

Autonomous Vehicle Prototype for Detecting and Collecting Plastic Bottles and Soda Cans

Abstract—The project focused on the development of a mobile autonomous vehicle prototype designed to detect, collect, and store plastic bottles and soda cans in a controlled environment. The addressed issue was the accumulation of these waste materials in spaces such as homes and laboratories, where manual collection was inefficient and no effective automated solutions existed. This project explored the integration of advanced technologies, such as autonomous navigation, computer vision, and robotics, to optimize the management of these recyclable waste materials. A V-model technical methodology was used for system development, along with a deductive scientific methodology for research and validation. The obtained results included the implementation of a functional prototype and the generation of applicable knowledge for future research and developments in the field of robotics and waste collection automation.

Keywords—Autonomous vehicle, robotics, computer vision, waste collection, autonomous navigation.

Prototipo de Vehículo Autónomo para Detectar y Recoger Botellas de Plástico y Latas de Refresco

Isabella Chavarro Agudelo¹, Carlos Arturo Beltrán Castro¹, Andrés-F Jiménez López, PhD.¹

¹Faculty of Basic Sciences and Engineering – Macrypt - Farmtechnology – Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia, isabella.chavarro@unillanos.edu.co, carlos.beltran.castro@unillanos.edu.co, ajimenez@unillanos.edu.co

Resumen– El proyecto se centró en el desarrollo de un prototipo de vehículo autónomo móvil diseñado para detectar, recoger y almacenar botellas plásticas y latas de gaseosa en un entorno controlado. La problemática abordada fue la acumulación de estos residuos en espacios como hogares y laboratorios, donde la recolección manual resultaba ineficiente y no existían soluciones automatizadas efectivas. Este proyecto exploró la integración de tecnologías avanzadas como la navegación autónoma, la visión por computadora y la robótica, con el fin de optimizar la gestión de estos residuos reciclables. Se empleó una metodología técnica V para el desarrollo del sistema y una metodología científica de deducción para la investigación y validación. Los resultados obtenidos incluyeron la implementación de un prototipo funcional y la generación de conocimientos aplicables a futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la robótica y la automatización de la recolección de residuos.

Palabras clave– Vehículo autónomo, robótica, visión por computadora, recolección de residuos, navegación autónoma.

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia, según el DANE, durante el año 2021 se generaron 30,31 millones de toneladas de residuos sólidos y productos residuales, de los cuales la tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos fue solo del 13.46% [1]. Por otro lado, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, la tasa de reciclaje en Colombia es mayor a la tasa promedio de América Latina, indicando una “ventaja competitiva” frente a otros países. Esto trae consigo consecuencias positivas como la generación de más de 60.000 empleos en áreas relacionadas con el reciclaje, iniciativas por parte de grandes compañías en la reutilización de materiales o economía circular, además de la creciente tasa de reciclaje año tras año [2].

En la capital del país, Bogotá, existe una tasa de aumento en la población del 1.4% anual, factor que afecta directamente la mayor generación y producción de desperdicios sólidos, los cuales son enviados al único vertedero de Bogotá por las autoridades competentes. Esto significa que las cantidades de residuos sólidos en este vertedero son exorbitantes [3].

Los plásticos y metales corresponden aproximadamente al 20% y 28% respectivamente del total de los residuos generados, desaprovechando en gran medida la parte que no es reciclada o reutilizada. Por tal razón, y reconociendo que los plásticos son altamente resistentes, duraderos en el tiempo y además están compuestos por derivados del petróleo, un recurso no renovable, deben aprovecharse estas características que permiten a los envases plásticos ser reciclados en un 100% hasta 5 veces, trayendo consigo un ahorro energético del 84% cuando se fabrican productos a partir de envases reciclados.

Por otro lado, se estima que el 70% de los envases de latas metálicas son fabricados con aluminio y el 30% restante con acero, proporcionando un ahorro energético del 95% y 75% respectivamente, con respecto a la fabricación a partir de materiales vírgenes. Estas latas son 100% reciclables el 100% de las veces, sin importar el material metálico con el cual estén fabricadas, debido a que para su proceso de reciclaje pasan por la etapa de fundición, lo que hace propicio el material para la generación de nuevos productos [4].

En hogares y laboratorios, los residuos reciclables se acumulan, y a pesar de que existen sistemas manuales de recolección, no se ha implementado ampliamente el uso de tecnología o sistemas automáticos para esta tarea. Existen productos comerciales que pueden limpiar el polvo y desechos pequeños del suelo, como aspiradoras autónomas, pero estas no recogen las latas o botellas plásticas del piso. Por lo tanto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué clase de sistema puede ser desarrollado para contribuir a la recolección de botellas plásticas y latas de gaseosa en un entorno controlado?

Si no se aborda este problema, la acumulación de residuos sólidos continuará, lo que puede resultar en un entorno más desordenado y potencialmente perjudicial para la salud. La ausencia de una solución automatizada también limita el avance hacia métodos más modernos y efectivos en la gestión de residuos reciclables.

El reciclaje de envases plásticos y latas metálicas trae consigo beneficios como el ahorro de energía, la reducción de necesidades por materia prima para la industria de la manufactura, el ahorro de recursos, la mejora en la calidad del aire, la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero, el descenso de los residuos destinados a incineración y la reducción de los residuos cuyo destino final es un vertedero o basurero [5].

Reducir estos residuos y aumentar la tasa de reciclaje es un reto difícil y existe una gran necesidad de implementar soluciones tecnológicas automatizadas que optimicen este proceso con el objetivo de contribuir a la solución de este problema [6]. Por lo tanto, se crea una gran oportunidad para que, por medio de la innovación y aplicación de tecnologías como inteligencia artificial, aprendizaje de máquina, visión por computadora, navegación autónoma, robótica y ROS, se haga importante conocer lo que estas tecnologías son y lo que pueden ofrecer.

La IA o inteligencia artificial abarca un campo muy grande, lo que le ofrece un enfoque interdisciplinario con la capacidad de poder abordar distintos problemas del mundo real incorporando diversas áreas del conocimiento [7]. Actualmente, en 2024, está revolucionando nuestro mundo a

pasos agigantados, tanto así que hoy día existen desde chatbots con IAs generativas como GPT-4 de OpenAI y Gemini Ultra de Google que mantienen conversaciones fluidas, hasta algoritmos que superan grandemente a los humanos en tareas más complejas. El Artificial Intelligence Index Report 2024 de la Universidad de Stanford destaca que la IA superó el rendimiento humano en varios aspectos, como la clasificación de imágenes, el razonamiento visual y la comprensión del inglés. Sin embargo, todavía está un paso atrás en tareas como las matemáticas a nivel competitivo y el razonamiento visual del sentido común [8].

El aprendizaje de máquina es una subdisciplina de la IA y la ciencia computacional. Este se enfoca en el uso de datos y algoritmos que pueden imitar la manera en que un humano aprende, con el objetivo de que poco a poco vaya mejorando su precisión. Al momento de implementar un sistema con inteligencia artificial, es necesario realizar cuatro pasos clave en el siguiente orden: adquisición de datos, entrenamiento del modelo, validación modificando detalles clave y pruebas para la comprobación del funcionamiento del sistema [9].

La visión por computadora es una rama de la inteligencia artificial relacionada con el análisis de imágenes y vídeos, que incluye un conjunto de técnicas que otorgan a la computadora la capacidad de “ver” y extraer información de aquello que se ha visto. Por lo tanto, para aplicar esta técnica es necesario utilizar una cámara y un dispositivo que procese, mediante algoritmos, la información captada [10]. Existen diferentes técnicas específicas dependiendo de la tarea a realizar por la computadora, por ejemplo, reconocimiento de patrones, clasificación de objetos, detección de movimiento [11], segmentación semántica, segmentación de instancias, reconocimiento facial o de gestos faciales [12]. Este campo de la inteligencia artificial ofrece aplicaciones al sector del reciclaje, como la clasificación de residuos en tres categorías: aprovechables, orgánicos y no aprovechables, y una categorización entre los aprovechables, como lo podría ser la clasificación entre envases plásticos y latas metálicas [13].

La robótica se encarga de diseñar máquinas programables para realizar tareas de forma automática o para simular un comportamiento animal o humano. Por lo tanto, un robot puede verse como un computador, pero con capacidad de movimiento [14]. En las aplicaciones de la robótica es muy utilizado ROS (Robotics Operative System), desde robots industriales hasta vehículos autónomos (AGVs), facilitando el desarrollo del software y proporcionando una robusta infraestructura junto a una variedad de herramientas que facilitan el desarrollo de sistemas robóticos complejos [15].

Cuando se une la inteligencia artificial junto con la robótica, surge el concepto de autonomía, haciendo referencia a una máquina capaz de realizar alguna tarea o actividad, compleja o no, sin intervención humana [16,17]. El movimiento autónomo que realiza un robot puede desarrollarse bajo diferentes tecnologías o técnicas. Una de estas técnicas es SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), es decir, localización y mapeo simultáneo [18]. SLAM es utilizado para que un robot pueda generar un mapa de su entorno a medida

que lo recorre. Para esto, se basa en tecnologías como la visión artificial, visión por computador, LiDAR (Light Detection and Ranging) y radar. Estas aportan la información necesaria para que el algoritmo SLAM, basado en IA, cree el mapa [19].

La Universidad de Kansai implementó un proyecto para realizar planificación de rutas para un robot de brazo doble, utilizando métodos como interpolación de arco o curva spline, siendo más efectivo el último mencionado. Además, la herramienta YOLOv3 resultó ser más que adecuada para el proceso de tratamiento de imágenes [20].

El Departamento de Ingeniería Mecánica y el Centro de Energía y Medio Ambiente del Instituto Indio de Tecnología de Patana desarrollaron un sistema que reúne estas y otras tecnologías en apoyo a la clasificación de residuos sólidos urbanos. Es un manipulador móvil capaz de identificar material reciclable a partir del modelo “bolsa de palabras”, con una capacidad de precisión en la clasificación del 94.3% bajo diferentes condiciones [21].

Los residuos en las zonas urbanas son un gran problema y, a pesar de que las entidades correspondientes incentivan mediante políticas actividades como el reciclaje, existe el inconveniente de que las personas no lo hacen de manera adecuada al no depositar estos residuos en el contenedor adecuado [22].

Por tal razón, se buscó desarrollar un prototipo de vehículo autónomo móvil capaz de detectar, recoger y almacenar botellas plásticas y latas de gaseosa en un entorno controlado, para contribuir a la gestión de residuos en un lugar cerrado, evaluando tecnologías para su elaboración como SLAM con LiDAR para navegación autónoma [23] e identificando el sistema de recolección más adecuado para el prototipo, además de la implementación adecuada de técnicas de visión por computadora para la identificación de las botellas plásticas y las latas de gaseosa [24,25].

Desde un punto de vista técnico, el proyecto está alineado con las tendencias actuales en automatización y robótica, y ofrece una solución innovadora para la recolección de residuos mediante el uso de tecnologías avanzadas en navegación y detección. Académicamente, el proyecto proporciona una valiosa oportunidad para aplicar conocimientos en un contexto práctico, enriqueciendo la formación en robótica y automatización, y abriendo la puerta a futuras investigaciones y desarrollos en la gestión de residuos. La implementación de este prototipo no solo contribuye al avance tecnológico en el sector, sino que también ofrece nuevas perspectivas para la resolución de problemas relacionados con la recolección de materiales reciclables.

II. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en dos enfoques principales: la metodología técnica V para el desarrollo del sistema y la metodología deductiva para la investigación, pruebas y validación de los resultados. Esta estructura se seleccionó porque cada etapa del proceso de desarrollo técnico estuvo acompañada de una validación correspondiente, lo que permitió un flujo claro de diseño y verificación.

Metodología técnica V para el desarrollo del prototipo: La metodología V se seleccionó debido a su enfoque estructurado en el desarrollo técnico. Permitted una clara distinción entre las fases de desarrollo (el lado izquierdo de la V) y las fases de verificación y validación (lado derecho de la V), como se mostró en la figura 1. Esta metodología se eligió por su enfoque secuencial y su capacidad para asegurar que cada componente desarrollado fuera verificado antes de la integración final del sistema [26]. Esto fue crucial para cumplir con los objetivos del proyecto, garantizando que el prototipo funcionara correctamente. De este modo, con cada sistema necesario para la elaboración del prototipo se llevaron a cabo diferentes fases, como el desarrollo o implementación, la integración, el diseño, la realización de pruebas, la evaluación, la verificación y la validación.

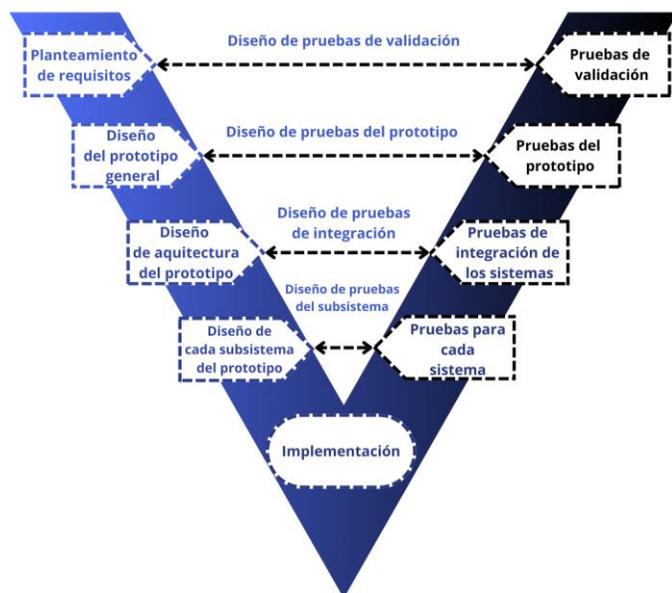


Fig. 1 Esquema de la metodología V. Fuente: Autores.

A. En comparación con otras metodologías:

Waterfall, aunque también es secuencial, no incluye el mismo nivel de verificación y validación en cada fase como lo hace la metodología V. La V es más robusta en cuanto a la corrección temprana de errores, ya que permite una validación constante a medida que se avanza en el desarrollo [27].

Scrum/Ágil, por su parte, se enfoca más en ciclos rápidos de trabajo (iteraciones o "sprints") y es ideal para proyectos en los que los requisitos cambian constantemente o cuando se trabaja con equipos de más de 5 personas. Debido a que en este proyecto solo participaron dos estudiantes y el proyecto ya tiene unos objetivos definidos, no fue tomada en cuenta. Además, el desarrollo de un prototipo físico, como el vehículo autónomo, requiere una secuencia definida y controlada, lo que hace que la metodología V sea útil en este contexto [28]."

B. Metodología científica (para la investigación y validación):

La metodología deductiva fue utilizada en este proyecto, partiendo de principios y conocimientos aceptados en robótica y recolección de residuos, para aplicarlos a un caso específico: el diseño de un vehículo móvil autónomo capaz de recoger botellas plásticas y latas en un entorno controlado. A través de este enfoque, se aplicó la teoría ya establecida sobre sistemas de detección, movilidad y recolección robótica, adaptándola a las necesidades particulares del entorno en el que se desarrolló. Además, se validó si estos conceptos funcionaban correctamente en este nuevo contexto educativo y tecnológico [29].

III. RESULTADOS

C. Diseño general del sistema.

El prototipo de robot móvil autónomo recolector de botellas y latas de gaseosa está dividido en tres fases o etapas y cada fase corresponde a un sistema con una función específica. Estos sistemas, la relación entre ellos y otras características a tener en cuenta para el control y visualización de datos del prototipo pueden ser observados en la figura 2.

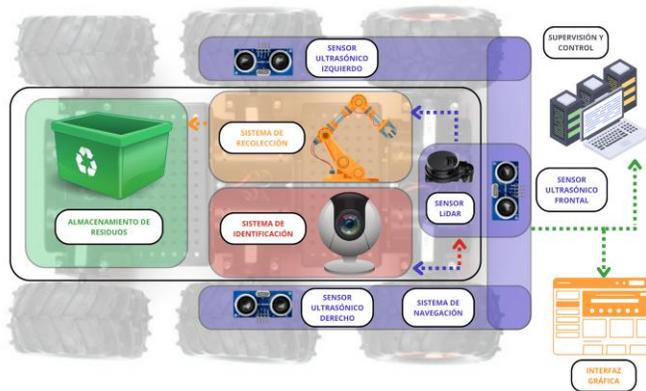


Fig. 2. Esquema del diseño general. Fuente: Autores.

D. Sistema de identificación.

El sistema de identificación resaltado en un color rojo es el encargado de buscar de forma activa con una cámara de vídeo botellas y latas de gaseosa. Esta búsqueda es realizada mediante un barrido de aproximadamente 180° en el entorno debido a que la cámara se encuentra sobre un servo motor que le permite realizar el movimiento. En caso que el objeto sea detectado es clasificado como botella plástica o lata de gaseosa con el sistema de detección.

Una vez encontrado el residuo el prototipo debe proceder a dirigirse hacia la botella o lata gracias al sistema de navegación autónoma mostrado de color morado, en donde el sensor LiDAR realiza un mapeo activo y constante del entorno, los sensores ultrasónicos laterales ayudan a evadir otros obstáculos y el sensor ultrasónico frontal también brinda información acerca de obstáculos o cuando el robot ya se encuentra frente al residuo.

Justo en el momento en que el robot llegue a la posición en donde se encuentra el residuo, este debe de posicionarse de

frente a él, es decir, con el sensor ultrasónico frontal apuntando hacia la botella para que el sistema de recolección representado con el color naranja comience a trabajar. El sistema de recolección de residuos es un brazo robótico con 4 grados de libertad y está encargado de siempre realizar la misma tarea, recolectar residuos con la misma trayectoria, tal que el efector final del brazo robótico siempre llegue al mismo punto objetivo en donde se encuentra el residuo, por eso se considera importante que el prototipo se ubique mirando de forma frontal y siempre a la misma distancia del objeto a recolectar.

Una vez tomada la botella o lata con el brazo es depositada en el depósito de almacenamiento de residuos resaltado de color verde. El color verde es elegido para mostrar de forma intencional que más allá de la generación de nuevo conocimiento y la aplicación de tecnologías el objetivo siempre que estas tecnologías en un futuro sean innovadas para contribuir al bienestar del ambiente y zonas urbanas. El depósito para almacenar los residuos se encuentra separado en dos secciones, el compartimento de plásticos para botellas plásticas y el de metales para almacenar las latas de gaseosa.

Después de haber recolectado un residuo el prototipo debe de seguir con la búsqueda de más de estos, al menos hasta que todo el entorno haya sido recorrido en su totalidad por el prototipo. Una vez el prototipo recoja todos los residuos del entorno debe de tomarse una pausa y después de un intervalo de tiempo iniciar una nueva búsqueda de residuos en su entorno.

La supervisión y control en el prototipo se encarga de mostrar el valor de distancia de los sensores ultrasónicos, el mapeo realizado por el sensor LiDAR, la posición en la que se encuentra el brazo robótico, la rotación de la cámara en el punto en el que detecta el residuo y la configuración o activación de todos los sensores y sistemas para realizar test individuales de funcionamiento. Por último en la interfaz gráfica será mostrado el usuario que esté conectado al prototipo, el mapa generado por el sensor LiDAR, la imagen de la cámara de video y datos relevantes acerca de los residuos recolectados, la interfaz gráfica se explica más a detalle en la sección de interfaz gráfica.

E. Sistema de navegación autónoma.

El sistema de navegación autónoma se encarga de desplazar el vehículo, mapear el entorno, evadir obstáculos, posicionar el vehículo frente al residuo a recolectar y enviar la información al sistema de recolección, a continuación, puede verse un esquema en la figura 3 para el diseño del sistema de navegación.

Los tres sensores ultrasónicos constantemente están enviando información acerca de la distancia de posibles obstáculos que puedan aparecer en el entorno. "Distancia izquierda" junto con "distancia derecha" son los valores de sensado mínimo permitidos para que el robot no tenga que evadir ese obstáculo, si la distancia del obstáculo es menor que estas distancias entonces el robot debe de hacer una maniobra evasiva.

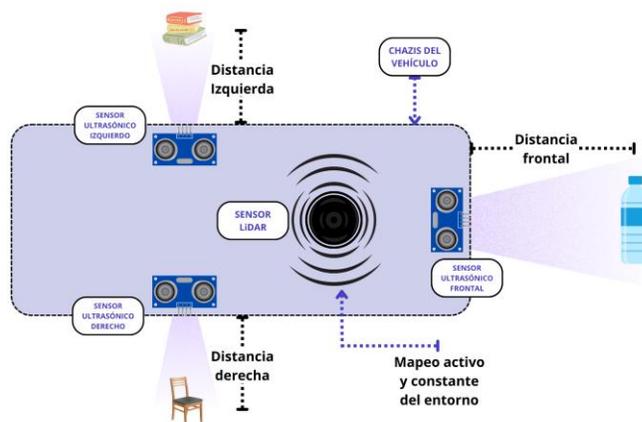


Fig. 3. Esquema del diseño de navegación autónoma. Fuente: Autores.

La "distancia frontal" es la longitud a la que el robot debe de encontrarse del residuo para que el brazo robótico pueda tomar la lata o botella, es preferible que la distancia siempre sea la misma para facilitar la programación del sistema de recolección, debido a que el punto destino al que tiene que llegar el brazo robótico siempre será el mismo.

El sensor LiDAR mediante la técnica SLAM ofrece un excelente mapeo en tiempo real, lo cual ayudará a conocer la posición del vehículo en todo momento y con precisión, además de ser capaz de dar información de los lugares por donde el prototipo ya ha pasado para realizar un recorrido completo en el entorno de trabajo.

F. Diseño del Sistema de Identificación.

Para lograr reconocer entre todos los objetos las botellas y latas de gaseosa es utilizado una cámara de video, la cual mediante un algoritmo de OpenCV debe de ser capaz de clasificarlos entre latas o botellas como se ve en el siguiente esquema de la figura 4.

La cámara se encuentra posicionada sobre un servo, el cual es capaz de girar al menos 180°. El objetivo es que la cámara realice un barrido buscando residuos de forma independiente, tal que si se quiere mirar hacia la izquierda el robot completo no tenga que realizar todo un giro, sino que el servo simplemente se desplaza 90° en sentido de las manecillas del reloj.

El momento en que la cámara identifica el residuo debe de ser enviado el ángulo de la posición en que la cámara lo detecte para que el vehículo gire en esa dirección y se desplace hacia el residuo. Debido a que ahora se conoce el ángulo en que se encuentra el residuo también puede conocerse su distancia gracias al sensor ultrasónico frontal o gracias al sensor LiDAR en caso de que el robot ya se encuentre alineado con el residuo.

Después de identificar y clasificar el objeto se envía esta información al sistema de recolección para que este sepa dónde situar el residuo.

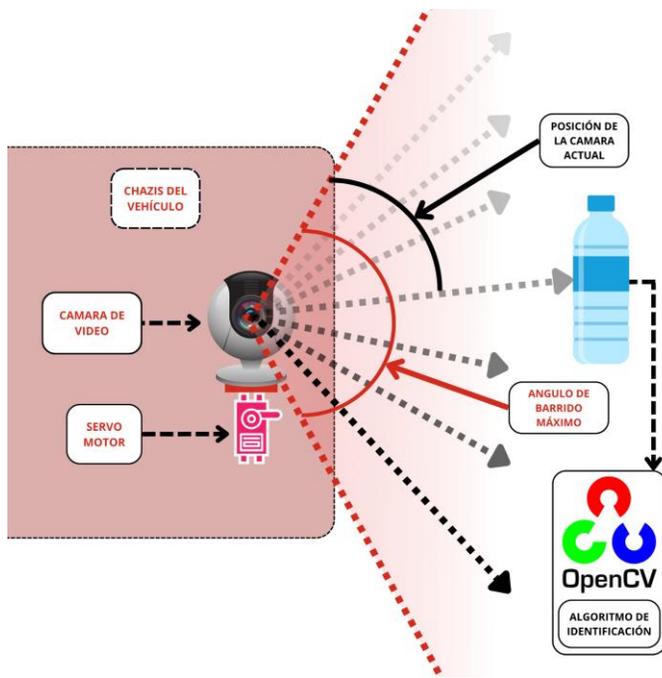


Fig. 4. Esquema del diseño general del sistema de navegación autónoma. Fuente: Autores.

G. Sistema de recolección.

Esta es una de las partes centrales del prototipo. Diseñada para permitir al vehículo autónomo recolectar botellas de plástico y latas de refrescos en un entorno controlado.

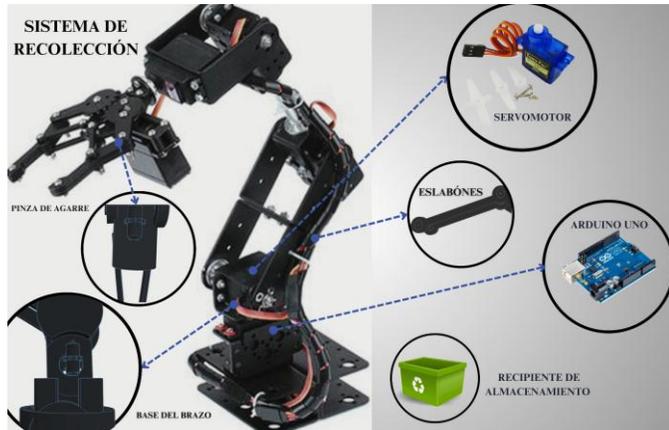


Fig. 5. Esquema del sistema de recolección. Fuente: Autores.

La descripción del sistema se basa en un brazo robótico de 4 grados de libertad para permitir al prototipo moverse horizontal y verticalmente. Su diseño proporciona acceso y levantamientos precisos sobre los objetos, lo que convierte el sistema en un recolector más eficiente.

H. Componentes del brazo robótico

Los Servomotores: Proporcionan movilidad en cada articulación de la mano y servoválvulas para permitir recoger

objetos. En la figura 5 se aprecia el servomotor a utilizar implementado en los eslabones individuales que permiten un movimiento controlado en todos los grados de libertad.

El Vástago: Las conexiones que superan cada servomotor forman una estructura de palanca, dándole flexibilidad para realizar varios movimientos complejos.

Los Arrestos: proporcionan estabilidad y actúan como puntos de sujeción para los brazos. En el auto. La base permite que el brazo manual se mueva rotacionalmente y lateralmente sin influir en la estabilidad del sistema.

Los Controles y detectores: el brazo robótico se controla con Arduino que controla los comandos de movimiento de los servomotores. Además de Sensores de proximidad, estos ayudan a detectar la presencia de objetos cerca de la mano detectando la dirección adecuada.

La Cámara de visión: ayuda a identificar objetos para detectar botellas y/o latas. La pinza está activada: la manija de la pinza es diferente cuando se selecciona el tipo correcto de desperdicio.

F. Implementación.

Se realizó el diseño 3D del prototipo para cada sistema, empezando por el chasis con 6 ruedas todo terreno, debido a que el chasis real trae consigo esas ruedas y adicionalmente se situó el sensor LiDAR y frontal del sistema de navegación como se puede ver en la figura 6.

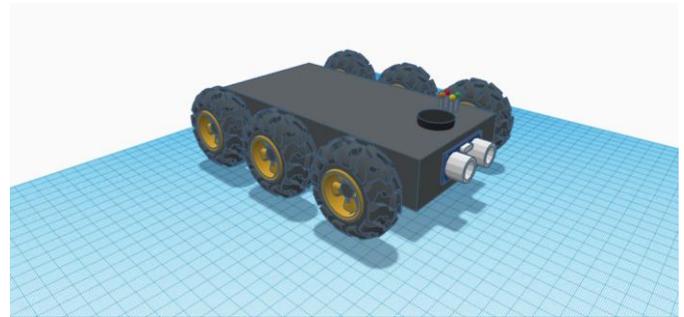


Fig. 6. Diseño 3D del chasis y sistema de navegación. Fuente: Autores.

Aún no se habían instalado los sensores ultrasonido laterales debido a que estos van en la parte exterior del recipiente de almacenamiento de residuos.

El sensor LiDAR se encuentra ubicado en la zona frontal superior del prototipo para que no existan artefactos del mismo vehículo que pueda afectar su medición, igualmente el sensor ultrasonido frontal también se ubica en la cara frontal del chasis.

El sistema de recolección constó de un brazo robótico y su programación para recoger los residuos, como se puede ver en el diseño 3D de la figura 7.

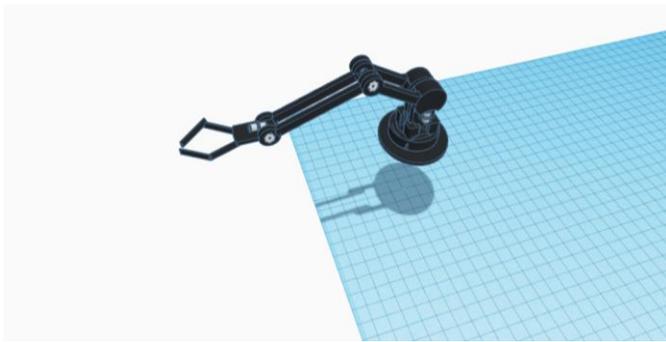


Fig. 7. Diseño 3D del brazo robótico. Fuente: Autores.

El brazo robótico contó con 4 grados de libertad y una garra del tamaño de una botella plástica convencional. Para el depósito de almacenamiento se diseñó un cubo con lados de 30 cm y una base de 20 cm para que pueda ser acoplado al chasis del vehículo como puede observarse en la figura 8, el depósito contiene dos secciones para separar los plásticos de los metales.



Fig. 8. Diseño del recipiente. Fuente: Autores.

Por último, los dos sensores ultrasónicos se instalaron en las partes exteriores laterales del depósito además de la cámara en la zona superior para tener una mayor visibilidad como lo muestra la figura 9.



Fig. 9. Diseño 3D del prototipo. Fuente: Autores.

I. Visualización de datos y análisis.

La visualización de datos y análisis es crucial para el monitoreo y evaluación del rendimiento del vehículo en tiempo real. La interfaz se presenta como un panel de control con varias secciones, tales como:

- Datos del usuario: Esta sección abarca la información del usuario que controla el vehículo, donde se almacena el perfil y sus datos asociados.
- Mapa de Ubicación: En la sección superior izquierda, se incluye una vista en tiempo real del mapa del terreno o espacio donde el vehículo está operando. Muestra la posición actual y las rutas recorridas por el robot.
- Estado actual del vehículo: En la zona denominada "Estado de Adán", se lleva a cabo un monitoreo de cada articulación del brazo robótico, mostrando la posición actual y cualquier alerta de mantenimiento o error detectado. También cuenta con un indicador visual que informa si la pinza está abierta o cerrada y un contador que indica la cantidad de botellas y latas recolectadas.
- Gráficos de Rendimiento: En esta sección se presenta un gráfico que muestra el rendimiento del sistema, incluyendo el tiempo promedio por recolección y la comparación entre objetos recolectados y detectados. Esto brinda una visión rápida de la eficiencia operativa.
- Controles de Operación: En la sección de "Estado de Adán", se encuentran botones para Iniciar, Pausar y Detener el brazo robótico, así como un panel de configuración para ajustar la sensibilidad de los sensores y el rango de movimiento.
- Cámara: En esta sección se muestra la visualización de la cámara en tiempo real, permitiendo monitorear el entorno del vehículo de manera continua.



Fig. 10. Esquema del diseño general del sistema (interfaz) Fuente: Autores.

Python es el lenguaje de programación seleccionado para desarrollar la interfaz, utilizando Tkinter para una GUI de escritorio, o HTML, CSS y JavaScript junto con Flask o Django para la interfaz web.

J. Comparación con sistemas existentes, retos y trabajos futuros.

Listas de sistemas similares: para una evaluación objetiva de la viabilidad y relevancia de nuestro propio prototipo, se

compara con los sistemas existentes de recolección de tipo autónomo.

Estos incluyen el brazo robótico UR3 de Universal Robots, un sistema de 6 grados de libertad diseñado para tareas industriales de alta precisión y complejidad. Estas son las tareas o procesos en un entorno muy controlado: la capacidad de carga útil y el rango del sistema lo hacen adecuado para la producción en línea y la ejecución cada vez más a gran escala en la industria.

El segundo caso es CleanRobotics TrashBot, un sistema autónomo de clasificación de desechos en base a la visión por computadora y otros sensores automatizados. Aunque este sistema no ofrece autonomía en vehículos de recolección, en términos de precisión y cierto grado de automatización. La evaluación de estos sistemas se realiza con base en varios indicadores importantes. Alternativamente, los precios comerciales de estos sistemas oscilan entre dólares 2,000 y 5,000 debido al uso de materiales industriales y tecnologías en sistemas de control duradero y avanzado. Por otro lado, el prototipo utiliza partes de bajo costo como piezas impresas en 3D y servomotores de menor costo, lo suficiente para mantener funcionando el sistema. Esto significa que el complemento funcional es accesible para demostrar para establecer la viabilidad del aprendizaje y el sistema.

K. Futuros trabajos y desafíos.

Detección de objetos. La identificación implica una precisión insuficiente para lograr la iluminación variable en el catastro de desechos; en base a la visión por computadora, se puede ver comprometida por sombras y reflectantes.

Inteligencia Artificial (IA). Es probable que modelos de aprendizaje profundo permitan una clasificación más precisa; el número de tipos de bio-basura en salmuera se puede incrementar incluso con desechos comunes como el plástico o los metales.

Se ha sugerido el uso de sensores de largo alcance o infrarrojos que ven más allá de lo visible en la cámara proporcionada.

Energía solar. Dado que funciona con celdas proporcionadas, dar energía al sistema hasta el punto de ser autosuficiente permitiría a nuestro prototipo trabajar de manera ininterrumpida a lo largo del día sin la necesidad de cargar.

L. Análisis de costos

Sistemas Comparativos: Para determinar la viabilidad y pertinencia del prototipo, se realizó una comparación con diversos sistemas de recolección autónoma en funcionamiento en la actualidad.

Diseño con brazo robótico UR3 de Universal Robots: Esta es una herramienta disponible para aplicaciones de alta precisión en ámbitos industriales. Tiene hasta seis grados de libertad y su objetivo es ejecutar tareas complejas en entornos donde se tiene control total. Lleva el nombre de UR3 debido a

que es la tercera versión de su modelo de brazo robótico. Esta versión en específico es ideal en empresas que implementan cadenas de producción en línea y cuyo personal realiza acciones repetitivas.

Sistema Clean Robotics TrashBot: Si bien está especializado en la separación de basura y no es un vehículo recolector autónomo propiamente dicho, posee sistemas de visión por computadora y sensores inteligentes que pueden compararse cuando menos en términos de precisión y función.

M. Criterios de comparación:

Costo de instalación: Dado que los sistemas comerciales trabajan con materiales e implementos industriales, que incluyen sistemas de control de larga durabilidad, el precio suele ser muy alto. Mientras que el precio de un UR3 o un TrashBot puede variar entre los 2,000 y 5,000 dólares americanos, nuestro prototipo, debido a su dependencia de productos y herramientas económicas como la impresión 3D y servomotores pequeños, es sustancialmente más barato de producir.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo representa un avance importante en la integración de tecnologías de navegación autónoma, detección de objetos y recolección para la gestión de residuos reciclables en entornos controlados. La combinación de sistemas de visión por computadora, mapeo SLAM y una interfaz de visualización en tiempo real demuestra una fuerte relación entre hardware y software, permitiendo que el vehículo opere de manera adaptable en diversos escenarios.

El proyecto enfrenta desafíos significativos durante su desarrollo. La detección de objetos, basada en visión por computadora, mostró dificultades bajo condiciones de iluminación variables, sombras y reflejos, afectando la precisión en la identificación de los desechos. Además, el control del brazo robótico requiere optimización para evitar errores en la recolección y mejorar su precisión al manipular objetos. Estas limitaciones resaltan la necesidad de avanzar en el diseño de algoritmos y en la integración de sensores más avanzados, como los de largo alcance o infrarrojos, que puedan complementar las capacidades del sistema.

Una ventaja destacable del prototipo es su capacidad para adaptarse a entornos, lo que lo posiciona como una solución innovadora para la gestión de residuos en espacios como hogares y laboratorios. Sin embargo, su dependencia de fuentes de energía tradicionales limita su operación continua, lo que abre la posibilidad de explorar el uso de energía solar para garantizar mayor autonomía y sostenibilidad.

La orientación y forma de los residuos dentro del entorno presenta una dificultad para el sistema de recolección debido a la posible variabilidad que existe en el punto de destino del brazo robótico al momento de recoger el residuo. Por lo tanto, además de conocer su posición en dos dimensiones en el mapa, se hizo necesario incluir un sensor de posición adicional para poder conocer la altura del objeto a recolectar, con el fin de

proporcionar la coordenada en tres dimensiones al brazo robótico.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada por los grupos de investigación Macrypt y el semillero FarmTechnology de la Universidad de los Llanos. El estudio es financiado por la Universidad de los Llanos (DGI) - Colombia, en el marco del proyecto: Sistema autónomo de cosecha de frutas inmerso en una plataforma de experimentación robótica virtual (2025 FCBI).

REFERENCIAS

- [1] Revista P&M, "Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales de residuos sólidos." [En línea]. Disponible en: <https://marcassostenibles.pm.com>
- [2] Revista P&M, "Cinco curiosidades sobre el reciclaje en Colombia," Marcas Sostenibles. [En línea]. Disponible en: <https://marcassostenibles.pm.com>
- [3] A. J. Padilla and J. C. Trujillo, "Waste disposal and households' heterogeneity: Identifying factors shaping attitudes towards source-separated recycling in Bogotá, Colombia," *Waste Management*, vol. 74, pp. 16–33, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.11.052.
- [4] Stop Basura, "La importancia de reciclar plásticos y metales." [En línea]. Disponible en: <https://stopbasura.com>
- [5] Stop Basura, "Los 7 beneficios de reciclar plásticos y metales." [En línea]. Disponible en: <https://stopbasura.com>
- [6] H. J. Kang et al., "Enhancing recycling efficiency: A rapid glass bottle sorting gripper," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 174, p. 104647, 2024, doi: 10.1016/j.robot.2024.104647.
- [7] E. Noor and M. B. Manantan, "Artificial Intelligence," in *Raising Standards: Data and Artificial Intelligence in Southeast Asia*, Asia Society, 2022, pp. 87–136. [En línea]. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/resrep48536.10>
- [8] AISolutions, "Inteligencia artificial en 2024." [En línea]. Disponible en: <https://aisolutions.com>
- [9] M.-F. R. Lee and T.-W. Chien, "Artificial Intelligence and Internet of Things for Robotic Disaster Response," in *Proc. Int. Conf. Adv. Robot. Intell. Syst. (ARIS)*, Taipei, Taiwan, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/ARIS50834.2020.9205794.
- [10] RecFaces, "¿Qué es la visión por computadora? Sistemas de visión artificial y aplicaciones: ejemplos de soluciones." [En línea]. Disponible en: <https://recfaces.com>
- [11] M. F. S. Titu et al., "Experiments with cooperative robots that can detect object's shape, color, and size to perform tasks in industrial workplaces," *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 8, pp. 179–192, 2024, doi: 10.1007/s41315-023-00305-y.
- [12] L. Rand, T. Boyce, and A. Viski, "Computer Vision," in *Emerging Technologies and Trade Controls: A Sectoral Composition Approach*, Center for International and Security Studies, U. Maryland, 2020, pp. 68–86. [En línea]. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/resrep26934.9>
- [13] ATRIA Innovation, "Inteligencia artificial aplicada a la clasificación de residuos." [En línea]. Disponible en: <https://atriainnovation.com>
- [14] Ferrovial, "Robótica." [En línea]. Disponible en: <https://ferrovial.com>
- [15] ATRIA Innovation, "Sistema ROS para el movimiento de Robots." [En línea]. Disponible en: <https://atriainnovation.com>
- [16] W. Totschnig, "Fully Autonomous AI," *Science and Engineering Ethics*, vol. 26, no. 5, pp. 2473–2485, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11948-020-00243-z.
- [17] C. Ulloa et al., "Deep Learning Vision System for Quadruped Robot Gait Pattern Regulation," *Biomimetics*, vol. 8, no. 3, p. 289, 2023, doi: 10.3390/biomimetics8030289.
- [18] E. Yudin et al., "CloudVision: DNN-based Visual Localization of Autonomous Robots using Prebuilt LiDAR Point Cloud," *arXiv preprint*, arXiv:2209.01605, 2022.
- [19] Geograma, "¿Qué es la tecnología SLAM y qué aporta a la cartografía y a los GIS?" [En línea]. Disponible en: <https://geograma.com>
- [20] N. Mukai et al., "Application of Object Grasping Using Dual-Arm Autonomous Mobile Robot—Path Planning by Spline Curve and Object Recognition by YOLO," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 35, pp. 1524–1531, 2023, doi: 10.20965/jrm.2023.p1524.
- [21] S. Gundupalli, S. Hait, and A. Thakur, "Automated Municipal Solid Waste Sorting for Recycling Using A Mobile Manipulator," in *Proc. DETC*, 2016, doi: 10.1115/DETC2016-59842.
- [22] J. L. Leon et al., "Design of automatic recycling system Phase I," in *Proc. Int. Congr. Innov. Trends Eng. (CONIITT)*, Bogotá, Colombia, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/CONIITT51147.2020.9240224.
- [23] J. Song et al., "Efficient LiDAR/inertial-based localization with prior map for autonomous robots," *Intelligent Service Robotics*, vol. 17, pp. 119–133, 2024, doi: 10.1007/s11370-023-00490-6.
- [24] R. H. C. Palácios et al., "Evaluation of mobile autonomous robot in trajectory optimization," *Computing*, vol. 105, pp. 2725–2745, 2023, doi: 10.1007/s00607-023-01205-6.
- [25] R. Aarthi and G. Rishma, "A Vision Based Approach to Localize Waste Objects and Geometric Features Extraction for Robotic Manipulation," *Procedia Computer Science*, vol. 218, pp. 1342–1352, 2023, doi: 10.1016/j.procs.2023.01.113.
- [26] C. Berger, "V-model for the development of software and hardware in traction systems," *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 120, pp. 23–28, 2003.
- [27] S. M. Velásquez et al., "Una revisión comparativa de la literatura acerca de metodologías tradicionales y modernas de desarrollo de software," *Revista Cintex*, vol. 24, no. 2, pp. 13–23, 2019.
- [28] M. V. E. Velasco et al., "Revisión sistemática de la metodología SCRUM para el desarrollo de Software," *Dominio de las Ciencias*, vol. 7, no. 4, p. 54, 2021.
- [29] D. Newman and G. Dávila, "Construcción de la Cueva de los Cristales," *BBC News Mundo*, 7 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-abc123>