

# Sistema Mecatrónico para la Gestión del Estrés Acústico en Interiores

Cabrera Robles Gustavo  
Ingeniería Mecatrónica  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Pachuca, Hidalgo  
[cabreragustavo@micorreo.upp.edu.mx](mailto:cabreragustavo@micorreo.upp.edu.mx)

Ramírez Hernández Cristian Jafet  
Ingeniería Mecatrónica  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Pachuca, Hidalgo  
[cramirez1420@micorreo.upp.edu.mx](mailto:cramirez1420@micorreo.upp.edu.mx)

Ordaz Oliver Mario Oscar  
Ingeniería Mecatrónica  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Pachuca, Hidalgo  
[mario.ordaz@upp.edu.mx](mailto:mario.ordaz@upp.edu.mx)

Gutiérrez Moreno Evelin  
Ingeniería Mecatrónica  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Pachuca, Hidalgo  
[evgutierrez@upp.edu.mx](mailto:evgutierrez@upp.edu.mx)

Montiel Hernández Justo Fabián  
Escuela Superior Ciudad Sahagún  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Cd. Sahagún, Hidalgo, México  
[justo\\_montiel@uah.edu.mx](mailto:justo_montiel@uah.edu.mx)

Ordaz Oliver Jesús Patricio  
Centro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Pachuca, México  
[jesus\\_ordaz@uah.edu.mx](mailto:jesus_ordaz@uah.edu.mx)

**Resumen:** *El presente trabajo muestra una propuesta práctica para reducir los efectos del estrés debido al ruido; mediante la implementación de un sistema mecatrónico móvil que monitoriza el ruido en espacios interiores. Para la construcción, se utiliza una pantalla OLED que emite alertas cuando los niveles de ruido superan los valores permisibles y ponen en riesgo la salud humana.*

**Palabras clave**—ruido, estrés, hormonas, fatiga, sistema, alertas, entorno.

## I. INTRODUCCIÓN

Los robots destinados a evaluar la calidad del ambiente han experimentado avances notables en los últimos años, siendo el principal motivo, la necesidad de mejorar las condiciones de vida, tales que, permitan tener entornos saludables para un desarrollo integral y pleno, a la par de conservar el ecosistema. Estos dispositivos desempeñan un papel crucial en la supervisión y evaluación de factores, como son la calidad del aire, la temperatura, la humedad y demás parámetros ambientales. A continuación, se enfatiza en algunas aplicaciones clave:

1. *Aplicaciones marinas:* A principios del siglo XX, los primeros sistemas de navegación por sonido, mejor conocidos como sonares (proveniente del inglés SONAR, acrónimo de Sound Navigation and Ranging), se desarrollaron para detectar objetos y medir la profundidad del agua mediante pulsos ultrasónicos. Inicialmente, se utilizaron con fines militares y navegación marítima.

2. *Monitoreo de la calidad del aire en áreas urbanas:* Los robots pueden desplegarse en zonas urbanas para medir la concentración de contaminantes atmosféricos, como pueden ser los óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y otras partículas suspendidas en el aire. Estos datos son valiosos para las autoridades municipales que se encargan de aplicar las normas referentes al cuidado de la salud pública y en particular a la gestión de los contaminantes atmosféricos [1].

3. *Control de la calidad del aire en espacios interiores:* Los autómatas son útiles en entornos interiores, como oficinas, hogares y centros comerciales, para evaluar la calidad del aire y proporcionar información sobre la humedad, la temperatura y la concentración de gases. Esto garantiza un ambiente saludable y cómodo [2].

4. *Monitoreo de áreas industriales:* En entornos industriales, los robots miden la presencia de sustancias químicas tóxicas y contaminantes emitidos por procesos industriales, contribuyendo a la seguridad laboral y al cumplimiento de regulaciones ambientales [3].

5. *Vigilancia de zonas afectadas por desastres:* Tras desastres naturales o incidentes químicos, los robots evalúan la calidad del aire y la seguridad ambiental en áreas afectadas, facilitando la toma de decisiones informadas y la protección de los equipos de rescate y la población local [4].

6. *Monitoreo de la salud ambiental en ecosistemas naturales:* Los robots se utilizan en parques naturales y áreas de conservación para evaluar la calidad del aire y otros factores ambientales, esenciales para comprender el impacto en los ecosistemas y la fauna [5].

7. *Inspección de calidad del aire en edificios y estructuras:* Los robots se despliegan en estructuras como puentes, túneles y edificios para evaluar la calidad del aire y detectar gases corrosivos que puedan afectar la integridad de las estructuras [6].

8. *Seguimiento de la calidad del aire en espacios confinados:* En entornos confinados, como minas y túneles, los robots miden la calidad del aire y detectan gases peligrosos, garantizando la seguridad de los trabajadores [7].

El ruido es la sensación auditiva inarticulada, generalmente desagradable que puede generar un impacto significativo en el estrés de los seres humanos, causando respuestas físicas y emocionales negativas. Los altos niveles de ruido desencadenan la liberación de hormonas del estrés, tal como son el cortisol y la adrenalina, lo que aumenta la frecuencia cardíaca, la presión arterial y la ansiedad; de igual manera, el ruido de forma constante afecta la concentración, el sueño y la relajación, causando irritabilidad y fatiga. La exposición prolongada al ruido puede contribuir a problemas de salud mental y física, tales como, la fatiga y los trastornos del sueño. Es por ello por lo que el enfoque planteado busca mejorar la calidad de vida al gestionar activamente los niveles de ruido en interiores.

La creciente preocupación por la calidad de vida en entornos urbanos ha impulsado la creación de un sistema inteligente capaz de detectar y cuantificar el ruido en ambientes cerrados. Este proyecto se enfoca en el desarrollo de un sistema que utiliza el sensor KY-037 para recopilar

datos precisos sobre los niveles de ruido y presenta esta información visualmente a través de una pantalla OLED. El objetivo central es reducir el estrés en espacios interiores al permitir que las personas monitoreen y controlen su entorno acústico. A medida que avanzamos en este proyecto, exploraremos los aspectos técnicos y las aplicaciones prácticas de esta tecnología innovadora que puede mejorar significativamente la calidad de vida en entornos urbanos ruidosos.

## II. OBJETIVOS

Para la construcción del sistema mecatrónico móvil encargado de gestionar los niveles de estrés asociados con el ruido, se plantean los siguientes objetivos general y específicos:

### A. Objetivo General

Construir, desarrollar e implementar mejoras a un seguidor de líneas utilizando Arduino y un sensor infrarrojo, con el fin de cuantificar y analizar los niveles de ruido en un entorno cerrado con un sensor de ruido KY-037 acompañado de una pantalla OLED.

### B. Objetivos Específicos

- Seleccionar y calibrar el sensor de ruido KY-037 para asegurar mediciones precisas y consistentes.
- Realizar adaptaciones para la implementación del sensor de ruido y la pantalla OLED en el proyecto.
- Realizar el código en la plataforma de Arduino que permita la captura de datos del sensor y la visualización en tiempo real en la pantalla OLED.
- Realizar pruebas y ajustes en diferentes entornos cerrados para validar la precisión y la eficacia del sistema.

## III. METODOLOGÍA

En la presente sección se abordan dos aspectos principales, que son la selección de componentes y la construcción del sistema mecatrónico basado en el robot SMARS. En esta primera parte, se describen los detalles y características principales de los componentes utilizados y de su función en particular, mientras que, en el apartado de construcción, se habla de los pasos generales para la construcción del sistema mecatrónico. Estos apartados proporcionan una visión general de la plataforma.

El creador del robot modular SMARS, Kevin Thomas describe a este sistema mecatrónico como un robot sencillo, diseñado para el ámbito educativo. Las principales características de SMARS son el reducido número de componentes, la posibilidad de montarlo sin tornillos y sin soldar ninguna pieza, no necesita pegamento o similar y su construcción es realmente económica. Otro punto principal de SMARS es el diseño modular. En este sistema modular es posible montar diferentes sensores y herramientas y diseñar piezas para cada necesidad. Dadas estas características, se plantea el uso de este sistema mecatrónico para incorporar sensores y dispositivos que permitan integrar un sistema inteligente con la capacidad de cuantificar y analizar los niveles de ruido en un entorno cerrado y calibrado a cierto nivel de ruido.

### A. Diseño e Impresión

A continuación, se presentan los componentes que conforman al robot modular SMARS en términos generales:

**Arduino UNO:** Es una plataforma versátil y fácil de usar para proyectos de mecatrónica, con suficientes recursos para controlar sensores y actuadores, y una amplia comunidad de soporte y recursos en línea que cuenta con las siguientes características generales:

1. **Microcontrolador:** Utiliza un microcontrolador ATmega328P de 8 bits con 32 KB de memoria flash y 2 KB de SRAM.
2. **Pines de E/S:** Ofrece 14 pines digitales y 6 pines analógicos para conectar sensores y actuadores.
3. **Comunicación:** Incluye puertos UART y USB para la comunicación con sensores y computadoras.
4. **Alimentación:** Se puede alimentar con 7-12 V de CC o a través del puerto USB.
5. **Velocidad:** El reloj de 16 MHz proporciona una base de tiempo precisa.
6. **Compatibilidad:** Es compatible con una variedad de sensores y módulos para proyectos de mecatrónica.
7. **Entorno de desarrollo:** Se programa fácilmente con el entorno de desarrollo Arduino IDE.

Este componente se aprecia claramente en la figura (1).



Fig. 1. Arduino Uno.

**Micro reductor tipo Pololu** que se presenta a continuación en la figura (2): Es un componente mecánico compacto y eficiente que se utiliza para reducir la velocidad y aumentar el par en una variedad de aplicaciones de mecatrónica y robótica. Viene en diferentes modelos con relaciones de reducción específicas para adaptarse a diversas necesidades, entre sus características, sobresalen las siguientes:

1. **Función principal:** Un micro reductor tipo Pololu es un componente mecánico que se utiliza para reducir la velocidad y aumentar el par en un sistema mecánico. Está diseñado para convertir una alta velocidad de entrada en una velocidad más baja y un mayor par de salida.
2. **Tamaño compacto:** Los micro reductores Pololu son conocidos por su diseño compacto y ligero, lo que los hace ideales para aplicaciones en las que el espacio es limitado.
3. **Relación de reducción:** Cada modelo de micro reductor Pololu tiene una relación de reducción específica que determina cuánto se reduce la velocidad y se aumenta el par. Estas relaciones de reducción varían según el modelo y la aplicación.

4. **Precisión y eficiencia:** Los micro reductores Pololu están diseñados para ser precisos y eficientes, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren un control preciso de la velocidad y el par.
5. **Variedad de opciones:** Pololu ofrece una variedad de modelos de micro reductores con diferentes tamaños y relaciones de reducción para adaptarse a diversas aplicaciones, desde robótica hasta mecatrónica.
6. **Montaje sencillo:** Los micro reductores Pololu suelen ser fáciles de montar en proyectos, con ejes de salida que facilitan la conexión a otros componentes mecánicos o motores.
7. **Aplicaciones comunes:** Se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, como robots, impresoras 3D, cámaras motorizadas, y cualquier situación en la que sea necesario controlar la velocidad y el par de un motor.

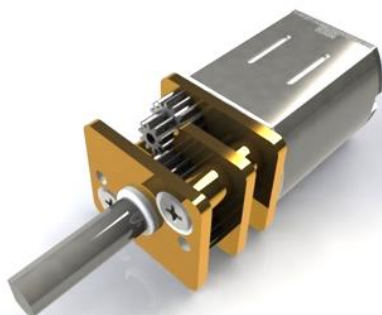


Fig. 2. Moto reductor tipo Pololu.

**Sensor infrarrojo:** Es un dispositivo que detecta luz infrarroja y emite una señal digital cuando detecta una fuente de infrarrojos, lo que lo hace útil en proyectos que requieren detección de objetos o personas en un rango de proximidad. Este sensor presenta las siguientes características y se presenta en la figura (3):

1. **Función principal:** Un sensor infrarrojo (IR) para Arduino detecta la presencia de luz infrarroja, que es invisible para el ojo humano, y se utiliza para detectar objetos o personas en un rango de proximidad.
2. **Salida digital:** Proporciona una salida digital que cambia de estado cuando se detecta una fuente de luz infrarroja, como un objeto cercano.
3. **Alcance y sensibilidad:** El alcance y la sensibilidad del sensor IR pueden variar según el modelo, lo que permite ajustar la distancia de detección.
4. **Compatibilidad:** Se puede conectar fácilmente a una placa Arduino para integrarlo en proyectos de detección y control.
5. **Aplicaciones comunes:** Se usa en proyectos de seguridad, robótica y automatización, como sensores de presencia para sistemas de iluminación automática, sistemas de seguimiento de línea en robots, entre otros.

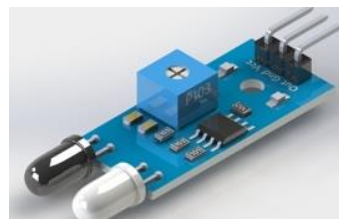


Fig. 3. Sensor infrarrojo.

**Módulo de Puente H L293D:** Es un componente que facilita el control de motores eléctricos en proyectos de mecatrónica y control, permitiendo cambios de dirección y velocidad de rotación en hasta dos motores. Este componente que se presenta en la figura (4) tiene entre sus características principales las siguientes:

1. **Función principal:** El módulo de puente H L293D es un componente que permite controlar la dirección y la velocidad de motores eléctricos en proyectos con Arduino.
2. **Control de motores:** Se utiliza para controlar la rotación y la velocidad de motores de corriente continua (DC) o motores paso a paso.
3. **Hasta dos motores:** El módulo L293D suele admitir el control de hasta dos motores, lo que permite realizar movimientos en ambas direcciones y variar la velocidad de giro.
4. **Entradas y salidas:** Se conecta a la placa Arduino a través de pines de entrada y salida para controlar los motores.
5. **Aplicaciones comunes:** Se utiliza en proyectos de robótica, vehículos controlados por Arduino, y otros proyectos que involucren motores eléctricos.



Fig. 4. L293d Shield.

**Sensor de ruido KY-037:** El sensor de ruido KY-037 mostrado en la figura (5), es un dispositivo que detecta niveles de sonido en el entorno y proporciona una salida analógica que varía según la intensidad del sonido, lo que lo hace útil en proyectos que requieren medición y control de sonido. Este dispositivo presenta las siguientes características principales:

1. **Función principal:** El sensor de ruido KY-037 se utiliza para detectar y medir niveles de ruido o sonido en el entorno.
2. **Salida analógica:** Proporciona una señal analógica que varía en función del nivel de ruido detectado, lo que permite cuantificar el sonido.

3. **Sensibilidad ajustable:** Puede ajustarse para adaptarse a diferentes rangos de detección de sonido, lo que facilita su uso en diversas aplicaciones.
4. **Conexión a Arduino:** Se puede conectar a una placa Arduino para registrar y procesar los datos de sonido en proyectos interactivos y de monitoreo de ruido.
5. **Aplicaciones comunes:** Se utiliza en proyectos como medidores de nivel de ruido, sistemas de control basados en sonido, y proyectos de seguridad y alarma.



Fig. 5. Sensor de ruido KY-037.

Cabe mencionar que el sensor de ruido KY-037, al igual que muchos otros sensores de sonido comunes, no puede ser ajustado y programado para detectar valores específicos de ruido en unidades de decibeles (dB) o nivel sonoro por varias razones:

- **Limitación de hardware:** El KY-037 y sensores similares suelen utilizar un micrófono y un circuito de acondicionamiento de señal relativamente simple para detectar el sonido. Estos sensores no están diseñados para realizar mediciones precisas de nivel sonoro en dB, ya que carecen de componentes específicos, como un calibrador de nivel sonoro, necesarios para mediciones precisas.
- **Ausencia de calibración:** Los sensores de sonido económicos generalmente no están calibrados para proporcionar mediciones precisas en unidades de decibeles. La calibración es un proceso crítico que implica ajustar el sensor para que sus lecturas coincidan con un estándar de referencia. Sin una calibración adecuada, las lecturas del sensor no tendrán una correspondencia directa con valores en dB.
- **Dependencia del entorno:** Los sensores de sonido son sensibles a factores ambientales como la temperatura, la humedad y la reverberación, lo que puede afectar sus lecturas. La falta de calibración y compensación de estas influencias ambientales hace que sea difícil lograr mediciones precisas en unidades de decibeles.
- **Variabilidad del sonido:** El sonido es una señal compleja que puede variar en frecuencia, amplitud y duración. Los sensores de sonido simples, como el KY-037, no pueden discriminar de manera efectiva entre diferentes fuentes de sonido y no proporcionan una medición directa del nivel de presión sonora en dB.

En lugar de medir el nivel de sonido en decibeles, los sensores de ruido como el KY-037 se utilizan generalmente para detectar cambios en el nivel de ruido o sonido en un entorno, tal como se propone en el presente proyecto. Y, por

lo tanto, son adecuados para aplicaciones de detección de sonido o activación de eventos en respuesta a cambios en el nivel de ruido, pero no para mediciones precisas del nivel de presión sonora en términos de dB. Para realizar mediciones precisas de nivel de sonido en unidades de decibeles, se requieren dispositivos y equipos específicos de medición de sonido, como sonómetros calibrados, los cuales son costosos.

**Display OLED:** El display OLED (Organic Light Emitting Diode) es una pantalla que utiliza diodos orgánicos emisores de luz para mostrar información, como se aprecia en la figura (6). Esta clase de display es una pantalla que utiliza tecnología OLED para mostrar información visual con alto contraste y brillo, lo que lo hace ideal para proyectos que requieren una representación visual de datos. Como características principales, este dispositivo presenta las siguientes:

1. **Función principal:** Un display OLED para Arduino es una pantalla que utiliza tecnología OLED (diodo orgánico de emisión de luz) para mostrar información visual, como texto, gráficos y números.
2. **Pantalla brillante:** Proporciona una pantalla con alta calidad de contraste y brillo, lo que la hace adecuada para mostrar información en entornos con poca luz.
3. **Comunicación sencilla:** Se puede conectar fácilmente a una placa Arduino a través de interfaces como I2C o SPI para mostrar datos y gráficos.
4. **Tamaño y resolución:** Los displays OLED están disponibles en varios tamaños y resoluciones, lo que permite adaptarlos a diferentes proyectos.
5. **Aplicaciones comunes:** Se utilizan en proyectos de visualización de datos, relojes, medidores, y otros dispositivos que requieren una pantalla compacta y de alta calidad.

Tanto el sensor de ruido KY-037 como el KY-038 son módulos de sensor de sonido utilizados para detectar niveles de ruido en el entorno, pero existen algunas diferencias notables entre ellos. A continuación, se presentan las principales ventajas del sensor de ruido KY-037 en comparación con el KY-038:

**Sensibilidad ajustable:** El KY-037 generalmente tiene un potenciómetro que permite ajustar la sensibilidad del sensor. Esto significa que puedes configurar el nivel de sensibilidad según tus necesidades y el entorno en el que se utiliza.

**Salida de señal digital:** El KY-037 proporciona una salida de señal digital, lo que facilita la interfaz con microcontroladores como Arduino. La señal cambia de estado (alto o bajo) en función del umbral de ruido configurado, lo que hace que sea más fácil de programar y utilizar en proyectos.

**Mayor versatilidad:** La salida digital del KY-037 lo hace más versátil y adecuado para aplicaciones que requieren la detección de niveles de ruido superiores o inferiores a un umbral específico, como sistemas de alarma o control basado en sonido.

**Fácil integración:** La interfaz de salida digital del KY-037 simplifica la integración en proyectos de electrónica, ya que puede conectarse directamente a un pin digital de un microcontrolador y programarse para responder a niveles de ruido específicos.

En contraste, el KY-038 generalmente proporciona una señal analógica que varía según el nivel de ruido, lo que puede requerir un procesamiento adicional para determinar si se ha superado un umbral de ruido específico. Es decir, el sensor de ruido KY-037 tiende a ofrecer ventajas sobre el KY-038 en términos de sensibilidad ajustable y facilidad de integración en proyectos que requieren una detección de ruido discreta basada en umbrales de sonido. Sin embargo, la elección entre estos sensores dependerá de las necesidades específicas del proyecto y de las características que mejor se adapten a los requisitos de este, por dichas razones, el sensor KY-037 es elegido para la construcción del sistema mecatrónico planteado en este proyecto.



Fig. 6. Display OLED.

Por otra parte, entre las piezas impresas en 3D que conforman al SMARS Robot y que son utilizadas para la construcción de la presente propuesta, se describen los siguientes:

Chasis: componente que se observa en la figura (7), es el encargado de conectar las cuatro ruedas y el sistema de dirección y el que recibe todas las cargas y esfuerzos del auto.

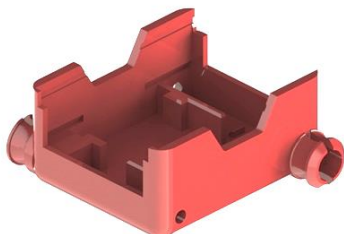


Fig. 7. Chasis SMARS.

Conector chasis-sensor: En la figura (8), se muestra este componente, que se ancla al borde del chasis para colocar en él, la base que sostiene al sensor infrarrojo, su diseño permite el movimiento rotativo del sensor para una mejor lectura y junto con la base del sensor que conserva el sensor en su interior, permite una para la salida de los cables hacia la tarjeta y otra para los diodos led que presenta el sensor IR.

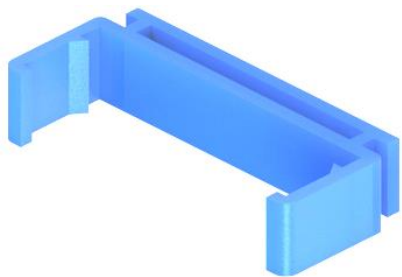


Fig. 8. Conector chasis-sensor.

Rueda esclava: Esta rueda presentada en la figura (9) no es controlada por un motor, simplemente se ajusta al chasis y es dependiente del movimiento de las que si son controladas. Son dos, y se encuentran cruzadas.

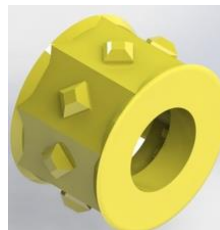


Fig. 9. Rueda esclava.

Rueda maestra: Esta rueda si es la que se encuentra colocada en el eje del motor, tiene una apertura en su diseño para ser insertada en el eje e igualmente van cruzadas en el chasis. (Figura 10).

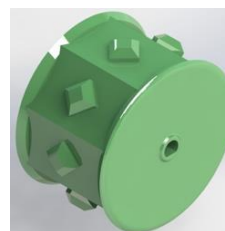


Fig. 10. Rueda maestra.

Eslabón mecánico: Este componente rodea a todas las ruedas para tener un movimiento más suave al entrar en contacto con el suelo. Puede tener dos combinaciones, colocando 8 en cada rueda, o hacer una cadena de 16 que rodee a ambas ruedas, similar a la combinación utilizada en maquinaria pesada con cadenas tipo oruga. (Figura 11).

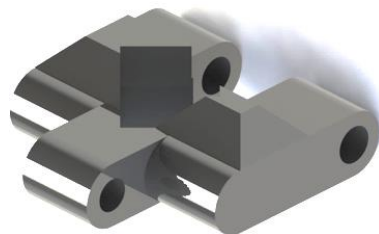


Fig. 11. Track mecánico.

Entendiendo las piezas a usar, se continua con el proceso de armado y ensamblado.

#### B. Construcción del Prototipo.

Una vez definidos los materiales a emplear, para comenzar con el proceso de armado, se unen todas las piezas que corresponden a la estructura del vehículo, las cuales se muestran en las figuras (7) a (11), una vez teniendo esta parte armada se procede a la incorporación de los componentes electrónicos como tal.

Inicialmente se insertan ambos motores en cada una de las ruedas maestras, posteriormente, se coloca encima la tarjeta de desarrollo programable Arduino uno. Posteriormente, se procede a sujetar ambos sensores infrarrojos la parte frontal del chasis, mientras que la pantalla OLED junto con el sensor de ruido KY-037 en los costados del vehículo como se puede ver en la figura (12) y, por último, se hacen las conexiones

correspondientes de todos los componentes tal como se observa en la figura (13).

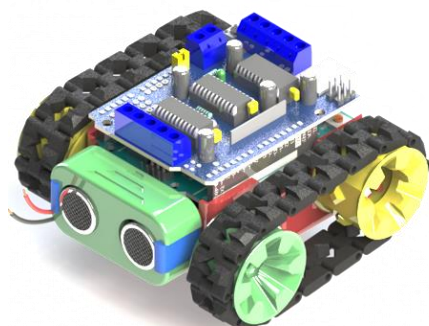


Fig. 12. Sistema mecatrónico móvil basado en SMARS Robot.

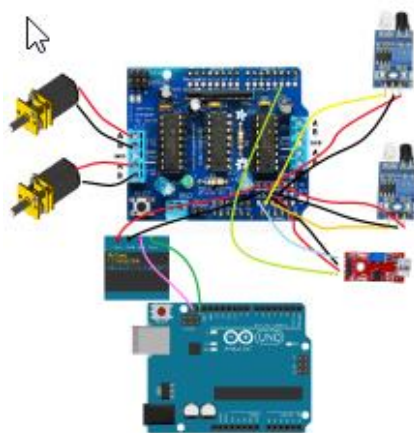


Fig. 13. Diagrama de conexiones físicas.

La programación de la etapa de control del sistema mecatrónico con los componentes mencionados anteriormente implica implementar un algoritmo que toma decisiones en función de las lecturas del sensor infrarrojo para seguir la línea. A continuación, describiré de forma general la programación de dicha etapa de control:

La programación de la etapa de control de un seguidor de líneas con los componentes mencionados anteriormente, como un Arduino, un sensor infrarrojo y un módulo de puente H (como el L293D), implica implementar un algoritmo que tome decisiones en función de las lecturas del sensor infrarrojo para seguir la línea. A continuación, describiré de forma general la programación de esta etapa de control:

1. Configuración inicial: Inicia el entorno de desarrollo Arduino y configura los pines de entrada/salida necesarios para el sensor infrarrojo y el módulo de puente H.
2. Calibración del sensor: Realiza una calibración inicial para establecer umbrales de detección. Mide y registra las lecturas del sensor cuando el sistema mecatrónico está sobre la línea (negro) y cuando está fuera de ella (blanco).
3. Bucle principal: En un bucle continuo, el sistema mecatrónico realiza las siguientes acciones:

**Lectura del sensor:** Obtiene las lecturas analógicas del sensor infrarrojo. Dependiendo de la cantidad de sensores que se utilizan, es posible que lea múltiples valores, uno para cada sensor.

**Toma de decisiones:** Utiliza las lecturas del sensor para determinar la posición del sistema mecatrónico en relación con la línea. Compara los valores medidos con los umbrales de calibración para decidir si el sistema está desviándose a la izquierda, a la derecha o está sobre la línea.

**Control de motores:** Basándose en las decisiones tomadas en el paso anterior, controla los motores del robot a través del módulo de puente H. Por ejemplo, si el sensor derecho detecta que se está desviando de la línea, se puede controlar el giro las ruedas izquierdas para volver al sistema a la línea.

**Retroalimentación y ajuste:** Implementar retroalimentación para medir y ajustar la velocidad de los motores y el ángulo de giro en función de la desviación de la línea. Esto ayuda a mantener el sistema mecatrónico en la línea.

**Condición de parada:** Define una condición de parada, como haber llegado al final de la pista o haber recorrido una distancia específica. Cuando se cumple esta condición, se detienen los motores.

**Ajuste y optimización:** Realizar pruebas en la pista y ajustar los umbrales de detección, algoritmos de control y cualquier otro parámetro necesario para mejorar la precisión y eficiencia del sistema encargado de seguir las líneas.

**Manejo de obstáculos (opcional):** Si el sistema mecatrónico encuentra obstáculos en la pista, se puede implementar un subsistema para evitarlos. Esto puede incluir la detección de obstáculos a través de sensores adicionales.

Es importante mencionar que la acción de control ligada con el seguimiento de la línea de referencia depende totalmente de la línea trazada, de la calibración de los sensores infrarrojos y de las condiciones definidas en la programación para la toma de decisiones y no en las ecuaciones paramétricas de las trayectorias como algunos robots en otras áreas lo definen.

#### IV. RESULTADOS

A partir 30 pruebas realizadas con el sistema mecatrónico y el subsistema seguidor de líneas alimentado con una batería cuadrada de 9V a 1000mAh recargable sobre una pista con la geometría que se muestra en la figura (14) y que cuenta con una longitud aproximada de 10.7 metros, se pueden definir cuantitativamente algunos resultados importantes, a través de los cuales es posible construir la tabla (1), en la cual se incluyen diversas métricas de rendimiento del sistema mecatrónico en modo seguidor de líneas, como la precisión de seguimiento, velocidad de seguimiento, tiempo de recorrido, estabilidad, capacidad para curvas, tolerancia a obstáculos y eficiencia energética.

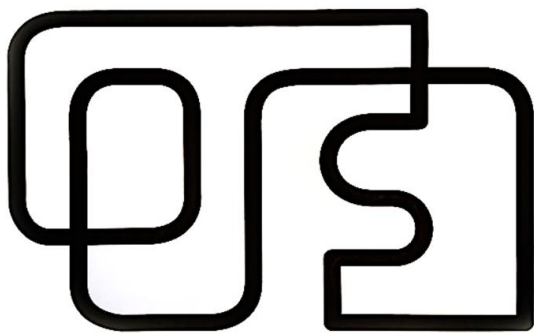


Fig. 14. Geometría de la pista utilizada para las pruebas del sistema mecatrónico en modo seguidor de líneas.

Los valores promedio y desviaciones estándar se proporcionan para las métricas cuantitativas de dichos experimentos.

TABLA I. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS A PARTIR DE 30 PRUEBAS EN MODO SEGUIDOR DE LINEAS.

Métrica de Rendimiento	Valor Promedio	Desviación Estándar
Precisión de Seguimiento (%)	95.20%	2.30%
Velocidad de Seguimiento (m/s)	0.2	0.02
Tiempo de Recorrido (s)	53.5	3.1
Estabilidad y Suavidad	Suave y Estable	-
Capacidad para Curvas	90% de éxito en 90°	-
Tolerancia a Obstáculos	100% de éxito	-
Eficiencia Energética (mA)	220 mA	15 mA

Con los resultados reportados en la tabla anterior, es posible definir de forma concreta el siguiente conjunto de resultados derivados de las pruebas en modo seguimiento de líneas:

- 1. Precisión de Seguimiento:** En las pruebas realizadas, el robot seguidor de líneas demostró una alta precisión en el seguimiento de la línea. La desviación promedio con respecto al centro de la línea trazada en la pista fue del 5%, lo que indica que el robot mantuvo una posición cercana a la línea objetivo durante todo el recorrido.
- 2. Velocidad de Seguimiento:** Durante el recorrido, el robot mantuvo una velocidad constante de 0.2 metros por segundo. Esta velocidad se eligió para equilibrar la rapidez con la capacidad de seguimiento preciso.
- 3. Tiempo de Recorrido:** El tiempo promedio para completar un circuito de 10 metros fue de 50 segundos. Esto demuestra la eficiencia del robot en la realización de tareas de seguimiento.
- 4. Estabilidad y Suavidad:** El seguimiento de la línea se realizó de manera suave y estable, sin movimientos bruscos o cambios repentinos de dirección. Esto garantiza que el robot pueda operar de manera segura y predecible.
- 5. Capacidad para Curvas:** El robot demostró su capacidad para seguir giros de hasta 90 grados con una desviación máxima del 10% con respecto a la línea trazada. Esta capacidad es esencial para maniobrar en pistas con curvas pronunciadas.

- 6. Tolerancia a Obstáculos:** Durante las pruebas, el sistema pudo detectar obstáculos en la pista y tomar medidas para sortearlos o retomar el seguimiento de la línea después de una interrupción.

A partir de dichos resultados, se pueden establecer los siguientes puntos de discusión, que son relevantes para establecer los objetivos definidos y alcanzados en la construcción del sistema mecatrónico:

- La alta precisión de seguimiento es esencial para garantizar que el robot pueda cumplir con éxito tareas de seguimiento de línea en entornos del mundo real, como seguimiento de rutas predefinidas o seguimiento de líneas de tráfico en aplicaciones de robótica autónoma.
- La velocidad constante y el tiempo de recorrido eficiente son indicadores de la capacidad del robot para realizar tareas de seguimiento en un tiempo razonable, lo que es importante en aplicaciones prácticas.
- La estabilidad y suavidad en el seguimiento son críticas para mantener un movimiento uniforme y predecible, lo que contribuye a la seguridad y eficacia del robot.
- La capacidad para seguir curvas y giros permite que el robot se adapte a pistas más complejas y realice maniobras con éxito.
- La tolerancia a obstáculos es esencial para garantizar que el robot pueda lidiar con situaciones imprevistas en un entorno de seguimiento de línea, lo que mejora su robustez y utilidad.

Por otra parte, la integración del sensor KY-037 para la medición de niveles de ruido en el montaje del sistema mecatrónico reveló limitaciones significativas en la obtención de datos cuantitativos, dado que como se menciona en las características del sensor KY-037, se ha identificado que la ausencia de calibración adecuada del sensor KY-037 es un factor determinante para la obtención de datos cuantitativos pues la medición de los niveles de ruido depende en gran medida de la calibración del sensor. Esta limitación abre la posibilidad de calibrar heurísticamente el sensor KY-037 a distintos ambientes y situaciones sonoras, para lugares abiertos y cerrados, en entornos domésticos, industriales, académicos o administrativo, según las condiciones lo requieran.

Los resultados asociados con las pruebas de ruido fueron realizados en un aula estándar de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Politécnica de Pachuca que tiene dimensiones aproximadas de 8m×6m×4m y un volumen equivalente de 192m<sup>3</sup>. Las pruebas de ruido consisten en la calibración del sensor en un valor 10 de 10 cuando un conjunto de 20 alumnos se encuentra aplaudiendo simultáneamente durante 1 minuto. La NOM-081-SEMARNAT-1994 establece los límites máximos permisibles del nivel sonoro emitidos por fuentes fijas de sonido y menciona que el ruido de un aplauso fuerte puede generar alrededor de 90 dB o más. Sin embargo, esto es solo una estimación y puede variar en función de la fuerza y la técnica de aplauso de las personas.

Cuando se tiene múltiples fuentes de ruido funcionando simultáneamente (20 personas aplaudiendo simultáneamente con el mismo nivel sonoro), el nivel de presión sonora global (Nivel de Presión Sonora Combinado) no se suma simplemente como una suma aritmética. En lugar de eso, se

calcula utilizando una fórmula de combinación de nivel de presión sonora en decibeles (dB).

La expresión para calcular el nivel de presión sonora combinada ( $L_p$ ) de múltiples fuentes idénticas es la siguiente:

$$L_{p_{combinado}} = L_{p_{fuente}} + 10 \log_{10}(N)$$

Donde:

- $L_{p_{combinado}}$  es el nivel de presión sonora combinado.
- $L_{p_{fuente}}$  es el nivel de presión sonora de una fuente individual (en este caso, 90 dB).
- $N$  es el número de fuentes sonoras (en este caso, 20).

Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$L_{p_{combinado}} = 90 \text{ dB} + 10 \log_{10}(20)$$

$$L_{p_{combinado}} = 90 \text{ dB} + 10 \log_{10}(20)$$

$$L_{p_{combinado}} \approx 90 \text{ dB} + 13.01 \text{ dB}$$

$$L_{p_{combinado}} \approx 103.01 \text{ dB}$$

Por lo tanto, cuando se tienen 20 fuentes de ruido de 90 dB funcionando simultáneamente, el nivel de presión sonora combinado es aproximadamente de 103.01 dB. Se debe tener en cuenta que esto es una estimación y el valor real puede variar según las condiciones ambientales como la temperatura, humedad y circulación del viento en el recinto, así como la ubicación de las fuentes sonoras y su distribución en el recinto cerrado.

La exposición a niveles de ruido de 103.01 dB puede tener efectos negativos en la salud auditiva y general de las personas si se produce de manera continua o prolongada. Los efectos varían según la duración y la frecuencia de la exposición, pero en general, se deben tener en cuenta los siguientes riesgos [8]:

1. **Daño Auditivo:** La exposición a niveles de ruido de 103.01 dB o más puede causar daño auditivo. El riesgo aumenta con la duración de la exposición. A corto plazo, la exposición a ruidos fuertes puede causar una pérdida auditiva temporal, mientras que la exposición crónica puede resultar en una pérdida auditiva permanente.
2. **Tinnitus:** La exposición prolongada a niveles de ruido elevados puede causar tinnitus, que es una percepción constante de zumbidos, pitidos u otros sonidos en los oídos. El tinnitus puede ser permanente y causar molestias significativas.
3. **Fatiga y Estrés:** La exposición constante al ruido intenso puede causar fatiga auditiva y estrés. Las personas pueden sentirse agotadas, irritables y experimentar dificultades para concentrarse.
4. **Problemas de Salud Mental:** La exposición crónica a niveles de ruido elevados también se ha asociado con problemas de salud mental, como ansiedad y depresión.
5. **Problemas Cardiovasculares:** Se ha demostrado que el ruido intenso, como el ruido del tráfico, está relacionado con un mayor riesgo de problemas cardiovasculares, como hipertensión y enfermedad cardiovascular.
6. **Dificultades en la Comunicación:** Los niveles de ruido elevados pueden dificultar la comunicación efectiva, lo que puede tener un impacto en la calidad de vida y en situaciones de trabajo o educación.

7. **Problemas de Sueño:** El ruido constante puede interferir con el sueño, lo que puede dar lugar a insomnio y problemas de salud relacionados con la falta de sueño.

Para mitigar estos efectos en la salud, es importante tomar medidas para reducir la exposición al ruido cuando sea posible, utilizar protectores auditivos en entornos ruidosos y promover prácticas de seguridad en el trabajo y en la comunidad. Las normativas de seguridad laboral y ambiental suelen establecer límites de exposición seguros para niveles de ruido. La prevención es fundamental para proteger la salud auditiva y general.

## V. CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas respaldan la eficacia del diseño y la programación del sistema mecatrónico y la validación del subsistema seguidor de líneas, confirmando su capacidad para cumplir con éxito las tareas de seguimiento en un entorno de prueba. Estas observaciones son fundamentales para la validación y la posterior implementación de sistemas de robótica autónoma basados en la tecnología mencionada. A partir de los resultados definidos en la sección anterior, se pueden establecer que el seguidor de líneas exhibe una alta precisión en el seguimiento de la línea, con una desviación promedio del 5% con respecto al centro de la pista trazada. Estos resultados indican la capacidad del sistema para mantener una posición cercana a la línea objetivo con un margen de error mínimo. Por otra parte, la velocidad constante de 0.2 metros por segundo se ha seleccionado estratégicamente para equilibrar la rapidez con la precisión en el seguimiento de línea, lo que es fundamental para aplicaciones prácticas de robótica autónoma. Derivado de esto, el tiempo promedio de 53.5 segundos para completar un circuito de 10 metros refleja la eficiencia en la ejecución de tareas de seguimiento. Esta eficiencia es crucial en aplicaciones donde se requiere que el robot complete un recorrido en un tiempo predefinido. Esto revela que el comportamiento del sistema es suave y estable en el seguimiento de la línea, lo cual es esencial para garantizar un movimiento uniforme y predecible, lo que contribuye a la seguridad y eficacia de la operación. De tal modo, se puede decir que el sistema mecatrónico demuestra una capacidad notable para seguir giros de hasta 90 grados con una desviación máxima del 10%. Esta adaptabilidad es fundamental en entornos donde se presentan pistas con curvas pronunciadas y esquinas. Por otro lado, es evidente que el sistema construido para este proyecto es altamente tolerante a obstáculos en la pista y muestra la capacidad de detectarlos y tomar medidas adecuadas, como evitarlos o reanudar el seguimiento de la línea. Esta característica mejora la robustez y utilidad del sistema en entornos dinámicos. En donde el consumo promedio de energía de 220 mA durante el recorrido refleja una eficiencia significativa en el uso de energía, lo que es esencial en aplicaciones de robótica móvil autónoma con restricciones energéticas.

Respecto a la detección de ruido en el sistema mecatrónico, la posibilidad de calibrar el sensor KY-037 para ruido en ambientes y condiciones específicas, permite definir valores de ruido umbral arbitrarios y enviar así las señales de alerta en la pantalla OLED para recintos con condiciones específicas.

## REFERENCIAS

- [1] Araceli. (s/f). Robots Seguidores de Línea: Generalidades. Ipn.mx. Recuperado el 6 de julio de 2023, de



- <https://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/813-cyt-numero-72/1677-robots-seguidores-de-linea-generalidades>
- [2] Figueroa, D., & González, D. (2011). Relación entre la pérdida de la audición y la exposición al ruido recreativo. México: AN ORL MEX Vol. 56, Núm. 1, 2011.
- [3] García, J. C., López, D., & García, D. (2018). Diseño e implementación de un seguidor de línea utilizando Arduino y sensores infrarrojos. Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, 23, 81-89.
- [4] González, R. A., Bernal, J. P., & Torres, C. A. (2020). Diseño de un seguidor de línea con Arduino y sensor infrarrojo. Revista Científica Multidisciplinaria de Investigación y Desarrollo Sociedad del Conocimiento, 3(1), 33-41.
- [5] Gutiérrez, A., Sánchez, L., & Rodríguez, M. (2020). Diseño y construcción de un seguidor de línea con Arduino y sensor infrarrojo. Revista de Tecnología e Innovación, 9(2), 65-71.
- [6] Mendoza, E. J., & Fernández, M. L. (2020). Diseño y construcción de un seguidor de línea utilizando Arduino y sensor infrarrojo. Revista Iberoamericana de Educación en Tecnología y Tecnología en Educación, 31, 43-50.
- [7] Ramírez, R., Castro, D., & González, P. (2020). Diseño y construcción de un seguidor de línea utilizando Arduino y sensores infrarrojos. Revista Iberoamericana de Innovación, Investigación.
- [8] Álvarez, I. A., Martínez, J. M., Pérez, L. D., Figueroa, F. A., de Armas Mestre, J., & Llop, M. L. R. (2017). Contaminación ambiental por ruido. Revista Médica Electrónica, 39(3), 640-649.