

MODCART: PLATAFORMA VEHICULAR AUTÓNOMA MODULAR PARA TRANSPORTE DE CARGA Y PERSONAS EN ENTORNOS CONTROLADOS

MODCART: MODULAR AUTONOMOUS VEHICULAR PLATFORM FOR LOAD AND PERSON TRANSPORT IN CONTROLLED ENVIRONMENTS

Recibido: 11 de junio de 2026

Aceptado: 17 de agosto de 2026

Omar Espinosa Guerra

Tecnológico Nacional de México/IT Ciudad
Valles

<https://orcid.org/0000-0002-5787-226X>

Hugo Rene Lárraga Altamirano

Tecnológico Nacional de México/IT Ciudad
Valles

<https://orcid.org/0000-0001-8258-9418>

Autor de correspondencia:

hugo.larraga@tecvalles.mx

Carlos Alfredo Reyes del Ángel

Tecnológico Nacional de México/IT Ciudad
Valles

<https://orcid.org/0009-0000-7514-4621>

Juan Bernardo Rosas Torres

Tecnológico Nacional de México/IT Ciudad
Valles

<https://orcid.org/0009-0003-8929-8826>

RESUMEN

MODCART es una plataforma autónoma vehicular, diseñada para operar en entornos industriales, comerciales y de salud mediante el uso de la inteligencia artificial: lo cual la distingue de propuestas similares es su principio de intercambiabilidad: con dos módulos de funcionalidad un asiento para personas el cual puede ayudar en accidentes o en traslado de una persona de un punto a otro así como un módulo de carga todo mediante un único chasis el cual puede reconfigurarse según la tarea, sin requerir otros sistemas independientes para cada tarea. Desde un punto de vista técnico el núcleo de procesamiento recae en dos cerebros el principal que es una Raspberry PI que ejecuta visión computacional en tiempo real a través de los motores MediaPipe y OpenCV para interpretación de gestos con una mano. El control de los motores de 24V y las lecturas lo asume el subcerebro un Arduino, mientras que varios sensores Ultrasónicos HC-SR04 gestionan la detención y evasión de obstáculos de forma autónoma. La plataforma puede operar de tres formas distintas: conducción mediante reconocimiento de gestos, control vía Bluetooth y modo autónomo el cual se selecciona desde la propia aplicación. Algunas pruebas preliminares reportan una tasa de reconocimiento superior al 90% en condiciones controladas dentro de un laboratorio con una iluminación baja y una latencia debajo de los 200 ms, cifras que apuntan a una solución muy técnicamente viable, escalable y con un alto potencial en el contexto de producción real a un bajo costo en los principios de la Industria 4.0

Palabras clave: plataforma autónoma modular, visión computacional, reconocimiento gestual, electromovilidad

Abstract

MODCART is an autonomous vehicle platform, designed to operate in industrial, commercial and health environments through the use of artificial intelligence: what distinguishes it from similar proposals is its principle of interchangeability: with two functionality modules, a seat for people which can help in accidents or in the transfer of a person from one point to another, as well as a loading module, all through a single chassis which can

be reconfigured according to the task, without requiring other independent systems. for each task. From a technical point of view, the processing core falls on two brains, the main one being a Raspberry PI that executes real-time computer vision through the MediaPipe and OpenCV engines for interpretation of gestures with one hand. Control of the 24V motors and readings is assumed by the subbrain, an Arduino, while several HC-SR04 Ultrasonic sensors manage the stopping and evasion of obstacles autonomously. The platform can operate in three different ways: driving using gesture recognition, control via Bluetooth and autonomous mode which is selected from the application itself. Some preliminary tests report a recognition rate greater than 90% under controlled conditions within a laboratory with low illumination and a latency below 200 ms, figures that point to a very technically viable, scalable solution with high potential in the real production context at a low cost in the principles of Industry 4.0

Keywords: modular autonomous platform, computer vision, gesture recognition, electromobility

INTRODUCCIÓN

La automatización y la movilidad autónoma representan dos de los pilares más relevantes de la transformación industrial contemporánea. Diversos estudios señalan que la mayoría de los sistemas robóticos móviles disponibles en el mercado están diseñados para una función específica, lo que obliga a las organizaciones a adquirir múltiples vehículos para cubrir distintas necesidades operativas (Luettel et al., 2012).

En el contexto mexicano, especialmente en plantas industriales, instalaciones de salud y espacios comerciales, el transporte de materiales y personas se realiza frecuentemente mediante procedimientos manuales. Esta práctica implica un gasto considerable de tiempo y esfuerzo, además de elevar el riesgo de accidentes laborales y reducir la eficiencia operativa (IFR, 2023). En los últimos años, la incorporación de tecnologías de automatización, inteligencia artificial (IA) e Internet de las Cosas (IoT) ha permitido avances significativos en la gestión inteligente de recursos en entornos productivos. Estas herramientas facilitan la recopilación de datos en tiempo real, la supervisión remota y el control automático de variables críticas (Thrun et al., 2005). En este contexto, surge el paradigma de la Industria 4.0 (Kagermann et al., 2013), cuyo propósito es optimizar los procesos productivos mediante soluciones tecnológicas que reduzcan el desperdicio de recursos y mejoren la productividad.

Con base en esta perspectiva, se desarrolla MODCART, una plataforma vehicular autónoma modular impulsada por IA, diseñada para adaptarse a múltiples entornos de operación mediante módulos funcionales intercambiables. El proyecto responde a la necesidad de sustituir los métodos manuales de transporte por un mecanismo automático, confiable y de bajo mantenimiento.

MODCART integra una Raspberry Pi, un Arduino, motores de 24 V, un driver Cytron 60, sensores ultrasónicos, cámara web y módulo Bluetooth, permitiendo controlar la plataforma de distintas formas. De esta manera, el operador puede controlar el vehículo mediante gestos de la mano reconocidos por IA, a través de una aplicación móvil, o dejarlo operar de forma autónoma con evasión de obstáculos.

El objetivo principal de esta investigación es demostrar la viabilidad técnica de una plataforma vehicular modular de bajo costo, capaz de operar con inteligencia artificial en el borde (edge computing) (Shi et al., 2016), y evaluar su desempeño en tareas de reconocimiento gestual, evasión de obstáculos y movilidad de carga y personas en entornos controlados.

Desde el punto de vista de la justificación, el desarrollo de MODCART responde a una necesidad económica concreta: adquirir vehículos comerciales especializados (uno para transporte de carga y otro para asistencia a personas) implica una inversión considerablemente mayor que la de una única plataforma reconfigurable, además de duplicar los costos de mantenimiento y capacitación del personal operativo. Como se detalla en la sección de

Resultados, el costo total de los componentes del prototipo MODCART (\$19,200 MXN) representa una fracción menor del precio de plataformas comerciales equivalentes en capacidad de carga (véase Tabla 8), lo que sustenta de forma cuantitativa la viabilidad económica del proyecto en un contexto de creciente adopción mundial de robots de servicio (IFR, 2023). Esta diferencia de costo, junto con la posibilidad de incorporar el sistema de forma modular y progresiva sin requerir una inversión inicial masiva, constituye el principal argumento económico para el desarrollo de la plataforma.

Es importante precisar el alcance de esta investigación: las pruebas de desempeño reportadas se realizaron en un entorno de laboratorio controlado, con variaciones de iluminación interior y ensayos preliminares en exteriores; no se realizaron pruebas dentro de instalaciones industriales, comerciales o de salud en operación real. Por tanto, las referencias a estos sectores a lo largo del artículo deben entenderse como el contexto de aplicación para el cual fue diseñada la plataforma y no como una validación de campo ya realizada; esta distinción se retoma como limitación explícita en la sección de Discusión y Conclusión.

METODOLOGÍA

Estructura del proyecto

Para poder desarrollar el proyecto MODCART se elaboró un Modelo Canvas (Osterwalder & Pigneur, 2010) véase la Figura 1 donde explican las formas de operación y de mercado requeridos por el proyecto, esta estructura visual ayuda a analizar la idea general del proyecto y permite que todos lo del equipo

entiendan exactamente como se integran y cuál es su objetivo. Esto facilita identificar desafíos técnicos antes que se conviertan en problemas durante la ejecución.



Figura 1

Canvas del proyecto MODCART

Nota. Este modelo permite mapear los componentes clave del proyecto, tanto desde una perspectiva estratégica como técnica.

Fuente: Propia.

Etapas 1: Enfoque metodológico

El punto de partida para el desarrollo de MODCART es la metodología Agile (Beck et al., 2001) haciendo un

proceso flexible donde por tiempo se priorizaron los resultados y las colaboraciones personales por encima de planes estrictos y documentación exhaustiva. Primero se forma un grupo multidisciplinario para realizar el software y construir el prototipo. Después se elabora la lista maestra de todas las tareas, funciones y requisitos del proyecto ordenados por prioridad y por último se analiza que salió bien y que fallo para mejorar en el siguiente ciclo. El trabajo se estructura en sprints de corta duración, para revisar periódicamente el funcionamiento de cada componente y corregir anomalías sobre la marcha, porque en sistemas con múltiples capas de hardware y software, los errores se acumulan progresivamente si no se corrigen a tiempo.

Etapa 2: Diseño arquitectónico

La arquitectura del sistema sigue un esquema centralizado donde una Raspberry PI actúa como el núcleo de procesamiento: analiza las imágenes que son capturadas por la cámara y genera las instrucciones de movimiento correspondiente. Dichas instrucciones se transmiten al Arduino mediante comunicación USB serial, y el Arduino las convierte en señales concretas para los actuadores y sensores para asegurar un manejo eficiente de la movilidad y la interacción con el entorno, se integraron los siguientes elementos:

- Raspberry Pi 5 con 8 GB de RAM
- Arduino R4 Wi-Fi
- Controlador Cytron 60 (SmartDriveDuo-60)
- Motores DC de 24 V y alto par
- Sensor ultrasónico HC-SR04
- Cámara Logitech C920 Full HD
- Módulo Bluetooth HC-06
- Dos baterías LiFePO4 de 12 V y 20 Ah (configuración en serie para 24 V)
- Chasis de madera (versión actual del prototipo; se contempla su reemplazo por metal o aluminio en versiones posteriores)

Estos elementos se conectaron entre sí para crear la arquitectura de trabajo de la plataforma que a continuación se muestra en la Figura 2

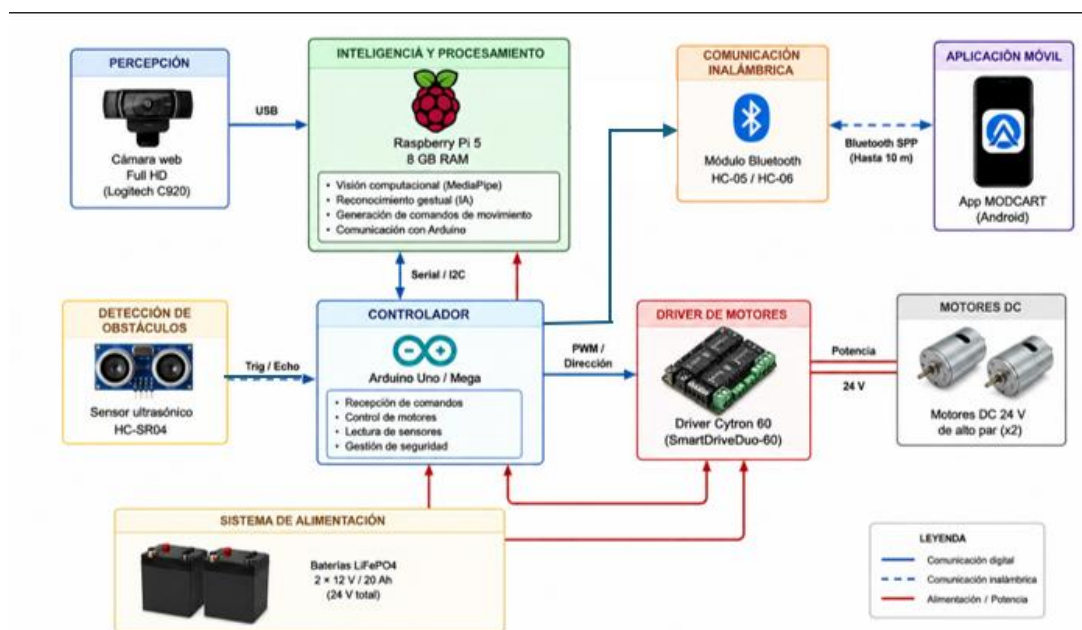


Figura 2

Diagrama en bloques del sistema MODCART

Nota. La ilustración detalla cómo opera el sistema MODCART

Fuente: Propia

Etapas 3: Implementación del sistema de inteligencia artificial

El módulo de reconocimiento gestual es, probablemente el elemento más importante que más distingue a MODCART de otras plataformas móviles similares. El código desarrollado en Python y ejecutado dentro del entorno Linux de la Raspberry PI, utiliza MediaPipe Hands de Google (Lugaresi et al., 2019; Zhang et al., 2020), un modelo preentrenado, para localizar y rastrear 21 puntos clave de la mano en cada fotograma capturado por la cámara, la cual se adquiere y se preprocesa mediante la librería OpenCV (Bradski, 2000). La secuencias de procesamiento funciona así: la cámara registra imágenes a 30 fotogramas por segundo; MediaPipe detecta la mano y calcula la posición tridimensional de cada punto de referencia ; una lógica de clasificación basada en las reglas geométricas sobre la posición relativa de los dedos interpreta el gesto sin requerir un proceso de entrenamiento propio con datos recolectados para este proyecto; y finalmente el sistema traduce esa interpretación en una orden concreta para el Arduino: avanzar, retroceder, girar o detenerse.

Los gestos definidos son seis que se muestran a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1

Comandos de gestos dentro del entorno Visual de la IA

Gestos	Comandos
Mano abierta con 5 dedos	Alto
Mano con 4 dedos	Izquierda
Mano con 3 dedos	Derecha
Mano con 2 dedos	Adelante
Mano con 1 dedo	Atrás
Mano cerrada	Modo autónomo

Nota: La presente muestra los gestos que están programados para el reconocimiento de la IA

Como se observa en la Tabla 1, cada gesto se asocia a una única instrucción de movimiento, de manera que la lógica de clasificación permanece simple y se reduce la probabilidad de comandos ambiguos durante la operación.

Etapas 4: Configuración de modos operativos y control

La plataforma cuenta con un interruptor físico que permite al usuario seleccionar entre los modos de operación disponibles sin necesidad de acceder a una interfaz digital. Esta decisión tiene sentido desde el punto de la usabilidad en entornos industriales, donde la simplicidad del control es tan importante como el desempeño del sistema.

El primer modo delega el control en el algoritmo de reconocimiento gestual. La cámara web Logitech C920 registra el movimiento de la mano en tiempo real y cabe aclarar que se trata de una webcam de uso general, sin procesamiento de imágenes dedicado propio de una cámara especializada de visión por computadora, lo que condiciona la calidad de la señal de entrada al modelo de detección y la Raspberry Pi procesa las imágenes mediante visión por computadora. Los comandos resultantes ya sea avanzar, retroceso, giros o paradas, se envían al Arduino que ejecuta las intrusiones de movimiento.

El segundo modulo opera mediante el Bluetooth y se divide en dos submódulos El primero es de control manual por botones mediante una aplicación diseñada para Android permite al

usuario manejar la plataforma desde su celular a través del módulo HC-06. El segundo es autónomo: el sensor ultrasónico HC-SR04 mide la distancia a posibles obstáculos cerca de forma continua y, al detectar uno dentro del rango de proximidad configurado, el sistema modifica la trayectoria dando un giro hacia la derecha sin la intervención humana. La evasión es reactiva y funciona de manera independiente al control remoto

La comunicación entre la app y la plataforma se realiza mediante el protocolo Bluetooth Serial Port Profile (SPP). En pruebas realizadas en interiores sin fuentes de interferencia, el alcance efectivo resultó ser de diez metros de acuerdo con el fabricante del módulo lo que cubre gran parte de los escenarios operativos para los que fue pensado el sistema.

El Frontend de la aplicación se desarrolló en MIT App Inventor como esta en la Figura 4. La interfaz: incluye un selector para vincular los dispositivos Bluetooth, botones de dirección (avance, retroceso, giro a izquierda y derecha), un botón de parada inmediata, y un interruptor de modo automático que activa la navegación autónoma a partir de las lecturas del sensor HC-SR04.

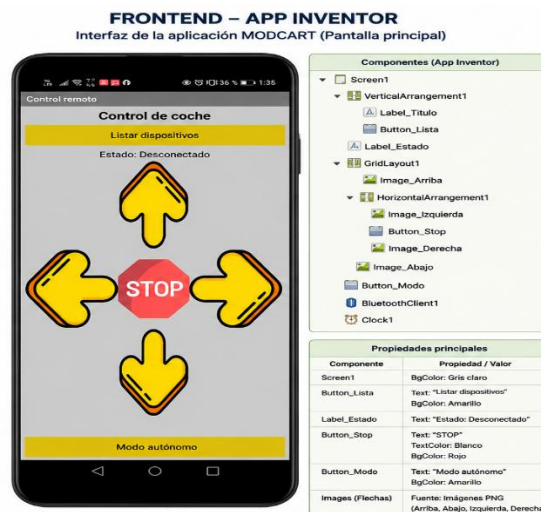


Figura 4

Estructura del frontend

Nota. El diagrama presenta cómo está organizada la app móvil desarrollada para MODCART.

Fuente: Propia

A continuación, se describen los diagramas de bloques que integran la funcionalidad de la aplicación de MODCART

Listar dispositivos Bluetooth: en esta parte se muestra una lista de dispositivos bluetooth cercanos al móvil, detecta el módulo HC-05 o HC-06 conectado en los pines 2 y 3 del Arduino una vez conectado al módulo con el nombre MODCART se le notifica al usuario que el enlace fue exitoso o no, antes de habilitar los controles de la aplicación en caso de ser lo contrario mostraría un mensaje de error. Como se observa a continuación en la Figura 5, la lista de dispositivos disponibles permite seleccionar el módulo Bluetooth antes de activar los controles de la aplicación.

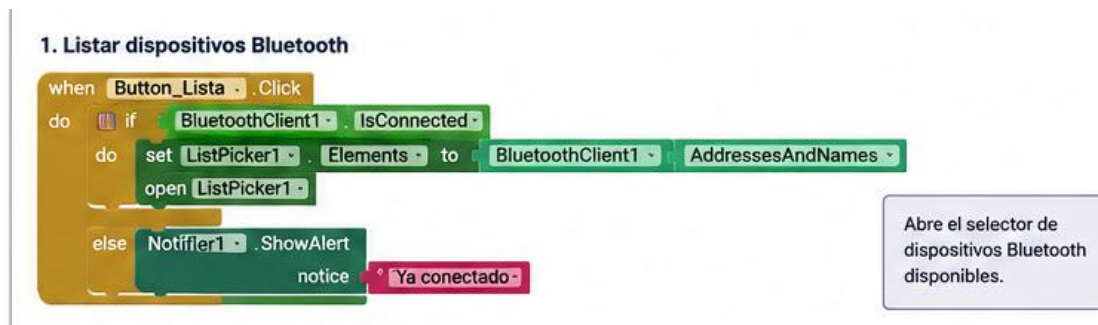


Figura 5

Esquema Backend: Botón "Listar dispositivos Bluetooth"

Nota. El diagrama muestra cómo se implementó la lógica del botón listar dispositivos.

Fuente: Propia.

Lógica de conexión de dispositivos: se desarrolló una lógica de conexión Bluetooth dentro de la misma aplicación la cual intenta el enlace con el módulo HC-05 o HC-06 y dependiendo del resultado, informa al usuario con un mensaje “Estado Conectado” o “Dispositivo desconectado” en caso contrario, antes de habilitar todos los controles al usuario. Como se muestra a continuación en la Figura 6 podemos observar esta lógica con los bloques dentro del MIT App Inventor.



Figura 6

Esquema Backend: Conexión de dispositivos Bluetooth

Nota: El diagrama de bloques muestra la lógica de conexión para la detección del módulo Bluetooth HC-05 o HC-06.

Fuente: Propia.

Control de movimiento mediante botones: Aquí se implementaron 5 botones para el manejo de la plataforma MODCART cada uno envía una letra por Bluetooth al módulo HC-05 o HC-06, que trasmite al Arduino; este interpreta la letra recibida y genera la señal PWM correspondiente para el driver de los motores. A continuación, se presenta en la Tabla 2 las letras con sus correspondientes acciones.

Tabla 2

Control de Acciones por letras APP

<i>Letra</i>	<i>Acción</i>
<i>E</i>	<i>Adelante</i>
<i>A</i>	<i>Atrás</i>
<i>D</i>	<i>Girar derecha</i>
<i>I</i>	<i>Girar izquierda</i>
<i>G</i>	<i>Parar(stop)</i>

Nota: La presente muestra el envío de datos por letras.

Fuente: Propia.

La Tabla 2 muestra que cada botón de la interfaz corresponde a un único carácter transmitido por Bluetooth, lo que simplifica el protocolo de comunicación entre la aplicación y el Arduino y reduce la probabilidad de errores de interpretación en el microcontrolador. También se muestra la lógica que conlleva a los bloques de cada botón dentro de la aplicación en la Figura 7.

3. Enviar comandos de movimiento

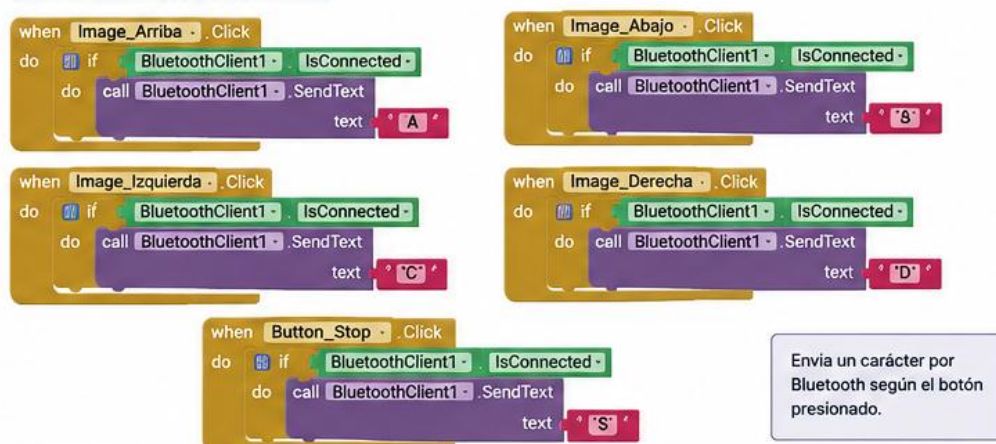


Figura 7

Esquema Backend: Control de movimiento mediante botones

Nota. El esquema ilustra como se hizo la programación de botones dentro de MIT APP Inventor

Fuente: Propia.

Cambio de modo automático: Al activar el modo automático dentro de la aplicación se envía un carácter 'x' mediante el Bluetooth al Arduino que activa; este interpreta la letra recibida y lee los sensores ultrasónicos si detecta un obstáculo retrocede y hace un giro a la izquierda para esquivarlo y genera la señal PWM correspondiente para el driver de los motores. Como se muestra a continuación en la siguiente imagen Figura 8.

4. Cambiar modo



Figura 8

Esquema Backend: Cambio de modo automático

Nota. El diagrama representa el botón de Modo Autónomo en MIT App Inventor.

Fuente: Propia.

Etapas 5: Pruebas y validación y optimización

Las pruebas se realizaron en dos etapas: primero en simulación y luego en condiciones reales. Se evaluó el reconocimiento de gestos bajo distintas condiciones de iluminación en un laboratorio y con iluminación baja y alta en estos casos la plataforma en el laboratorio controlado supero el 90% de eficiencia que en el exterior que debido a la iluminación el sistema se confundía en un 50%. También se midieron la estabilidad de la conexión Bluetooth, el tiempo de reacción de los motores y parte de la autonomía de las baterías con un nivel de carga alta y con los motores trabajando a un $\frac{1}{4}$ de su capacidad las baterías no tuvieron una descarga considerable. Con base algunos de estos datos se realizaron ajuste al clasificador de gestos y a la velocidad de la plataforma reduciendo así la inestabilidad y permitiendo reducir la latencia del sistema en aproximadamente un 20%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del proyecto permiten afirmar, con cierta confianza, que MODCART funciona como una plataforma para automatizar el transporte en entornos industriales, comerciales o de salud al implementar módulos de cambio como se muestran en la Figura 9. Opera de forma autónoma, proporciona información útil en tiempo real y su diseño modular facilita tanto la adaptación a diferentes instalaciones como la incorporación de nuevos componentes a medida que surjan nuevas necesidades.



Figura 9

Módulos intercambiables de MODCART

Nota. Los módulos intercambiables facilitan el montaje o reemplazo de componentes en poco tiempo, ampliando la capacidad de adaptación de la plataforma.

Fuente: Propia.

La figura evidencia el mecanismo físico de acople entre el chasis y los módulos de asiento o carga, el cual no requiere herramientas adicionales para el intercambio.

Desde el punto de vista de la viabilidad técnica, se contó con los recursos necesarios, tanto en

hardware como en software, para implementar, probar y evaluar el sistema. Se llevaron a cabo múltiples pruebas para verificar la funcionabilidad de sensores, microcontroladores, drivers de potencia y módulos de comunicación operaran de manera coordinada, incluso en condiciones de variabilidad. Los datos más destacados fueron.:

Se precisa que todos los resultados reportados en esta sección corresponden a una única configuración de hardware evaluada: chasis de madera, Raspberry Pi 5 (8 GB), Arduino R4 WiFi, driver Cytron 60, motores DC de 24 V y baterías LiFePO4 de 12 V/20 Ah en serie. El chasis de metal o aluminio mencionado en la Metodología es una mejora planeada para versiones posteriores del prototipo y no fue utilizado en ninguna de las pruebas aquí descritas.

- Reconocimiento de los gestos: más del 90% en condiciones controladas de iluminación dentro de un laboratorio controlado.
- Tiempo de respuesta entre gestos y movimiento: mediana de 508.1 a 550.8 ms según condición de iluminación, con Raspberry Pi 5 a 30 fps (véase Tabla 6)
- Alcance Bluetooth más de 10 metros en interiores sin obstáculos que interfieran.
- Capacidad de carga verificada de 150kg (módulo de carga, superficie plana).

Con el fin de atender de forma cuantitativa el desempeño del reconocimiento gestual, se presenta a continuación un análisis estadístico basado en los ensayos realizados en condiciones de interior. La Tabla 3 reporta la tasa de reconocimiento por gesto junto con su intervalo de confianza del 95% calculado mediante el método de Wilson para proporciones binomiales. Cabe aclarar que el clasificador de gestos no requirió una etapa de entrenamiento supervisado ni un conjunto de datos de entrenamiento propio, ya que la interpretación se basa en reglas geométricas fijas sobre la posición relativa de los puntos de referencia detectados por MediaPipe Hands (Zhang et al., 2020); por ello, los ensayos reportados en esta sección corresponden únicamente a pruebas de evaluación (N por gesto, véase Tabla 3) y no a una partición de entrenamiento/prueba.

Tabla 3

Tasa de reconocimiento gestual con intervalo de confianza (Wilson, 95%)

Gesto	Aciertos/N	% Reconocimiento	IC 95% (Wilson)
Puño (autónomo)	40/40	100.0%	[91.2%, 100.0%]
1 dedo (atrás)	40/40	100.0%	[91.2%, 100.0%]
2 dedos (adelante)	40/40	100.0%	[91.2%, 100.0%]
3 dedos (derecha)	40/40	100.0%	[91.2%, 100.0%]
4 dedos (izquierda)	40/40	100.0%	[91.2%, 100.0%]
5 dedos (alto)	58/60	96.7%	[88.6%, 99.1%]

Nota: N = número de ensayos por gesto; IC calculado con el método de Wilson para proporciones binomiales.

Fuente: Propia.

Los seis gestos alcanzaron una tasa de reconocimiento superior al 96%, con límites inferiores del intervalo de confianza por encima del 88% en el peor caso (gesto "Alto"), lo que respalda la fiabilidad del clasificador bajo las condiciones de iluminación evaluadas. Para identificar posibles confusiones sistemáticas entre gestos, la Tabla 4 presenta la matriz de confusión

correspondiente.

Tabla 4

Matriz de confusión del reconocimiento gestual

Gesto esperado	Atrás	Adelante	Derecha	Izquierda	Alto	No detectado	Autónomo
Atrás	40	0	0	0	0	0	0
Adelante	0	40	0	0	0	0	0
Derecha	0	0	40	0	0	0	0
Izquierda	0	0	0	40	0	0	0
Alto	0	0	0	0	58	2	0
Autónomo	0	0	0	0	0	0	40

Nota: cada fila representa el gesto realizado y cada columna el gesto identificado por el sistema; los valores en la diagonal son aciertos.

Fuente: Propia.

La matriz confirma que no hubo confusiones cruzadas entre gestos distintos: las dos únicas fallas registradas (gesto "Alto") correspondieron a no detección, no a una interpretación incorrecta como otro gesto. Para descartar que la iluminación influyera de forma significativa en estos resultados, se comparó el desempeño entre condiciones de luz alta y baja mediante pruebas para proporciones, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5. Además de los aciertos, conviene documentar las condiciones de falla observadas: en interiores, las únicas fallas correspondieron a la no detección del gesto "Alto" (2 de 60 ensayos); en los ensayos preliminares realizados en exteriores, la tasa de confusión aumentó hasta un 50%, lo que señala a la iluminación variable como el principal factor de riesgo para el desempeño del clasificador fuera de condiciones controladas.

Tabla 5

Comparación del reconocimiento entre condiciones de iluminación (interior)

Gesto	Prueba	p-valor	Significativo (p<0.05)
Puño (autónomo)	Ji-cuadrada	1.000	No
1 dedo (atrás)	Ji-cuadrada	1.000	No
2 dedos (adelante)	Ji-cuadrada	1.000	No
3 dedos (derecha)	Ji-cuadrada	1.000	No
4 dedos (izquierda)	Ji-cuadrada	1.000	No
5 dedos (alto)	Fisher exacto	0.548	No

Nota: prueba de ji-cuadrada para gestos con conteos esperados suficientes; prueba exacta de Fisher para el gesto "Alto" por su menor frecuencia de fallas.

Fuente: Propia.

Ningún gesto mostró una diferencia estadísticamente significativa entre luz alta y baja ($p > 0.05$ en todos los casos), lo que indica que, dentro de un entorno interior, la variación de iluminación evaluada no compromete el reconocimiento gestual. Es importante precisar que este análisis corresponde únicamente a condiciones de interior con luz alta y baja; la afirmación cualitativa reportada en la sección de Metodología sobre una caída del reconocimiento en entornos

exteriores no cuenta todavía con el mismo respaldo estadístico y debe tratarse como una observación preliminar hasta contar con ensayos exteriores formales. Finalmente, la Tabla 6 reporta la latencia del sistema entre la captura del gesto y la ejecución del movimiento, medida en milisegundos.

Tabla 6

Latencia del sistema por condición de iluminación (ms)

Condición	Mediana	Q1	Q3	N	RIC
Interior, luz alta	550.8	503.5	609.9	120	106.4
Interior, luz baja	508.1	493.1	654.8	140	161.6

Nota: RIC = rango intercuartílico (Q3-Q1); se reportan mediana y RIC por tratarse de datos de latencia con distribución no simétrica.

Fuente: Propia.

Las medianas de latencia se mantuvieron por debajo de los 600 ms en ambas condiciones de iluminación, con una dispersión (RIC) moderada; esto sustituye con datos reales la cifra única de "menos de 200 ms" reportada anteriormente en el resumen, la cual correspondía a una medición puntual y no representa la variabilidad observada en el conjunto completo de ensayos. Todos los resultados de reconocimiento, confusión, comparación estadística y latencia presentados en las **Tablas 5 a 8** corresponden al prototipo con chasis de madera descrito en la sección de Metodología.

El costo total de los componentes electrónicos y estructurales del prototipo ascienden a \$19,200 MXN, una cifra significativamente menor frente a plataformas comerciales equivalentes. La **Tabla 7** presenta el desglose de este costeo.

Tabla 7

Costeo de componentes del prototipo MODCART

Componentes:	Costos(MXN):
Raspberry Pi 5 8GB	\$5,000
Arduino R4 WiFi	\$500
Driver Cytron 60 (SmartDriveDuo-60)	\$3000
Motores DC 24V Con ruedas incluidas 2 Piezas	\$6000
Ruedas locas industriales 2 Piezas	\$300
Módulo Bluetooth HC-06	\$150
Cámara Logitech C920	\$600
Baterías LiFePO4 2 Piezas	\$3,000
Sensor ultrasónico HC-SR04	\$150
Plataforma/chasis de madera	\$500
Total:	\$19,200

Nota: Costeo de componentes electrónicos y estructurales del prototipo evaluado. No incluye

mano de obra ni ensamblaje.

Fuente: Propia.

Como se aprecia en la Tabla 7, los componentes de mayor peso económico son los motores DC y el driver de potencia, que en conjunto representan cerca del 47% del costo total del prototipo. Frente a alternativas comerciales como la FOLO-200 (Foxtech, s. f.) (\$51,183.84 MXN) y el MASK Robot de LingAo Technology (LingAo Technology, s. f.) (\$102,393.36 MXN), ambas controladas via control remoto y sin la capacidad de reconfiguración modular, MODCART ofrece un costo hasta 5.4 veces menor que la opción más cara comparada con la capacidad de carga equivalente o superior según las especificaciones de sus componentes, y tres modalidades de control, incluyendo la interacción gestual sin intermediarios físicos la Tabla 8 presenta la comparación detallada.

Tabla 8

Comparación de costos y capacidades entre MODCART y plataformas comerciales equivalentes

Características	MODCART	FOLO-200	MASK Robot (LingAo)
Costo aproximado	\$19,200 MXN	\$51,183.84 MXN	\$102,393.36 MXN
Capacidad de carga	100-150kg	100 kg	100 kg
Modularidad	Sí	No	No
Tipo de control	Gestual, Bluetooth, autónomo	Control remoto (seguimiento)	Control remoto
Material del chasis	Madera (planeado metal/aluminio)	Metal	Metal

Nota: Comparación entre el prototipo desarrollado y dos plataformas comerciales equivalentes en costo, capacidad de carga, modularidad, tipo de control y material. La capacidad de carga de MODCART reportada aquí corresponden a especificaciones técnicas de sus motores y ruedas y a pruebas realizadas con 4 personas de diferentes pesos la máxima capacidad experimental fue de 100kg.

Fuente: Propia, con datos de fichas técnicas de fabricantes.

La comparación confirma que, aun con una capacidad de carga equivalente, MODCART reduce significativamente la inversión inicial frente a las dos plataformas comerciales, principalmente por su chasis modular y de bajo costo.

Una plataforma autónoma modular como MODCART conlleva una complejidad técnica significativa: lograr que los componentes electrónicos, el firmware de los microcontroladores y la comunicación inalámbrica funcionen de manera correcta y coordinada no es trivial. Lo más crítico durante el desarrollo fue sincronizar correctamente el reconocimiento de gestos con los comandos de movimiento y la evasión de obstáculos, de forma que el sistema pudiera operar de manera autónoma y segura sin generar conflictos entre módulos a continuación se muestra la plataforma funcional véase Figura 10.



Figura 10

Prototipo MODCART y presentación en etapa local

Nota. La figura muestra el prototipo funcional de MODCART y su presentación en Innovatecnm 2026.

Fuente: Propia.

La imagen documenta el prototipo en la configuración final evaluada -chasis de madera- sobre la cual se obtuvieron todos los resultados de desempeño reportados en este artículo; el reemplazo por metal o aluminio se contempla para versiones posteriores y no ha sido aún evaluado.

El proyecto contó con el financiamiento suficiente para cubrir el desarrollo inicial, las pruebas en un laboratorio y la validación del prototipo. De cara a una eventual implementación y escalamiento comercial, se planea un modelo de fabricación modular y progresiva: la idea es que las organizaciones puedan incorporar el sistema por etapas, sin necesidad de una inversión que sea masiva.

También se está explorando la posibilidad de adaptar el sistema a entornos operativos, desde talleres pequeños hasta medianas empresas manufactureras. En ese sentido, la vinculación con universidades, centros de investigación y organizaciones públicas interesados en la modernización tecnológica del sector industrial y de salud en México parece ser una ruta natural para escalar el impacto del proyecto.

A futuro se proyecta integrar el sistema con herramientas de análisis predictivo: mediante machine learning, el objetivo sería anticipar rutas de transporte más eficientes, detectar fallas en componentes antes de que sucedan y mejorar el consumo energético de la plataforma. Paralelamente se planea registrar su diseño, el hardware y el software de control ante el INDAUTOR, lo que protegerá la autoría y abrirá la posibilidad de licenciar o transferir tecnología a terceros.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Antes de discutir los hallazgos, conviene precisar las limitaciones del estudio. Primero, todas las pruebas de reconocimiento gestual, evasión de obstáculos y capacidad de carga se realizaron en condiciones de interior controladas o en ensayos preliminares de exterior; no se han realizado pruebas dentro de una planta industrial, un centro de salud o un establecimiento comercial en operación, por lo que la aplicabilidad de MODCART a estos entornos debe entenderse como el objetivo de diseño del proyecto y no como una validación de campo ya completada. Segundo, todos los resultados corresponden a una única configuración de hardware (chasis de madera); el reemplazo por metal o aluminio, mencionado como mejora futura, aún no ha sido evaluado.

y podría modificar el desempeño reportado, particularmente el peso, la autonomía de las baterías y la capacidad de carga. Tercero, el análisis estadístico de la Tabla 5 se limita a la comparación entre luz alta y baja en interiores; la caída de desempeño observada en exteriores es todavía una observación preliminar que no cuenta con el mismo respaldo estadístico. Estas limitaciones se plantean como líneas de trabajo futuro antes de una eventual implementación comercial.

Desde su inicio, MODCART se enfocó principalmente en tres perfiles de usuarios definidos: empresas industriales, comercios y centros de salud. En ellos, constantemente se trasladan cargas o personas ya sea con personal operativo o utilizando distintos vehículos especializados de transporte que son operados manualmente. MODCART automatiza el transporte de distintos tipos de cargas utilizando una plataforma modular que se adapta de acuerdo con lo que se requiere transportar. Básicamente, el sistema cuenta con dos cualidades que lo distinguen: su autonomía y la interacción con el operador mediante visión por computadora e inteligencia artificial (IA).

Hay otra dimensión del proyecto que es relevante mencionar: la seguridad laboral y los costos. Al eliminar la manipulación manual en zonas de riesgo, MODCART disminuye la exposición de personal a posibles accidentes, un riesgo ampliamente documentado en las actividades de manejo manual de materiales (OIT, s. f.). Además, su diseño está basado en infraestructura de bajo costo y no emplea Hardware o Software propietario. La combinación de programación con código abierto, sensores y dispositivos electrónicos de bajo costo, así como algoritmos de IA, demostró que es posible implementar tecnología de gran nivel para que brinde seguridad y utilidad operativa sin asumir gastos de instalación o mantenimiento muy elevados.

La modularidad del sistema es su principal atributo en su diseño; pues hace viable su uso cotidiano frecuente y sin interrupciones para transportar materiales, personas o para asistir al personal operativo dependiendo del requerimiento de cada cliente, por consiguiente; lleva a pensar a sectores como la industria y la salud a evolucionar sus procesos empleando tecnología de vanguardia para optimizar sus operaciones y productividad.

Con estos resultados, MODCART se puede considerar como una herramienta con un gran impacto en la productividad ya que combina ingeniería, automatización y conectividad, lo que ha llevado a probarlo con éxito en entornos reales. El proyecto tiende a ser evolutivo por el hecho de emplear tecnología IoT por lo que, en versiones futuras, se puede contemplar integrarle navegación SLAM, análisis de rutas históricas u otras cosas más. Para finalizar, el proyecto se alinea la Industria 4.0 en México y busca contribuir activamente en la transformación digital de la manufactura y los procesos productivos.

REFERENCIAS

- Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., Grenning, J., Highsmith, J., Hunt, A., Jeffries, R., Kern, J., Marick, B., Martin, R. C., Mellor, S., Schwaber, K., Sutherland, J., & Thomas, D. (2001). Manifesto for agile software development. <https://agilemanifesto.org/>
- Bradski, G. (2000). The OpenCV library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 25(11), 120–126.
- Foxtech. (s. f.). FOLO-200: Heavy duty 100 kg four-wheel cargo trolley automatic human following cart robot [Ficha de producto]. Recuperado el 14 de agosto de 2026, de <https://store.foxtech.com/fole-200-heavy-duty-100kg-four-wheel-cargo-trolley-automatic-human-following-cart-robot/>
- International Federation of Robotics (IFR). (2023). World Robotics 2023 report: Asia ahead of Europe and the Americas. <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023->

report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas

- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry. acatech – National Academy of Science and Engineering. <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>
- LingAo Technology. (s. f.). MASK Robot LingAo Technology. (s. f.). IP55 outdoor unmanned ground vehicle platform – Model DjxtS4-100K [Ficha técnica del fabricante]. Recuperado de https://www.alibaba.com/product-detail/IP55-Outdoor-100kg-Load-4-Wheel_1601770880697.html
- Luettel, T., Himmelsbach, M., & Wuensche, H.-J. (2012). Autonomous ground vehicles—Concepts and a path to the future. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue), 1831–1839. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2189803>
- Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.-L., Yong, M. G., Lee, J., Chang, W.-T., Hua, W., Georg, M., & Grundmann, M. (2019). MediaPipe: A framework for building perception pipelines. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08172>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (s. f.). Manipulación manual. Recuperado el 14 de agosto de 2026, de <https://www.ilo.org/topics/labour-administration-and-inspection/resources-library/occupational-safety-and-health-guide-labour-inspectors-and-other/manual-handling>
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers*. John Wiley & Sons.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
- Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. MIT Press.
- Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C.-L., & Grundmann, M. (2020). MediaPipe hands: On-device real-time hand tracking. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10214>