

# Desarrollo de un prototipo de robot móvil autónomo con navegación basada en visión por computadora para la asistencia de adultos mayores dentro de entornos controlados

Ramírez Cruz Miranda Naian (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)<sup>1, \*</sup>, Silva Aguiar Sergio Rafael (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)<sup>1</sup>, Zermeño Escobedo Luis (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)<sup>1</sup>, Lomas Montaudon Yvonne (profesor responsable)<sup>1</sup>, Girón Nieto Huber (profesor asesor)<sup>1</sup> y Ochoa García Oliver (profesor asesor)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México

## Resumen

En las últimas décadas, la población de adultos mayores ha presentado un aumento significativo, por lo que su asistencia y cuidado se han vuelto desafíos importantes para las familias y el sector de salud pública en México. Esto ha motivado la investigación y desarrollo de soluciones innovadoras para ayudar a satisfacer las necesidades de esta demografía en crecimiento. En la actualidad, los robots móviles autónomos están mayormente enfocados al sector industrial, sin embargo, el constante avance tecnológico abre paso a su inclusión en áreas de servicio y asistencia, planteando nuevos desafíos para la elaboración de robots capaces de operar en ambientes dinámicos con interacción humana. El presente artículo introduce el desarrollo de un prototipo de robot móvil autónomo con navegación basada en visión por computadora para la asistencia de adultos mayores dentro de entornos controlados. Para ello, se caracterizaron los requerimientos mecánicos, electrónicos y de control necesarios para su funcionamiento. Se diseñaron sistemas de navegación y reconocimiento automático de voz para el seguimiento de personas por medio de una cámara de profundidad. Se prototipó un modelo de media fidelidad a partir de un diseño realizado en software CAD, e integraron los componentes mecánicos y electrónicos. Finalmente, se validó mediante pruebas el comportamiento integral del prototipo dentro del entorno establecido. Se presenta un prototipo de robot de servicio, responsivo a comandos de voz, capaz de analizar su entorno mediante la captura y procesamiento de imágenes, para el seguimiento del beneficiario con el propósito de asistirlo al transportar sus pertenencias.

**Palabras clave:** Robótica, robot de servicio, visión por computadora, cámara de profundidad.

**\*Autor Corresponsal:** 188008@iberopuebla.mx

## Introducción

La población de adultos mayores en México ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas. Este incremento se debe en gran parte al aumento de la esperanza de vida y a la disminución de la tasa de natalidad en el país. Según la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo Nueva Edición (ENOEN) realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para el segundo trimestre de 2022, en México había 17,958,707 personas de la tercera edad (60 años o más), representando el 14% de la población total del país. En contraste, se registró un incremento de aproximadamente el 23% en la esperanza de vida promedio en México [1]. Al envejecer, es común comenzar a presentar complicaciones de salud como limitaciones físicas, pérdida de memoria, entre otras. Estas pueden comprometer la independencia y movilidad de las personas, limitando su capacidad de realizar tareas cotidianas como transportar objetos o realizar traslados constantes para buscar sus pertenencias alrededor de su hogar [2].

La asistencia y cuidado de personas mayores se ha vuelto un desafío importante para las familias y el sector de salud pública en México, por lo que se ha motivado la investigación y desarrollo de soluciones innovadoras para ayudar a satisfacer las necesidades de esta población en crecimiento. Actualmente los robots móviles autónomos (AMR) son mayormente aplicados al sector industrial, sin embargo, los avances tecnológicos están abriendo paso a su aplicación en áreas de servicio y asistencia, dejando de lado

las tareas monótonas y repetitivas de la industria, y planteando nuevos desafíos para el desarrollo de robots capaces de operar en ambientes dinámicos con interacción humana [3].

El autor Marc Prensky presenta en su teoría sobre la división de la población en función de su relación con la tecnología, la distinción de los migrantes digitales como aquellas personas que la han adquirido en algún momento de su vida, por lo que pueden sentirse abrumados o intimidados, además de no contar con la misma comprensión intuitiva que el resto de la población [4], [5]. Al formar parte de la categoría de migrantes digitales, los adultos mayores pueden verse especialmente afectados por la brecha digital, como se demuestra en la revisión de Prospectos de Población Mundial del 2015 realizada por la ONU, donde se establece a las personas de la tercera edad como el sector de la población con mayor rezago tecnológico [6]. Estudios han demostrado que la inclusión de la tecnología en la vida de los adultos mayores puede ser una gran herramienta para dar solución a muchos de los problemas que se presentan a lo largo de esta etapa, entre ellos, la necesidad de asistencia para trasladar sus pertenencias u objetos en general [7], [8]. Los robots de servicio pueden contribuir a la movilidad e independencia de los adultos mayores, al permitirles realizar sus tareas cotidianas de manera más cómoda y segura, sin depender de la ayuda de otras personas. Esto se traduce en una mayor autonomía para desenvolverse en su día a día, disminuyendo el riesgo de posibles caídas o lesiones. Implementar este tipo de tecnologías en los hogares ayuda a disminuir la demanda y cargas de trabajo de familiares,

amigos o personal médico que se dedique al cuidado del adulto mayor en cuestión, reduciendo el número de accidentes y brindándole mayor independencia.

Es indispensable desarrollar tecnologías que tomen en cuenta a los sectores de la población más vulnerables. La inclusión de robots en los hogares para asistir en tareas cotidianas abre el panorama de la democratización tecnológica, permitiendo a un mayor número de personas disfrutar de los avances en el campo. A pesar de su innegable utilidad y contribución al ámbito industrial, existe una gran área de oportunidad desde el enfoque social para el desarrollo de tecnologías innovadoras.

Con la creciente población de adultos mayores, su cuidado se ha vuelto un desafío cada vez mayor, lo que ha motivado la investigación en este ámbito. En la actualidad, existen robots de servicio con un amplio espectro de habilidades, desde realizar mediciones de signos vitales, ofrecer recordatorios de medicación, detección de accidentes o transporte de objetos, hasta ayudar al bienestar físico y emocional de las personas, manteniendo conversaciones e interactuando con el ser humano [9]–[11].

Este tipo de tecnología ha sido objeto de estudios que evalúan sus efectos psicológicos, fisiológicos y sociales en los beneficiarios. además, del papel de la robótica en el cuidado de la salud y bienestar de los adultos mayores. En general, los avances en el área tienen como objetivo mejorar la calidad de vida de los usuarios y aliviar la carga de aquellos encargados de su cuidado [12].

Se propone el desarrollo de un robot de servicio con la capacidad de interactuar con el usuario mediante la comprensión de comandos de voz y de navegar de manera autónoma dentro de un entorno controlado. El sistema de navegación para el seguimiento de personas se basa en la captura de imágenes tridimensionales por medio de una cámara de profundidad para la identificación de una imagen objetivo. Mientras tanto, el sistema de comprensión de lenguaje natural para la interacción humano-máquina, se genera a partir de la implementación del sistema de reconocimiento automático de voz, Whisper, desarrollado por la empresa OpenAI [13], [14].

Al ser una tecnología destinada a la asistencia de adultos mayores con limitada rapidez o agilidad de movimiento, el robot debe ser capaz de identificar al usuario para poder mantener una distancia de seguridad, con el propósito de evitar accidentes al colisionar con su entorno o con el propio usuario, mientras lo asiste en el traslado de objetos.

Uno de los aspectos más importantes para los robots de servicio es la capacidad de adecuarse a las necesidades del usuario y entorno donde serán aplicados, contemplando factores como el tamaño o las capacidades de movimiento y carga requeridos. Con el propósito de asegurar una operación cómoda y segura, se requiere de un diseño ergonómico que permita realizar actividades como colocar objetos en la bandeja del robot con el brazo extendido, sin necesidad de agacharse o levantar cargas pesadas, para reducir el esfuerzo necesario al transportar o buscar objetos, mientras se mantiene la habilidad del robot para navegar dentro del hogar.

Como objetivo general del proyecto se planteó desarrollar un prototipo de robot móvil autónomo con navegación basada

en visión por computadora para la asistencia de adultos mayores dentro de entornos controlados. Para lograrlo se establecieron como objetivos específicos caracterizar los requerimientos mecánicos, electrónicos y de control necesarios para el funcionamiento del robot móvil autónomo, diseñar los sistemas de intercomunicación y navegación para el seguimiento de personas mediante la cámara de profundidad Intel RealSense D455, prototipar un modelo de media fidelidad a partir de un diseño realizado en software CAD, y, finalmente, validar mediante pruebas de operación el comportamiento integral del prototipo dentro del entorno establecido.

## Metodología

### *Diseño mecánico*

En primera instancia, se identificaron las características y necesidades particulares del usuario y entorno de operación del robot, en términos de carga, tamaño y movilidad para adaptarse a las limitaciones físicas de las personas de la tercera edad. Para garantizar la ergonomía del prototipo propuesto, se solicitó a 20 adultos mayores de 60 años (10 hombres y 10 mujeres) su colaboración para establecer las dimensiones de altura del robot. Para las dimensiones de largo y ancho del robot, se contemplaron las medidas estándar de una puerta, de modo que el robot fuera capaz de atravesar a través de ella de una de manera segura. Una vez establecidas las dimensiones, se revisaron las tecnologías y diseños existentes de robots móviles autónomos, en concreto de aquellos con habilidades de seguimiento de objetivos y responsividad por medio de comandos de voz; de igual manera se estudiaron las técnicas que permitieran desarrollar las habilidades básicas del robot (navegación e interacción). Para el seguimiento de personas se optó por el reconocimiento, por medio de la cámara de profundidad Intel RealSense D455, de un QR con un identificador único asociado. De este modo, el robot es capaz de comparar su orientación y distancia de separación respecto a la persona que está asistiendo. Para la interacción humano-máquina y la comprensión de lenguaje natural, se implementó el sistema de reconocimiento automático de voz ‘Whisper’, desarrollado por OpenAI de manera local, evitando la dependencia de una conexión a internet para su funcionamiento.

Se seleccionan los materiales y dispositivos necesarios para el prototipado del robot, y se diseñaron los modelos CAD de la estructura interna mediante el software de CATIA. Para el soporte y aislamiento de los elementos electrónicos del robot, se diseñaron dos placas, una superior y otra inferior, que fueron cortadas en MDF de 15mm (Fig. 1 y Fig. 2).

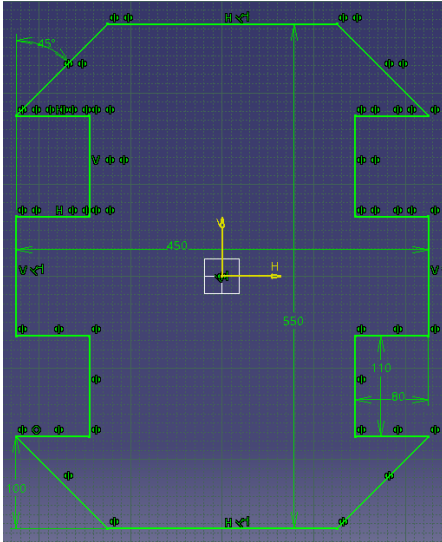


Fig. 1. Plano base inferior.

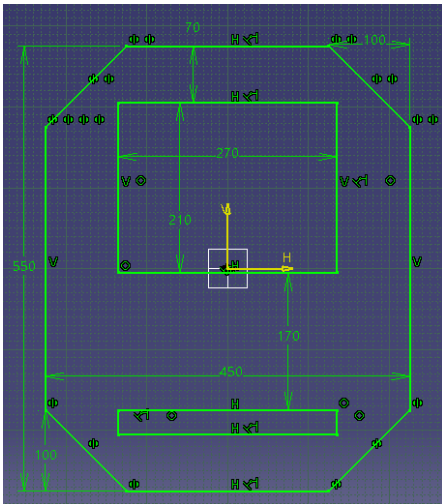


Fig. 2. Plano base superior.

Se seleccionaron llantas omnidireccionales para garantizar una navegación adecuada dentro del escenario propuesto, prescindiendo de un radio de giro demasiado amplio. Debido a la naturaleza de las llantas, se requirió asignar a cada una de ellas, un motor independiente. Se imprimieron en 3D con filamento PLA las bases para el soporte de los motores (Fig. 3), y se maquinaron ejes para el acoplamiento de llantas y motores (Fig. 4).

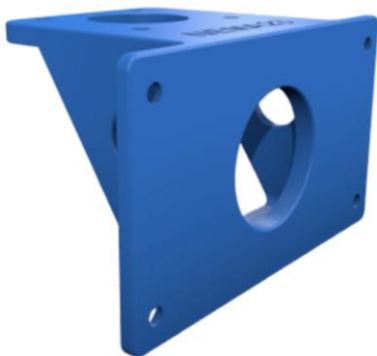


Fig. 3. Base para motores.

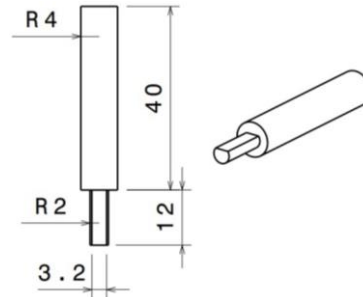


Fig. 4. Eje de conexión llanta-motor.

Se unieron las llantas, ejes y motores por medio de coples, colocando chumaceras para brindar mayor soporte y prevenir posibles fracturas por cortante o torsión. Los motores se colocaron en la parte inferior de la estructura, a través de las bases impresas en 3D, como se muestra en la Fig. 5.

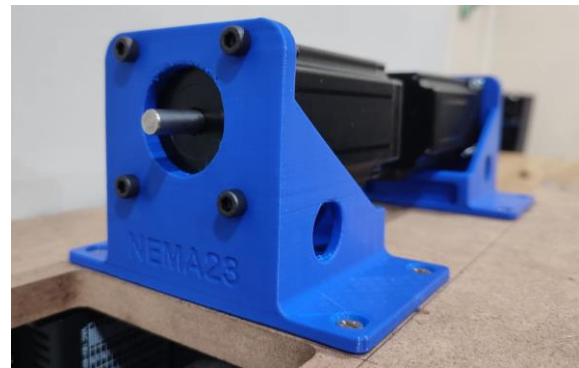


Fig. 5. Base motor.

El acoplamiento de llantas y motores descrito se muestra en la Fig. 6 y la distribución del resto de los elementos (llantas, motores y drivers) de la estructura interna en la Fig. 7.

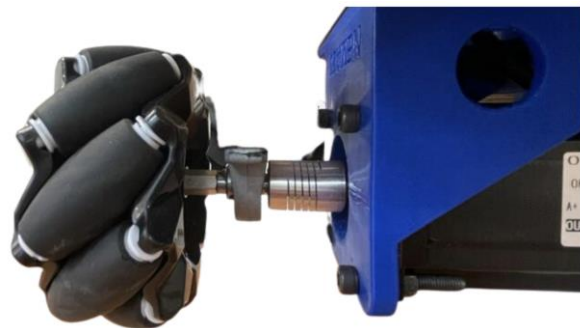


Fig. 6. Acoplamiento motor-eje-llanta.



Fig. 7. Distribución estructura interna (placas, llantas, motores y drivers).

La placa superior se cortó por láser en MDF de 3mm, pues su función únicamente es aislar y proteger del calor generado por baterías, drivers y motores, a los objetos colocados dentro del contenedor; para sostener la estructura se cortaron 5 columnas de perfil item de 1 pulgada (Fig. 8). Finalmente, se cablearon, soldaron y unieron los componentes electrónicos y mecánicos. El ensamble final de la estructura interna se muestra en la Fig. 9.



Fig. 8. Soportes estructura interna.



Fig. 9. Ensamble estructura interna (mecánica y electrónica).

Para la estructura externa del robot, se diseñó una carcasa que pudiese fungir como contenedor para proteger y transportar las pertenencias del usuario; como material para su elaboración se seleccionó MDF de 3mm. En la Fig. 10 se muestra el modelo CAD de la carcasa diseñada.

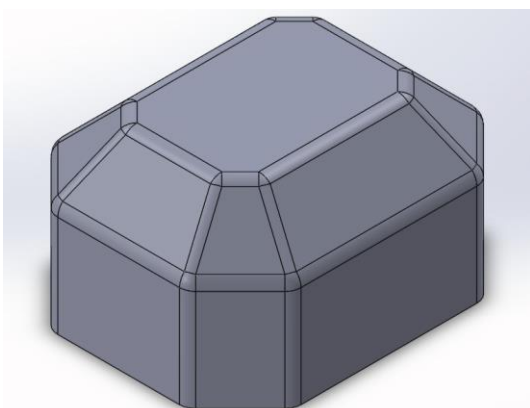


Fig. 10. Diseño carcasa exterior.

Finalmente, se fijó la carcasa a la parte superior de la estructura interna colocando una compuerta para acceder a

las baterías y otra para proteger los objetos colocados por el usuario dentro del contenedor (Fig. 11).



Fig. 11. Compuertas.

#### *Codificación de módulos básicos*

A continuación, se explica la operación de los módulos básicos y su codificación. Para la navegación y seguimiento de personas, se implementó la librería Aruco, a través de OpenCV, para generar un QR con un dígito identificador (ID) asignado (Fig. 12), para la estimación a través de coordenadas de la orientación del robot respecto a la persona seguida. Para ello, se identifica el ID dentro del campo de visión de la cámara, obteniendo sus coordenadas dentro de un plano dividido en tres secciones a lo largo del eje X (derecha, izquierda y centro); esto permite al robot conocer la posición del usuario y replanificar su trayectoria. Una vez detectado el QR, para saber la distancia de separación del robot respecto a la persona seguida, se generó una matriz de puntos a partir de la imagen de profundidad de la cámara. Con esta, se calcula la distancia, determinando si es necesario detenerse o continuar la marcha para mantener la distancia de seguridad establecida.

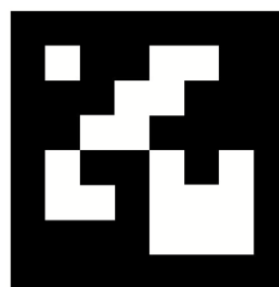


Fig. 12. QR Aruco.

Para la interacción humano-máquina, se implementó una etapa de comprensión de lenguaje natural, mediante el sistema de reconocimiento automático del habla, Whisper. En primer lugar, consta de un detector de amplitudes, modulado para las frecuencias propias de la voz humana. Una vez identificado el comienzo de la instrucción, se graba, transcribe e interpreta en busca de comandos válidos, como comenzar o dejar de seguir; una vez encontrados, se activan los elementos necesarios para realizar la tarea solicitada.

Para el control de motores se utilizó la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi Pico. Por medio del puerto serial se reciben las



indicaciones de navegación obtenidas a través de la cámara de profundidad, y se activa cada uno de los motores en la dirección adecuada para realizar el movimiento indicado. En la Fig. 13 se muestran las combinaciones de giro implementadas para cada movimiento.

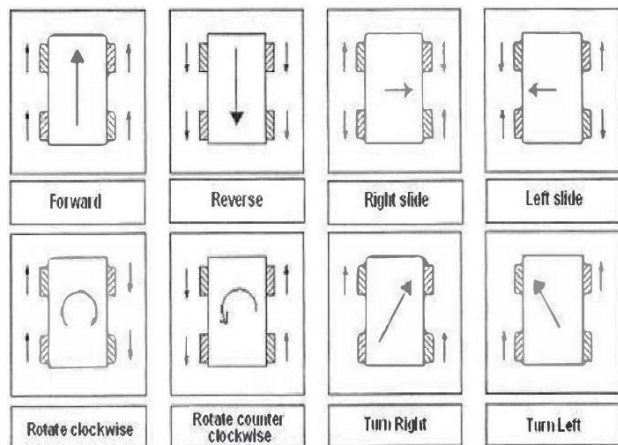


Fig. 13. Dirección llantas omnidireccionales.

### Diseño de pruebas

Con el propósito de comprobar la operación integral del prototipo, se diseñó un entorno de características específicas, donde el robot pudiese realizar diversas tareas que demanden cada una de sus habilidades. Se construyó una pista de ensayo con distintos obstáculos y trayectos a seguir, para evaluar el funcionamiento de los módulos básicos y su interacción entre sí. Al ser destinado para operar en hogares,

se delimitó un espacio de 16m<sup>2</sup>, simulando el área de sala-comedor de una casa.

Se realizaron 10 pruebas en cada uno de los experimentos propuestos, descritos a continuación, y se registraron los resultados; en cada uno de ellos se aumenta progresivamente la dificultad al combinarse las habilidades necesarias para completarlos.

Para el primer escenario se indicó al robot cuándo comenzar y dejar de seguir al usuario, en un área despejada y únicamente en línea recta. En este experimento se evalúa la responsividad a comandos de voz, el seguimiento simple de personas y la navegación básica manteniendo una distancia de seguridad.

En el segundo escenario se solicita al robot empezar y dejar de seguir, mientras el usuario cambia de dirección o da vueltas alrededor de un área despejada. En este experimento se evalúa la responsividad a comandos de voz, el seguimiento avanzado de personas y la replanificación de ruta manteniendo la distancia de seguridad establecida.

En el tercer escenario se solicita al robot empezar y dejar de seguir al usuario, mientras este cambia de dirección o da vueltas alrededor de un área con distintos obstáculos como sillas, una mesa o cajas de cartón. Estos elementos se movieron alrededor del espacio de forma aleatoria entre pruebas para comprobar el comportamiento del robot en distintos ambientes. En este experimento se evalúa la responsividad a comandos de voz, la evasión de obstáculos, el seguimiento avanzado de personas y la replanificación de ruta manteniendo la distancia de seguridad establecida.

## Resultados y Discusión

En este apartado se discuten los resultados obtenidos en cada una de las etapas de desarrollo del proyecto. En el estudio realizado con adultos mayores para establecer dimensiones adecuadas para brindar ergonomía al robot, se registraron los resultados descritos en la Tabla 1, donde los parámetros a medir fueron:

- Altura total de cada uno de los usuarios.
- Distancia entre el suelo y la punta de los dedos al tener el brazo extendido.
- Distancia entre el suelo y el puño de la mano, al tener el codo flexionando, formando un ángulo de 90° respecto al cuerpo con el antebrazo.

Tabla 1: Estudio para el establecimiento de dimensiones del robot.

| Usuario  | Altura (cm) | Distancia suelo-mano(cm) |                  |
|----------|-------------|--------------------------|------------------|
|          |             | Brazo extendido          | Brazo flexionado |
| Mujeres  |             |                          |                  |
| 1        | 164         | 65                       | 99               |
| 2        | 157         | 58                       | 92               |
| 3        | 155         | 54                       | 90               |
| 4        | 160         | 61                       | 95               |
| 5        | 159         | 58                       | 94               |
| 6        | 168         | 67                       | 103              |
| 7        | 158         | 59                       | 93               |
| 8        | 160         | 61                       | 95               |
| 9        | 162         | 64                       | 97               |
| 10       | 159         | 60                       | 94               |
| Hombres  |             |                          |                  |
| 1        | 178         | 73                       | 108              |
| 2        | 180         | 74                       | 109              |
| 3        | 173         | 65                       | 103              |
| 4        | 176         | 71                       | 106              |
| 5        | 178         | 73                       | 108              |
| 6        | 182         | 74                       | 110              |
| 7        | 174         | 67                       | 104              |
| 8        | 175         | 70                       | 105              |
| 9        | 180         | 74                       | 109              |
| 10       | 177         | 71                       | 106              |
| Promedio | 169         | 66                       | 101              |

A partir de los datos recopilados, se calculó el valor promedio general entre hombres y mujeres, obteniendo un valor de 66cm para la posición del brazo extendido verticalmente y 101cm para el brazo flexionado. A estos valores se les restó 30cm, dimensión correspondiente a una bolsa estándar al ser sostenida por las asas; se obtuvieron los valores de 36cm y 71cm respectivamente. Finalmente se estableció una tolerancia de 4cm, para que el usuario pudiese colocar la bolsa de forma cómoda y segura en la base del robot, sin tener que dejarla caer, pudiendo provocar daño de a los objetos contenidos en su interior; mediante esto, se estableció una altura de 40cm para el robot.

Para la construcción de la estructura del prototipo se optó por MDF debido a su accesibilidad y facilidad de uso. Sin embargo, este material es poco resistente al agua, lo que representa una desventaja importante. Los hogares y asilos son ambientes dinámicos en los que la probabilidad de accidentes como derrames de líquidos es bastante alta. Si bien la carcasa exterior puede fungir como protección para los elementos electrónicos, las bases y paredes de la estructura interna se pueden ver comprometidas ante este tipo de circunstancias.

Debido a demanda energética de los drives y motores, la autonomía de prototipo puede verse limitada a una ventana reducida de tiempo. Esto se traduce en la necesidad de cargar las baterías de manera constante, lo que puede ser tedioso o complicado para el usuario.

El establecimiento de dimensiones personalizadas para el beneficiario compromete la obtención de piezas comerciales o prefabricadas, pues estas se maquinan con medidas estandarizadas. Este problema puede resolverse mediante maquinado o impresión 3D, sin embargo, esto puede ser poco accesible fuera del contexto universitario, donde se cuenta con la maquinaria disponible. Esto puede ocasionar un incremento en los costos y dificultar la recreación del prototipo.

Debido al material seleccionado para la impresión 3D de las bases de los motores (filamento PLA), conforme se ensambló el resto de los elementos e incrementó el peso del prototipo, estas empezaron a ceder. Si bien no se presentó una ruptura por completo, su fractura demuestra la necesidad de sustituir las piezas impresas por piezas maquinadas en un material más resistente. También se requirió reforzar la mayoría de las uniones, sobre todo aquellas móviles, para evitar esfuerzos de flexión, torsión o cortante que pudiesen ocasionar la fractura de alguna de las piezas. La implementación de lo anterior permitió una operación adecuada y estable.

Las pruebas de movilidad mostraron que, al desplazarse, se producen vibraciones en la estructura del robot, provocando inestabilidad en la captura de imágenes de la cámara de profundidad. A través de la siguiente gráfica (Fig. 14), se visualiza la vibración captada por la cámara al desplazarse el robot; sin embargo, el robot es capaz de mantener una

navegación adecuada, con los parámetros de seguridad establecidos.

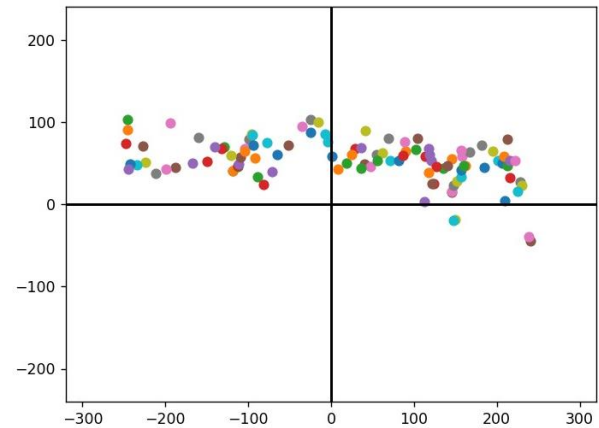


Fig. 14. Gráfica vibraciones cámara de profundidad.

El módulo de reconocimiento automático de voz permite al usuario hacer uso del robot sin necesidad de aprender a interactuar con interfaces o dispositivos específicos. Esto representa una ventaja para las personas de la tercera edad, quienes, al encontrarse en la categoría de migrantes digitales, pueden sentirse abrumadas o reacias de incluir nuevas tecnologías en sus vidas. A su vez, la navegación basada en visión por computadora permite al robot funcionar de forma autónoma, sin necesidad de que un usuario sin experiencia o técnicos especializados lo programen o configuren repetidamente.

Por otro lado, la implementación de técnicas de visión por computadora, y de reconocimiento automático de voz se traducen en una demanda de procesamiento bastante elevada. Si bien la capacidad computacional es suficiente para el funcionamiento del prototipo, al demandarse todos los módulos de manera simultánea, puede verse limitada la velocidad de respuesta del robot.

A pesar de las dificultades que surgieron a nivel computacional, de procesamiento, y mecánico durante el desarrollo del proyecto, se presenta como resultado un prototipo funcional capaz de realizar las tareas de seguimiento de personas y ejecución de comandos de voz. El prototipo final ensamblado se muestra en la Fig. 15.



Fig. 15. Prototipo final.

Para facilitar el proceso de análisis de resultados de las pruebas realizadas, se marcó el camino exacto que seguiría el usuario en cada uno de los escenarios, y se comparó con el recorrido realizado por el robot, a lo largo de 10 pruebas. En cada una de las pruebas se registró:

- Tiempo que le tomó al robot recorrer la distancia total establecida (8mtrs).
- Número de veces en las que debido a las vibraciones se perdió de vista al usuario, teniendo que detenerse.
- Precisión del camino tomado por el robot en relación con el recorrido original del usuario.

En las Tablas 2, 3 y 4, se muestran los resultados obtenidos, en términos de tiempo, repetibilidad y precisión en cada una de las pruebas.

Tabla 2: Resultados de la primera prueba de un camino recto en un espacio controlado de 8m de distancia.

| No. de medición | Tiempo (s) | Pérdida del objetivo | Precisión (cm) |
|-----------------|------------|----------------------|----------------|
| 1ra medición    | 13.1       | 2                    | 8.5            |
| 2da medición    | 14.49      | 1                    | 10             |
| 3ra medición    | 14.7       | 2                    | 7              |
| 4ta medición    | 14.65      | 2                    | 6.5            |
| 5ta medición    | 14.28      | 1                    | 7              |
| 6ta medición    | 14.26      | 2                    | 11             |
| 7ma medición    | 13.63      | 2                    | 8.5            |
| 8va medición    | 13.92      | 1                    | 9.5            |
| 9na medición    | 14.23      | 1                    | 8              |
| 10ma medición   | 14.14      | 2                    | 7.5            |

Tabla 3: Resultados de la segunda prueba de un movimiento Zig-Zag en un espacio controlado de 8 metros.

| No. de prueba | Tiempo (s) | Pérdida del objetivo | Precisión (cm) |
|---------------|------------|----------------------|----------------|
| 1ra medición  | 23.44      | 4                    | 12.5           |
| 2da medición  | 20.19      | 3                    | 11             |
| 3ra medición  | 23.35      | 3                    | 8              |
| 4ta medición  | 22.85      | 2                    | 11             |
| 5ta medición  | 22.37      | 4                    | 10.5           |
| 6ta medición  | 23.14      | 3                    | 8.5            |
| 7ma medición  | 23.08      | 4                    | 9              |
| 8va medición  | 22.94      | 4                    | 10.5           |
| 9na medición  | 22.76      | 3                    | 9.5            |
| 10ma medición | 22.42      | 2                    | 11.5           |

Tabla 4: Resultados de la tercera prueba en un espacio controlado de 8m con obstáculos.

| No. de prueba | Tiempo (s) | Pérdida del objetivo | Precisión (cm) |
|---------------|------------|----------------------|----------------|
| 1ra medición  | 28.45      | 3                    | 12             |
| 2da medición  | 28.16      | 4                    | 10.5           |
| 3ra medición  | 29.73      | 4                    | 10             |
| 4ta medición  | 28.84      | 3                    | 11.5           |
| 5ta medición  | 30.11      | 3                    | 9              |
| 6ta medición  | 29.76      | 4                    | 10.5           |
| 7ma medición  | 29.58      | 3                    | 11             |
| 8va medición  | 29.67      | 4                    | 10.5           |
| 9na medición  | 29.81      | 3                    | 12             |
| 10ma medición | 29.77      | 3                    | 9.5            |

A continuación, en las Fig. 16, 17 y 18, se presentan las gráficas descriptivas de cada rubro evaluado (tiempo, repetibilidad de pérdida de objetivo y precisión), donde se puede observar la funcionabilidad del prototipo en cada uno de los escenarios evaluados (línea recta, zigzag y obstáculos).

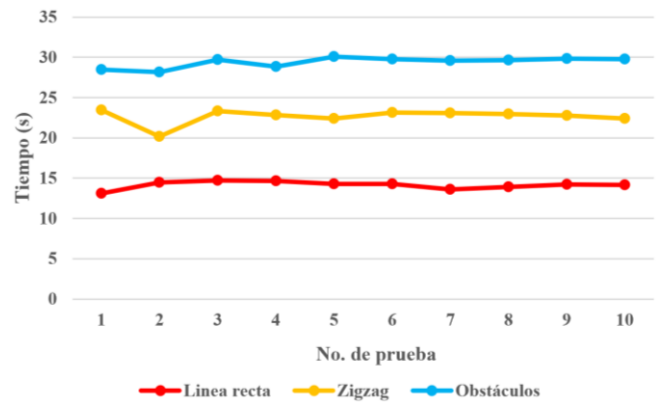


Fig. 16. Gráfica del tiempo requerido para completar las distintas pruebas.

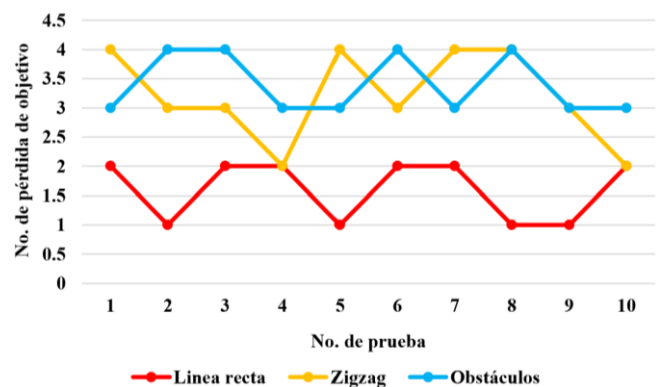


Fig. 17. Gráfica número de veces en que se perdió el objetivo durante las distintas pruebas.

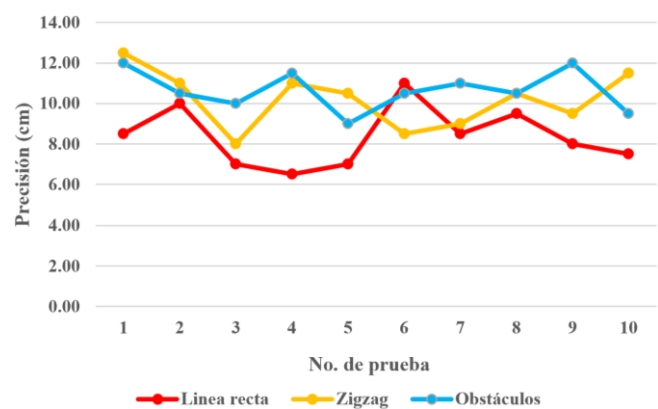


Fig. 18. Gráfica precisión registrada en las distintas pruebas.

Mediante las pruebas realizadas, se obtuvieron los valores promedio de 22.06 segundos como tiempo para completar el recorrido, 2.77 pérdidas de objetivo por prueba y 9.73 cm de precisión entre el camino seguido por el robot y el camino original del usuario. Se determinó que el prototipo físico del

robot es capaz de realizar las tareas establecidas de manera adecuada, mediante el funcionamiento en conjunto de los módulos básicos desarrollados.

### Conclusiones, perspectivas y recomendaciones

Dada la naturaleza de la robótica de servicio, la caracterización de los requerimientos específicos del usuario y el entorno de operación es uno de los pilares del desarrollo del proyecto. Gracias a los avances tecnológicos, la inclusión de robots en entornos dinámicos con personas ha incrementado su viabilidad. Sin embargo, se deben mantener presentes las limitaciones y normativas establecidas para garantizar la seguridad de los usuarios, conforme se realicen avances en el área.

El proyecto contribuye a abrir las puertas de la implementación robótica más allá de los entornos industriales, denotando la importancia de generar tecnologías inclusivas y de priorizar el diseño centrado en el usuario. Se destaca la importancia de garantizar que todos los sectores de la población puedan beneficiarse de los avances tecnológicos actuales.

La codificación de los módulos básicos contempla el mayor número escenarios posible, de manera que la robustez del programa pueda garantizar la prevención de posibles fallas. Cada uno de los módulos básicos fueron diseñados en relación directa con las necesidades de los usuarios identificadas, así como los elementos electromecánicos y de prototipado fueron seleccionados para cubrir los requerimientos específicos del proyecto. Las pruebas de validación demuestran que el prototipo opera de manera adecuada, presentando precisión y repetibilidad a lo largo de los diversos escenarios de prueba.

Se presenta un prototipo funcional capaz de realizar las tareas de seguimiento de personas, evasión de obstáculos y ejecución de comandos de voz, bajo las condiciones establecidas. El diseño centrado en el usuario garantiza que el robot sea capaz de cubrir los requerimientos específicos del beneficiario, considerando sus limitaciones físicas, preferencias y habilidades. Con esto se concluye que el diseño mecánico y electrónico óptimo para un robot destinado a la asistencia de personas es aquel que sea amigable con las perspectivas del usuario y adaptable a sus necesidades.

### Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, **“Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo Nueva Edición”**, sep. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/observances/older-persons->
- [2] M. Takahara, K. Nakamura, F. Huang, I. Tanev, y K. Shimohara, **“Caregiver Support System for Nursing Care for Older Adults; Caregiver Support System for Nursing Care for Older Adults”**, 2018, doi: 10.1109/APWConCSE.2018.00028.
- [3] L. E. Sucar *et al.*, **“Markovito Team Description Paper for RoboCup@Home 2020”**, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://robotic.inaoep.mx/>
- [4] M. Prensky, **“H. Sapiens Digital: From Digital Immigrants and Digital Natives to Digital Wisdom”**. [En línea]. Disponible en: <http://www.innovateonline.info/index.php?view=article&id=705>
- [5] G. Sunkel y H. Ullmann, **“Las personas mayores de América Latina en la era digital: superación de la brecha digital I”**, 1976.
- [6] United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division, **“World Population Prospects The 2015 Revision”**, New York, jul. 2015.
- [7] E. Vidal, **“Digital Literacy Program: reducing the Digital Gap of the Elderly: Experiences and Lessons Learned”**, doi: 10.1109/CONTIE49246.2019.00030.
- [8] C. Park, S. Kang, J. Kim, y J. Oh, **“A Study on Service Robot System for Elder Care”**, 2012, doi: 10.1109/URAI.2012.6463070.
- [9] M. Bates, **“Robotic Pets: A Senior’s Best Friend?”**, *IEEE Pulse*, vol. 10, 2019, doi: 10.1109/MPULS.2019.2922565.
- [10] M. E. Pollack *et al.*, **“Pearl: A Mobile Robotic Assistant for the Elderly”**.
- [11] Dipl.-I. C. Schaeffer y Dipl.-I. T. May, **“Care-O-bot™: A System for Assisting Elderly or Disabled Persons in Home Environments”**, 1999.
- [12] S. Li y Y. Liu, **“How Can Smart Service Robot Help the Elderly Aging in Place: Application, Prospect and Preference; How Can Smart Service Robot Help the Elderly Aging in Place: Application, Prospect and Preference”**, 2022 *IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTIS)*, 2022, doi: 10.1109/IoTIS56727.2022.9976005.
- [13] Y. Yoon, H. Yoon, y J. Kim, **“Person Following with a RGB-D Camera for Mobile Robot”**, 2012, doi: 10.1109/URAI.2012.6462968.
- [14] G. Fragapane, R. de Koster, F. Sgarbossa, y J. O. Strandhagen, **“Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda”**, *European Journal of Operational Research*, vol. 294, núm. 2. Elsevier B.V., pp. 405–426, el 16 de octubre de 2021. doi: 10.1016/j.ejor.2021.01.019.