

UNIVERSIDAD EAN FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE ECOBOT-R: ROBOT
TERRESTRE AUTÓNOMO PARA INSPECCIÓN AMBIENTAL Y
RECOLECCIÓN BÁSICA DE RESIDUOS EN ZONAS URBANAS Y
NATURALES**

Autor;

Mora Guerrero Ciro Alejandro

Asignatura:

PROYECTO DE GRADO

Docente:

Chacón Rivera Lina María

Fecha: Agosto del 2025

Bogotá, Colombia

RESUMEN

El auge en la necesidad de herramientas tecnológicas para vigilar el medio ambiente y manejar los desechos está acelerando la creación de sistemas independientes que resulten accesibles y muy útiles. Este plan plantea la creación, puesta en marcha y prueba de ECOBOT-R (Robot de Control y Observación Ambiental – Rover), un robot terrestre mixto que se ocupará de la revisión y limpieza elemental. Este robot podrá desplazarse por caminos y áreas descubiertas para cumplir dos labores esenciales: (i) registrar factores ambientales como temperatura, humedad y calidad del aire al instante, y (ii) hallar y recoger residuos livianos, sobre todo trozos metálicos usando un electroimán, aparte de señalar en el mapa la posición de desechos no metálicos. El sistema estará formado por una estructura independiente de bajo precio, sensores ambientales y un componente de recolección simple, todo dirigido por un diseño basado en microcontroladores que se comunicará con un móvil. Los datos reunidos se guardarán en una base de datos y se mostrarán en mapas de calor, lo que hará más fácil la toma de decisiones en la gestión ambiental. Esta idea busca brindar una herramienta funcional, adaptable y fácil de copiar que respalde tareas de vigilancia, seguridad industrial y cuidado del ambiente, en sintonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 13).

INTRODUCCIÓN

Es innegable cómo el entorno se degrada en ciudades y campos, reflejado en la basura que se acumula y en la contaminación del aire y la tierra. Aunque existen planes para limpiar y vigilar, estos suelen ser caros, consumen mucho tiempo y no siempre ofrecen

información fiable para decidir bien. Aquí es donde la robótica terrestre entra en juego como una opción útil y barata, capaz de hacer trabajos repetitivos y arriesgados que ayudan tanto al medio ambiente como a nuestra salud. Lo que se ha visto en otros países demuestra lo mucho que pueden hacer los robots por sí solos en la revisión y el cuidado de espacios. Un buen ejemplo es el Railway Inspection and Maintenance Vehicle (RIMV), un robot creado para las vías del tren que tiene sensores modernos (GPS, IMU, LIDAR, cámaras de profundidad), un sistema ROS2 y conexión al momento, lo que le permite mostrar lo bien que funciona en la práctica (Li et al., 2024). Situaciones como esta nos sirven para usar formas de diseño, detección y prueba en otros lugares, como parques, caminos o ciudades donde se necesita moverse solo y vigilar el medio ambiente.

Además, uno de los problemas más grandes en el mundo de los robots móviles es ajustar y adaptar los sensores y cómo actúan. Estudios como los de Stronger & Stone (2006) indican que un robot puede crear sus propios modelos internos, lo que le permite aprender de su alrededor y cambiar su forma de trabajar sin que nadie tenga que intervenir. Estas capacidades de aprendizaje y adaptación son clave para que ECOBOT-R pueda moverse fácilmente en distintos lugares, desde suelos urbanos asfaltados hasta caminos naturales con diferentes luces y texturas. Los textos más recientes también resaltan lo importante que es la robótica autónoma en el cuidado del medio ambiente, mencionando usos en parques y zonas naturales donde ayudan a recoger basura y a obtener datos al instante (Lakhouit, 2025). Esto apoya la importancia de ECOBOT-R como una idea que combina varias cosas para ser sostenible.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y validar el funcionamiento de ECOBOT-R, un robot terrestre autónomo de bajo costo, capaz de realizar inspección ambiental y recolección básica de residuos en entornos urbanos y naturales.

Objetivos Específicos

- Diseñar el modelo del robot terrestre híbrido con enfoque en inspección ambiental y limpieza básica.
- Desarrollar el chasis móvil y los subsistemas de sensores ambientales y de recolección.
- Integrar el sistema de censado ambiental con el mecanismo de recolección y la interfaz de usuario.
- Adecuar un mecanismo de recolección de objetos metálicos mediante electroimán y un sistema de marcado georreferenciado para otros residuos.
- Evaluar el desempeño del robot en entornos controlados, midiendo precisión de detección, cobertura de área y autonomía energética.

DEFINICION DEL PROBLEMA

Lidiar con los residuos sólidos en parques, caminos y áreas públicas es un desafío considerable, especialmente por la gran necesidad de personal y la falta de métodos de seguimiento en tiempo real. Además, las tareas de recolección y control ambiental suelen llevarse a cabo de manera separada, lo que incrementa los costos y disminuye la eficacia. En la actualidad, no hay opciones económicas que combinen ambas funciones en un solo sistema autónomo. Esta falta de integración complica la obtención de datos ambientales geográficamente ubicados y el apoyo a los equipos de limpieza para localizar y recoger residuos, especialmente los metálicos, que pueden representar riesgos para la seguridad. También es fundamental tener en cuenta la necesidad constante de calibrar los sistemas de medición y acción.

En este contexto, Stronger & Stone (2006) indica que la efectividad de un robot autónomo depende en gran medida de su habilidad para aprender y adaptarse a entornos cambiantes. De manera similar, Lakhouit (2025) resalta que los sistemas robóticos aplicados a la gestión ambiental pueden mejorar tanto la eficacia como la sostenibilidad al tomar decisiones. Este vacío tecnológico abre la posibilidad de desarrollar un prototipo como ECOBOT-R, que combine métodos de modelado sensorial y de acción para operar de manera confiable en diferentes escenarios.

JUSTIFICACIÓN

La llegada de ECOBOT-R busca ser una forma de dar opciones tecnológicas

sencillas para cuidar el planeta en ciudades y campos. Su forma mezclada permite ver datos clave del ambiente y ayuda a limpiar un poco con piezas fáciles de copiar. Aparte de ayudar al planeta, este plan da algo bueno para aprender: junta ideas de electrónica, sensores, programación y cómo hacer cosas mecánicas en algo real. Así, impulsa aprender haciendo y crear habilidades en cómo hacer proyectos paso a paso, algo clave para formar a un ingeniero en mecatrónica. El robot sirve como un ejemplo barato para pueblos, universidades y empresas que quieren mejorar cómo cuidan el planeta. Al usar un sistema que guarda datos con ubicación, el plan ayuda a crear información útil para hacer reglas ambientales, planes para cuidar el planeta y cómo manejar basura. Esta idea va con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sobre todo el ODS 11 (Ciudades y lugares sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima). La experiencia en hacer vehículos que se manejan solos para lugares importantes, como el RIMV, muestra que las formas de hacer las cosas por partes y usar sensores avanzados se pueden usar en otros temas para mejorar cómo funcionan las cosas y la seguridad(Li et al., 2024). Además, que un robot pueda aprender y cambiar cómo entiende sus sensores y cómo actúa abre la puerta a sistemas más fuertes y que se manejan solos, incluso si las cosas cambian (Stronger & Stone, 2006). Al final, estudiar robots que cuidan el planeta dice que estos sistemas no solo mejoran cómo se maneja la basura, sino que también dan datos valiosos para hacer reglas públicas y estudiar la ciencia. Estas ideas hacen que ECOBOT-R sea importante como algo práctico, que se puede copiar y que puede crecer mucho.

TABLA 1: REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO – ECOBOT-R

Categoría	Requerimientos del Prototipo ECOBOT-R
Técnicos	El sistema tendrá unos sensores que miden el clima: temperatura, humedad y qué tan limpio está el aire, con un margen de error de hasta 5%. También, deberá adivinar cuánto hay de las cochinadas más comunes (PM2.5, CO₂, ozono) usando esos datos, tal como dice la Organización Mundial de la Salud. Pondremos sensores que detecten pedazos de plástico y metal con una cámara y un detector especial. El sistema usará motores que funcionan con corriente continua y que cambian de velocidad para que todo marche bien. Tendrá un GPS que no se equivoca por más de 2 metros y se comunicará sin cables (por Wi-Fi o LoRa). Debe funcionar por lo menos 2 horas sin recargar la batería, según pruebas comunes.
De diseño	El robot se construirá sobre un chasis modular, ligero y de bajo costo (< 1 millón COP). Incluirá batería recargable de ion-litio ($\geq 12V$, 7Ah) con sistema de protección. El diseño debe permitir la integración de un electroimán para residuos metálicos, además de mecanismos de sujeción. El robot tendrá dimensiones aproximadas de $40 \times 30 \times 25$ cm, con un peso de 8–10 kg. Capacidad de carga hasta 2 kg.
De operación	El prototipo podrá desplazarse en superficies urbanas (pavimento, cemento) y senderos naturales, con pendientes hasta 10%. Velocidad de operación entre 0,5 y 1 m/s. Incorporará sensores de proximidad para evitar

	colisiones. El sistema incluirá aplicación móvil con visualización en tiempo real de datos ambientales, ubicación GPS y estado de batería.
De calidad	Se garantizará confiabilidad en registro y almacenamiento de datos en bases locales y remotas. Vida útil estimada ≥ 100 ciclos. Se incluirá protocolo de calibración periódica de sensores y validación en laboratorio. Los datos se exportarán en formatos compatibles (CSV, JSON).
Legales y reglamentarios	Cumplimiento con RETIE para seguridad eléctrica. Cumplimiento con ISO 13482 (seguridad en robots de servicio), ISO 14001 (gestión ambiental). Protocolos de monitoreo y seguimiento de funcionamiento serán documentados, con respaldo en normas de trazabilidad de datos.
De sostenibilidad	El chasis debe construirse, en la medida de lo posible, con materiales reciclables o reutilizables como biopolímeros y aleaciones de aluminio ligero. El consumo energético debe ser reducido, con una potencia media inferior a 20 W en operación continua. El diseño debe promover el modularidad para facilitar reparaciones y reutilización de componentes, reduciendo la generación de desechos electrónicos.
De las partes interesadas	Satisfacer las peticiones peculiares de los gobiernos locales, centros de estudios superiores y grupos de aseo en áreas urbanas o rurales. El modelo inicial debe ser accesible en cuanto a su cuidado, con piezas de reemplazo fáciles de conseguir en la zona y manuales sencillos para arreglarlo y ajustarlo. La estructura adaptable permitirá a las entidades hacer cambios y

	revisiones periódicas sin necesitar herramientas complejas, garantizando que siempre funcione.
--	--

Fuente: elaboración propia (2025).

TABLA 2: DE COMPONENTES

Componente	Modelo recomendado	Función
Microcontrolador principal	ESP32-CAM	Control general y visión básica
Procesador secundario (op.)	Raspberry Pi 4B (2GB)	Procesamiento de IA y clasificación de residuos
Controlador de motores	PCA9685	Control de servos y motores por PWM
Motores de tracción	Motores DC con caja reductora (TT o N20)	Movimiento del robot
Servomotor ligero	SG90 (9g)	Manipulación básica con brazo o pinza
Electroimán	Mini electroimán DC 5V	Recolección de objetos metálicos
Sensor de orientación	MPU6050 (IMU 6DOF)	Medición de inclinación y giros
Sensor de distancia	HC-SR04 (ultrasónico)	Evitar obstáculos en la navegación

Sensor de calidad de aire	MQ-135	Detección de CO ₂ y contaminantes básicos
Módulo GPS (opcional)	NEO-6M	Georreferenciación de residuos
Fuente de energía	Baterías Li-ion 18650 + BMS	Alimentación del sistema
Estructura	Acrílico o MDF	Base y chasis del robot
Ruedas	Kit ruedas TT/N20	Desplazamiento del robot

Fuente: elaboración propia (2025).

ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS-ECOBOT-R

Intención del producto: El ECOBOT-R es un robot terrestre autónomo, híbrido y asequible, con dos propósitos principales: (i) realizar inspecciones ambientales mediante el registro de temperatura, humedad relativa, calidad del aire y cálculo de contaminantes criterio (PM2.5, CO₂, ozono); y (ii) ejecutar recolección básica de residuos metálicos y georreferenciación de desechos no metálicos. De esta forma, se busca ofrecer una herramienta práctica y replicable para entidades ambientales y académicas en la gestión sostenible de espacios urbanos y naturales.

Usuarios finales: Alcaldías, corporaciones ambientales, universidades, brigadas de limpieza urbana y rural.

Verificación de Parámetros de Diseño:

Normativas y Estándares: Cumplimiento con RETIE (instalaciones eléctricas en Colombia), ISO 13482 (seguridad en robots de servicio) e ISO 14001 (gestión ambiental). Esto asegura que el prototipo sea seguro en operación, sostenible y conforme a la normatividad nacional.

Restricciones Técnicas: Autonomía mínima de 2 horas, capacidad de carga de hasta 2 kg, dimensiones aproximadas $40 \times 30 \times 25$ cm, tracción adaptada a pavimentos y senderos naturales.

Factibilidad Técnica: Viable mediante sensores de bajo costo, microcontroladores (Raspberry Pi, ESP32), motores con controladores PWM y batería de ion-litio. Se contempla un consumo energético promedio <20 W, en línea con normas de eficiencia energética.

Estimación de Características de Diseño:

Potencia / Consumo Energético: Consumo máximo estimado de 20–25 W en operación continua; batería de litio de 12V y 7Ah como fuente principal.

Desempeño: Velocidad de operación entre 0,5 y 1 m/s; precisión de sensores $\pm 5\%$; localización GPS con error < 2 m.

Durabilidad: Vida útil mínima de 100 ciclos operativos; resistencia a condiciones ambientales moderadas (humedad $< 70\%$, temperatura entre 10–35 °C).

Costos: Costo de prototipo < 1 millón COP; costos de mantenimiento anuales estimados

en $< 15\%$ del costo de construcción.

Alcance de la Solución de Ingeniería:

Incluye: registro de variables ambientales, almacenamiento en base de datos, visualización en mapas de calor, recolección de residuos metálicos con electroimán y georreferenciación de residuos no metálicos. No incluye: recolección masiva de residuos, navegación en terrenos extremos o integración con sistemas de gestión de residuos industriales. Recursos necesarios: microcontrolador, sensores (DHT22, MQ-135, GPS), módulo de comunicación, baterías recargables, chasis modular, electroimán, aplicación móvil.

Validación y Verificación:

Pruebas Iniciales: validación de módulos por separado (sensores, tracción, recolección).
Revisión de Diseño: integración de subsistemas y verificación de comunicación entre ellos.
Pruebas Finales: evaluación del prototipo en entornos controlados (parques urbanos) para medir precisión de sensores, cobertura de área, autonomía energética y eficiencia en la recolección de residuos.

MARCO DE REFERENCIA – ECOBOT-R

Robótica ambiental y censado inteligente

Hoy en día, la robótica ambiental se ha convertido en una herramienta clave para cuidar el entorno. Cada vez es más importante contar con sistemas que permitan medir en tiempo real la calidad del aire, la temperatura o la humedad, variables que influyen directamente en la sostenibilidad. Los avances en este campo han hecho posible el desarrollo de dispositivos capaces no solo de recolectar datos, sino también de procesarlos en el mismo lugar, lo que ahorra energía y evita depender de conexiones constantes a internet. Tal como lo señalan Wiese et al. (2025), este tipo de soluciones logra reducir significativamente el consumo energético en comparación con sistemas tradicionales.

Para ECOBOT-R, estos desarrollos son un referente de cómo un robot puede trabajar de forma autónoma y confiable incluso en entornos con recursos limitados. Un ejemplo inspirador es RaccoonBot, que según Mendez-Flores et al. (2025) emplea energía solar para extender sus misiones de campo. Esta estrategia demuestra que la integración de mecanismos de autoabastecimiento es clave para prolongar la vida operativa del robot en espacios naturales.

Visión artificial para clasificación y recolección de residuos

El manejo de residuos es uno de los grandes retos ambientales actuales, y la visión

artificial se ha consolidado como una de las principales aliadas para enfrentarlo. Gracias a la inteligencia artificial, ya existen robots capaces de identificar distintos tipos de basura con altos niveles de precisión, incluso cuando se utilizan dispositivos de bajo costo como la Raspberry Pi (Jin et al., 2023)

Esto abre la puerta a que ECOBOT-R integre un sistema de clasificación que detecte plásticos o metales y que además apoye la recolección mediante un electroimán.

Investigaciones más recientes, como la de Nahiduzzaman et al. (2025) muestran que con técnicas avanzadas de aprendizaje automático se pueden lograr tasas de acierto superiores al 90% en la clasificación de residuos comunes. Asimismo, trabajos como el de Páez-Ubieta et al. (2024) han combinado visión artificial con sensores táctiles, alcanzando un 94% de precisión en la detección y más del 80% de éxito en la recolección física en escenarios reales. Todo esto confirma que el camino para un robot recolector como ECOBOT-R es viable y con gran potencial de impacto social y ambiental.

Eficiencia energética en sistemas robóticos

Uno de los principales desafíos de los robots, sobre todo en campo abierto, es el consumo de energía. La autonomía de las baterías puede determinar si un proyecto resulta práctico o no. Por esta razón, múltiples estudios se han centrado en optimizar trayectorias y movimientos para reducir gasto energético. Soori et al. (2023) destacan que esta optimización puede lograrse sin sacrificar el rendimiento del sistema.

De manera complementaria, Jiang et al. (2023) muestran que las redes neuronales LSTM

permiten predecir el consumo de energía según las condiciones de movimiento o la tarea ejecutada. Este tipo de avances resulta directamente aplicable a ECOBOT-R, que necesitará desplazarse por distintos terrenos manteniendo su autonomía. Además, investigaciones publicadas en revistas de producción limpia señalan que cuando se aplican buenas prácticas de gestión, los robots no solo consumen menos energía, sino que también pueden contribuir a la reducción de la intensidad energética en sectores industriales completos, reforzando así su aporte a la sostenibilidad.

Colaboración humano-robot, seguridad y sostenibilidad

La transición hacia la llamada *Industry 5.0* ha puesto en el centro la colaboración entre humanos y robots. Ya no se trata solo de velocidad o fuerza, sino de interacción segura y responsable. En este sentido, Bonello et al. (2024) demuestran que implementar medidas de seguridad en estaciones colaborativas no solo protege a los operarios, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental al optimizar procesos y disminuir desperdicios.

Para ECOBOT-R, esta perspectiva es fundamental, ya que se espera que opere en espacios públicos o naturales donde interactúe con personas. Siguiendo esta línea, Adamides & Edan (2023) destacan que la robótica colaborativa puede mejorar la ergonomía, reducir riesgos y favorecer un enfoque tecnológico más humano y sostenible.

Estrategias de muestreo y planificación autónoma

Finalmente, otro aspecto clave para el éxito de ECOBOT-R es cómo decide dónde y cuándo recoger información. No basta con contar con buenos sensores, también es necesario planificar rutas de manera estratégica. Sung et al. (2023) subrayan que los robots pueden optimizar sus recorridos priorizando zonas de mayor interés ambiental y ajustando la frecuencia de muestreo en función de la incertidumbre y el valor esperado de los datos.

Aplicar este tipo de estrategias permitirá a ECOBOT-R recorrer los espacios de manera inteligente, aprovechar mejor su energía y ofrecer resultados más útiles para la toma de decisiones ambientales. En otras palabras, no se trata solo de un recolector de residuos, sino de un aliado en la gestión responsable de los recursos naturales.

Análisis de requerimientos

La creación del ECOBOT-R debe atender a necesidades evidentes en el campo educativo y medioambiental, por esto se distribuye en funcionales y no funcionales.

Los funcionales son las acciones que el sistema debe cumplir para considerarse útil en estas se encuentran, recolectar residuos metálicos mediante un sistema electromagnético, detectar, recolectar residuos plásticos y papeles con apoyo de visión artificial, medir parámetros ambientales básicos (calidad del aire, humedad, temperatura), almacenar y enviar datos

georreferenciados para análisis posterior por último operar de forma autónoma en entornos mixtos (parques, caminos, espacios urbanos). Los no funcionales son las condiciones de calidad, rendimiento o restricciones bajo las que el sistema debería funcionar, como tener al menos 2 horas de autonomía con su batería, mantener un costo bajo de construcción, respetar dimensiones compactas, ser fácil de mantener a esto nos referimos repuestos disponibles y una calibración simple.

Análisis de restricciones

Durante la construcción del **ECOBOT**, se observaron diferentes limitaciones que condicionaron su funcionamiento y desempeño. Las restricciones surgieron en las decisiones técnicas en la selección de componentes, tanto como de los recursos económicos y las condiciones en la operación real. Con esto dichas limitaciones se clasificaron en técnicas, económicas, operativas y ambientales.

Restricciones técnicas

Los límites técnicos están vinculados de forma directa con la capacidad de carga, la efectividad de los elementos electrónicos y las restricciones físicas que presenta la estructura del ECOBOT.

Microcontroladores: Se utilizaron modelos de bajo costo que tienen una capacidad de procesamiento restringida. Esto quiere decir que el robot no es capaz de realizar tareas muy complejas simultáneamente ni gestionar en tiempo real algoritmos sofisticados de inteligencia artificial, lo cual disminuye la rapidez con que responde y la exactitud de

ciertas funciones.

Capacidades de carga: El ECOBOT tiene un límite de carga de 2 kg, lo que determina el volumen y la clase de materiales que es capaz de recoger o trasladar. Aunque es adecuado para las pruebas iniciales o aplicaciones pequeñas, su uso se ve restringido en situaciones de recolección a gran escala.

Sensores: Los sensores que se emplearon son de tipo económico y tienen un margen de error que oscila entre el 5 % y el 10 %. Esto significa que, por ejemplo, en la identificación de obstáculos o distancias, el valor registrado puede ser diferente del real. Esta falta de precisión puede provocar fallos en la navegación o en la clasificación de los desechos si se compara con sensores de alta gama. No se utilizan sensores más exactos porque son costosos y no caben en el presupuesto asignado.

Debido a estas restricciones técnicas, en esta versión inicial se necesita simplificar las funciones del ECOBOT, concentrándose más en validar el concepto que en un rendimiento de alta exactitud.

Restricciones económicas

Las restricciones económicas se derivaron del presupuesto asignado al proyecto.

Selección de componentes: Puesto que los recursos eran limitados, la elección se hizo por motores, microcontroladores y sensores de gama baja o media, dando prioridad al costo en lugar de a la durabilidad y la precisión.

Prototipado del chasis: Los materiales empleados para la estructura son asequibles y

sencillos de manipular, sin embargo, no brindan la misma resistencia mecánica ni el mismo peso ligero que otros materiales más caros, como las aleaciones de aluminio o los compuestos plásticos especializados.

Expansión del sistema: La posibilidad de incorporar módulos extra (sistemas de comunicación inalámbrica más potentes, cámaras de visión artificial de alta resolución o algoritmos de control sofisticados que necesitan hardware específico) también se ve restringida por la falta de presupuesto.

El ECOBOT se ha concebido como una solución funcional y económica, aunque no competitiva con prototipos de laboratorio que tienen un financiamiento más alto.

Restricciones operativas

Estos límites están vinculados con el mantenimiento, la durabilidad y las labores requeridas para garantizar que el robot funcione.

Mantenimiento periódico: El ECOBOT necesita ser revisado de manera continua, particularmente en lo que respecta al estado de las baterías y la calibración de los sensores. Si estas labores no se llevan a cabo de manera regular, el margen de error en las mediciones puede incrementarse y la autonomía para operar puede reducirse.

Autonomía energética: Las baterías que se utilizan proporcionan un tiempo de funcionamiento limitado, lo que limita la utilización ininterrumpida del robot. Esto requiere que se interrumpa con frecuencia para reemplazar o recargar las baterías.

Durabilidad: Dado que los componentes electrónicos y mecánicos no son de calidad

industrial, su duración puede disminuir si se emplean en ambientes exigentes o con un uso intensivo.

Estas circunstancias hacen que el ECOBOT necesite supervisión y modificaciones frecuentes en la práctica, lo cual restringe su autonomía real.

Restricciones ambientales

El entorno en el cual opere el ECOBOT también representa un factor importante en su desempeño.

Condiciones climáticas: Los sensores pueden verse directamente afectados por la humedad, el polvo o la lluvia, lo que puede causar lecturas inexactas o incluso fallos temporales.

Variaciones de luz: Las alteraciones repentinas de la luz (como, por ejemplo, pasar de estar a la sombra a recibir luz solar directa) en áreas al aire libre pueden afectar los sensores ópticos, lo que disminuye la fiabilidad al detectar objetos o residuos.

Terreno: El chasis y el sistema de tracción están diseñados para suelos más o menos planos; si se trata de territorios con irregularidades o con obstáculos significativos, disminuye la capacidad del ECOBOT para moverse.

Debido a estos motivos, el robot se adapta mejor a pruebas en espacios regulados (por ejemplo, en laboratorios o zonas con suelo liso) que a ambientes urbanos o naturales con circunstancias desfavorables.

Análisis de alternativas

En la etapa de diseño y planificación del ECOBOT, se realizó un análisis detallado de diversas opciones tecnológicas para escoger las que mejor coinciden con los objetivos del proyecto: funcionalidad, integración sencilla, sostenibilidad, eficiencia energética y coste bajo. Este proceso facilitó reconocer fortalezas, debilidades y compatibilidades entre las distintas áreas mecánica, electrónica y de control.

Respecto al microcontrolador principal, se tuvieron en cuenta tres opciones: ESP32, Raspberry Pi 4 y Arduino Mega. El Arduino Mega brindaba simplicidad en la programación y una comunidad de soporte extensa, pero su capacidad de conectividad y procesamiento no era suficiente para un sistema autónomo que contara con varios sensores. La Raspberry Pi 4 tenía un rendimiento computacional más alto y la capacidad de hacer funcionar algoritmos de inteligencia artificial, pero su costo y consumo de energía se vieron como inconvenientes para un prototipo portátil que dependía de baterías. En última instancia, se decidió que el ESP32 era la mejor opción porque proporciona un balance ideal entre rendimiento, consumo y versatilidad. Este microcontrolador cuenta con conectividad Bluetooth y Wi-Fi integrada, una gran cantidad de pines de entrada y salida, además de un consumo energético bajo, lo que lo hace perfecto para manejar el robot en tiempo real y comunicarse con dispositivos externos.

En cuanto al sistema de recolección, se analizaron tres métodos fundamentales: un

mecanismo de succión por vacío, una pinza mecánica de cierre automático y un brazo robótico con electroimán. La pinza mecánica tenía una estructura simple, pero no era muy eficaz con los residuos pequeños o de formas irregulares. El sistema de succión, a pesar de ser versátil, requería un diseño más complicado y un consumo energético elevado. En contraste, el brazo robótico con electroimán se demostró como la alternativa más efectiva y práctica porque contaba con la capacidad de recolectar materiales ferrosos de forma precisa y con un mínimo consumo energético. De igual manera, su estructura modular propicia que se lleven a cabo adaptaciones o mejoramientos en el futuro, aumentando la funcionalidad del robot de acuerdo con lo que requiera el medio.

En el sistema de tracción, se evaluaron diferentes configuraciones: ruedas convencionales, orugas y ruedas omnidireccionales. Las orugas proporcionaban una estabilidad considerable en terrenos desparejos, pero hacían que el peso y las necesidades de energía aumentaran significativamente. Las ruedas omnidireccionales permitían una maniobrabilidad excepcional, pero su implementación exigía programar de manera más complicada y usar piezas más costosas. Por esta razón, se decidió utilizar ruedas tradicionales acopladas a motores de corriente continua con reductores, por su balance entre eficiencia, sencillez y accesibilidad en términos económicos. Esta configuración aseguró un movimiento estable y de bajo consumo, apropiado para el prototipo en superficies naturales.

Se analizaron varias opciones en relación con el sistema de censado para expandir las capacidades del robot más allá de la mera navegación. Se pensó en un principio utilizar solamente sensores de distancia, pero más adelante se optó por añadir un conjunto más completo, que incluía sensores de partículas suspendidas en el aire, calidad del aire,

humedad y temperatura (como el DHT22 y el MQ-135). Esta decisión posibilitó que el ECOBOT incluyera una función extra de monitoreo ambiental, la cual recopila información importante del medio ambiente durante el proceso de recolección. Después de examinar las opciones disponibles, se eligieron los sensores que tenían una alta compatibilidad con el ESP32, un bajo consumo energético y una buena precisión, garantizando así una comunicación eficiente y estable.

Sobre el material estructural, se consideraron tres alternativas fundamentales: polímeros producidos por impresión 3D, acrílico y aluminio. El aluminio era muy resistente, pero encarecía el precio y complicaba los cambios en la estructura. El acrílico era ligero, pero presentaba poca resistencia a las vibraciones y a los golpes. Por otra parte, la impresión en tres dimensiones brindó una opción flexible, asequible y sustentable, posibilitando la producción de piezas personalizadas que son livianas y sencillamente reemplazables. Asimismo, el empleo de filamentos reciclables fortaleció la perspectiva medioambiental del proyecto, en línea con los principios de sostenibilidad que orientaron la creación del ECOBOT.

Por último, en el sistema de alimentación se investigaron las baterías Li-Po, iónicas de litio y la viabilidad de un sistema híbrido que fuera complementado con energía solar. Aunque las baterías Li-Po tenían una gran potencia, eran menos estables y duraderas. Dado que las baterías de iones de litio sobresalían por su seguridad, su larga duración y su favorable relación entre costo y rendimiento, se eligieron como la principal fuente energética. Además, se planeó incorporar celdas solares en el futuro para incrementar la autonomía del robot y disminuir su necesidad de recargas eléctricas, lo que refuerza el compromiso con la sostenibilidad.

El análisis de las diferentes opciones posibilitó la toma de decisiones basadas en criterios técnicos, ecológicos y económicos, garantizando que cada elección aportara de forma consistente al objetivo global del proyecto. Esta evaluación ayudó al ECOBOT a alcanzar un diseño que combina de manera equilibrada la funcionalidad, el bajo impacto ecológico y la viabilidad tecnológica; por lo tanto, supone un progreso importante en el desarrollo de soluciones mecatrónicas destinadas a la preservación del medioambiente.

Etapas de diseño

El proceso de diseño del ECOBOT fue el paso principal para fortalecer el proyecto, ya que en ese periodo se definieron los parámetros técnicos, estéticos y funcionales que guiaron su rendimiento en campo. El objetivo de esta etapa fue desarrollar un robot que pueda recoger desechos sólidos de tamaño mediano, como envases plásticos o trozos metálicos; la meta era lograr que fuera autónomo y eficiente en el manejo del ambiente y que tuviera una perspectiva sustentable. La primera etapa del diseño consistió en crear un modelo 3D utilizando software CAD (Onshape, Solidworks), en la que se definió la estructura general del robot. El propósito principal fue crear una base móvil que fuera estable, duradera y ligera, capaz de resistir los sensores, los actuadores y el sistema de control sin perjudicar la maniobrabilidad. Para esto, se creó un chasis modular hecho con materiales mixtos: polímeros producidos por impresión tridimensional para las partes no estructurales y elementos metálicos en los lugares donde se fijan el brazo robótico y los motores. Este método posibilitó balancear la resistencia y el peso, manteniendo los costes de producción a un nivel reducido. Se prestó particular atención a la estructura de los componentes internos durante el proceso de diseño. Se estableció un espacio central para la placa controladora ESP32 y el sistema de baterías,

que está protegido con una cubierta desmontable. Esta facilita el mantenimiento y la incorporación de mejoras futuras. Además, se crearon conductos internos para organizar el cableado y permitir la ventilación de las piezas electrónicas; de esta manera, el prototipo se vuelve más seguro y duradero. El ECOBOT tiene como núcleo funcional a un brazo robótico. Con una estructura articulada de tres grados de libertad, fue concebido con la capacidad de alcanzar, agarrar y colocar residuos dentro de un contenedor integrado. Se hizo un compartimiento el cual se añadió un electroimán que puede atraer materiales metálicos livianos, pero el diseño también prevé la opción de añadir otros sistemas de agarre, como pinzas o garras mecánicas. Este diseño adaptable fue desarrollado en su totalidad en CAD, replicando los movimientos y rangos de ángulos de cada articulación para asegurar la estabilidad durante el funcionamiento. Gracias a las simulaciones, fue posible corregir eventuales interferencias entre los componentes y garantizar una movilidad fluida y exacta. Se prestó la misma atención al desarrollo del sistema de tracción. El ECOBOT emplea ruedas motrices propulsadas por motores de corriente continua con reductores, lo que permite un desplazamiento controlado y estable sobre una variedad de superficies, desde el pavimento hasta el suelo natural. Para garantizar una distribución apropiada del peso y prevenir vuelcos durante la manipulación de objetos por el brazo robótico. En cuanto al sistema electrónico el ESP32 fue elegido como microcontrolador principal, por su habilidad para administrar, al mismo tiempo, la lectura de sensores, la comunicación inalámbrica y el control de motores. Este aparato posibilita la conexión con un amplio espectro de sensores, que abarcan desde la detección de obstáculos hasta la medición de calidad del aire, temperatura, humedad y ultrasonido. Estos sensores aumentan las habilidades del robot al permitir una interacción inteligente

con su entorno y al ofrecer datos ambientales pertinentes que robustecen el rol ecológico del proyecto. La parte trasera del chasis contiene un sistema de almacenamiento para los desechos recolectados como parte del diseño. Este contenedor está equipado con una abertura automática que se controla mediante un servomotor, el cual se activa cuando el brazo deja caer el objeto. Se optimizó la estructura con el fin de posibilitar el vaciado y la limpieza del compartimento, así como prevenir sobrecargas. En la etapa final de diseño se hicieron simulaciones de esfuerzo en las piezas producidas a través de impresión 3D, para comprobar su resistencia frente a torsiones, vibraciones y cargas dinámicas. Para optimizar la eficacia de recolección, también se simularon las trayectorias del brazo y las áreas alcanzadas por el electroimán. Estas pruebas en línea fueron fundamentales para perfeccionar el modelo antes de su producción física, disminuyendo los costos y las equivocaciones durante la fase de ensamblaje.

Análisis de costos

El análisis de costos del ECOBOT-R posibilita entender de forma transparente y clara los recursos económicos que se requieren para fabricar el prototipo. El proyecto fue planteado como una solución que puede replicarse y es accesible, lo que llevó a utilizar elementos de bajo costo sin afectar la funcionalidad esencial del robot. A continuación, se mostrarán los componentes que efectivamente se emplearon durante el proceso de construcción y sus valores específicos.

Costos de hardware

Para el desarrollo del robot se utilizaron dos placas principales, que eran ambas de la familia ESP32-S3. La primera fue una ESP32-S3-CAM-WROOM-NR16, que costó 51.000 COP. Se empleó esta tarjeta para controlar el sistema de visión del robot. La segunda placa, comprada por 35.000 COP, es una ESP32-S3-NR16 que se usó para el control general y la administración de sensores extra.

Para los demás componentes, como los actuadores para el brazo y el chasis fueron adquiridos con el objetivo de una buena función y un costo bajo, en cuanto a lo sensores se buscaron los mejores en el mercado en cuanto a un precio medio/bajo donde dieran un rendimiento bueno y cumpliera con todo lo que se exige en el ECOBOT, por ultimo los demás componentes son de buena calidad y complementan de buena manera el proyecto.

Componente	Cantidad	Costo unitario (COP)	Costo total (COP)
ESP32-S3 CAM WROOM NR16	1	51.000	51.000
ESP32-S3 NR16	1	35.000	35.000
PCA9685	1	40.000	40.000
Puentes H (drivers de motores)	2	35.000	70.000
Motores reductores	4	20.000	80.000
Servomotores metálicos (grandes)	2	35.000	70.000
Servomotores metálicos (pequeños)	3	25.000	75.000
Electroimán 5V	1	25.000	25.000
Sensores ultrasónicos HC-SR04	2	12.000	24.000
MQ-135 (calidad de aire)	1	30.000	30.000
DHT22 (temperatura y humedad)	1	20.000	20.000
Baterías + BMS (set)	1	120.000	120.000
Chasis (fabricación y montaje)	—	80.000	80.000
Cables, tornillería y conectores	—	20.000	20.000

Análisis de sostenibilidad

El proyecto ECOBOT-R incorpora una perspectiva de sostenibilidad que se conecta directamente con dos Objetivos de Desarrollo Sostenible esenciales para la

conservación del medio ambiente: el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) y el ODS 13 (Acción por el Clima). La literatura científica ha resaltado en gran medida el vínculo entre la sostenibilidad y la tecnología, al admitir que la robótica tiene el potencial de ayudar a reducir desperdicios, aumentar la eficacia energética y atenuar las consecuencias del cambio climático.(Giordano et al., 2023)

Contribución al ODS 12: Producción y Consumo Responsables

El ODS 12 fomenta la implementación de prácticas productivas que disminuyan el impacto en el medioambiente, reduzcan el consumo de recursos y promuevan la reutilización. El ECOBOT-R aborda estos objetivos desde diferentes perspectivas.

Uso de materiales con responsabilidad

Con polímeros biodegradables y componentes metálicos que se pueden volver a usar, fue construido principalmente el chasis del robot. Esto concuerda con las sugerencias de (Giordano et al., 2023) los cuales destacan que emplear materiales reciclables o biodegradables en sistemas robóticos ayuda directamente a disminuir residuos persistentes y a establecer pautas de producción responsables.

Optimización de los componentes electrónicos

El prototipo incorpora solamente los elementos necesarios para su operación, lo que disminuye la producción de desechos electrónicos. Esta resolución se encuentra en consonancia con la perspectiva sobre la eficiencia de recursos que (Xia & Ahmad, 2025) mencionan, que enfatizan que los diseños robóticos enfocados en reducir el uso de energía

y materiales contribuyen a satisfacer los principios del ODS 12.

Modularidad y arreglo

Gracias a la estructura modular, es posible reemplazar únicamente los componentes que se necesiten, lo cual extiende el tiempo de vida útil del aparato y fomenta un modelo de mantenimiento circular. Estas prácticas se alinean con las estrategias que (Giordano et al., 2023) describen para hacer más sostenible el ciclo de vida de los dispositivos robóticos.

Aporte al ODS 13, que trata sobre la acción climática

El ODS 13 exige que se implementen acciones tácticas y tecnológicas para disminuir las repercusiones medioambientales y robustecer la reacción ante el cambio climático. ECOBOT-R contribuye directamente a la vigilancia de variables medioambientales y a disminuir el requerimiento de recursos humanos y vehículos para trabajos que se repiten.

Vigilancia medioambiental para la actuación climática

El robot recopila información sobre la calidad del aire, la humedad y la temperatura, creando datos que son útiles para analizar las condiciones ambientales de cada localidad. (Giordano et al., 2023) destacan que los robots creados para la vigilancia medioambiental brindan una asistencia esencial para las tácticas de adaptación y mitigación del clima.

Disminución de emisiones indirectas

El ECOBOT-R ayuda a reducir las emisiones vinculadas al transporte cuando se llevan a cabo labores de inspección que normalmente necesitan viajes en vehículos de servicio o

motocicletas. (Xia & Ahmad, 2025) sostienen que la robótica, cuando se aplica a la administración de recursos y medioambiental, tiene el potencial de disminuir el impacto climático al optimizar procesos y reducir el consumo de combustibles fósiles.

Eficiencia en términos energéticos

El ECOBOT-R fue diseñado para tener un consumo promedio reducido (≤ 20 W), lo cual coincide con los progresos de (Xia & Ahmad, 2025) que destacan que la transición hacia sistemas robóticos con eficiencia energética es esencial para las acciones relacionadas con el clima en zonas urbanas e industriales.

Discusión de resultados

La evaluación del ECOBOT-R permitió un análisis realista de la actuación del prototipo con respecto a los objetivos establecidos al comienzo del proyecto. En líneas generales, el robot fue capaz de llevar a cabo sus principales tareas: moverse independientemente, registrar variables ambientales esenciales, reconocer diferentes tipos de residuos y realizar la recolección de elementos metálicos. No obstante, las pruebas también mostraron limitaciones vinculadas con el diseño, los materiales disponibles y la capacidad de procesamiento de los componentes elegidos. El funcionamiento del sistema de recolección fue uno de los elementos más destacados que se observaron. Aunque el diseño de las pinzas y del brazo hizo posible la validación del concepto funcional, la precisión del agarre se vio comprometida porque las pinzas fueron hechas de madera fina. Este material, aunque es asequible y sencillo de manipular, no proporcionó la estabilidad ni la rigidez requeridas para asegurar un agarre estable. Esto provocó que algunos objetos se deslicen o que la pinza pierda alineación en movimientos repetidos. A pesar de esta

restricción, el sistema logró evidenciar el principio de recolección y posibilitó la detección de claras oportunidades para optimizar la estructura en versiones futuras a través de materiales más duraderos, por ejemplo polímeros reforzados o elementos impresos en 3D con un grosor mayor.

El sistema satisfizo parcialmente las expectativas en lo que respecta a la detección de metales y plásticos. La categorización de desechos se vio influenciada por dos elementos primordiales. Primero, la calidad de la cámara integrada en la ESP32-S3-CAM no tiene la sensibilidad ni la resolución necesarias para proporcionar un reconocimiento ideal en condiciones de luz cambiantes. En segundo lugar, el procesador del microcontrolador tiene restricciones al ejecutar modelos de visión artificial más elaborados, a pesar de ser eficaz en las labores de adquisición y control de datos. Esto resultó en una disminución de la precisión al detectar objetos pequeños, superficies que reflejan o colores que son muy parecidos a los del ambiente. No obstante, el sistema logró diferenciar patrones fundamentales y notar diferencias suficientes para detectar residuos en condiciones controladas, lo que coincide con la perspectiva experimental del prototipo.

El ECOBOT-R demostró un rendimiento apropiado en senderos poco irregulares y superficies regulares en lo que respecta a la navegación y el desplazamiento. El empleo de cuatro motores reductores posibilitó una tracción firme y un movimiento ininterrumpido. No obstante, en terrenos con inclinaciones o superficies excesivamente rugosas, la estabilidad lateral del robot se vio afectada por la distribución de los componentes y el peso total del sistema. Estas observaciones llevan a la conclusión de que, aunque la plataforma funciona, necesita todavía optimizar su estabilidad estructural y el centro de gravedad para poder operar en terrenos con más exigencias.

En general, los resultados indican que el ECOBOT-R pudo validar su concepto funcional, a pesar de que algunas de sus capacidades se vieron perjudicadas por las restricciones inherentes al prototipo. Esto no es un error del sistema, sino una ocasión para perfeccionar el diseño, optimizar los materiales empleados y buscar opciones de hardware más potentes para las versiones por venir. Los resultados obtenidos indican que es factible construir un robot que sea educativo, modular y económico, el cual respalde labores relacionadas con el medioambiente. Esto se alinea con las metas del proyecto y establece fundamentos firmes para desarrollos más sofisticados.

Fase	Descripción	Actividades principales	Entregables
Fase 1 – Ensamblaje y Preparación	Integración física de todos los componentes del robot.	- Ensamblaje del chasis y distribución interna. - Instalación de motores, puentes H, servos y electroimán. - Montaje de sensores (ultrasonido, color, MQ-135 y DHT22). - Revisión de conexiones eléctricas y seguridad.	- Prototipo ensamblado. - Sistema eléctrico organizado y funcional.
Fase 2 – Integración de Software	Configuración del sistema de control y programaciones iniciales.	- Programación de controladores en ESP32-S3.- Integración de lectura de sensores y control de actuadores. - Implementación del módulo de comunicación. - Configuración del sistema de registro de datos.	- Firmware estable. - Comunicación funcional con interfaz de monitoreo.
Fase 3 – Pruebas en Entorno Controlado	Validación del funcionamiento en ambientes seguros.	- Pruebas de movilidad en superficies regulares. - Verificación del agarre y movimiento del brazo robótico. - Evaluación de precisión de detección con la cámara. - Ajuste de parámetros de navegación y agarre.	- Informe de pruebas internas. - Parámetros ajustados y sistema estable.

Fase 4 – Pruebas en Campo Real	Evaluación del rendimiento del robot en entornos urbanos o naturales.	- Pruebas de desplazamiento en parques o senderos. - Recolección de objetos metálicos reales. - Identificación de residuos plásticos y no metálicos. - Registro de datos ambientales en campo.	- Datos ambientales y de recolección obtenidos. - Análisis de desempeño en campo.
Fase 5 – Optimización y Cierre del Proyecto	Ajustes finales para mejorar el desempeño general.	- Corrección de problemas detectados en campo. - Refuerzo de componentes estructurales. - Optimización del algoritmo de detección y navegación. - Elaboración de documentación final.	- Prototipo optimizado. - Manual de usuario e informe final.

Conclusiones

La creación del ECOBOT-R hizo posible alcanzar con éxito las metas fijadas al comienzo del proyecto, lo que evidencia la viabilidad de construir un robot móvil a bajo costo que pueda colaborar en las tareas de recogida y clasificación básica de desechos, además de registrar variables ambientales en tiempo real.

En primer lugar, con relación al propósito de detectar residuos, el robot alcanzó a identificar metales y elementos no metálicos a través de la visión computacional. A pesar de que la resolución de la cámara integrada y la habilidad de procesamiento del microcontrolador limitaron la precisión de identificación, el sistema validó el concepto al demostrar que es capaz de detectar patrones visuales y contrastes suficientes para diferenciar ciertos tipos de residuos en situaciones controladas. Esta experiencia demostró la necesidad de agregar cámaras o sensores ópticos de mejor calidad en versiones futuras.

Respecto al objetivo de recolección, el ECOBOT-R fue capaz de efectuar movimientos elementales de agarre y levantar objetos metálicos utilizando un electroimán. Sin embargo, la exactitud del brazo se vio afectada debido a que las pinzas estaban fabricadas con madera delgada y no ofrecieron la rigidez necesaria para un agarre estable. No obstante, se validó el funcionamiento general y se detectaron mejoras evidentes para versiones posteriores.

El robot mostró un movimiento constante en superficies uniformes debido a sus cuatro motores reductores con respecto al objetivo de movilidad autónoma. Aunque se admite que el diseño puede mejorarse para funcionar en terrenos irregulares mediante la modificación de la distribución del peso y el centro de gravedad, la navegación respondió apropiadamente a las lecturas de los sensores ultrasónicos.

Con respecto a la meta de registrar variables ambientales, los sensores instalados hicieron posible medir la distancia, humedad, calidad del aire y temperatura de forma consistente con los valores previstos, lo cual confirma que el sistema de monitoreo funciona e integra correctamente.

Por último, el ECOBOT-R evidenció que es viable crear una solución funcional con piezas económicas y de fácil acceso, lo que permite mantener el proyecto dentro del presupuesto fijado.

REFERENCIAS

Adamides, G., & Edan, Y. (2023). Human–robot collaboration systems in agricultural tasks: A review and roadmap. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 204). Elsevier B.V.

- <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107541>
- Bonello, A., Refalo, P., & Francalanza, E. (2024). The Impacts of Industrial Safety on Environmental Sustainability in Human-Robot-Collaboration within Industry 5.0. *Procedia CIRP*, 122, 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.041>
- Giordano, G., Murali Babu, S. P., & Mazzolai, B. (2023). Soft robotics towards sustainable development goals and climate actions. *Frontiers in Robotics and AI*, 10. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1116005>
- Jiang, P., Wang, Z., Li, X., Wang, X. V., Yang, B., & Zheng, J. (2023). Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. *Journal of Manufacturing Systems*, 70, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.07.009>
- Jin, S., Yang, Z., Królczyk, G., Liu, X., Gardoni, P., & Li, Z. (2023). Garbage detection and classification using a new deep learning-based machine vision system as a tool for sustainable waste recycling. *Waste Management*, 162, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.014>
- Lakhout, A. (2025). Revolutionizing urban solid waste management with AI and IoT: A review of smart solutions for waste collection, sorting, and recycling. In *Results in Engineering* (Vol. 25). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104018>
- Li, J., Durazo-Cardenas, I., Ruiz-Carcel, C., He, F., Anderson, R., Hall, A., Burbridge, D., & Starr, A. (2024). Smart railways: The design and construction of an autonomous inspection and maintenance vehicle. *Procedia CIRP*, 128, 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.003>
- Mendez-Flores, E., Pourshahidi, A., & Egerstedt, M. (2025). *RaccoonBot: An Autonomous Wire-Traversing Solar-Tracking Robot for Persistent Environmental Monitoring*. <http://arxiv.org/abs/2501.14151>
- Nahiduzzaman, M., Ahamed, M. F., Naznine, M., Karim, M. J., Kibria, H. B., Ayari, M. A., Khandakar, A., Ashraf, A., Ahsan, M., & Haider, J. (2025). An automated waste classification system using deep learning techniques: Toward efficient waste recycling and environmental sustainability. *Knowledge-Based Systems*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113028>
- Páez-Ubieta, I. de L., Castaño-Amorós, J., Puente, S. T., & Gil, P. (2024). *Vision and Tactile Robotic System to Grasp Litter in Outdoor Environments*. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01930-2>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Optimization of energy consumption in industrial robots, a review. In *Cognitive Robotics* (Vol. 3, pp. 142–157). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.05.003>
- Stronger, D., & Stone, P. (2006). Towards autonomous sensor and actuator model induction on a mobile robot. In *Connection Science* (Vol. 18, Issue 2, pp. 97–119). <https://doi.org/10.1080/09540090600768690>
- Sung, Y., Chen, Z., Das, J., & Tokekar, P. (2023). *A Survey of Decision-Theoretic Approaches for Robotic Environmental Monitoring*. <http://arxiv.org/abs/2308.02698>
- Wiese, P., Kartsch, V., Guermendi, M., & Benini, L. (2025). *A Multi-Modal IoT Node for Energy-Efficient Environmental Monitoring with Edge AI Processing*. <https://doi.org/10.1109/COINS65080.2025.11125738>
- Xia, Y., & Ahmad, M. (2025). Industrial Robotics, Resource Efficiency, Energy Transition, and Environmental Quality: Designing a Sustainable Development Goals Framework for G7 Countries in the Presence of Geopolitical Risk. *Sustainability (Switzerland)*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/su17051960>