

Industry 5.0 oriented rotating forklift prototype for inventory handling

Anny Astrid Espitia-Cubillos¹; Laura María Vargas Duanca²; Robinson Jiménez-Moreno³

^{1,3}Associate professors Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, anny.espitia@unimilitar.edu.co,
robinson.jimenez@unimilitar.edu.co

²Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, est.lauram.vargasd@unimilitar.edu.co

Abstract—The following document presents the design of a scale prototype of an automatic forklift for handling inventory boxes. The design is based on the CAD model and its subsequent 3D printing, which allowed its assembly with the necessary electronics and motion control through an STM32 microcontroller card. A stress analysis was performed on the CAD design of the prototype that demonstrates the stability of the system and guarantees its operation under the expected conditions. An App for cell phone was designed using Bluetooth Electronics software that allowed controlling the displacement motors and servomotors of the box handling module remotely, including the option of turning to rearrange the box. The effectiveness of the physical module is validated when used from the cell phone for gripping and transporting boxes, as well as the programming of an automatic routine that allows it to operate autonomously in future work.

Keywords— STM32, wireless communication, forklift, CAD design, industry 5.0

Prototipo de montacargas giratorio para manipulación de inventario orientado a industria 5.0

Anny Astrid Espitia-Cubillos¹; Laura María Vargas Duanca²; Robinson Jiménez-Moreno³

^{1,3}Profesores asociados Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, anny.espitia@unimilitar.edu.co,
robinson.jimenez@unimilitar.edu.co

²Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, est.lauram.vargasd@unimilitar.edu.co

Resumen— El siguiente documento presenta el diseño de un prototipo a escala de un montacargas automático para manipulación de cajas de inventario. El diseño parte del modelo CAD y su posterior impresión 3D, lo que permitió su ensamble con la electrónica necesaria y control de movimiento mediante una tarjeta microcontrolada STM32. Se realizó un análisis de esfuerzos sobre el diseño CAD del prototipo que demuestra la estabilidad del sistema y garantiza su funcionamiento bajo las condiciones previstas. Se diseñó una App para celular mediante el software Bluetooth Electronics que permitió controlar los motores de desplazamiento y los servomotores del módulo de manipulación de cajas de forma remota, se incluye la opción de giro para reacomodación de la caja. Se logra validar la efectividad del módulo físico al ser usado desde el celular para agarre y transporte de cajas, así como la programación de una rutina automática que le permita en un trabajo futuro operar autónomamente.

Palabras clave— STM32, comunicación inalámbrica, montacargas, diseño CAD, industria 5.0.

I. INTRODUCCIÓN

Con los avances de la industria 4.0 y 5.0, el desarrollo de fábricas inteligentes se centra como objeto de investigaciones variadas. Una fábrica inteligente implica, a su vez, un almacén inteligente que permita contar con información real y confiable sobre los niveles de inventario junto con la localización de los productos dentro del almacén en tiempo real. Para ello también se han desarrollado montacargas inteligentes [1], dado que la manipulación de producto es usual en un gran número de empresas, incluso con la operación de más de un montacargas en el mismo espacio de trabajo [2].

Un enfoque habitual para el desarrollo de investigaciones con agentes móviles es el uso de escenarios virtuales, donde para montacargas se encuentran investigaciones para la operación del montacargas [3][4] y su navegación [5]. Teniendo como base que poder controlar un montacargas requiere también de su análisis cinemático y dinámico en relación con el objeto a manipular, lo que se enfoca en este caso en el centro de gravedad por la naturaleza de la operación del montacargas [6][7].

A partir de la caracterización de la labor del montacargas se puede estudiar métodos de propulsión [8], estimación de ubicación [9] o mejoras en el actuador de locomoción o motor [10], ya sea con herramientas de simulación, o prototipos. Sin embargo, algunos casos requieren investigaciones in situ y en modelos reales, como los riesgos y seguridad del conductor

[11], toma de datos por sensores para análisis en tiempo real [12][13] y localización en tiempo de real de un conjunto de montacargas para mejorar tiempos de desplazamientos y evitar accidentes por colisión [14]. Algunos de los esquemas de seguridad con montacargas pueden ser simulados y soportados por algoritmos de inteligencia artificial [15].

Este análisis del estado del arte es una muestra de los campos de acción en investigación con montacargas, por ello y con el objetivo de desarrollar un montacargas para manipulación de cajas que opere con técnicas de inteligencia artificial para evasión de obstáculos dinámicos, como otros montacargas y personal, que este basado en sistemas de visión para navegación [16] y seguimiento de trayectoria [17] con conexión inalámbrica [18]. Se propone el desarrollo de un prototipo de montacargas para navegación autónoma, con un efector rotatorio que permita el giro de cajas, en ambientes de almacenamiento [19]. Para su validación se usa una simulación como en [20], donde diseñaron una carretilla elevadora inteligente RFID que funciona en un almacén 4.0 de papel tisú.

También en [21] se propuso un método de supervisión de montacargas en escenarios de Industria 4.0 diseñado para la gestión automática de grandes almacenes mucha rotación de inventarios.

Finalmente, en [22] señalan hoy en día los montacargas se entienden como equipos que permiten la manipulación de objeto en almacenes, facilitando su gestión con sistemas inteligentes, con algunos avances en autonomía que incluyen ruteo y planeación de movimientos con inteligencia artificial.

II. DISEÑO Y MONTAJE

A. Modelo CAD

Para el diseño del prototipo se usan varillas de aluminio de 8 mm de diámetro sobre un sistema de transporte tipo oruga las cuales fueron fijadas mediante rodamientos y con soportes impresos en 3D, todo ello para darle soporte estructural a la torre, donde se implementó un sistema de elevación mediante un mecanismo de tornillo sin fin de tipo trapezoidal al que se le acopló un motor reductor para subir y bajar el soporte de las cajas.

Se utilizan 4 palas esquineras para asegurar cada caja, un servomotor MG966R con el fin de girarla hasta 260°, un sensor ultrasónico de distancia que permite detectar la cercanía al palet y un sensor de color RGB.

El diseño elaborado en el software SolidWorks está integrado por un total de 50 piezas, que incluye soportes para los componentes electrónicos, cuya representación CAD completa desde dos ópticas se puede observar en la Fig. 1.

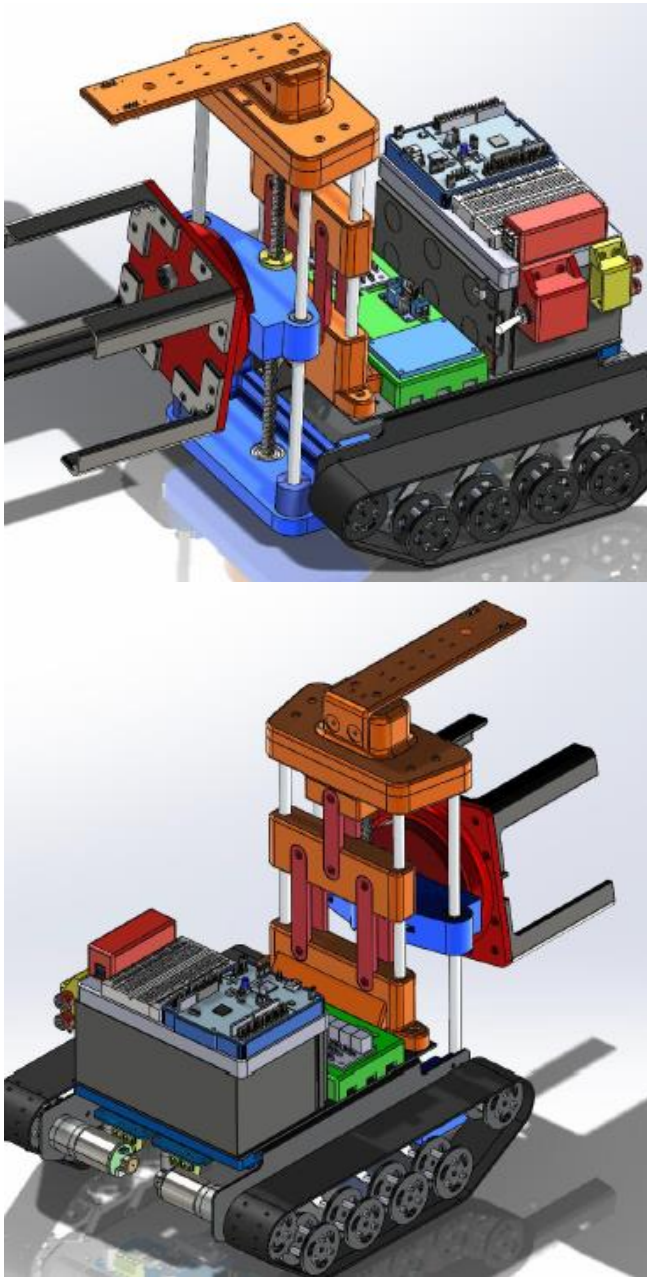


Fig. 1 Diseño CAD de las piezas ensambladas.

En la Fig. 2. se presenta el diseño de la caja que será manipulada, para garantizar el reconocimiento de su posición correcta una de sus caras es de color rojo, que será detectado gracias al sensor de color RGB, permitiendo al prototipo orientarla correctamente antes de ponerla en el estante.



Fig. 2 Caja a manipular.

B. Impresión 3D y ensamble

El prototipo se fabrica utilizando diferentes materiales, seleccionados según el nivel de rigidez requerido para cada componente, las piezas ensambladas se pueden observar en la Fig. 3.

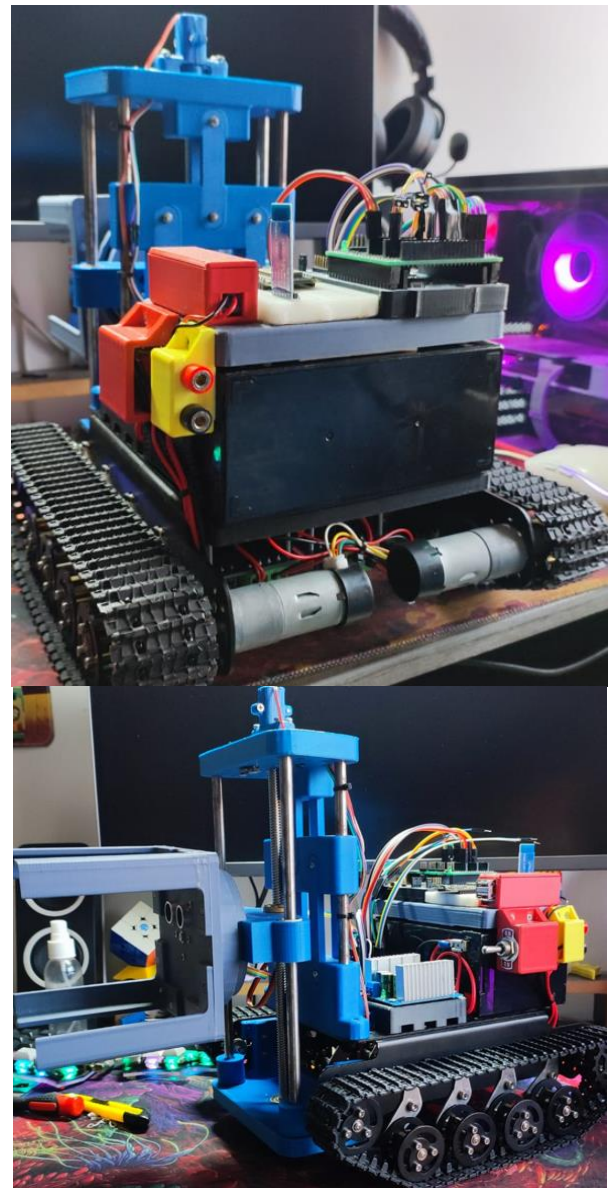


Fig. 3. Impresión de las piezas.

La Tabla I relaciona la cantidad de material de impresión utilizado por pieza y en total, así como los costos asociados y las características del proceso de impresión. Para el caso Tex corresponde a la temperatura de extrusor (°C) de la impresora 3D, Tc a la temperatura de cama (°C), Ti al Tiempo de impresión en formato (hh:mm), Mat al tipo de material de impresión empleado, dependiendo de los requerimientos estructurales de cada componente, y el costo está relacionado en pesos colombianos (COP).

TABLA I
MATERIALES Y COSTOS DE IMPRESIÓN

Parte impresa	Cant.	Gr.	Tex	Tc	Ti	Mat.	Costo
Acople Motor	1	1	260	90	0:10	ABS	147
Soporte Motor	2	9	260	90	1:21	ABS	1.269
Elabon Union	4	17	260	90	1:57	ABS	2.193
Elabon Union 2	2	7	260	90	0:49	ABS	908
Separador Varillas	1	73	260	90	7:16	ABS	9.041
Separador Varillas Mitad	1	45	260	90	4:57	ABS	5.733
Separador Varillas Roscada Y Lisas	1	71	260	90	7:25	ABS	8.912
Corredera	1	67	260	90	7:13	ABS	8.484
Union Varillas Abajo	1	75	260	90	7:35	ABS	9.328
Disco Fijo	1	34	260	90	3:23	ABS	4.210
DiscoExterno	1	73	260	90	7:34	ABS	9.143
Pala	4	68	260	90	7:54	ABS	8.806
Soporte RGB	1	26	260	90	3:00	ABS	3.360
ShieldPuentesH	1	48	200	60	5:18	PLA	5.642
ShieldSTM	1	41	200	60	4:07	PLA	4.680
BaseSTM	1	17	200	60	1:35	PLA	1.898
ShieldPotencia	1	39	200	60	4:20	PLA	4.593
ShieldPuentesH	1	47	200	60	5:27	PLA	5.613
TapaSuperior2	1	67	260	90	6:43	ABS	8.314
CaseSwitch	1	18	200	60	1:54	PLA	2.086
TapaSwitchCase	1	2	200	60	0:15	PLA	245
Case5VDC	1	10	200	60	1:03	PLA	1.157
TapaCase5V	1	4	200	60	0:26	PLA	467
TapaBornas	1	2	200	60	0:11	PLA	222
SoporteBornas	1	6	200	60	0:43	PLA	724
ShieldMicrosXD	1	59	200	60	5:17	PLA	6.516
Espaciador	4	10	260	90	1:16	ABS	1.331
Caja	1	77	220	70	6:38	TPU	13.805
TOTAL	39	1013	-	-	105:47	-	128.826

El ensamble con la parte electrónica implicó determinar los motores a emplear, para el mecanismo del tornillo sin fin se escoge un Motorreductor N20-200 de 12V con una velocidad de 200 RPM y un torque de 1 kg·cm, por otro lado, para la rotación de las cajas, se elige un servomotor MG966R con un rango de giro de 260°.

La programación del prototipo se llevó a cabo utilizando dos microcontroladores, una tarjeta STM32 y una tarjeta ESP32. La STM32 trabaja a una velocidad de 84 MHz con un voltaje de 3.3 a 5 voltios, cuenta con múltiples interfaces de comunicación (UART, I2C, SPI) y capacidad para manejar tareas en tiempo real por lo que se seleccionó como sistema de control principal que gestiona los controles de los motores de desplazamiento, el motor del tornillo sin fin encargado de subir y bajar la plataforma del montacargas y el servomotor que posiciona las cajas, además, integra un sensor ultrasonido para la detección de cajas y la IMU para lograr el futuro desarrollo de la autonomía en el movimiento del prototipo, finalmente, también se encarga de recibir y procesar las señales enviadas por la ESP32. La ESP32 como microcontrolador secundario, se encarga de leer el sensor RGB que monitorea la posición de la caja y el láser de distancia VL53L0X, que determina la altura a la que se encuentra la plataforma del montacargas, estos datos, son transmitidos a la STM32 por medio de la activación de un pin y comunicación serial respectivamente.

Para el diseñar los circuitos impresos (PCB) que permiten conectar los elementos y compartir la energía de la batería, se usó el software Proteus.

La Fig. 4. presenta la electrónica incorporada, la parte a) corresponde a la Batería sellada de 12v-12 AH, la parte b) a la tarjeta STM32F401RE usada como sistema de control y en la parte c) se observa el chasis en aluminio que permite el ensamble del prototipo y su movilidad horizontal con un sistema de oruga en cada lado.

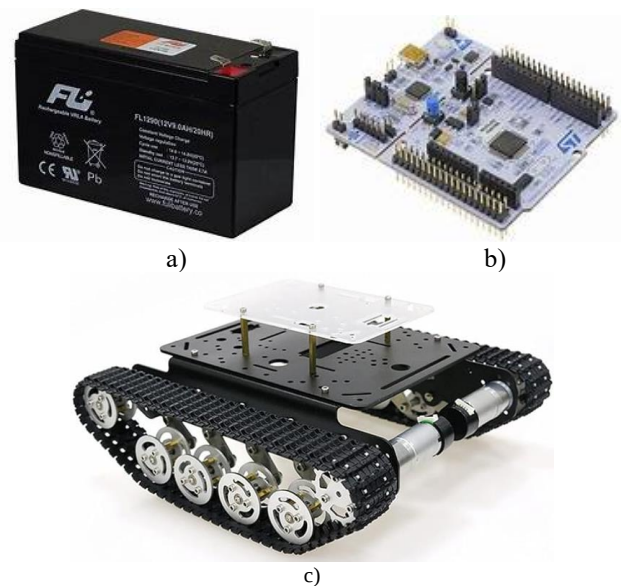


Fig. 4. Principales componentes del prototipo final.

Dentro del algoritmo de control los servomotores requieren operar en función a un tiempo acorde a la posición angular deseada, para el caso dicho tiempo y ángulo se relaciona mediante (1).

$$t_{ang} = 1000\mu\text{seg} + \frac{1000\mu\text{seg} \cdot \text{angulo}^\circ}{180^\circ} \quad (1)$$

La Tabla II relaciona la instrumentación electrónica requerida y los costos asociados a cada uno.

TABLA II
MATERIALES Y COSTOS ELECTRÓNICOS

Materiales	Cantidad	Precio (COP)
ESP32 devkit v1	1	26.331
Microcontrolador STM32F401RE	1	132.900
Protoboard 400 Puntos	1	7.900
MPU6050	1	11.900
Sensor Ultrasonido HC-SR04	1	6.100
Sensor RGB TCS230	1	20.900
Cables y Jumpers	-	36.800
Driver Puente H L298N	1	12.000
Driver Puente BTS7960	2	84.000
ServoMotor MG966R 270°	1	54.539
Convertor DC-DC 5V USB	1	9.520
Motorreductor N20-200 12V 200 RPM 1 Kg.Cm	1	19.020
Modulo Bluetooth HC-05 (Maestro - Esclavo)	1	18.963
Interruptor de codillo on-off-on E-TEN1122 15A	1	4.906
Convertor DC-DC Tipo Buck Ajustable 12A	1	24.043
Cargador De Batería 2 A Inverter 6-12 V Black&white	1	79.900
Fabricación PCB	-	69.000
Batería Sellada 12v-12 AH	1	120.585
TOTAL		739.307

La Tabla III relaciona la instrumentación mecánica requerida y los costos asociados a cada uno. Los costos totales de impresión, instrumentos electrónicos y materiales mecánicos del prototipo relacionados en las Tablas I, II y III corresponden a \$1.234.935 pesos colombianos que equivalen a 288 dólares estadounidenses.

TABLA III
MATERIALES Y COSTOS MECÁNICOS

Materiales	Cantidad	Precio (COP)
Rodamiento Lineal 8mm	2	17.800
Rodamiento Radial Blindado 608ZZ	5	14.065
Rodamientos 8x16x5mm	6	20.000
Varilla Roscada Trapezoidal 8mm - T8 - 4 Hilos X 400mm	1	37.000
Chasis de tanque	1	277.937
TOTAL	-	366..802

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

A modo de prueba se llevó a cabo el análisis de esfuerzos en el software de simulación Coppelia realizado sobre el diseño CAD del prototipo bajo las condiciones de carga que genera la caja a transportar, en la Fig. 5. se presentan los resultados, donde se muestra que el desplazamiento máximo registrado es de 3.168×10^{-2} mm y se ubica en las palas inferiores, este valor se presenta en color rojo, por su parte, los soportes principales y las bases, exponen desplazamientos inferiores a 1×10^{-3} mm demostrando la estabilidad del sistema y la validez de los movimientos de cada articulación, lo que garantiza su funcionamiento bajo las condiciones previstas.

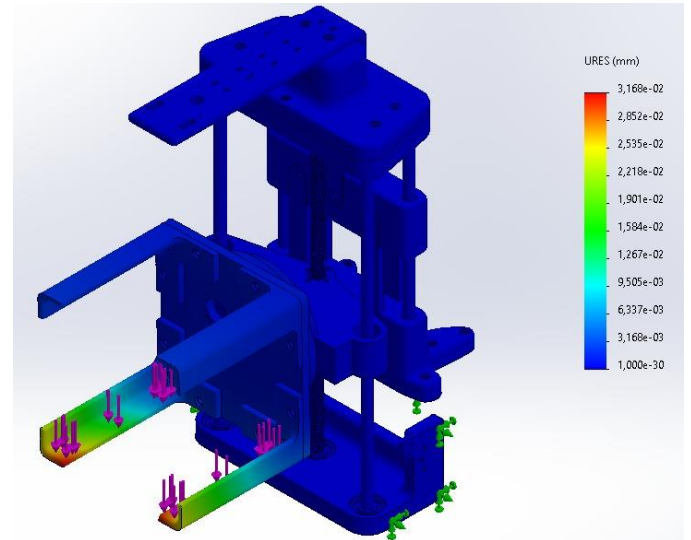


Fig. 5. Análisis de esfuerzos.

Terminado el montaje, se probaron los motores y sensores del tornillo sin fin y del sistema de rotación antes de aplicar los algoritmos de manejo y control. En la Fig. 6. se expone el diseño final donde se observa la caja con la orientación correcta.

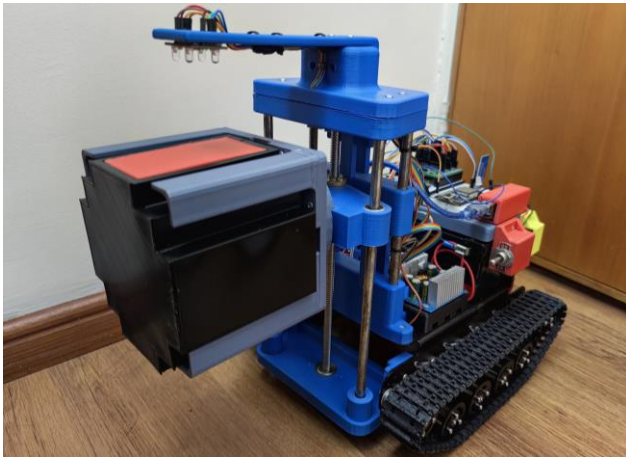


Fig. 6. Prototipo final.

Mediante Bluetooth Electronics se diseña una App para celular que permite controlar los servomotores del módulo de manipulación de cajas y los motores de desplazamiento incluidos en el prototipo de montacargas para manipulación de inventario. La gestión de montacargas mediante teléfono inteligente ya se había expuesto en [23]. En la Fig. 7. se presenta la interfaz de control que permite graduar el movimiento, la velocidad, la altura y la posición.

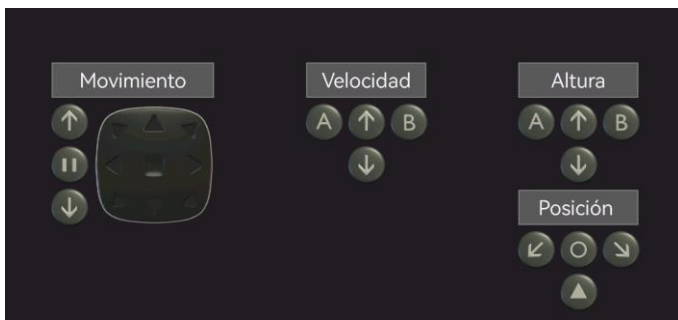
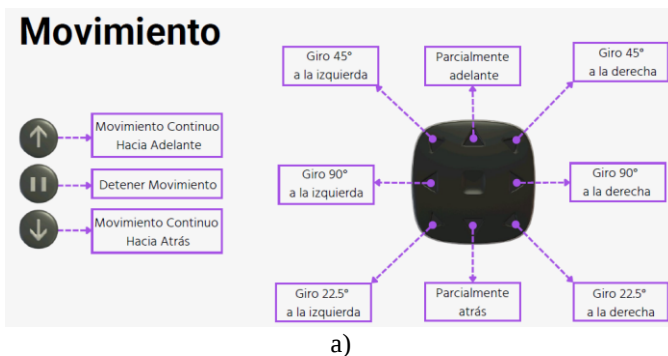
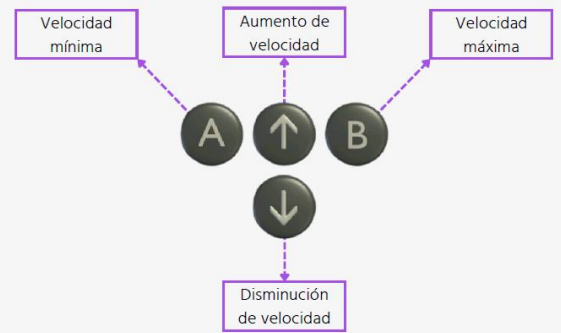


Fig. 7 App de control.

La Fig. 8. detalla el funcionamiento de la App, la parte a) del movimiento del prototipo completo, la parte b) la velocidad de movimiento, la parte c) la altura de la caja y la parte d) la posición de la caja.

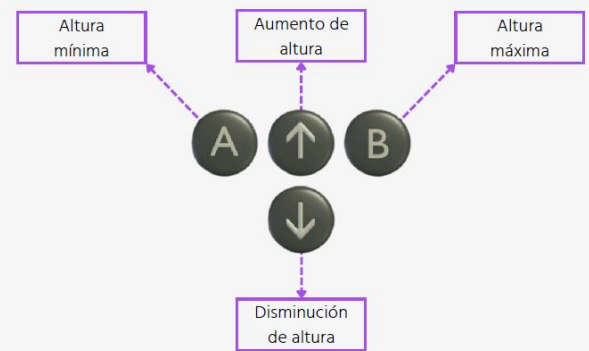


Velocidad



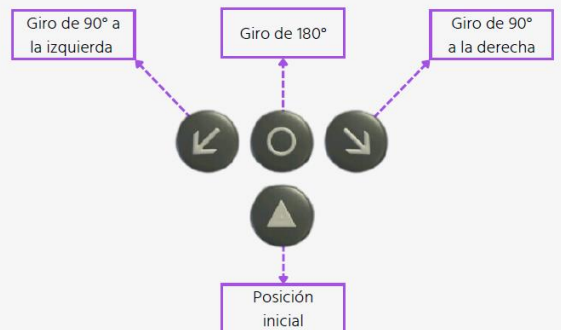
b)

Altura



c)

Posición



d)

Fig. 8 Detalle de funcionamiento App de control.

La App se valida con pruebas donde el modulo es manejado desde el celular de forma remota y efectiva, en primera instancia se usa para el agarre de la caja y su transporte. Se valida también la programación de una rutina que le permita al montacargas operar autónomamente en un trabajo futuro.

IV. CONCLUSIONES

El diseño del prototipo a escala de un montacargas giratorio automático para manipulación de cajas presenta dos elementos innovadores, de un lado permite no solo el agarre de las cajas sino su giro, y de otro lado su sistema de control permite su manejo mediante programación o a través una app de celular.

Los resultados del análisis de esfuerzos realizado permiten concluir que el diseño CAD del prototipo cumple con las condiciones de carga requeridas por la caja a transportar por lo que se concluye el sistema es estable funciona en las condiciones previstas.

Como trabajo futuro, adicional a lo mencionado en el cuerpo del documento, se propone implementar algoritmos de inteligencia artificial que permitan la navegación autónoma y segura del montacargas diseñado, como se expone en [24].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada y a su vicerrectoría de investigaciones por el tiempo y la financiación del proyecto de investigación INV-ING-4150 titulado “Fortalecimiento de procesos de recepción de pedidos y control de inventario de materias primas soportado en industria 4.0” - Vigencia 2025, de donde se deriva el presente producto.

REFERENCIAS

- [1] W. Cao and L. Dou, "Implementation method of automatic loading and unloading in container by unmanned forklift," 2021 International Conference on Machine Learning and Intelligent Systems Engineering (MLISE), Chongqing, China, 2021, pp. 503-509, doi: 10.1109/MLISE54096.2021.00105.
- [2] A. Prutsch, H. Possegger and H. Bischof, "Action-By-Detection: Efficient Forklift Action Detection for Autonomous Mobile Robots in Warehouses," 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Yokohama, Japan, 2024, pp. 10757-10763, doi: 10.1109/ICRA57147.2024.10611659.
- [3] B. Sarupuri, G. A. Lee and M. Billingham, "An Augmented Reality Guide for Assisting Forklift Operation," 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct), Merida, Mexico, 2016, pp. 59-60, doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2016.0039.
- [4] J. F. Hoefinghoff, A. Jungk, W. Knop and L. Overmeyer, "Using 3D Field Simulation for Evaluating UHF RFID Systems on Forklift Trucks," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 2, pp. 689-691, Feb. 2011, doi: 10.1109/TAP.2010.2096193.
- [5] A. Pereira, G. A. Lee, E. Almeida and M. Billingham, "A Study in Virtual Navigation Cues for Forklift Operators," 2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), Gramado, Brazil, 2016, pp. 95-99, doi: 10.1109/SVR.2016.25.
- [6] M. R. Imani et al., "Dynamic Analysis of Forklift AGV based on Center of Gravity," 2024 International Electronics Symposium (IES), Denpasar, Indonesia, 2024, pp. 322-328, doi: 10.1109/IES63037.2024.10665882.
- [7] M. Kasahara and Y. Mori, "Relation between overturn and the center of gravity of a forklift truck," 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Kanazawa, Japan, 2017, pp. 135-140, doi: 10.23919/SICE.2017.8105471.
- [8] S. Kim, S. Choi, J. Lee, S. Hong and J. Yoon, "A study of hybrid propulsion system on forklift trucks," 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, Spain, 2013, pp. 1-8, doi: 10.1109/EVS.2013.6914737.
- [9] J. Gu, H. Song, C. Li and S. Zhu, "Research on the Method of Universal Forklift Pallet Detection and Pose Estimation Based on Visual and 3D Point Cloud Fusion," 2024 5th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM), Nanjing, China, 2024, pp. 388-394, doi: 10.1109/ICMTIM62047.2024.10629322.
- [10] Y. Yuan et al., "Comparative Study of Synchronous Reluctance Motor and Switched Reluctance Motor for Forklift Applications," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEM60801.2024.10700264.
- [11] M. Freidouny, S. M. Torabi, A. Aliyari, M. Mohammadbeigi and N. Arjmand, "An investigation into the occupational risk in forklift drivers," 2020 27th National and 5th International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME), Tehran, Iran, 2020, pp. 97-100, doi: 10.1109/ICBME51989.2020.9319419.
- [12] T. Aso, "Work Element Estimation for Forklift Operation," 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), Himeji, Japan, 2022, pp. 1372-1377, doi: 10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9807065.
- [13] L. Radrigán and S. E. Godoy, "Development of risk activity detection system for forklifts based on inertial sensors,," in IEEE Access, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3524032.
- [14] E. Sun and R. Ma, "The UWB based forklift trucks indoor positioning and safety management system," 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2017, pp. 86-90, doi: 10.1109/IAEAC.2017.8053982.
- [15] M. R. Setiawan et al., "Simulation of Predicting the Safety Level of Objects in the Blind Spot Area of a Forklift Unit Using Fuzzy and Artificial Neural Networks," 2024 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoT&IS), Bali, Indonesia, 2024, pp. 19-25, doi: 10.1109/IoT&IS64014.2024.10799349.
- [16] S. Hadwiger, D. Kube, V. Lavrik and T. Meisen, "Towards Precision in Motion: Investigating the Influences of Curriculum Learning based on a Multi-Purpose Performance Metric for Vision-Based Forklift Navigation," 2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Bari, Italy, 2024, pp. 796-803, doi: 10.1109/CASE59546.2024.10711452.
- [17] Y. Liu, X. Zhu and Y. Wang, "Research on Trajectory Tracking Control of Forklift-Type AGV Based on Fuzzy MPC," 2024 3rd International Conference on Service Robotics (ICoSR), Hangzhou, China, 2024, pp. 177-182, doi: 10.1109/ICoSR63848.2024.00045.
- [18] M. F. Zuhairi, A. Jikaraji, H. Dao and A. Sulong, "Analysis of an Indoor Positioning System for Forklifts Using WiFi Fingerprinting," 2024 International Visualization, Informatics and Technology Conference (IVIT), Kuala Lumpur, Malaysia, 2024, pp. 134-137, doi: 10.1109/IVIT62102.2024.10692721.
- [19] W. Meng et al., "Localization Performance of an Autonomous Forklift in a Warehouse Environment," 2024 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), Hangzhou, China, 2024, pp. 124-131, doi: 10.1109/CIS-RAM61939.2024.10673324.
- [20] A. Motroni, A. Buffi, A., and P. Nepa. "Forklift Tracking: Industry 4.0 Implementation in Large-Scale Warehouses through UWB Sensor Fusion", Applied Sciences, 2021, 11(22), 10607, doi: 10.3390/app112210607.
- [21] A. Motroni, A. Buffi, P. Nepa, M. Pesi, and A. Congi. "An Action Classification Method for Forklift Monitoring in Industry 4.0 Scenarios," Sensors, 2021, 21(15), 5183, doi: 10.3390/s21155183.
- [22] A. Espitia-Cubillos, R. Jiménez-Moreno, and E. Rodríguez-Carmona, "Analysis of scientific papers related to intelligent forklifts," III International Conference of Applied Industrial Engineering (CIIA), Guayaquil, Ecuador, 2025, pp.1-10.
- [23] H. Abuzied, N. Nazih, and A. Sahbel, A. "Design and simulation of eco-friendly smartphone controlled forklift," Heliyon, 2024, 10(9), e30682, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e30682.
- [24] R. Jimenez, R. Castillo, and J. Jaramillo, "Machine vision system for robotic navigation in a residential environment," Journal of intelligent & Fuzzy Systems, 2024, 47, 427-437, doi:10.3233/JIFS-238028