

Evaluación de la exactitud de sensores ultrasónicos comerciales para la medición de distancia respecto a diferentes superficies

Ing. Angel David Záizar González, M.C. Darío Cisneros Arreola, Dra. Merit Cisneros González, Dr. Manuel Ismael Mata Escobedo.

^aInstituto Tecnológico del Valle del Guadiana M23790001@vguadiana.tecnm.mx Durango, Dgo, México. Autor A.

^bInstituto Tecnológico del Valle del Guadiana merit.cg@vguadiana.tecnm.mx Durango, Dgo, México. Autor B.

^cInstituto Tecnológico del Valle del Guadiana darío.ca@vguadiana.tecnm.mx Durango, Dgo, México. Autor C.

^dInstituto Tecnológico del Valle del Guadiana manuel.me@vguadiana.tecnm.mx Durango, Dgo, México. Autor D.

Resumen

Existen en el mercado diferentes sensores ultrasónicos que son utilizados en diferentes áreas de la investigación e industria. Generalmente se desconoce si las lecturas proporcionadas son confiables debido a las características de diseño como lo pueden ser el consumo de corriente, resolución de la información y el rango de operación, originando cierta incertidumbre en los investigadores y trabajadores que los utilizan. Asimismo en el área de la industria este tipo de sensores tienen un gran impacto debido a los procesos y proyectos de automatización como en el desarrollo de sistemas de monitoreo. El presente trabajo consiste en la evaluación de 4 sensores ultrasónicos de marcas y diseños diferentes, con el objetivo de determinar el dispositivo más exacto y poder utilizarlo en diferentes trabajos de investigación. Los sensores fueron evaluados en un rango amplio de distancias y en superficies de referencia diferentes. Para evaluar los resultados se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo trifactorial. Los resultados mostraron como el error de las lecturas varía entre sensores ($p > 0.05$) a pesar de ser calibrados y de tomar lecturas de manera simultánea, así como es que ciertos intervalos de distancias pueden presentar diferencias significativas para los sensores o como el tipo de superficie puede afectar ligeramente la veracidad de los datos.

Palabras clave - Electrónica, Agua, IoT, Sensor Ultrasónico, Distancia, Exactitud.

Abstract

On the market there is a wide range of different ultrasonic sensors used in different research and industry areas. It's generally unknown whether the readings provided are reliable due to design characteristics such as current consumption, data

resolution and range of operation, causing some uncertainty in the researchers who use them. Also, in the industry, such sensors have a great impact due to processes and automation projects, such as the development of monitoring systems. The present work consists of the evaluation of 4 ultrasonic sensors of different brands and designs in the market, with the main objective of determining the most accurate device and being able to use it in different research works and automation projects. The sensors were evaluated over a wide range of distances and on different reference surfaces. A completely randomized design with a three factor arrangement was used to evaluate the readings of the sensors. The results showed how the error of the readings varies between sensors ($p > 0.05$) despite being calibrated and taking readings simultaneously, as well as that certain distance intervals may present significant differences for the sensors or as the surface type may slightly affect the veracity of data.

Keywords – Electronics, Water, IoT, Ultrasonic Sensor, Distance, Accuracy.

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0 busca la optimización y mejoría de procesos de automatización y manufactura mediante el uso de tecnologías inteligentes como la inteligencia artificial y el internet de las cosas (IoT). La implementación de estas nuevas tecnologías está altamente correlacionado con el nivel económico e intelectual del país, por consecuencia la brecha en el ritmo de producción es mayor entre países desarrollados y subdesarrollados [1]. En México el impacto de la industria 4.0 solo ha sido notorio en pocas empresas de la industria automotriz, y esto se debe a la escasez de tecnología, materiales y sobre todo, la falta de personal con los conocimientos necesarios para manejar las nuevas tecnologías [2].

Las tecnologías IoT surgen como una forma de comunicación entre distintos dispositivos y es considerada una de las tecnologías más influyentes en la actualidad por su amplio margen de aplicaciones en el área de la salud, deporte, industria, seguridad, entre otras [3]-[10].

En la industria agropecuaria se tiene la agricultura de precisión (AP), la cual consiste en la implementación de sistemas de geolocalización, automatización y monitoreo en el campo. El IoT permite en la AP el desarrollo de aplicaciones como el registro de niveles de humedad del suelo o la automatización y monitoreo de cultivos en un invernadero, sin embargo, para cualquier tipo de sistema de IoT es necesario conocer las características del tipo de sensores a utilizar para el

desarrollo de una aplicación de buena calidad a bajo costo.

Unos de los sensores más comunes en la industria son los sensores ultrasónicos. Este tipo de sensores emiten ondas sonoras imperceptibles para el oído humano que rebotan al entrar en contacto con una superficie, permitiendo calcular la distancia del sensor a la superficie ya que la onda de sonido viaja a una velocidad constante [11]. Normalmente este tipo de sensor se encuentra en la industria en aplicaciones como la medición en cisternas o contenedores, sistemas antichoque de automóviles y sistemas de seguridad, asimismo en el área de la agricultura se han generado aplicaciones como la detección de árboles en sistemas de conducción automática o la detección de plagas en invernaderos [bbbbbb]-[aaaaaa].

La comparativa que se realizó tiene como objetivo la evaluación de la exactitud de distintos sensores ultrasónicos respecto a diferentes distancias y superficies. En este trabajo se considera un proceso de selección previo a un proceso de automatización en el área de la agricultura para el estudio de suelos de agostaderos, para tal fin se tomaron lecturas de la distancia respecto a una superficie líquida y una sólida.

2. CONTENIDO

Se realizó una comparación estadística entre 4 sensores ultrasónicos comerciales y para ello se consideraron las siguientes etapas: instalación de software, selección de materiales, instalación y calibración de sensores, funcionamiento del sistema y diseño experimental.

2.1 Instalación de Software.

Se utiliza el programa IDE de Arduino ver 2.0.3 para Windows 10 (64 bits), asimismo se configuró el ESP-32 Devkit 1 para su utilización en ese software.

2.2 Selección de materiales.

Para el procesamiento de datos se consideró el uso del μ C ESP-32 Devkit 1 por su capacidad de manejo de datos y su fácil programación por medio del IDE de Arduino. El ESP-32 Devkit 1 cuenta con una memoria Flash de 4 MB, memoria SRAM de 500 KB, procesador de 32 bits y tiene conectividad inalámbrica por medio de Bluetooth y Wifi.

2.2.1 Sensores.

En la lectura de datos se seleccionaron distintos sensores ultrasónicos comerciales:

HC-SR04 se eligió por su disponibilidad en el mercado y su alta compatibilidad con el IDE de Arduino^{MR}. En cuanto a su alimentación tiene un consumo de baja energía de 15 mA y un voltaje de operación de 5 V, de acuerdo a su funcionamiento

tiene un tiempo mínimo de espera de 20 ms entre lecturas y un alcance de 4.5 m.

Grove-Ultrasonic ranger V2.0 se utilizó por el reciente impacto de Sseed Studio^{MR} en el mercado de la electrónica, por su adaptabilidad a distintas marcas de μ C, asimismo con una alimentación de 3.3 V cuenta con una gran estabilidad y su alcance de 3.5 m.

JSN-SR04T debido a que cuenta con un módulo resistente al agua y con alta protección ante interferencias. Este sensor se usa normalmente en aplicaciones de seguridad y control industrial por su alta viabilidad al tener un rango de 0.25 m a 4.5 m y por su bajo consumo de 30 mA y alimentación de 5 V.

US-016 por su bajo consumo de 3.8 mA, un voltaje de operación de 5 V y su alcance de 3 m, a diferencia de otros sensores que arrojan como lectura el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de onda, el US-016 tiene como dato de salida una señal de voltaje analógica proporcional a la distancia medida.

2.2.2 Material de referencia.

Los sensores ultrasónicos elegidos funcionan gracias a que tienen un objeto de referencia o superficie que permite que la onda emitida rebote, sin embargo las lecturas de este tipo de sensores se puede ver afectada por el tamaño, homogeneidad y solidez de la superficie [18]-[20].

Para la evaluación de los sensores se probaron dos superficies homogéneas; una superficie sólida (lamina de melamina) de 30 cm x 25 cm y una superficie líquida (agua corriente) contenida en un recipiente de 30 cm x 21 cm. En ambas superficies se realizaron las pruebas mediante el mismo procedimiento en un ambiente controlado.

2.3 Instalación de sensores.

Para la instalación de los sensores en el experimento fue necesario el uso de fixturas modeladas en 3D por medio del software FreeCAD^{MR} (Fig. 1), las cuales permitieron que la posición de los sensores sea fija al tomar las medidas para su calibración, con el fin de obtener el mayor grado de certeza en los valores obtenidos y evaluar su exactitud. Las medidas de los sensores fueron obtenidas de las hojas de especificaciones de datos de los fabricantes de los sensores.

Como base del sistema se utilizó un trípode ajustable de la marca Kinyo^{MR} con una altura ajustable de 58.42 cm a 149.86 cm de alto. Se diseñó un adaptador para conectar las fixturas al trípode como se muestra en la Fig. 2.

Para la integración de los sensores al trípode fue necesario el uso de una impresora 3D, por ello se trabajó con la impresora Ender 3 V2 Creality^{MR}. Como material de impresión se utilizó filamento PLA Steren^{MR} de 0.75 mm de diámetro.

Fig. 1.- Fixturas de sensores.



Fuente: Autoría propia.

2.4 Calibración de sensores.

El proceso de calibración de sensores se realizó capturando diferentes distancias respecto a una superficie sólida como referencia. Posteriormente las medidas obtenidas por los sensores fueron registradas en una hoja de cálculo y con ello se obtuvo la función de la pendiente correspondiente de cada sensor, posteriormente fueron implementadas en el código principal.

Para ello se realizaron lecturas a 10 distancias distintas con un intervalo de 5 cm entre ellas. El rango de distancia va de los 5 a los 50 cm, en el caso del sensor JSN-SR04T el rango fue de 25 a 75 cm.

Para determinar la función de la pendiente se utilizaron las siguientes fórmulas del método de mínimos cuadrados [21]:

$$m = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (1)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (2)$$

Donde m = pendiente de la función; b = ordenada de la función; y = valores reales; x = lecturas sin ajuste.

2.5 Funcionamiento del sistema.

Al inicio el μC realizó la conexión a internet y al servidor de la plataforma ThingSpeak, posteriormente esperó la señal de un interruptor para iniciar la toma de lecturas. El uso de fixturas personalizadas para los sensores permitió la toma de lecturas simultánea de los cuatro sensores respecto a una misma distancia como se muestra en la Fig. 3.

Para asegurar una correcta toma de datos se tiene un tiempo de espera de 5 segundos en los cuales se descartan las lecturas para evitar picos de voltaje y tener una señal más estable, al terminar ese tiempo se obtuvo el promedio de las siguientes 50 lecturas que representan una repetición y se envía a la plataforma ThingSpeak.

2.6 Diseño experimental.

Se realizó un diseño completamente al azar con arreglo trifactorial donde los factores evaluados son el tipo de sensor (A), el tipo de superficie (B) y la distancia (C). Para el factor C se utilizaron 10

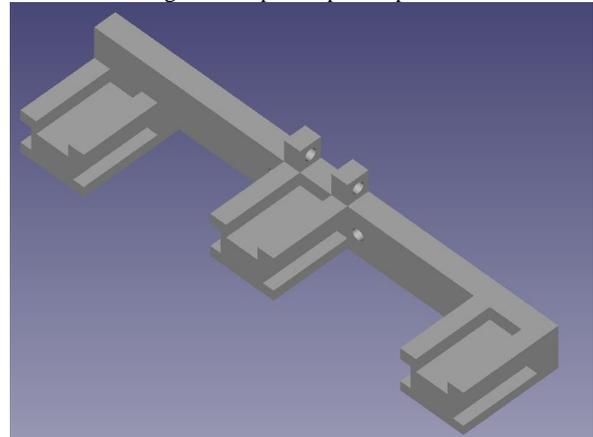
distancias diferentes tomadas cada 5 cm hasta llegar a los 50 cm. La combinación de los factores generó 80 tratamientos, se realizaron 3 repeticiones por tratamiento.

Para evaluar los resultados se realizó un ANOVA con significancia del 5% y la prueba de Tukey por medio del software RStudio^{MR}.

Para una buena viabilidad de las lecturas primeramente se utilizó un nivel de burbuja tanto en la superficie como en la posición de los sensores para asegurar que la onda emitida sea paralela a la superficie como se muestra en la Fig. 4. Posteriormente se ajustó la altura del trípode de acuerdo a las distancias de referencia con una cinta métrica en ambas superficies.

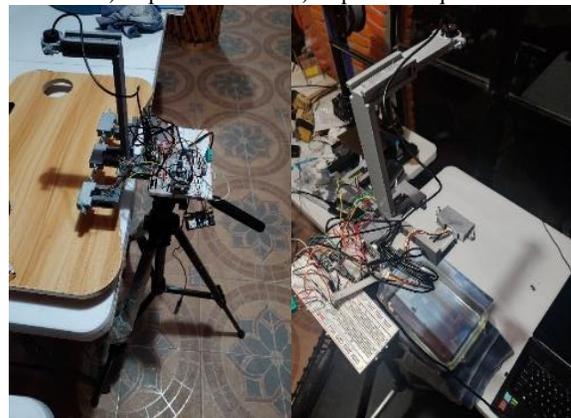
Los datos almacenados en la nube fueron transferidos a una hoja de cálculo, posteriormente se realizó una resta entre la lectura y la distancia real obteniendo así el Error Promedio (E.P.) que se utilizó como nuestra variable dependiente.

Fig. 2.- Adaptador para trípode.



Fuente: Autoría propia.

Fig. 3.- Toma de lecturas en distintas superficies.
a) Superficie solida b) Superficie liquida



Fuente: Autoría propia.

Fig. 4. Nivelación de sensores.



Fuente: Autoría propia.

2.7 Resultados y discusión.

Las lecturas obtenidas por triplicado para cada sensor se muestran en la Tabla 1. Se observa como en la distancia inicial el E.P. es bastante alto en el sensor US-016 a diferencia de los demás sensores. Asimismo, se observa un ligero aumento en el E.P. respecto al tipo de superficie empleada.

El ANOVA demostró que solamente los factores A y C presentan diferencias estadísticas ($P < 0.05$), mientras que para el factor B no se observaron diferencias estadísticas ($P > 0.05$). Para el E.P., en el factor A se observa cómo los sensores JSN-SR04T y Grove presentan la menor media perteneciendo a un mismo grupo, a diferencia de los sensores HC-SR04 y US-016 que pertenecen a grupos aislados, siendo este último el que mayor media presentó. En el factor C se generaron 6 grupos, en los cuales se observó como las distancias de 10 a 25 cm presentaron mayor inestabilidad, principalmente las distancias de 20 y 25 cm que mostraron las medias más altas y pertenecen a grupos aislados. En cambio el factor B demostró no tener diferencias significativas, sin embargo, al calcular el E.P. se logra apreciar un ligero aumento en este aproximadamente de 0.5 y 0.3 cm en los sensores JSN-SR04T y Grove, respectivamente, de acuerdo al tipo de superficie empleada como se muestra en la Fig. 5.

Respecto a la linealidad de los sensores JSN-SR04T y Grove en la Fig. 6, se observa cómo en una superficie líquida el sensor JSN presenta un valor de R^2 de 0.9994, ligeramente mayor a la R^2 de 0.9989 del sensor Grove.

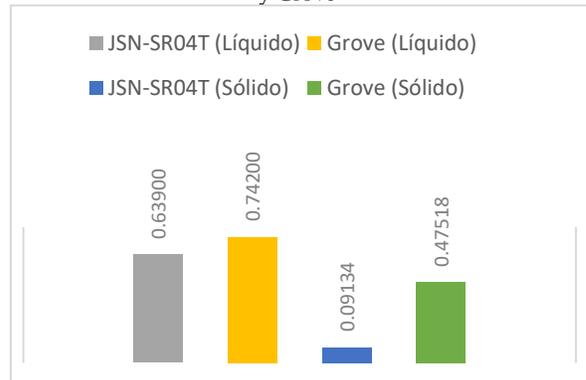
En relación al precio, los sensores JSN y Grove cuestan aproximadamente 180 y 80 pesos MXN respectivamente, ambos precios son relativamente bajos para aplicaciones de automatización e industria. Sin embargo, las condiciones de uso pueden condicionar la selección del sensor ya que las lecturas del sensor JSN son viables a partir de los 25 cm y las del sensor Grove a partir de los 2 cm, esto debido a sus rangos de operación.

Tabla 1. Error Promedio por sensor y superficie en distancia de 5 cm.

Sensor (A)	Superficie (B)	Distancia (C)	E.P.
US-016	Sólida	5	16.58
	Líquida		23.01
HC-SR04	Sólida	5	0.96
	Líquida		1.41
JSN-SR04T	Sólida	5	0.06
	Líquida		0.05
Grove	Sólida	5	0.06
	Líquida		0.05

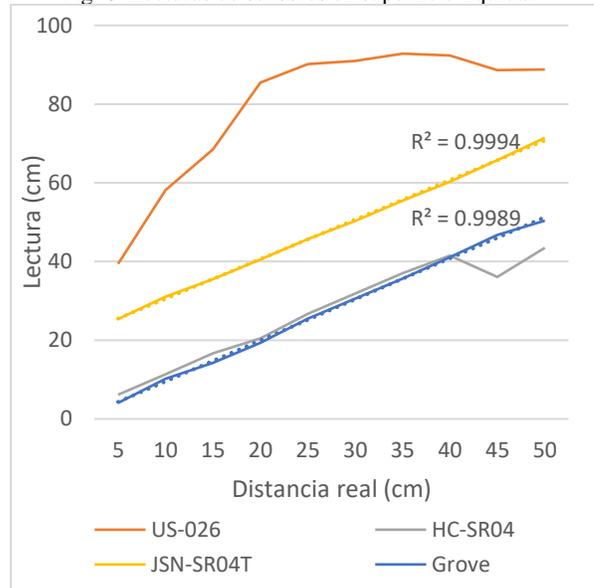
Fuente: Autoría propia.

Fig. 5. Error Promedio (cm) obtenido con los sensores JSN y Grove



Fuente: Autoría propia.

Fig. 6. Lecturas de sensores en superficie líquida.



Fuente: Autoría propia.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La elaboración de este experimento permitió comparar la exactitud de 4 sensores ultrasónicos, asimismo se tuvo un buen manejo de los datos en tiempo real por medio de la plataforma Thingspeak. Por lo tanto el μ C ESP-32 Devkit 1 es un elemento de bajo costo con la capacidad necesaria para realizar diversas tareas de manera simultánea como la toma y manejo de datos, asimismo, el sensor JSN-SR04T fue seleccionado como el sensor indicado por presentar el E.P. más bajo, la mejor linealidad, tener un precio económico y por tener su rango de operación. Ambos componentes electrónicos son ideales para el proceso de automatización a desarrollar.

El tipo de superficie no influye significativamente en los resultados, sin embargo el ligero aumento del E.P. demuestra como el cambio de superficie afecta ligeramente la veracidad de los datos respecto a la superficie original del proceso de calibración. Por lo tanto, es recomendable que en futuros proyectos donde se trabaje con una superficie líquida será necesario iniciar el proceso de calibración con una superficie de características similares.

4. REFERENCIAS

- [1] G. Torres, "Industria 4.0 en México," Urany Sa De Cv, Querétaro, México, 2021. Accessed: Jan. 6, 2024. [Online]. Available: <https://urany.net/blog/industria-4-0-en-mexico>
- [2] M. Nieblas, "Cuando el destino nos alcance... con la industria 4.0," Deloitte Touche Tohmatsu Limited, Cd. de México, México, Accessed: Jan. 6, 2024. [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/mx/es/pages/dnoticias/articulos/desarrollo-de-industria-4-0.html>
- [3] F. Rivera, "Estos son los retos de México frente a la cuarta revolución industrial o industria 4.0," Forbes, 2023. Accessed: Jan. 6, 2024. [Online]. Available: <https://www.forbes.com.mx/estos-son-los-retos-de-mexico-frente-a-la-cuarta-revolucion-industrial-o-industria-4-0/>
- [4] C. B. Ynzunza, J. M. Izar, J. G. Bocarando, F. Aguilar and M. Larios, "El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras," *Conciencia Tecnológica*, Aguascalientes, México, 2017, No. 54.
- [5] M. Cotteleer and B. Sniderman, "Forces of change: industry 4.0," *Deloitte Insights*, 2017.
- [6] P. Perez and S. Llana, "La instrumentación en la biomecánica deportiva," *Journal of Human Sport and Exercise*, Alicante, España, vol. 2, no. 2 pp. 26-4, 2007.
- [7] D. Castro, W. Coral, J. Cabra, J. Colorado, D. Méndez and L. Trujillo, "Survey on IoT solutions applied to healthcare," *DYNA*, Medellín, Colombia, vol. 84, no. 203, pp. 192-200, 2017.
- [8] Y. Alvarez, M. A. Leguizamón-Páez and T. J. Londoño, "Risks and security solutions existing in the Internet of things (IoT) in relation to big data," *Ingeniería y Competitividad*, Bogotá, Colombia, vol. 23, no. 1, 2021.
- [9] D. Ordóñez-Camacho, "Reduciendo la brecha de seguridad del IoT con una arquitectura de microservicios basada en TLS y OAuth2," *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, Ecuador, No. 25, 2021.
- [10] M. Castaño-Gómez, A. M. López-Echeverry and P. A. Villa-Sánchez, "Review of the use of IoT technologies and devices in physical security systems," *Ingeniería y Competitividad*, Pereira, Colombia, vol. 24, no. 1, 2022.
- [11] E. Santos De La Cruz, N. Cancino, J. Yenque, D. Ramírez and M. Palomino, "El ultrasonido y su aplicación," *Industrial Data*, Lima, Perú, vol. 8 no. 1, pp. 25-28, 2005.
- [12] N. M. Tharmin, N. M. Arshad, R. Adnan, R. Sam, N. A. Razak, M. F. Misnan and S. F. Mahmud, "Tree detection profile using a single non-intrusive ultrasonic sensor for inter-row tracking application in agriculture field," *2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013, pp. 310-313.
- [13] A. S. Ahouandjinou, P. M. Kiki and K. M. Assogba, "Smart environment monitoring system by using sensors ultrasonic detection of farm pests," *2017 2nd International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies (BioSMART)*, Paris, France, 2017, pp. 1-5.
- [14] E. Szilagyi, S. Meza, D. Petreus, T. Patarau and R. Etz, "Application of Ultrasonic Sensors in Mapping Vineyard Parameters," *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Pitesti, Romania, 2020, pp. 150-154.
- [15] G. G. Naidu and G. P. Ramesh, "Mango Leaf Disease Detection Using Ultrasonic Sensor," *2022 IEEE International Conference on Data Science and Information System (ICDSIS)*, Hassan, India, 2022, pp. 1-5.
- [16] H. Zhao and Z. Wang, "Motion Measurement Using Inertial Sensors, Ultrasonic Sensors, and Magnetometers With Extended Kalman Filter for Data Fusion," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 943-953, 2012.
- [17] A. Rocchi, E. Santecchia, F. Ciciulla, P. Mengucci and G. Barucca, "Characterization and Optimization of Level Measurement by an Ultrasonic Sensor System," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 8, pp. 3077-3084, 2019.

[18] “Sensores ultrasónicos 101: respuestas a las preguntas más frecuentes,” Banner Eng., Minneapolis, EUA, Accessed: Jan. 6, 2024. [Online]. Available: <https://www.bannerengineering.com/mx/es/company-expert-insights/ultrasonic-sensors-101.html>.

[19] “Conocimientos sobre los sensores ultrasónicos (parte 1): tecnología y funcionalidad en unas pocas palabras,” Pepperl+Fuchs SE., Mannheim, Alemania, 2014. Accessed: Jan. 6, 2024. [Online]. Available: <https://www.pepperl-fuchs.com/mexico/es/24907.htm>.

[20] J. Smooth, “Comprender los sensores ultrasónicos,” Digikey Corp., 2021. Accessed: Jan. 6, 2024. [Online]. Available: <https://www.digikey.com.mx/es/articles/understanding-ultrasonic-sensors>.

[21] “Recta que mejor se ajusta (método de mínimos cuadrados),” Varsity Tutors, Misuri, EUA, Accessed: Jan. 6 2024. [Online]. Available: https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath_help/spanish/topics/line-of-best-fit.