además, la variabilidad de las mediciones en este caso parece estar más contenida, siendo 7.98 % para la concentración de 0.1 %; 3.24 % para la concentración del 0.2 %; 3.16 % para la de 0.3 %; 3.56 % para la de 0.4 % y 5.67 % para la concentración de 0.5 %, en comparación con la variabilidad observada en la prueba con concentraciones más elevadas.

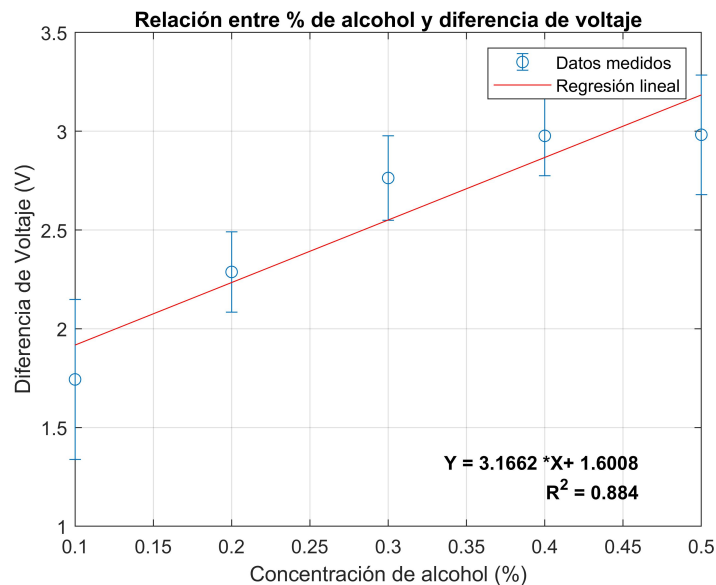


Figura 22: Relación entre % de alcohol (0.1 a 0.5 %) y la diferencia de voltaje en el sensor MQ3, mostrando una regresión lineal con pendiente pronunciada y buen ajuste ($R^2 = 0.884$)

8.6.2. Prototipo final

Se logró integrar con éxito todos los componentes seleccionados, incluyendo el sensor MQ3, el Arduino Nano, la pantalla OLED de 0.96 pulgadas y un botón (Figura 23). Durante el ensamblaje de las piezas del housing, se identificó un problema con la boquilla; originalmente debía estar fija al resto de la estructura, pero en el proceso de fabricación se produjo como una pieza separada. Además, las varillas de soporte que conectan la tapa con la base (Figura 13), diseñadas para sujetar la PCB y la pantalla OLED, resultaron ser

demasiado delgadas. Posteriormente, todas las dimensiones fueron ajustadas correctamente y el sobredimensionamiento de algunas partes fue clave para el éxito en la fabricación del dispositivo, ya que permitió evitar que la PCB y sus componentes quedaran demasiado ajustados dentro del housing.

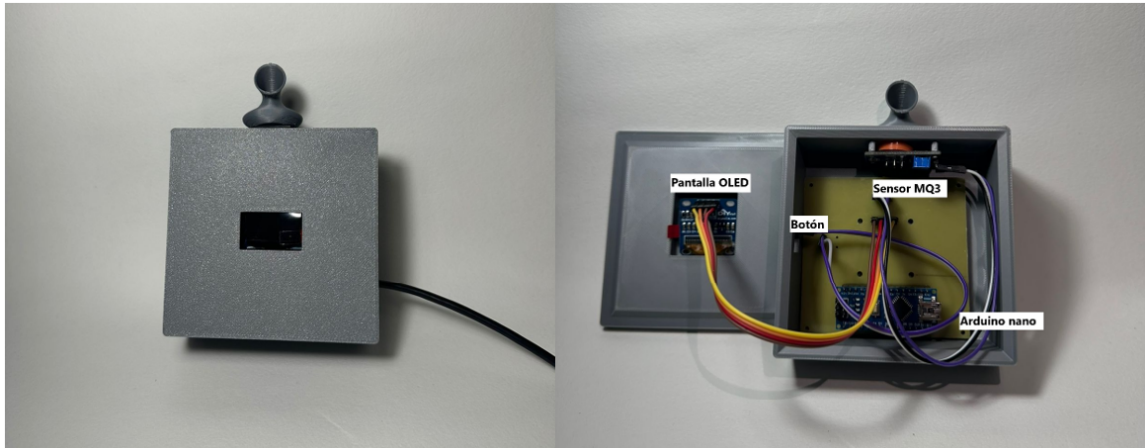


Figura 23: Prototipo final con housing que alberga la electrónica. Se observan el sensor MQ3, un botón para interacción del usuario, la placa Arduino Nano, y una pantalla OLED destinada a mostrar los resultados del porcentaje de alcohol en el aliento (/BAC). El dispositivo incluye una boquilla que facilita al usuario tomar las mediciones de manera más cómoda

8.6.3. Comparativa con dispositivo comercial

Los datos demuestran que las mediciones del sensor MQ3 se encuentran por debajo de la línea de identidad, la cual indica los puntos en los cuales ambas mediciones deberían converger, indicando una constante discrepancia entre las mediciones BAC entre el dispositivo comercial y el dispositivo desarrollado. Asimismo, se observa que esta discrepancia se mantiene constante con un valor de 0.01 %BAC para todas las mediciones, sin tomar en cuenta la medición que tiene 0.00 %BAC en ambos dispositivos, inclusive con un comportamiento de linealidad en las discrepancias. Para una mejor comprensión de lo descrito con anterioridad, refiérase a la Figura 24.

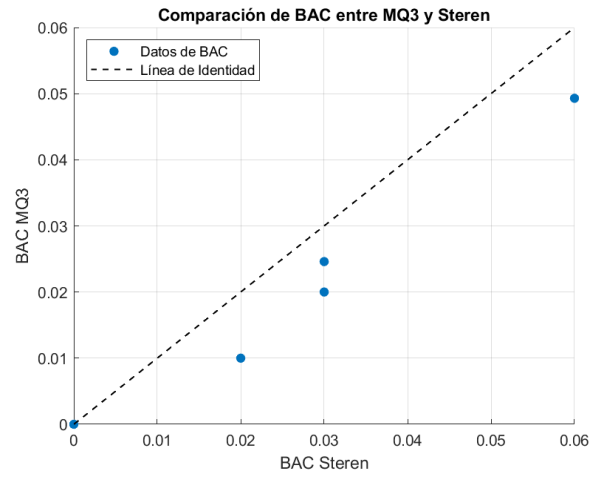


Figura 24: Comparación de las mediciones de BAC entre el sensor MQ3 y el dispositivo comercial Steren, mostrando la línea de identidad

El sensor MQ3 demostró un rendimiento destacable en concentraciones bajas de alcohol, lo que lo convierte en una opción adecuada para el dispositivo final. Este sensor, basado en tecnología resistiva, mostró una respuesta consistente a las variaciones de concentración de etanol [52]. El tiempo de precalentamiento prolongado mejoró la eliminación de gases residuales y proporcionó una mayor homogeneidad en los datos recolectados, favoreciendo su estabilidad. Las diferencias de voltaje promedio para concentraciones de 35 % y 70 % mostraron una respuesta positiva y lineal, indicando que el MQ3 es adecuado para operar en rangos amplios de concentración (Figura 16). Sin embargo, se observaron limitaciones, como valores de voltaje de saturación similares entre concentraciones de 35 % y 70 %, lo cual sugiere que el sensor tiene dificultades para diferenciar entre concentraciones altas debido a la saturación de los sitios activos de la capa sensitiva de dióxido de estaño [52].

El sensor 968-007, por su parte, presentó una mayor variabilidad en todas las concentraciones, especialmente en niveles bajos de alcohol. Esta variabilidad se atribuye a la naturaleza electroquímica del sensor, que lo hace más susceptible a las condiciones ambientales, tales como la humedad y la temperatura, y que afectan significativamente la estabilidad de las lecturas [53] (Figura 16). Aunque el sensor 968-007 presentó una respuesta con menor dispersión relativa, lo que lo hace idóneo en aplicaciones donde la consistencia es crítica, pues su capacidad para diferenciar pequeñas variaciones es limitada (Figura 17b). Debido a las limitaciones del sensor 968-007 para obtener lecturas consistentes con concentraciones menores al 5 %, se optó por utilizar únicamente el sensor MQ3 en el prototipo final.

Mientras que el sensor MQ3 tiende a tener coeficientes de variación mayores, lo que indica una sensibilidad elevada a las condiciones del entorno, el sensor 968-007 mostró valores significativamente menores, reafirmando su estabilidad, aunque con menor sensibilidad para cambios sutiles en la diferencia de voltaje dependiendo de la concentración utilizada (Figura 17a). Aunque el sensor MQ3 es más reactivo, esta característica hace que la variabilidad en las mediciones incremente y reduzca la precisión, particularmente en concentraciones

elevadas de alcohol.

Otro punto relevante es el tiempo de reacción del sensor MQ3, que se mantuvo dentro de rangos esperados para sensores resistivos de bajo costo [52]. El tiempo promedio registrado fue de 10.82 s (Figura 21), el cual es adecuado para aplicaciones que no requieran una respuesta inmediata, aunque se observaron mejoras con tiempos de precalentamiento más largos. Esto destaca la importancia del acondicionamiento previo, ya que un mayor tiempo de precalentamiento ayuda a reducir la variabilidad de las lecturas y proporcionar una respuesta más precisa [52].

Para mejorar la precisión y utilidad del sensor MQ3 en el dispositivo final, es fundamental considerar procesos adicionales de calibración. Estos procesos podrían incluir pruebas con concentraciones más bajas y en un rango más amplio que el utilizado en la prueba de regresión lineal a concentraciones bajas. Extender este rango de concentraciones permitiría evaluar mejor la capacidad del sensor para detectar variaciones sutiles en concentraciones menores de alcohol, las cuales son cruciales para aplicaciones donde se necesita monitorear niveles bajos con alta precisión, y también permitiría obtener un mejor resultado del modelo de la regresión lineal aplicada [54]. Además, se podrían emplear técnicas de ajuste del voltaje de referencia y algoritmos de filtrado para compensar el ruido ambiental y mejorar la estabilidad de las lecturas en escenarios prácticos. La incorporación de un sistema de calibración periódica también ayudaría a mitigar las discrepancias observadas al traducir lecturas de voltaje a concentraciones equivalentes de la concentración de alcohol en sangre (BAC), asegurando una mayor consistencia en las mediciones [55].

Las limitaciones encontradas durante el estudio, como la incapacidad del sensor 968-007 para diferenciar concentraciones elevadas de alcohol, reflejan la necesidad de seleccionar adecuadamente el tipo de sensor según la aplicación específica. El sensor MQ3, con su alta sensibilidad a concentraciones bajas y comportamiento lineal hasta el 10% [52], se muestra como una opción óptima para aplicaciones donde se requiere monitorear pequeñas fluctuaciones, mientras que el sensor 968-007 podría ser más adecuado para aplicaciones que requieren estabilidad a expensas de la sensibilidad.

Los resultados sugieren que para el diseño del dispositivo final se debe considerar el uso del sensor MQ3 debido a su mejor respuesta en concentraciones bajas y su capacidad para proporcionar una relación lineal entre el porcentaje de alcohol y el voltaje generado. Sin embargo, será necesario realizar ajustes adicionales y procesos de calibración que mitiguen las discrepancias observadas al traducir las lecturas de voltaje a concentraciones equivalentes de BAC (Figura 22). Se recomienda, además, un enfoque en la optimización del tiempo de precalentamiento para asegurar una respuesta consistente y reducir las limitaciones encontradas en la sensibilidad en concentraciones elevadas.

Una de las limitaciones del sensor MQ3, es la necesidad de variar la resistencia R_0 a 0.4 mg/L de etanol en aire limpio, debido a que no se disponía de una forma adecuada para obtener aire limpio sin el uso de una cámara de vacío, un equipo que la universidad no posee. Esta falta de acceso a una cámara de vacío pudo afectar directamente las mediciones, ya que no se contó con un valor de referencia preciso para calibrar el sensor como lo indica el datasheet [52]. Esto es crucial porque una calibración precisa del valor de R_0 permitiría optimizar la relación entre la concentración de alcohol y el voltaje de salida.

Para futuros desarrollos, se recomienda establecer un protocolo de calibración en condiciones controladas para mejorar la precisión del dispositivo. Una posible mejora sería adquirir un sistema de filtrado que proporcione aire limpio sin necesidad de una cámara de vacío completa. Además, se podría implementar un sistema de corrección por hardware y software que compense las variaciones ambientales que afectan la resistencia R_0 , mejorando así la fiabilidad de las mediciones y asegurando una calibración constante y precisa. Asimismo, acoplar baterías para hacer el dispositivo portátil y optimizar el diseño de la PCB y el housing para reducir su tamaño incrementaría su practicidad y facilidad de uso.

Los resultados comparativos con un dispositivo comercial refuerzan la necesidad de una calibración adicional para el sensor MQ3. Las mediciones mostraron una discrepancia constante de aproximadamente 0.01 % BAC al comparar las lecturas del dispositivo desarrollado con las del dispositivo comercial. Aunque el sensor MQ3 mostró una relación lineal entre la concentración de alcohol y el voltaje, existe un margen de error al traducir estos valores a medidas de BAC (Figura 22). Esta discrepancia puede deberse a la sensibilidad del sensor a pequeños cambios en la concentración de alcohol y a la utilización de la Ley de Raoult para relacionar concentraciones en solución con concentraciones en aliento. Aunque el sensor MQ3 es prometedor, requiere un proceso de calibración riguroso para lograr una mayor coincidencia con los valores reportados por dispositivos comerciales y asegurar su validez práctica.

- Se desarrolló e implementó un sistema de adquisición de datos para la detección de alcohol en sangre a través del aliento, utilizando el sensor MQ3. Este sensor mostró una respuesta lineal y consistente en concentraciones bajas de etanol (0.1 %–0.5 %), con una pendiente de 3.17 V % y un coeficiente de determinación $R^2=0.884$. Además, en comparación con el sensor 968-007, el MQ3 demostró una mayor sensibilidad en concentraciones bajas, con diferencias de voltaje promedio de 1.15 V a 0.1 % y 3.26 V a 10 %, lo que respalda su idoneidad para aplicaciones que requieren detección precisa en rangos reducidos.
- La evaluación comparativa de los sensores MQ3 y 968-007 bajo condiciones controladas permitió identificar que el MQ3 es más adecuado para este proyecto. El MQ3 mostró una menor desviación estándar en concentraciones altas (2.54 % a 70 % y 7.35 % a 35 %) en comparación con el 968-007 (7.13 % a 70 % y 32.23 % a 35 %). Además, el MQ3 presentó un tiempo de reacción promedio de 10.82 segundos, dentro del rango esperado para sensores resistivos de bajo costo, lo que lo hace viable para aplicaciones prácticas.
- El prototipo final integra el sensor MQ3, un microcontrolador Arduino Nano, una pantalla OLED y una boquilla para facilitar la interacción del usuario. Aunque se identificaron problemas durante el ensamblaje, como la separación de la boquilla y el sobredimensionamiento de las varillas de soporte, estos se resolvieron ajustando las dimensiones del housing. El diseño final permitió obtener mediciones confiables y mostró una precisión promedio del 97.65 % en el rango de concentraciones estudiado, destacando su potencial para aplicaciones reales.
- A pesar de una discrepancia constante de 0.01 %BAC entre el prototipo y un dispositivo comercial, el sensor MQ3 demostró un rendimiento prometedor. La linealidad observada en la relación entre concentración de alcohol y diferencia de voltaje ($Y = 0.037X + 1.94$) sugiere que, con una calibración más rigurosa, el prototipo podría competir con dispositivos comerciales. Esto resalta la importancia de implementar

procesos de calibración adicionales, como ajustes del voltaje de referencia y algoritmos de filtrado, para mejorar la precisión.

- El sistema de evaporación de etanol diseñado para simular el aliento humano, aunque presentó limitaciones en hermeticidad, permitió evaluar el sensor MQ3 en condiciones controladas. Los resultados obtenidos no mostraron discrepancias significativas, lo que validó su uso para la calibración del prototipo. Futuras mejoras en el sistema de simulación, como la incorporación de un sistema de filtrado para aire limpio, podrían optimizar la precisión de las mediciones.

- Se recomienda implementar un protocolo de calibración más riguroso bajo condiciones controladas. Esto incluye la adquisición de un sistema de filtrado de aire que abastezca de un entorno limpio y constante durante la calibración, reduciendo considerablemente los factores ambientales que afectan a la precisión del sensor. Esto brindará una mejora en la fiabilidad y repetibilidad de las mediciones, acercando más los resultados del prototipo a los obtenidos con dispositivos comerciales.
- Para optimizar el sistema de evaporación de etanol se recomienda mejorar la hermeticidad. Rediseñar el sistema utilizando componentes que permitan cortes y un sellado más efectivo para minimizar las fugas del vapor de etanol, silicón o tapas con empaques de hule. De esta forma se garantizaría una homogenización de la concentración de etanol dentro del sistema para mejorar la precisión de los resultados obtenidos.
- Se recomienda la incorporación de un sistema de procesamiento de datos en segundo plano, pero en tiempo real. Dentro de estos sistemas se podrían incluir algoritmos para el filtrado de ruido y la corrección de variables ambientales, mediante la incorporación de otros sensores como el de temperatura y humedad que trabajen en conjunto, que influyen directamente en las mediciones del sensor MQ3.
- Para validar correctamente el funcionamiento del dispositivo se recomienda realizar pruebas de validación extensivas en diferentes entornos y con distintos grupos de usuarios. Esto ayudaría a la evaluación del desempeño del dispositivo en situaciones reales, y a identificar mejoras adicionales. También al compararlo directamente con otros dispositivos comerciales, ayudaría a sentar una base sólida para asegurar la confiabilidad del dispositivo mediante sus resultados de precisión.
- Se recomienda que para optimizar el diseño del prototipo y mejorar su portabilidad, se integre un módulo de batería recargable, para facilitar su uso sin necesidad de estar conectados a una computadora. Junto con esta mejora, se sugiere también que se reduzca tanto el tamaño del housing como el de la PCB y tratar de utilizar materiales más livianos y que el diseño favorezca la ergonomía.

- Por último, se recomienda cambiar el microcontrolador utilizado (Arduino nano) por uno más potente y con mayor capacidad, como el ESP32. Este ofrece ventajas significativas ante el Arduino nano, como una mejora capacidad de procesamiento, mayor número de pines para el control de más periféricos e incluso algunos modelos poseen conectividad a *Wi-Fi* y *Bluetooth*. Esto permitiría una mejor integración de características adicionales, como el procesamiento de datos en tiempo real y la transmisión de datos a plataformas de almacenamiento en la nube, mejorando la funcionalidad general y adaptabilidad del dispositivo a aplicaciones más complejas.

-
- [1] M. Ávila, *Qué reforma el artículo 185 de la Ley General de Salud, a cargo de la diputada María José Ávila Serna, del grupo parlamentario del PVEM, recibida en la sesión del jueves 2 de febrero de 2006*, Accedido el 25 de mayo de 2024, feb. de 2006. dirección: http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2006/02/asun_2221913_20060202_1140025557.pdf.
- [2] W. H. Organization, *Alcohol*, Accedido el 25 de mayo de 2024, Sección «Centro de prensa», mayo de 2022. dirección: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/alcohol>.
- [3] J. R. Villalbí, M. Bosque-Prous, M. Gili-Miner, A. Espelt y M. T. Brugal, “Políticas para prevenir los daños causados por el alcohol,” *Revista Española de Salud Pública*, vol. 88, págs. 515-528, 2014, Accedido el 25 de mayo de 2024.
- [4] R. Arias Duque, “Reacciones fisiológicas y neuroquímicas del alcoholismo,” es, *Diversitas*, vol. 1, págs. 138-147, dic. de 2005, Accedido el 25 de mayo de 2024, ISSN: 1794-9998. dirección: http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-99982005000200003&nrm=iso.
- [5] F. MAPFRE, *El alcohol y la conducción*, Accedido el 25 de mayo de 2024. Sección «Educación y divulgación/Seguridad vial», feb. de 2021. dirección: <https://www.fundacionmapfre.org/educacion-divulgacion/seguridad-vial/movilidad-segura-salud/temas-conduccion-segura/medicamentos-alcohol-drogas/efectos-alcohol/#:~:text=De%20%2C5%20a%20, intuici%C3%B3n%20y%20falta%20de%20coordinaci%C3%B3n>.
- [6] M. J. G. Bestard, J. Rosselló, E. Munar y M. Quetgles, “Influencia de las bajas tasas de alcoholemia sobre el rendimiento psicomotor y el control atencional de la acción: implicaciones para la seguridad vial,” *Psicothema*, vol. 13, n.º 2, págs. 229-233, 2001, Accedido el 25 de mayo de 2024.
- [7] ALCOLOCK, *ALCOSCAN*, Accedido el 25 de mayo de 2024, jul. de 2020. dirección: <https://alcolock.com.br/es/produtos/etilometros-para-fiscalizacao-do-transito/alcoscan/>.

- [8] J. Ljungblad, B. Hök, A. Allalou y H. Pettersson, “Passive in-vehicle driver breath alcohol detection using advanced sensor signal acquisition and fusion,” *Traffic Injury Prevention*, vol. 18, págs. 1-6, sup1 mayo de 2017, Accedido el 25 de mayo de 2024, ISSN: 1538-9588. DOI: 10.1080/15389588.2017.1312688.
- [9] J. Pereira, P. Porto-Figueira, C. Cavaco et al., “Breath analysis as a potential and non-invasive frontier in disease diagnosis: An overview,” *Metabolites*, vol. 5, págs. 3-55, 1 ene. de 2015, Accedido el 25 de mayo de 2024, ISSN: 2218-1989. DOI: 10.3390/metabo5010003.
- [10] J. H. Coben y G. L. Larkin, “Effectiveness of ignition interlock devices in reducing drunk driving recidivism,” *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 16, n.º 1, págs. 81-87, 1999, Accedido el 25 de mayo de 2024.
- [11] L. Vissers, S. Houwing y F. Wegman, “Alcohol-related road casualties in official crash statistics,” págs. 11-12, 2018, Accedido el 25 de mayo de 2024.
- [12] G. Andrade, “Regulación para los pilotos de vehículos automotores, de la prohibición de conducir bajo influencia de bebidas alcohólicas y consecuencias jurídicas y sociales de las personas que conduzcan en estado de ebriedad,” mar. de 2007, Accedido el 25 de mayo de 2024. dirección: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/04/04_7754.pdf.
- [13] A. M. Carrasco González, S. Barriga Jiménez y J. M. León Rubio, “Consumo de alcohol, percepción de riesgo y conductas relacionadas con la seguridad vial en adolescentes,” *Revista de Psicología de la Salud*, vol. 18, n.º 2, págs. 3-26, 2006, Accedido el 25 de mayo de 2024.
- [14] D. de Tránsito de la Policía Nacional Civil, *Primera licencia*, Accedido el 25 de mayo de 2024, jun. de 2023. dirección: <https://transito.gob.gt/primer-licencia/#:~:text=Para%20menores%20de%20edad%20>.
- [15] M. y Noticias, *Horarios y rutas habilitadas del Transmetro*, Accedido el 25 de mayo de 2024, oct. de 2020. dirección: <https://movilidadynoticias.com.gt/horarios-y-rutas-habilitadas-del-transmetro/#:~:text=Lunes%20a%20viernes%20de%205,a.m.%20a%207%3A00%20p.m.>
- [16] A. Hite y Á. Montenegro, “Los corruptos de Guatemala amenazan con socavar el legado anticorrupción,” ene. de 2020, Accedido el 25 de mayo de 2024. dirección: <https://www.wola.org/es/analisis/corruptos-de-guatemala-amenazan-legado-anticorrupcion/>.
- [17] W. H. Organization, *Alcohol - Daños y cifras*, Accedido el 25 de mayo de 2024. Sección «Centro de prensa», mayo de 2022. dirección: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/alcohol>.
- [18] J. Ljungblad, B. Hök, A. Allalou y H. Pettersson, “Passive in-vehicle driver breath alcohol detection using advanced sensor signal acquisition and fusion,” *Traffic Injury Prevention*, vol. 18, S31-S36, sup1 mayo de 2017, Accedido el 25 de mayo de 2024, ISSN: 1538-9588. DOI: 10.1080/15389588.2017.1312688.
- [19] J. McMurry, *Química orgánica*, 8.ª ed. Cengage Learning, 2014, vol. 1, págs. 64-80, Accedido el 28 de julio de 2024, ISBN: 978-607-481-853-6.
- [20] D. Ball, J. Hill y R. Scott, *The basics of general, organic, and biological chemistry*. The LibreTexts, ene. de 2024, vol. 1, Accedido el 28 de julio de 2024.

- [21] L. G. Wade y J. W. Simek, *Química orgánica*. Pearson, 2017, vol. 1, Accedido el 28 de julio de 2024.
- [22] P. César, *Etanol*, Accedido el 22 de agosto de 2023, ene. de 2011. dirección: <https://www.profpc.com.br/Etanol.htm>.
- [23] J. I. Plasencia Criollo, F. V. Gualotuña Cueva, M. J. Delgado Angamarca y S. D. Paucar Llapapasca, "Manejo en intoxicación por metanol," *RECIMUNDO*, vol. 3, n.º 3, págs. 842-869, oct. de 2019, Accedido el 28 de julio de 2024. DOI: 10.26820/recimundo/3.(3).septiembre.2019.842-869. dirección: <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/552>.
- [24] J. Alcalá Pedrajas, "Intoxicación por metanol," en *Anales de Medicina Interna*, Accedido el 28 de julio de 2024, SciELO España, vol. 19, 2002, págs. 70-71.
- [25] H. Ó. González Seguí, J. d. J. Hernández López y J. Hendrik Giersiepen, "Metanol: tolerancias y exigencias en las normas para mezcal y bebidas de agave," *Rivar (Santiago)*, vol. 7, n.º 19, págs. 1-21, 2020, Accedido el 28 de julio de 2024.
- [26] H. J. Vázquez y O. Dacosta, "Fermentación alcohólica: una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 8, n.º 4, págs. 249-259, 2007, Accedido el 28 de julio de 2024.
- [27] A. Abril y E. A. Navarro, *Etanol a partir de biomasa lignocelulósica*. Aleta Valencia, Spain, 2012, Accedido el 28 de julio de 2024.
- [28] A. Velasco Martín et al., "Farmacología y toxicología del alcohol etílico, o etanol," págs. 55-69, 2014, Accedido el 28 de julio de 2024.
- [29] L. M. Gerard, "Caracterización de bacterias del ácido acético destinadas a la producción de vinagres de frutas," dic. de 2015, Accedido el 28 de julio de 2024. DOI: 10.4995/Thesis/10251/59401.
- [30] Nazza, *Todo sobre el alcohol isopropílico*, Accedido el 28 de julio de 2024, jun. de 2020. dirección: https://www.nazza.es/blog/16_usos-alcohol-isopropilico.html.
- [31] M. Dávila, S. Machado, P. Dall'Orso, A. Pascale y J. Prego, "Intoxicación aguda no intencional grave con alcohol isopropílico en el Departamento de Emergencia Pediátrica del Centro Hospitalario Pereira Rossell. A propósito de tres casos clínicos," *Archivos de Pediatría del Uruguay*, vol. 91, n.º 4, págs. 225-230, 2020, Accedido el 28 de julio de 2024.
- [32] K. Ackermann, *Alcohol by volume: beer, wine, liquor*, Accedido el 28 de julio de 2024, jul. de 2022. dirección: <https://alcohol.org/statistics-information/abv/>.
- [33] B. Eddings, *Alcohol by volume (ABV) in beer*, Accedido el 28 de julio de 2024. Sección «How-Tos», nov. de 2021. dirección: <https://www.thespruceeats.com/alcohol-by-volume-353204>.
- [34] B. Hayes, *How do you measure the percentage of alcohol in beer, wine and other beverages?* Accedido el 28 de julio de 2024, mayo de 2021. dirección: <https://www.nist.gov/how-do-you-measure-it/how-do-you-measure-percentage-alcohol-beer-wine-and-other-beverages>.
- [35] E. Sánchez, "La absorción del alcohol," ago. de 2023, Accedido el 15 de julio de 2023. Sección «Anatomía y fisiología». dirección: <https://mejorconsalud.as.com/la-absorcion-del-alcohol/>.

- [36] A. Ramírez, “El proceso del alcohol en el cuerpo,” mar. de 2020, Accedido el 22 de agosto de 2023. dirección: <https://www.seguridad-vital.com/el-proceso-del-alcohol-en-el-cuerpo/>.
- [37] J. Aguilera, *Cuaderno didáctico sobre educación vial y salud*, Accedido el 10 de septiembre de 2023, abr. de 2018. dirección: <https://1library.co/document/wq20462z-cuaderno-didactico-sobre-educacion-vial-y-salud.html>.
- [38] J. González y O. Zúñiga, “Interacciones entre fármacos y etanol,” vol. 2, sep. de 2015, Accedido el 18 de agosto de 2023. dirección: <https://revista.unsis.edu.mx/index.php/saludyadmon/article/view/60/57>.
- [39] R. Moreno Otero y J. R. Cortés, “Nutrición y alcoholismo crónico,” *Nutrición Hospitalaria*, vol. 23, págs. 3-7, 2008, Accedido el 5 de julio de 2023.
- [40] Nesper94, *Metabolismo del alcohol*, Accedido el 5 de septiembre de 2023, dic. de 2023. dirección: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metabolismo_del_alcohol.svg#metadata.
- [41] CDC, *El consumo de alcohol y su salud*, Accedido el 30 de julio de 2023, feb. de 2024. dirección: <https://www.cdc.gov/alcohol/hojas-informativas/consumo-alcohol-salud.html>.
- [42] N. M. Plus, “Efectos del alcohol en la salud: lo que debe saber,” ago. de 2023, Accedido el 12 de septiembre de 2023. dirección: <https://magazine.medlineplus.gov/es/art%C3%ADculo/efectos-del-alcohol-en-la-salud-lo-que-debe-saber/>.
- [43] N. I. on Alcohol Abuse y Alcoholism, *Metabolismo del alcohol*, Accedido el 12 de julio de 2023, 2023. dirección: https://www.niaaa.nih.gov/sites/default/themes/solstice/images/bodyeffects_05052022.svg.
- [44] N. I. on Alcohol Abuse y Alcoholism, *Alcohol's effects on health: research-based information on drinking and its impact*, Accedido el 25 de julio de 2023. Sección «Alcohol's Effects on Health», mayo de 2022. dirección: <https://www.niaaa.nih.gov/alcohols-effects-health/los-efectos-del-consumo-de-alcohol-en-el-cuerpo>.
- [45] J. Payne, D. Hill y N. King, “Observations on the distribution of alcohol in blood, breath, and urine,” *British Medical Journal*, vol. 1, n.º 5481, pág. 196, 1966, Accedido el 8 de agosto de 2023.
- [46] domdomegg, *Gas exchange in the alveolus*, Accedido el 19 de agosto de 2023, 2016. dirección: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gas_exchange_in_the_alveolus.svg.
- [47] R. Chang y J. Overby, *Química*, 13.^a ed. McGraw-Hill, 2020, vol. 2, págs. 112-158, Accedido el 20 de septiembre de 2023.
- [48] G. Fedorovitch, “Aerosol particles in lungs: theoretical modeling of deposition and mucociliary clearance,” en IntechOpen, dic. de 2019, págs. 13-21, Accedido el 14 de julio de 2023. DOI: 10.5772/intechopen.84254.
- [49] L.-Y. Gai, R.-P. Lai, X.-H. Dong et al., “Recent advances in ethanol gas sensors based on metal oxide semiconductor heterojunctions,” *Rare Metals*, vol. 41, págs. 1818-1842, 6 jun. de 2022, Accedido el 3 de septiembre de 2023, ISSN: 1001-0521. DOI: 10.1007/s12598-021-01937-4.

- [50] Testo, *Esquema de sensor para CO₂ y otros gases*, Accedido el 28 de julio de 2023, 2016. dirección: <https://www.academiatesto.com.ar/cms/sensores-electroquimicos>.
- [51] R. Mandal, *Schematic diagram of modern resistive semiconductor gas sensor*, Accedido el 15 de septiembre de 2023, 2013. dirección: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-modern-resistive-semiconductor-gas-sensor-24_fig18_292148696.
- [52] H. E. CO, *Datasheet for MQ3 sensor*, Accedido el 17 de julio de 2023, 2018. dirección: <https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2018/01/MQ-3.pdf>.
- [53] S. Sensors, *Datasheet for ULPSM-Ethanol 968-007*, Accedido el 10 de agosto de 2023, 2016. dirección: <https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/10/ULPSM-Ethanol-968-007.pdf>.
- [54] F. Zapata, *Coeficiente de determinación: fórmulas, cálculo, interpretación, ejemplos*, Accedido el 7 de septiembre de 2023, dic. de 2022. dirección: <https://www.lifeder.com/coeficiente-de-determinacion/>.
- [55] Y. R. Carrillo-Amado, M. A. Califa-Urquiza y J. A. Ramón-Valencia, "Calibration and standardization of air quality measurements using MQ sensors," *Respuestas*, vol. 25, págs. 70-77, 1 ene. de 2020, Accedido el 25 de agosto de 2023, ISSN: 2422-5053. DOI: 10.22463/0122820X.2408.
- [56] A. LLC, *Arduino Uno Rev3 pinout diagram*, <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>, Accedido el 21 de agosto de 2024, 2024.

13.1. Configuración de pines

13.1.1. Configuración de pines sensor MQ3

Pin #	Función MQ3	Notas
1	A0	Pin analógico.
2	D0	Pin digital.
3	Vcc	Pin de entrada de voltaje de 0 a 5V, 5V recomendado.
4	GND	Pin de tierra.

Cuadro 1: Descripción y la distribución de pines del sensor MQ3. Adaptado de [52]

13.1.2. Configuración de pines sensor ULPSM 968-007

Pin #	Función ULPSM	Notas
1	Vgas	Salida de voltaje. Vgas es proporcional a la concentración de gas objetivo.
2	Vref	Salida de voltaje. Vref es aproximadamente la mitad del voltaje de suministro. Útil como referencia fija; equivalente a cero para Vgas. NOTA: La salida de alta impedancia requiere un buffer para conectarse a cualquier dispositivo de medición.
3	Vtemp	Salida de voltaje. Vtemp es proporcional a la temperatura. NOTA: La salida de alta impedancia requiere un buffer para conectarse a cualquier dispositivo de medición.
4	N/C	
5	N/C	
6	GND	Tierra universal para alimentación y señal
7	V+	Entrada de voltaje de suministro: 2.7 a 3.3 V
8	V+	Entrada de voltaje de suministro: 2.7 a 3.3 V

Cuadro 2: Descripción y la distribución de pines del sensor ULPSM 968-007. Adaptado de [53]

13.1.3. Configuración de pines Arduino UNO

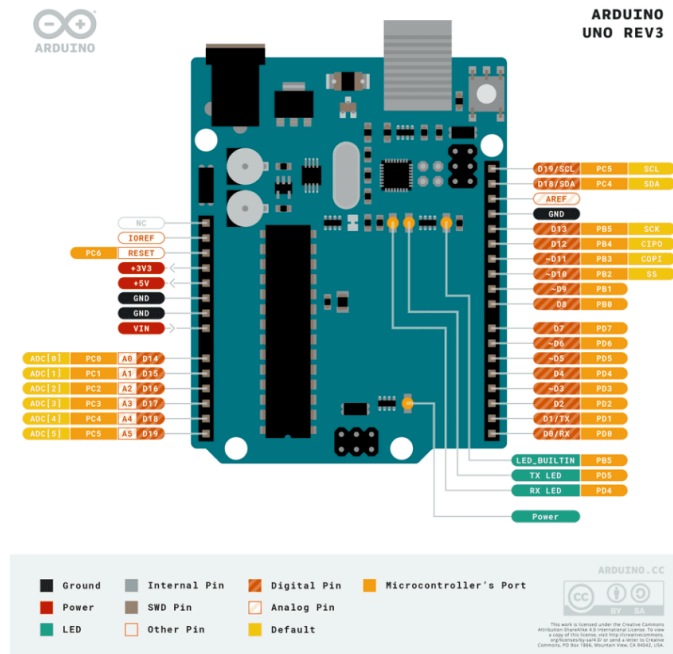


Figura 25: Pinout de microcontrolador Arduino Uno [56]