



Diseño e implementación de un sistema automatizado de carga y descarga con múltiples estaciones, capaz de gestionar colas de productos, integrando algoritmos de optimización de trayectorias para un almacenamiento eficiente basado en tipo de producto.

Galarza Beltrán, Jonathan Eduardo y Viñamagua Montoya, Cristhian Joel

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Msc. Loza Matovelle, David César

08 de junio del 2026



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

GALARZA-VIÑAMAGUA

7%
Textos sospechosos



< 1% Similitudes
< 1 % similitudes entre comillas
0 % entre las fuentes mencionadas
2% Idiomas no reconocidos
5% Textos potencialmente generados por la IA

Nombre del documento: GALARZA-VIÑAMAHUA.pdf
ID del documento: d6fdd3020701aae232c6f6dd0d128888c3572793
Tamaño del documento original: 5,37 MB

Depositante: DAVID CESAR LOZA MATOVELLE
Fecha de depósito: 20/2/2026
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 20/2/2026

Número de palabras: 20.972
Número de caracteres: 140.053

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuente principal detectada

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	FOR-TRABAJO-INTEGRACION-CURRICULAR (2).docx Diseño e impleme... #11bc73 Viene de de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (55 palabras)

Fuente con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	04 Tesis en formato digital_BORJA JIMENEZ_CALI CASTRO.pdf 04 Tesi... #a43475 Viene de de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (12 palabras)

Msc. Loza Matovelle, David César

Director

C.C.: 1708661549



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Diseño e implementación de un sistema automatizado de carga y descarga con múltiples estaciones, capaz de gestionar colas de productos, integrando algoritmos de optimización de trayectorias para un almacenamiento eficiente basado en tipo de producto”** fue realizado por los señores **Galarza Beltrán, Jonathan Eduardo y Viñamagua Montoya, Cristhian Joel**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de junio del 2026

Msc. Loza Matovelle, David César

Director

C.C.: 1708661549



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Galarza Beltrán, Jonathan Eduardo y Viñamagua Montoya, Cristhian Joel**, con cédulas de ciudadanía n° 1726056383 y 1750597856, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Diseño e implementación de un sistema automatizado de carga y descarga con múltiples estaciones, capaz de gestionar colas de productos, integrando algoritmos de optimización de trayectorias para un almacenamiento eficiente basado en tipo de producto”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 08 de junio del 2026

Galarza Beltrán, Jonathan Eduardo

C.C.: 1726056383

Viñamagua Montoya, Cristhian Joel

C.C.: 1750597856



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Galarza Beltrán, Jonathan Eduardo y Viñamagua Montoya, Cristhian Joel**, con cédulas de ciudadanía n° 1726056383 y 1750597856, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Diseño e implementación de un sistema automatizado de carga y descarga con múltiples estaciones, capaz de gestionar colas de productos, integrando algoritmos de optimización de trayectorias para un almacenamiento eficiente basado en tipo de producto”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 08 de junio del 2026

Galarza Beltrán, Jonathan Eduardo

C.C.: 1726056383

Viñamagua Montoya, Cristhian Joel

C.C.: 1750597856

Dedicatoria

Jonathan Galarza

El presente trabajo de titulación está dedicado, en primer lugar, a mí mismo: a mi esfuerzo, constancia y determinación; a esa persona que tuvo que enfrentar grandes retos para llegar hasta aquí, y que hoy puede mirar atrás con orgullo para recordarse que todo es posible cuando se camina con perseverancia y fe en uno mismo.

A mi amada novia Carolina, quien estuvo siempre presente en esta recta final, convirtiéndose en un pilar fundamental de mi vida. Gracias por no soltar mi mano en los momentos más difíciles, por tu apoyo incondicional, tu paciencia y tu amor, que fueron impulso y refugio cuando más lo necesité.

A mis padres, Eduardo y Alexandra, por enseñarme con su ejemplo el verdadero significado del esfuerzo y la perseverancia. Gracias por sus consejos, su respaldo constante y por demostrarme que, con amor y disciplina, los retos más difíciles pueden transformarse en oportunidades.

A mis hermanas, Lore y Jaz, por ser mi inspiración y mi ejemplo. Esta alegría también les pertenece; mi vida, mis logros y mis sueños siempre han estado ligados a ustedes, y así seguirá siendo.

Y de manera muy especial, a mi amada abuelita Etelvina. Sin tu amor, tu cuidado y tu fe inquebrantable en mí, nada de este esfuerzo tendría el mismo valor. Gracias por estar siempre pendiente, por tu ternura infinita y por nunca dejar de creer en mí. Este logro también es tuyo.

Cristhian Viñamagua

Dedico este trabajo, fruto de años de esfuerzo, aprendizaje y perseverancia, en primer lugar, a mi familia, por ser mi apoyo incondicional y el pilar fundamental en cada etapa de mi vida.

Gracias por su paciencia, sus consejos y por acompañarme en cada desvelo, recordándome siempre que los sueños se construyen con constancia. Su confianza en mí ha sido la fuerza que me impulsó a seguir adelante incluso cuando el camino parecía cuesta arriba.

A mi madre Lorena, por el sacrificio silencioso y el ejemplo diario de responsabilidad y honestidad, valores que guiaron cada decisión tomada durante esta carrera. Todo lo alcanzado es también resultado de su trabajo y dedicación.

A mi abuelita María y mi tía Soledad, que siempre estuvieron para apoyarme y brindarme un consejo cuando más lo necesitaba, sus acciones y palabras me motivaron para lograr este momento de mi vida.

A mis amigos George, Marlon, Luis V y Luis C, por el apoyo mutuo, las largas jornadas de estudio, las ideas compartidas y los momentos que hicieron más ligero el recorrido. Cada conversación y cada colaboración dejaron huellas que también forman parte de este logro.

Finalmente, dedico este proyecto a mí mismo, por la perseverancia, el compromiso y la determinación de no rendirme. Este trabajo representa no solo un objetivo académico alcanzado, sino también el crecimiento personal y profesional construido paso a paso.

Agradecimiento

Jonathan Galarza

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, cuyo amor y unión han sido fundamentales para superar cada reto que se presentó en el camino. Gracias por acompañarme, sostenerme y enseñarme que, juntos, todo obstáculo es más llevadero.

A mis tíos Manuel, Blanca y Aida, quienes han sido un pilar constante a lo largo de mi vida; gracias por su apoyo, su guía y su presencia incondicional. A mis primos, mis confidentes y compañeros, siempre dispuestos a tenderme la mano cuando lo necesité.

A mis padres, Eduardo y Alexandra, por su respaldo durante toda mi vida, por el apoyo económico y por brindarme todas las facilidades que estuvieron a su alcance. Sin su sacrificio, comprensión y confianza, este logro no habría sido posible.

A mi novia Carito, en quien encontré una motivación constante para dar siempre lo mejor de mí. Tu amor ha sido el impulso que me permitió seguir adelante sin importar las circunstancias; este logro también es tuyo, y va dedicado con todo mi corazón.

A mis amigos Germán, Sebastián, Leo, Anahí, Mariú y Byron, porque sin ustedes este camino no habría sido el mismo. Gracias por acompañarme en los logros y en las dificultades académicas, por las experiencias compartidas y por los recuerdos que me llevo como uno de los mayores regalos de mi vida universitaria.

A mi compañero Christian por compartir el esfuerzo en esta recta final.

Finalmente, este trabajo de titulación va dedicado de manera muy especial a usted, mamita Etelvina. Gracias por su amor incondicional, su cariño sincero y por siempre regalarme palabras de aliento cuando más las necesité.

Cristhian Viñamagua

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por brindarme la formación académica, los recursos y el entorno necesarios para desarrollar este proyecto y consolidar mi crecimiento profesional.

A mi director de tesis y a los docentes que acompañaron este proceso, por su guía, paciencia y valiosos aportes técnicos, que fueron fundamentales para orientar el desarrollo del sistema y superar cada desafío presentado. Sus conocimientos y recomendaciones enriquecieron significativamente este trabajo.

A mi familia, por el apoyo incondicional, la motivación constante y la confianza depositada en mí durante toda la carrera. Su respaldo fue el motor que me permitió mantener la perseverancia en los momentos de mayor exigencia.

A mis compañeros y amigos, por la colaboración, el intercambio de ideas y el compañerismo que hicieron de esta etapa una experiencia de aprendizaje compartido.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la culminación de este proyecto, ya sea con su tiempo, orientación o palabras de aliento.

Cada aporte fue importante para alcanzar esta meta.

Índice de contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	8
Capítulo 1: Introducción	19
Antecedentes	19
Planteamiento del problema.....	22
Justificación e importancia del proyecto	23
Objetivos.....	25
Objetivo general	25
Objetivos específicos.....	25
Alcance y limitaciones del proyecto.....	25
Diseño e implementación	25
Despliegue de una red sensorial distribuida	26
Implementación de sistemas de percepción	26
Capítulo 2: Marco Teórico y Estado del Arte	29
Sistemas automatizados de almacenamiento	29
Gestión de colas de productos	31
Tecnologías de detección y clasificación.....	32
Sensores de detección	32
Sensores de clasificación	33
Multiplicadores de I/O	34
Algoritmos de optimización de trayectorias.....	35
Criterios de Diseño para la Interoperabilidad con Sistemas AMRs (Robots Móviles Autónomos)	
.....	38
Arquitectura de control y gestión de energía del sistema	39

Capítulo 3: Diseño e integración del Sistema	41
Metodología general del proyecto	41
Diseño conceptual y funcional del sistema.....	44
Diseño e integración progresiva de subsistemas	44
Parámetros de Diseño y Requerimientos Técnicos	44
Caracterización de la Carga	45
Entorno Operacional y Matriz de Almacenamiento	45
Diseño de las Estaciones Entrada/Salida.....	46
Mecanismo de Elevación Vertical	46
Efector Final de la Estación: Gripper de Sujeción	49
Diseño del Sistema de Control y Procesamiento.....	52
Análisis de Carga de Entrada/Salida en el controlador	52
Selección del Expansor I2C.....	56
Selección de sensores de presencia para la matriz de almacenamiento	59
Selección de Sensores de Identificación	62
Etapa de Selección de Potencia y Control de Motores	65
Diseño Electrónico y Energético	69
Balance de Energía: Red Lógica y Servos (Circuito 5V)	69
Balance de Energía: Red de Potencia (Circuito 12V)	71
Gestión Térmica del Gabinete.....	72
Fuente de Alimentación Switching 5V 5A S-25-5 WESTOR:	73
Fuente de Alimentación conmutada de un solo grupo AC 110V/220V a DC 12V 10A	73
Cálculos temperatura	74
Diseño y simulación en el software Solid Works.....	77
Integración Mecatrónica y Arquitectura de Control.....	88
Integración Mecánica de las Estaciones de Transferencia	89

	12
Subsistema de Percepción y Expansión I2C	92
Gestión de Energía e Integridad de Señal	94
Subsistema de acoplamiento y comunicación con AMRs	95
Arquitectura de Control, Interfaz HMI y Protocolos de Comunicación	96
Jerarquía de Control Embebido (Maestro-Esclavo)	97
Nivel de Supervisión: Interfaz HMI (Python)	97
Algoritmos de gestión de almacenamiento	103
Optimización de trayectorias	107
Consideraciones de seguridad y operación	110
Capítulo 4: Análisis y Discusión de Resultados	113
Comparativa entre sistema actualizado y diseño base	113
Simulación del sistema de almacenamiento	117
Pruebas de detección y clasificación	119
Pruebas de sincronización y acoplamiento con AMRs	125
Análisis comparativo entre algoritmo implementados	128
Discusión de resultados y evaluación del desempeño	139
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	141
Conclusiones basadas en los resultados y objetivos del proyecto	141
Recomendaciones	143
Propuestas para trabajos futuros	144
Referencias	145
Apéndices	147

Índice de tablas

Tabla 1 Tecnologías de almacenamiento y recuperación (AS/RS)	20
Tabla 2 Comparativa técnica de sensores de detección	33

Tabla 3 Comparativa técnica de sensores de clasificación.....	34
Tabla 4 Comparativa técnica de módulos de expansión de I/O	35
Tabla 5 Comparativa de algoritmos de optimización aplicados a sistemas AS/RS.	36
Tabla 6 Selección de mecanismo de elevación	47
Tabla 7 Selección Efector final	50
Tabla 8 Selección del controlador	54
Tabla 9 Selección de Expansor I2C	58
Tabla 10 Selección sensor de presencia.....	61
Tabla 11 Selección de Sensor de color	64
Tabla 12 Selección control motores	67
Tabla 13 Cuantificación de cargas 5v.....	70
Tabla 14 Cuantificación de cargas 12v.....	71
Tabla 15 Selección de sistema de ventilación	88
Tabla 16 Asignación de los índices de frecuencia.....	105
Tabla 17 Comparación de diseño base con actualizaciones realizadas	115
Tabla 18 Configuración de direcciones I2C de las MCP23017	120
Tabla 19 Variables relevantes de algoritmos.....	139

Índice de figuras

Figura 1 Modelo en V de la propuesta basado en la norma VDI 2206	42
Figura 2 Esquema implementado SolidWorks	78
Figura 3 Contornos térmicos sin ventilación.....	79
Figura 4 Esquema con ventilación de absorción.....	80
Figura 5 Contornos térmicos ventilación forzada absorción	82
Figura 6 Perfiles de velocidad térmica ventilación de absorción	83
Figura 7 Esquema con ventilación de absorción y expulsión	84
Figura 8 Contornos térmicos ventilación absorción – extracción.....	85
Figura 9 Perfiles de velocidad térmica ventilación de absorción – Extracción	86
Figura 10 Modelo CAD de estaciones de carga.....	89
Figura 11 Husillo T8 con acople bronce.....	90
Figura 12 Rodamiento lineal LM8UU	91
Figura 13 Acople flexible 8mm.....	91
Figura 14 Sensor infrarrojo HW-870	92
Figura 15 Esquema de Expansión de pines.....	93
Figura 16 Sensor de color TCS34725.....	94
Figura 17 Guías mecánicas dispuestas en la trayectoria del ARM.....	96
Figura 18 Interfaz HMI diseñada en Python.....	99
Figura 19 Interfaz HMI diseñada en Python, pestaña de configuración.....	100
Figura 20 Interfaz HMI diseñada en Python, pestaña de estadísticas.	101
Figura 21 Interfaz HMI diseñada en Python, pestaña de heatmap.	102
Figura 22 Clasificación del Storage por zonas.....	103
Figura 23 Clasificación del Storage por tipo de producto	104
Figura 24 Clasificación del Storage por frecuencia de requerimiento.....	106
Figura 25 Ejemplo de almacenamiento con algoritmo de tipo de producto.....	108

Figura 26 Ejemplo 2 de almacenamiento con algoritmo de tipo de producto.....	109
Figura 27 Ejemplo de almacenamiento con algoritmo de zonas.	110
Figura 28 Diagrama de Flujo del Homing.....	112
Figura 29 Gabinete de control del sistema base	114
Figura 30 Gabinete de control del sistema actualizado	114
Figura 31 HMI del sistema base anterior	115
Figura 32 Sección lista de instrucciones del HMI.	118
Figura 33 Comparación del Grid físico y simulado	119
Figura 34 Comparación del Grid físico y simulado	120
Figura 35 Comparación del Grid físico y simulado	121
Figura 36 Reconocimiento de los 4 MCP23017 mediante comunicación I2C.....	122
Figura 37 Conexiones de los sensores TCS34725 con el módulo TCA9548A	123
Figura 38 Implementación de los sensores TCS34725 en el sistema físico	124
Figura 39 Lectura de los sensores TCS34725 en el IDE de Arduino.....	124
Figura 40 Modelo propuesto del ARMs.....	125
Figura 41 Sujeción de la caja con el mecanismo del gripper.....	126
Figura 42 Acoplamiento de las estaciones de carga / descarga con los ARMs	127
Figura 43 Estado del sistema de almacenamiento simulado con algoritmo de tipo de producto.....	128
Figura 44 Estado del sistema de almacenamiento real con algoritmo de tipo de producto	129
Figura 45 Parámetros generales del sistema lleno con algoritmo de tipo de producto	129
Figura 46 Mapa de calor del sistema lleno con algoritmo de tipo de producto	130
Figura 47 Estado del sistema con algoritmo de tipo de producto	131
Figura 48 Estadísticas generales con algoritmo de tipo de producto	132
Figura 49 Mapa de calor del sistema con algoritmo de tipo de producto.....	133

Figura 50 Estado del sistema con algoritmo de frecuencia de requerimiento	134
Figura 51 Estadísticas generales con algoritmo de frecuencia de requerimiento	134
Figura 52 Mapa de calor con algoritmo de frecuencia de requerimiento	135
Figura 53 Estado del sistema con el algoritmo por zonas	136
Figura 54 Variables generales con el algoritmo por zonas	137
Figura 55 Mapa de calor con el algoritmo por zonas.....	138

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación orientado a mejorar la eficiencia operativa y la gestión inteligente de inventarios en entornos académicos e industriales. El proyecto se desarrolla en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y propone una arquitectura mecatrónica de bajo costo basada en la integración coordinada de subsistemas mecánicos, electrónicos y de software. La solución incorpora múltiples estaciones de carga y descarga, un manipulador cartesiano de tres grados de libertad y una matriz de almacenamiento de alta densidad, capaces de gestionar colas dinámicas de productos y optimizar su ubicación según criterios de tipo y frecuencia de uso. El sistema emplea una red sensorial distribuida para la detección de ocupación y la clasificación automática de objetos, junto con una arquitectura de control distribuido que separa la lógica de procesamiento de la etapa de potencia, mejorando la robustez y la integridad de señal. Asimismo, se implementan algoritmos de optimización de trayectorias y estrategias de gestión de almacenamiento que reducen tiempos de ciclo, movimientos innecesarios y consumo energético. La supervisión del proceso se realiza mediante una interfaz hombre-máquina desarrollada en software, que permite monitoreo en tiempo real, registro de datos y control remoto de las operaciones. La metodología de desarrollo se basa en el Modelo en V para sistemas mecatrónicos, lo que facilita la descomposición funcional, el diseño modular y la validación progresiva de cada subsistema. Las pruebas experimentales evaluaron precisión de posicionamiento, confiabilidad de detección, sincronización de movimientos y desempeño global, evidenciando mejoras significativas frente al diseño base. Como resultado, el prototipo demuestra la viabilidad técnica de implementar soluciones logísticas inteligentes con hardware accesible, además de consolidarse como una plataforma didáctica que fortalece la formación práctica en automatización y robótica aplicada.

Palabras clave: Almacenamiento, optimización, trayectorias, logística, inventarios.

Abstract

This paper presents the design and implementation of an automated storage and retrieval system aimed at improving operational efficiency and intelligent inventory management in academic and industrial environments. The project is being developed at the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE and proposes a low-cost mechatronic architecture based on the coordinated integration of mechanical, electronic, and software subsystems. The solution incorporates multiple loading and unloading stations, a Cartesian manipulator with three degrees of freedom, and a high density storage matrix capable of managing dynamic product queues and optimizing their location according to criteria such as type and frequency of use. The system uses a distributed sensor network for occupancy detection and automatic object classification, together with a distributed control architecture that separates the processing logic from the power stage, improving robustness and signal integrity. Trajectory optimization algorithms and storage management strategies are also implemented to reduce cycle times, unnecessary movements, and energy consumption. Process supervision is carried out through a software-developed human machine interface, which allows real-time monitoring, data logging, and remote control of operations. The development methodology is based on the V-model for mechatronic systems, which facilitates functional decomposition, modular design, and progressive validation of each subsystem. Experimental tests evaluated positioning accuracy, detection reliability, movement synchronization, and overall performance, showing significant improvements over the base design. As a result, the prototype demonstrates the technical feasibility of implementing smart logistics solutions with accessible hardware, as well as establishing itself as an educational platform that strengthens practical training in automation and applied robotics.

Keywords: Storage, optimization, trajectories, logistics, inventories.

Capítulo 1: Introducción

Antecedentes

La optimización de los sistemas logísticos es un campo de investigación activo debido a su impacto directo en la eficiencia industrial. Según (Murat & Zeeshan, 2022), el diseño de Sistemas de Almacenamiento y Recuperación Automatizados (AS/RS) ha evolucionado hacia la integración de algoritmos inteligentes que minimizan los tiempos de ciclo, dejando atrás los esquemas de control que son enteramente secuenciales. En el ámbito académico, la implementación de dichos prototipos permite validar teorías de control distribuido y planificación de trayectorias en entornos físicos controlados y con así desarrollar una idea clara de la importancia del apartado de la producción en la industria.

A nivel internacional, Caride y Figueroa (2024) detalla la importancia de implementar almacenes inteligentes que cuenten con arquitecturas y algoritmos que hagan más eficientes los sistemas, mientras tanto en el documento redactado por Santonja (2022) habla acerca de la importancia de prototipos que ayuden a diseñar sistemas escalables controlados por PLC, así minimizando errores en una arquitectura a gran escala. El proyecto propuesto se basa en estas literaturas para proponer una arquitectura de bajo costo basada en microcontroladores potentes y accesibles que gestionen la complejidad de múltiples estaciones.

Específicamente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, (Tamayo et al., 2025) desarrollaron recientemente un "Sistema de almacenamiento automático con una estación de carga/descarga", logrando gestionar el almacenamiento mediante control por orden de entrada/salida. Sin embargo, su investigación se limitó a una única estación de operación la cual propuso un manejo manual sin una compatibilidad real con robots autónomos móviles y a una lógica de almacenamiento basada en densidad, sin abordar la gestión de múltiples colas de productos, ni la clasificación dinámica por tipos mediante sensores que permitan designar varios productos, dejando una brecha tecnológica que el presente proyecto busca cubrir.

Los sistemas automatizados de almacenamiento (AS/RS) son herramientas claves en sectores industriales y académicos, debido a su impacto en la optimización de procesos logísticos. Dichos sistemas aparte de permitir un manejo más eficiente del espacio disponible de almacenamiento, también reducen costos que involucran al personal que lo operan, mejorando así la productividad de almacenamiento automatizando sus procesos. La

automatización es posible debido a los procesos repetitivos tanto en la gestión como en el control del inventario (Santoja, 2022).

De tal manera, el proyecto se basa en la necesidad de modernizar y optimizar los sistemas de almacenamiento mediante creación de sistemas a manera de prueba, replicables y escalables en ambientes industriales y educativos, contribuyendo a la mejora de procesos logísticos, ya que busca la eficiencia operativa y el aprendizaje práctico en el área de ingeniería. El presente proyecto supone un impacto en la implementación de soluciones tecnológicas en la gestión de almacenes en diferentes niveles, buscando específicamente una mejora en sistemas de almacenamiento y así alinearse y proponer nuevas tendencias de automatización industrial.

Con el fin de recopilar información real relacionada con la temática principal del proyecto, la **Tabla 1** recopila las investigaciones más relevantes revisadas, detallando título de la investigación y los aportes técnicos significativos para el desarrollo del presente proyecto.

Tabla 1
Tecnologías de almacenamiento y recuperación (AS/RS)

Autor(es)	Título del Trabajo	Principales Hallazgos
(BAHOS & BLANCO, 2019)	Diseño y construcción de una máquina AS/RS para almacenamiento y extracción de artículos electrónicos de una bodega	Desarrollaron un prototipo físico funcional para la gestión automatizada de componentes electrónicos, validando la integración entre la estructura mecánica cartesiana y una base de datos de inventario para reducir errores en el <i>picking</i> de piezas pequeñas.
(Rokhforoz et al., 2021)	A fair task and time allocation of multiple human operators using decentralized Nash bargaining solution	Propusieron un algoritmo de optimización descentralizado basado en la teoría de juegos para asignar tareas. Los autores validaron el método ya que quedó en evidencia que logra un equilibrio en la minimización del tiempo de operación y la correcta la distribución de cargas, mejorando la eficiencia en comparación con enfoques tradicionales.

(Murat & Zeeshan, 2022)	Design and Optimization of Automated Storage and Retrieval Systems: A Review	Presentan una clasificación sistemática de investigaciones sobre AS/RS basada en algoritmos de optimización y configuraciones. Concluyen que el uso de modelos de simulación es fundamental para la Industria 4.0 y señalan la necesidad de aplicar algoritmos avanzados en configuraciones de almacenamiento circular.
(Santoja, 2022)	Prototipo de un pequeño almacén automatizado.	Desarrollo de un AS/RS que impulsó de manera comercial. Incorpora varios sensores, un robot cartesiano y elementos de sujeción. Así logró disminuir el tiempo de espera del cliente y la carga laboral del personal. El sistema fue controlado mediante un Interfaz tipo SCADA y un PLC.
(Caride & Figueroa, 2024)	Análisis y diseño de una arquitectura inteligente para la optimización del surtimiento en un almacén AS/RS	Emplea una metodología para desarrollar un sistema de almacenamiento eficiente relacionada con la reubicación y rediseño de un sistema AS/RS. Se realiza la clasificación ABC de los productos en el almacén para una gestión más eficiente determinando acciones operativas para diferentes escenarios en el almacén.

La recopilación de información, presentada en la **Tabla 1**, revela una tendencia en la evolución de los sistemas AS/RS a lo largo de los últimos años, ya que integra una robustez mecánica con la inteligencia computacional. Las investigaciones descritas no se limitan a la validación de prototipos físicos mediante tipos de control clásico, sino que se resalta la necesidad de integrar algoritmos de optimización y estrategias de simulación en la Industria 4.0, con el fin de reducir tiempos de ciclo y mitigar errores en la gestión de inventarios complejos.

Planteamiento del problema

En la Universidad de las Fuerzas Armadas UFA-ESPE, actualmente no existe un sistema didáctico integral que permita la enseñanza práctica y multidisciplinaria de los procesos de almacenamiento automatizado. Por lo cual representa una limitación significativa en la formación de estudiantes de carreras de ingeniería, e incluso de áreas administrativas, quienes requieren comprender tanto la lógica operativa como la eficiencia de la gestión de almacenes.

Bajo dicha necesidad, se plantea el desarrollo del proyecto “Diseño e implementación de un sistema automatizado de carga y descarga con múltiples estaciones, capaz de gestionar colas de productos, integrando algoritmos de optimización de trayectorias para un almacenamiento eficiente basado en tipo de producto”, con el fin de fortalecer la enseñanza aplicada en dichas disciplinas.

El sistema AS/RS vigente opera bajo un control y diseño básico que no cuenta con varias necesidades tanto físicas como de control, como el espacio necesario para tránsito de transporte autónomo, estaciones de carga/descarga que interactúen con el medio físico, sensores de detección de tipo de producto, protocolos de comunicación, sensores de validación y gestión de la energía. La ausencia de las antes mencionadas características hace difícil la recreación de procesos de clasificación dinámica, afectando la profundidad del análisis experimental requerido para una formación alineada con los estándares de manufactura actual.

De acuerdo con la tesis desarrollada por Tamayo y Zambrano (2025), titulada “Diseño e implementación de un sistema de almacenamiento automático con una estación de carga/descarga y celdas de almacenamiento, para gestión de almacenamiento mediante control por orden de entrada/salida y por densidad de almacenamiento.”, se logró establecer un prototipo inicial funcional, enfocado en la carga/descarga manual y clasificación básica de productos. Sin embargo, dicho sistema presenta limitaciones estructurales y operativas, al no

integrar múltiples estaciones de carga/descarga automática, transporte interno óptimo con algoritmos de optimización de trayectorias, uso de sensores de tipo de producto, red de sensores interconectados que muestren el estado de cada cubículo, entre otras características. Las carencias previamente mencionadas dificultan la aplicación del modelo existente en contextos educativos más amplios y reducen su potencial como plataforma de experimentación interdisciplinaria y escalable.

Con el fin de adaptar la estructura existente buscando mejorar más acorde a las necesidades actuales, surge la necesidad principal de aumentar las dimensiones de altura mínima al suelo, para tener un tránsito fluido de AMRs, además de diseñar interacción con un modelo multi-robot, gracias a una estructura elevada que libere el espacio inferior. También se busca agregar multi estaciones automatizadas de carga/descarga que funjan como protocolos de comunicación con el exterior físico, detección de ocupación en tiempo real y algoritmos inteligentes que hagan más eficientes los flujos de entrada y salida.

La implementación de mejoras en el sistema no solo busca modernizará el AS/RS ya existente, sino que lo convertirá en una herramienta didáctica aplicable a varias áreas y carreras, útil para las distintas carreras dentro del entorno universitario. Gracias a esto se podrá tener una formación más sólida con componentes no solo teóricos sino también prácticos en áreas de gestión, automatización, producción industrial, control de procesos, análisis de datos y toma de decisiones estratégicas, alineada con las exigencias tecnológicas y productivas de la industria moderna.

Justificación e importancia del proyecto

La administración eficiente de inventarios en entornos industriales demanda la capacidad de simular operaciones logísticas complejas, incluyendo la interacción con

plataformas móviles autónomas (AMRs) creando así entornos completos para simulación de almacenes, que sean capaces de detectar, diferenciar y catalogar diferentes tipos de productos y así encontrar mejoras en la eficiencia. Actualmente, la carencia de sistemas de carga y descarga inteligentes que integren detección, diferenciación y catalogación automática de productos limita la posibilidad de recrear escenarios de manufactura flexible. Tal restricción dificulta la validación experimental de procesos de optimización de trayectorias, impidiendo alcanzar la máxima eficiencia posible en el manejo automatizado de materiales.

Para solventar dichos requerimientos, la propuesta técnica se centra en el desarrollo de estaciones automatizadas capaces de reconocer la tipología del producto mediante sensores de color, permitiendo la toma de decisiones autónoma para el almacenamiento y retiro. La arquitectura planteada robustece la operación mediante la implementación de una red sensorial distribuida, diseñada para verificar la ocupación matricial de las celdas en tiempo real, así como también de toma en cuenta el sistema de monitorización el cual integra algoritmos de optimización que dan datos estadísticos del funcionamiento, clasificando las rutas en función de la zona, el tipo de carga y la frecuencia de uso en las estaciones.

La relevancia del proyecto está centrada en la implementación física dentro del Laboratorio de Automatización y Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Sangolquí, donde busca cumplir la carencia de una plataforma base para futuras investigaciones académicas. El prototipo funcionará como una herramienta didáctica para docentes y alumnos, que ayudará a validar conceptos teóricos en un entorno práctico. Ello ayudará en el pensamiento crítico y con esto la generación de soluciones innovadoras alineadas con los estándares de la industria, fortaleciendo así las competencias técnicas de los futuros profesionales en el campo de la ingeniería y otras ramas relacionadas.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema automatizado de carga y descarga con múltiples estaciones, capaz de gestionar colas de productos, integrando algoritmos de optimización de trayectorias para un almacenamiento eficiente basado en tipo de producto.

Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un dispositivo de carga descarga de múltiples productos. El sistema debe ser compatible con AMRs (robots móviles autónomos – por sus siglas en inglés) para la recepción de productos.
- Implementar sensores que permitan determinar el tipo de producto en el dispositivo de carga, descarga.
- Diseñar e implementar una red de sensores de presencia para las celdas de almacenamiento.
- Implementar algoritmos de gestión de almacenamiento basados en la optimización de trayectorias para almacenamiento por zonas, por producto y por frecuencia de requerimiento.
- Actualizar el sistema de simulación y monitorización agregando los dispositivos de carga/descarga de productos, los tipos de productos, y el análisis de datos para determinar las frecuencias de requerimiento.

Alcance y limitaciones del proyecto

El desarrollo de la propuesta técnica contempla la automatización integral del sistema de almacenamiento, abarcando los siguientes hitos de ingeniería:

Diseño e implementación

El diseño e implementación de las estaciones electromecánicas de transferencia (carga y descarga) para múltiples productos, integrando actuadores, sensores y algoritmos de control

que garanticen futura interoperabilidad física y lógica entre los Robots Móviles Autónomos (AMRs) y la matriz de almacenamiento.

Despliegue de una red sensorial distribuida

Se planifica una red de sensores ubicados en cada cubículo de la matriz de almacenamiento que servirán para el monitoreo de ocupación, permitiendo detectar y conocer el estado de cada celda en tiempo real.

Implementación de sistemas de percepción

Es indispensable colocar sensores que cumplan la función de detección de alguna magnitud física para la clasificación automática, capaces de determinar el tipo de producto previo a su ingreso al almacén para garantizar su trazabilidad.

El procesamiento del sistema y la supervisión de sus etapas de funcionamiento estarán implementados en una estación de cómputo, que utiliza una aplicación desarrollada con el lenguaje de programación Python dentro del entorno de desarrollo Visual Studio Code. La interacción hombre-máquina se gestiona mediante una Interfaz (HMI) estructurada en tres ventanas con distintas funciones:

1. **Módulo de Simulación:** Visualización gráfica dinámica de los procesos realizados por el sistema, botones de lanzamiento, conexión con la comunicación serial y selección de tipo de algoritmo.
2. **Módulo de Configuración:** Se puede establecer parámetros de configuración de la funcionalidad general del sistema tales como velocidad, ajuste de algoritmos, calibración del sistema y generación de colas de productos.
3. **Módulo de estadísticas:** Muestra gráficas estadísticas que se actualizan en tiempo real de los escenarios de funcionamiento y los ciclos cumplidos.

Para gestionar la alta densidad de señales digitales provenientes de la red de sensores, se procura una gran densidad de entradas para la lectura eficiente de los datos. La arquitectura de control debe contener una gran capacidad de control del sistema.

La sincronización de los movimientos debe ser coordinada, además de ser en su totalidad desmontable, facilitando las tareas de mantenimiento y escalabilidad.

Para certificar la operatividad del prototipo, es necesario ejecutar varios protocolos de prueba los cuales distintos enfoques, entre los cuales pueden estar:

- Verificación de la precisión en la detección y clasificación de productos según su tipología.
- Pruebas de seguridad para evasión de colisiones mecánicas y lógicas durante las secuencias de movimiento.
- Verificación de compatibilidad de estaciones de carga y descarga con modelos de AMRs.

En resumen, el capítulo fundamenta la necesidad de evolucionar la infraestructura logística del laboratorio hacia una arquitectura inteligente, alineada con las tendencias de la Industria 4.0 que priorizan la integración de algoritmos de optimización sobre el control secuencial tradicional. Se identificó que los antecedentes locales, específicamente el trabajo de (Tamayo et al., 2025), presentan limitaciones operativas al carecer de compatibilidad con plataformas móviles (AMRs), gestión concurrente de estaciones y sistemas de clasificación dinámica. Para solventar dichas brechas tecnológicas, el proyecto propone el diseño e implementación de un sistema automatizado multi-estación que integra una red sensorial distribuida para la detección de ocupación y algoritmos de optimización de trayectorias basados en la tipología y frecuencia del producto. Así, la investigación no solo busca mejorar la eficiencia operativa y la trazabilidad del inventario mediante hardware de bajo costo, sino también consolidar una herramienta

didáctica multidisciplinaria que fortalezca la formación práctica en ingeniería mecatrónica y automatización industrial.

Capítulo 2: Marco Teórico y Estado del Arte

En el capítulo se establece los fundamentos teóricos y el estado del arte que sustentan la investigación. Su propósito radica en contextualizar el enfoque tecnológico adoptado, justificando las metodologías seleccionadas para el diseño y la implementación de las soluciones propuestas en el sistema de almacenamiento automatizado.

Sistemas automatizados de almacenamiento

En la actualidad, la tendencia global hacia la automatización busca reemplazar las intervenciones manuales mediante la implementación de sistemas capaces de percibir el entorno físico (sensores) y ejecutar tareas (actuadores). El objetivo fundamental es la realización de operaciones cíclicas que permitan reducir costos operativos y minimizar errores humanos, mejorando sustancialmente la productividad, la eficiencia del sistema y la calidad final, otorgando así un valor agregado al proceso (Santoja, 2022).

Dependiendo de la complejidad del sistema se opta por utilizar uno u otro dispositivo, ya que no todos son aplicables sin una evaluación previa de las condiciones y los requerimientos funcionales. Hoy en día, bajo el paradigma de la Industria 4.0, se busca integrar tecnologías emergentes como la Inteligencia Artificial, sistemas multi-robot, el IoT y la analítica de datos. Bajo el siguiente contexto, la trazabilidad del producto adquiere un rol protagónico, permitiendo no solo mover mercancías, sino conocer en tiempo real su ubicación, estado e historial dentro de la cadena logística.

La automatización de los sistemas mencionados se enfoca en el almacenaje y la gestión de inventarios, priorizando dos vertientes complementarias:

- **Forma Física:** Consiste en la adaptación o implementación de dispositivos (mecánicos, eléctricos, neumáticos, etc.) que reemplazan la fuerza humana para mejorar variables de producción como precisión, tiempo y velocidad. Actualmente, se dispone de diversos robots industriales que incrementan la capacidad operativa del sistema.
- **Forma Digital:** Se refiere a la implementación de los algoritmos de gestión cuyo propósito es coordinar el movimiento de actuadores y detección de los sensores.

Es en el presente nivel donde la propuesta tecnológica del proyecto incide directamente en la trazabilidad mediante la integración de sensores de clasificación por tipología (color) y una red de detección de presencia matricial, con lo cual el sistema genera una "huella digital" del movimiento de cada carga. Implementar dichas actualizaciones permite que la ubicación física del producto esté siempre sincronizada con la base de datos digital (Bélanger et al., 2023) facilitando la toma de decisiones basada en la identificación inequívoca del ítem y su posición exacta en el almacén.

El correcto funcionamiento y la coordinación de la implementación física y la digital busca priorizar la optimización mediante algoritmos y la velocidad de operación, garantizando el monitoreo del rendimiento y las existencias. Los beneficios resultantes de la implementación física y digital son:

- Reducción de costos operativos.
- Control y Trazabilidad: Capacidad de rastrear el producto en tiempo real gracias a la validación sensorial en cada etapa del proceso de carga y descarga.
- Mayor precisión: Reducción significativa de errores en la clasificación y asignación de celdas.
- Optimización

Gestión de colas de productos

La gestión de colas de productos en sistemas de almacenamiento automatizado es un componente clave para garantizar la eficiencia en la entrada, clasificación, ubicación y recuperación de los objetos que son manejados. En un contexto de los sistemas de almacenamiento ya sea en un entorno industrial o académico, una "cola" representa una secuencia de productos que esperan ser procesados en una estación específica, ya sea para carga, descarga o redistribución.

Un sistema de colas óptimo permite establecer el orden de prioridad de los productos en función del tipo, de la zona, de la frecuencia de acceso, de la disponibilidad de espacio en el almacén. Para los sistemas AS/RS, dicha gestión es esencial para prevenir tiempo desperdiciado, cuellos de botella, reducir el tiempo de espera y gestionar de una manera adecuada los recursos de transporte y de almacenamiento.

Desde el punto de vista computacional, las colas pueden implementarse mediante estructuras de datos tipo FIFO, Prioridad Asociada, Algoritmos de trayectoria, o cualquier otro tipo de algoritmo complejo que contemple criterios como:

- Tipo de producto (de carácter funcional, de tipo de tamaño, de tipo decategoría).
- Frecuencia de requerimiento (productos de alta rotación).
- Urgencia o prioridad del pedido (por su relación con sistemas de planificación).
- Ubicación (actual, destino para las rutas empleadas).

En el proyecto, se plantea la implementación de colocación dinámica y gestión de colas que permita ordenar los productos entrantes en función de su frecuencia de acceso y tipo, lo que será clave para desarrollar una estrategia de almacenamiento inteligente, que reubique los

productos más utilizados en zonas de fácil acceso y mantenga los de menor rotación en zonas menos prioritarias.

Para ello, se utilizarán algoritmos básicos de ordenamiento combinados con sensores de presencia por cubículo y estructuras de datos programadas desde un microcontrolador, el cual supervisará el estado de cada celda, actualizará la posición de cada producto y mantendrá activa una cola virtual que regule el orden de ingreso, almacenamiento y despacho.

Asimismo, se incorporarán estaciones de carga y descarga, que al detectar nuevos productos, los ingresen automáticamente a la celda de almacenamiento correspondiente según su categoría y demanda. El modelo de gestión de colas permitirá simular de forma didáctica lo que ocurre en un entorno logístico real, y será una herramienta útil para que los estudiantes puedan experimentar con distintos escenarios de operación, evaluación de rendimiento y toma de decisiones basada en datos reales.mod

Tecnologías de detección y clasificación

Existen varios tipos de sensores que permiten detectar y clasificar objetos dependiendo de sus propiedades, analizando las opciones más viables a considerar para el desarrollo del presente proyecto se muestran a continuación:

Sensores de detección

La función primordial del subsistema de detección es confirmar la presencia física de las unidades de carga dentro de la matriz de almacenamiento, evitando errores de colisión o doble asignación. A continuación, la **Tabla 2** presenta una clasificación técnica de los sensores evaluados, contrastando sus prestaciones operativas frente a variables como la distancia de detección y el tipo de señal de salida.

Tabla 2
Comparativa técnica de sensores de detección

Tecnología del Sensor	Principio de Funcionamiento	Tipo de Salida	Rango de Detección	Precisión	Costo Relativo
Infrarrojo Reflexivo (IR)	Emisión de luz IR y detección del rebote sobre el objeto.	Digital	Corto (2 - 10 cm)	Baja (Depende del color/material)	Bajo
Ultrasónico	Emisión de ondas sonoras y medición del tiempo de eco.	Analógica / PWM	Medio (2 - 400 cm)	Media (+- 3 mm)	Bajo/Medio
Láser Tipo Barrera	Interrupción física de un haz de luz entre emisor y receptor.	Digital	Largo (> 10 m)	Muy Alta (Detección binaria exacta)	Medio/Alto
Time of Flight (ToF)	Medición del tiempo de vuelo de fotones láser (LIDAR).	Digital (I2C)	Medio (3 - 200 cm)	Alta (+- 1 mm)	Medio

Sensores de clasificación

El subsistema de clasificación tiene la responsabilidad de discriminar el tipo de producto en las unidades de carga que ingresan o salen del sistema, permitiendo su asignación a zonas específicas de almacenamiento o su priorización en colas. Para seleccionar el método de identificación más eficiente, se evaluaron distintas tecnologías en función de la naturaleza del producto y los requerimientos de trazabilidad. A continuación, la **Tabla 3** detalla las opciones técnicas disponibles, contrastando su principio de operación, el tipo de identificador requerido y su fiabilidad en entornos industriales.

Tabla 3
Comparativa técnica de sensores de clasificación

Tecnología del Sensor	Principio de Clasificación	Tipo de Identificador	Robustez / Fiabilidad	Costo Relativo
Sensor de Color (TCS3200)	Análisis de frecuencia de luz reflejada (RGB)	Color de etiqueta o carcasa	Media (Sensible a cambios de iluminación ambiental)	Bajo
Radiofrecuencia (RFID)	Lectura inalámbrica de datos por inducción electromagnética	Etiqueta electrónica (UID único)	Muy Alta (No requiere aislamiento)	Alto (Requiere chips individuales)
Celda de Carga (Lectura Peso)	Medición de deformación (Punto de Galgas)	Masa	Media (Requiere empotramiento robusto)	Medio
Visión Artificial (Códigos QR)	Decodificación de patrones	Código impreso	Alta (Requiere estabilidad y luz controlada)	Medio/Bajo (Depende del procesador)

Multiplicadores de I/O

La arquitectura del sistema, caracterizada por una alta densidad de sensores distribuidos en la matriz de almacenamiento, demanda una cantidad de pines de entrada/salida que supera la capacidad física de la mayoría microcontroladores. Para solventar la limitación de hardware mencionada sin comprometer la escalabilidad del proyecto, se integran módulos de expansión de I/O. La selección de dichos componentes se realiza considerando la naturaleza de la señal (analógica o digital) y el protocolo de comunicación, tal como se detalla en la **Tabla 4**, donde se contrastan las características técnicas de las soluciones adoptadas.

Tabla 4
Comparativa técnica de módulos de expansión de I/O

Dispositivo	Función Principal	Protocolo de Comunicación	Capacidad de Expansión	Tipo de Señal Manejada
MCP23017	Expansor de Puertos GPIO	I2C (Direccional)	16 canales (Configurables In/Out)	Digital
ADS1115	Conversor Analógico-Digital (ADC)	I2C (Alta resolución 16-bit)	4 canales (Single-ended) o 2 (Diferencial)	Analógica (Precisión)
CD74HC4067	Multiplexor / Demultiplexor	Control Digital Paralelo	16 canales (Switching)	Analógica o Digital

Algoritmos de optimización de trayectorias

En el contexto de los sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados (AS/RS), la implementación de algoritmos de optimización de trayectorias es fundamental para maximizar la eficiencia operativa. Dichos algoritmos permiten calcular las rutas más eficaces que deben seguir los mecanismos de transporte (grúas, brazos robóticos o vehículos móviles autónomos) para cumplir tareas de carga, descarga o reposicionamiento de productos. Autores como (Murat & Zeeshan, 2022) señalan que la optimización no solo reduce tiempos, sino que es un requisito indispensable para la integración efectiva en la Industria 4.0.

El objetivo principal de los modelos matemáticos que se busca implementar es minimizar variables críticas como la distancia recorrida, el tiempo de operación y el consumo energético, evitando movimientos mecánicos innecesarios y buscando la máxima eficiencia. La necesidad se vuelve más importante cuando el sistema incorpora múltiples estaciones y diversidad de productos, como es el caso de la propuesta del proyecto. La eficiencia del sistema dependerá de la capacidad de los algoritmos para determinar no solo el mejor camino

físico, sino también el orden óptimo y la atención de los pedidos, considerando el estado del almacén y la prioridad de los productos.

Asimismo, investigaciones recientes como la de (Caride & Figueroa, 2024) destacan la importancia de complementar el ruteo físico con estrategias de gestión de inventario (como la clasificación ABC) para determinar acciones operativas eficientes en diferentes escenarios de demanda. Para seleccionar la estrategia lógica más adecuada al hardware de control es necesario evaluar las distintas metodologías existentes.

En la **Tabla 5** presenta una comparativa técnica de los algoritmos más utilizados en la industria, contrastando su principio de funcionamiento y su aplicabilidad en entornos de almacenamiento según la revisión literaria realizada.

Tabla 5
Comparativa de algoritmos de optimización aplicados a sistemas AS/RS.

Tipo de Algoritmo	Funcionamiento	Ventajas y aplicación	Referencia
Dijkstra	Explora el punto ponderado a llegar desde el nodo origen para encontrar el camino más corto a todos los demás nodos.	Garantiza la ruta más corta existente. Es ideal para mapas estáticos y entornos conocidos.	(Dijkstra, 1959)
A-Star	Extensión de Dijkstra que utiliza una función heurística para estimar el costo restante hacia el destino.	Alta eficiencia. Reduce la carga en procesamiento y la búsqueda hacia la meta, se usa en robótica móvil.	(P. E. Hart et al., 1968)

Genéticos	Simula la selección natural para explorar soluciones óptimas en espacios de búsqueda complejos.	Optimización General. Es útil cuando en problemas complejos, con alto costo computacional.	(Goldenberg, 1989)
Basado en Frecuencia	Asigna ubicaciones fijas o zonas dinámicas según la rotación del producto (Alta/Media/Baja).	Reducción de recorridos. Minimiza el tiempo promedio de ciclo ya que mantiene los productos populares cerca de la salida.	Roodbergen & Vis (2009)
Colonia de Hormigas	Basado en el comportamiento de hormigas y feromonas para encontrar rutas.	Adaptabilidad por ciclos. Según Zhou et al. (2014), es superior para evitar obstáculos que cambien con el tiempo y trampas.	Zhou et al. (2014)
Greedy	Selecciona una opción optima en una posición y trata de aplicar en todo el sistema.	Rápido. Ideal para sistemas pequeños de poca potencia, sin embargo NO es la mejor solución global.	(Cormen et al., 2022)

En el contexto del presente trabajo de titulación, se propondrá un algoritmo simplificado de optimización basado en matrices de distancia y prioridad, considerando: la ubicación actual del producto, la celda destino (más próxima y disponible), la frecuencia de solicitud del producto

(alta, media, baja) y la posición de las estaciones de carga/descarga. El algoritmo propuesto será ejecutado por microcontrolador gobernado por el algoritmo implementado en Python el cual supervisará en tiempo real la ocupación del almacén y determinará la ruta más eficiente.

La introducción de varios algoritmos no sólo busca la mejora del rendimiento operativo del sistema AS/RS, sino que también permite verlo como un recurso educativo altamente valioso. La parte física da la oportunidad de exponer a los estudiantes a la aplicación efectiva de conceptos avanzados de automatización logística, control inteligente y optimización de sistemas en tiempo real, cerrando la distancia entre la teoría académica y las exigencias técnicas actuales del mundo industrial. (Theopilus et al., 2020).

Criterios de Diseño para la Interoperabilidad con Sistemas AMRs (Robots Móviles Autónomos)

La arquitectura del sistema ha sido concebida bajo un enfoque modular que contempla la futura vinculación con Robots Móviles Autónomos (AMRs). Es de importancia mencionar que, si bien el desarrollo y programación de las unidades móviles excede el alcance del presente proyecto, el diseño de las estaciones de carga y descarga se ha ejecutado garantizando rigurosamente las condiciones de compatibilidad física y lógica necesarias para permitir dicha integración.

La finalidad técnica consiste en considerar las estaciones fijas como nodos de logística abiertos, estandarizando sus interfaces para que, en posteriores fases de la investigación, puedan interactuar con agentes externos sin necesidad de realizar modificaciones estructurales.

En conclusión, el enfoque de que trata el apartado dota al proyecto de una escalabilidad tecnológica con un respaldo de infraestructura preparado para el funcionamiento multi-robot, sirviendo como un fundamento de cercado para evoluciones futuras en las líneas de investigación sobre robótica móvil sin comprometer la funcionalidad que puede ofrecer el sistema de almacenamiento actualmente.

Arquitectura de control y gestión de energía del sistema

En lo que respecta a los sistemas de automatización industrial, la eficacia y la escalabilidad de los procedimientos dependen ineludiblemente de la solidez del esquema de control y comunicación. Más concretamente, los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) exigen estructuras capaces de sincronizar una gran cantidad de periféricos (sensores y actuadores) sin sacrificar la magnitud del procesamiento. Partiendo de la presente afirmación, el proyecto que se va a implementar incluye una topología de control distribuido como condición necesaria para garantizar el funcionamiento total del prototipo, garantizando la modularidad y la seguridad eléctrica por encima de todo.

La lógica de Control que se busca usada para validar la integración de plataformas de desarrollo accesible en sistemas robustos, la arquitectura se fundamenta en el uso de unidades de procesamiento.

En los sistemas de automatización que deben presentar una fuerte densidad de instrumentación, se debe prever la aplicación de estrategias de expansión de puertos para no sobrecargar a los procesadores centrales. Dichas arquitecturas se suelen basar en buses de datos, que permiten gestionar un gran número de señales de un modo eficiente y multiplexado, mejorando así la infraestructura de cableado y facilitando las tareas de mantenimiento.

Por otro lado, el control operativo moderno necesita establecer enlaces de comunicación entre los controladores y las interfaces de usuario, que son absolutamente

necesarios para permitir la supervisión de las variables relevantes en tiempo real y el establecimiento de interacciones telemáticas con el operador, que además debe tener la capacidad de ver estados y dar órdenes a distancia.

Finalmente, la fiabilidad de la infraestructura de hardware en sistemas electromecánicos dependerá principalmente de una gestión rigurosa de la energía, ya que para garantizar la temporalidad del proceso es tradicional la separación física y eléctrica de las fuentes de alimentación, procurando así que los circuitos que destinan a la ejecución lógica del procesamiento se aislen de las etapas de potencia que van dedicadas a la ejecución mecánica. De ahí que dicho tipo de separación, sumada a la utilización de interfaces de aislamiento, permita reducir las interferencias electromagnéticas y proteger los componentes más vulnerables, estableciendo así una topología de control distribuido, a la vez robusta, modular y escalable.

En resumen, el marco teórico y el estado del arte analizados evidencian que la eficiencia de los sistemas de almacenamiento modernos (AS/RS) reside en la convergencia sinérgica entre la automatización física y la inteligencia digital. Se ha fundamentado que la transición hacia la Industria 4.0 exige superar el control secuencial básico mediante la implementación de algoritmos de optimización de trayectorias y gestión de inventarios, tal como lo sugieren (Murat & Zeeshan, 2022) elementos indispensables para minimizar tiempos operativos y consumo energético. Asimismo, la integración de tecnologías de percepción sensorial y arquitecturas de control distribuido garantiza la trazabilidad en tiempo real, sincronizando el flujo físico con la base de datos digital (Bélanger et al., 2023), y asegura la escalabilidad del sistema mediante interfaces compatibles con futuros agentes móviles (AMRs).

Finalmente, la visión respalda la relevancia del proyecto ya no únicamente como solución logística, sino como una propuesta didáctica que logre cerrar la brecha existente entre

la teoría académica y la práctica profesional (Theopilus et al., 2020), creando de así una sólida base conceptual para el desarrollo ingenieril del sistema.

Capítulo 3: Diseño e integración del Sistema

El presente capítulo aborda la ingeniería de detalle y el diseño integral del sistema AS/RS, fundamentando la transición desde los requerimientos operativos hacia la definición de las especificaciones técnicas del prototipo. A través de un enfoque metodológico cuantitativo, se desarrollan los cálculos cinemáticos, el balance de cargas energéticas y la estimación de capacidad computacional, empleando matrices de decisión ponderadas para justificar objetivamente la selección de la arquitectura mecánica, electrónica y de control que garantiza la eficiencia y robustez del sistema, así como también su total integración.

Metodología general del proyecto

Para garantizar la integración sinérgica entre los dominios mecánico, electrónico e informático, el desarrollo del proyecto se rigió bajo la metodología de diseño mecatrónico del Modelo en V, conforme a la directriz VDI 2206 para el diseño de sistemas mecatrónicos. Con dicho enfoque se estructura el ciclo de vida del prototipo en dos vertientes principales: una fase descendente de especificación y diseño, y una fase ascendente de integración y validación como se representa en la **Figura 1**.

topología de control distribuido y una estructura mecánica cartesiana compatible con futuros sistemas AMR.

2. Diseño de Dominio Específico En la presente etapa, se trabajaron los subsistemas en paralelo:

- **Dominio Mecánico:** Modelado CAD en Autodesk Inventor de la estructura tubular, estaciones de elevación por husillo y efectores finales, validando dimensionalmente el ensamble virtual.
- **Dominio Electrónico:** Diseño de la arquitectura de conexiones para controladores, la red de sensores matriciales y la segregación de fuentes de potencia
- **Dominio Informático:** Desarrollo de los diagramas de flujo para los algoritmos de optimización de trayectorias y diseño de la interfaz HMI en Python.

3. Implementación e Integración (Vértice) Punto de inflexión donde los modelos digitales se materializaron en el prototipo físico. Se procedió a la manufactura de piezas en impresión 3D y corte láser, el ensamblaje de la perfilería metálica y el cableado de los gabinetes de control.

4. Aseguramiento de la Propiedad (Rama Ascendente)

El proceso de validación ha sido llevado a cabo mediante escalas:

- **Pruebas Unitarias:** validación de cada uno de los actuadores, calibración de los sensores de color, de presencia y ajuste de los finales de carrera.
- **Pruebas de Integración:** validación de la comunicación serial de la PC con el controlador principal y del protocolo de comunicación I2C.
- **Validación del Sistema:** evaluación final del rendimiento del AS/RS, comparativa de las métricas de tiempos de almacenamiento y eficiencia de ruteo respecto a los requerimientos iniciales.

Diseño conceptual y funcional del sistema

La arquitectura propuesta se concibe como una celda de manufactura flexible. El funcionamiento del sistema opera bajo la coordinación de las tres estaciones verticales que actúan como interfaz de entrada/salida y un manipulador cartesiano de 3 grados de libertad encargado de la distribución de las cargas en la matriz de almacenamiento.

El flujo operativo inicia con la detección y clasificación del producto en la estación de ingreso. Posteriormente, la unidad de control central calcula la coordenada de almacenamiento óptima basándose en el algoritmo escogido, la disponibilidad de la matriz y la tipología del objeto. Finalmente, la ejecución cinemática se delega a los controladores locales para el transporte y posicionamiento final, garantizando un ciclo cerrado de operación automatizada,

Diseño e integración progresiva de subsistemas

La materialización de la arquitectura propuesta se fundamenta en una estrategia de descomposición funcional, la cual permite segregar la complejidad del sistema global en unidades operativas independientes o subsistemas. Dicha metodología modular no solo facilita el diseño detallado y la depuración de fallos en etapas tempranas, sino que garantiza la escalabilidad del proyecto y las pruebas en cada etapa para verificar funcionamiento, permitiendo la actualización o reemplazo de componentes específicos sin comprometer la integridad del conjunto. A continuación, se describe la ingeniería de detalle de cada módulo, definiendo sus principios de operación, selección de componentes y los protocolos de interfaz que aseguran la sinergia entre los dominios mecánico, electrónico e informático.

Parámetros de Diseño y Requerimientos Técnicos

El desarrollo del sistema parte de la integración de una infraestructura preexistente (robot cartesiano) con nuevos subsistemas de transferencia y manipulación. El presente

apartado define las condiciones de frontera físicas y operativas que rigen el diseño de los nuevos elementos.

Caracterización de la Carga

El dimensionamiento de los actuadores y los efectores finales se basa en las dimensiones reales de la carga objetivo.

- **Tipo de Objeto:** Caja mdf.
- **Dimensiones (L x A x H):** 80mm x 40mm x 70mm
- **Masa Máxima Nominal:** 0.20kg .
- **Restricción de Manipulación:** La carga debe ser sujeta de los laterales en las estaciones, y con soporte inferior dispuesto en el eje Y del cartesiano por el robot cartesiano.

Entorno Operacional y Matriz de Almacenamiento

Basada de la estructura pórtico existente a la que se le vuelve a proyectar una nueva estructura matricial de alta densidad.

- **Dimensiones del Bastidor:** 1650 mm (Ancho) × 1150 mm (Alto)
- **Topología de la Matriz:** 5 filas × 10 columnas (50 celdas efectivas)
- **Dimensiones de la celda:** 150 mm × 150 mm × 150 mm
- **Ubicación de las estaciones:** zona del bastidor inferior $Y < 0$, obligándose a una distancia de entrega vertical de 400 mm desde la parte inferior hasta la primera fila operativa.

Diseño de las Estaciones Entrada/Salida

El nuevo sistema que se va a implementar es de alta importancia, debido que sirve como conector físico entre el entorno externo y entorno del almacén. Su diseño se divide en dos mecanismos independientes, los cuales son de elevación y sujeción respectivamente.

Mecanismo de Elevación Vertical

Las estaciones deben elevar la carga aproximadamente 400mm (altura propuesta de AMR) para entregarla al robot cartesiano, en la **Tabla 6** se detallan criterios necesarios para que cumplan con lo requerido y distintos mecanismos posibles tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación y ponderación:

- **Seguridad de Autobloqueo:** Capacidad de mantener la carga en altura sin energía eléctrica para evitar caídas). **(30%)**
- **Precisión y Repetibilidad:** Capacidad de llegar y mantener distancias exactas para alinearse con la pala transportadora y el modelo de AMR. **(20%)**
- **Capacidad de Carga:** Eficiencia para levantar peso. **(20%)**
- **Costo de Implementación:** Precio de componentes + complejidad de montaje. **(15%)**
- **Velocidad de Desplazamiento:** Rapidez de llegar al punto final. **(10%)**
- **Mantenimiento:** Necesidades de lubricación o ajuste. **(5%)**

Tabla 6
Selección de mecanismo de elevación

Criterios	Peso (%)	Husillo Trapezoidal (T8)	Correa Dentada	Piñón-Cremallera	Husillo de Bolas
1. Seguridad (Autobloqueo)	30%	5 (Excelente, alta fricción)	1 (Nulo, cae sin energía)	1 (Nulo, reversible)	2 (Bajo, suele caer)
2. Precisión	20%	4 (Alta, 0.04mm)	3 (Media, elasticidad)	3 (Media, holgura/backlash)	5 (Muy alta, <0.01mm)
3. Capacidad de Carga	20%	5 (Multiplicación de fuerza)	2 (Depende de motor)	4 (Buena transmisión)	5 (Excelente eficiencia)
4. Costo	15%	5 (Muy económico)	4 (Económico)	3 (Medio)	1 (Muy costoso)
5. Velocidad	10%	2 (Baja, limitado por RPM)	5 (Muy Alta)	5 (Alta)	3 (Media)
6. Mantenimiento	5%	3 (Limpieza/Grasa)	5 (Bajo, solo tensión)	4 (Bajo)	2 (Crítico, delicado al polvo)
PUNTAJE TOTAL	100%	4.15	2.55	2.65	3.05

Análisis de Resultados de y Selección Técnica

1. **Husillo Trapezoidal T8:** Obtiene el puntaje más alto **(4.15)**.

Su principal ventaja es el autobloqueo mecánico otorgado por su rosca interna por su ángulo de avance, el sistema no es reversible, por lo tanto, si el motor pierde potencia o se apaga, la estación no se pierde posición ni corre el riesgo de desplomarse, actuando como un freno pasivo de seguridad. Además, la estación tiene una alta multiplicación de torque con motores NEMA 17 pequeños por lo que, se puede levantar pesos importantes.

2. **Husillo de bolas:** Si bien el mecanismo tiene características mecánicamente superiores (mayor precisión y eficiencia), su baja fricción lo convierte en un mecanismo reversible (la carga caerá al suelo por efecto de la gravedad simultáneamente a la fase de carga si no se coloca un motor de tipo que incorpore freno electromagnético), lo que dificulta el control y aumenta innecesariamente el coste del sistema usado para dicha aplicación.

3. **Correa/Cremallera:** Se descartan para la aplicación del mecanismo de las estaciones debido a la falta de seguridad y de autobloqueo. Requerirían frenos activos para sostener la estación en posición en caso de corte inesperado de energía, y con así añade complejidad al diseño.

Conclusión: Debido al puntaje escogido gracias a sus características, se escogió el **Husillo Trapezoidal T8 de 4 entradas (Pitch 2mm, Lead 8mm)**. El mecanismo escogido ofrece un equilibrio ideal para el correcto funcionamiento: avance de 8mm por vuelta que es una velocidad aceptable y sobre todo la retención de carga segura, cumpliendo con los requerimientos de seguridad a bajo costo.

Cálculo de Torque de Elevación

- **Masa total de elevación (mT):** 0.2kg (Peso Caja) + 0.3kg (Mecanismo Gripper)
+ 0.2kg (Base) = 0.7kg.
- **Fuerza Axial (Fa):** $F_a = mT(g + a) = 0.7(9.81 + 0.2) = 7.0N$.
- **Torque Requerido (Treq):** Considerando la eficiencia del $n=0.4$

$$T_{req} = \frac{F_a * Paso}{2\pi * n} = \frac{7 * 0.008}{2\pi * 0.4} \approx 0.022 Nm$$

- **Selección:** Un motor **NEMA 17** (Figura) estándar (0.40Nm) ofrece un Factor de Seguridad mayor a 15, garantizando que la estación pueda operar sin calentamiento excesivo y con capacidad de retención estática.

Efecto Final de la Estación: Gripper de Sujeción

A diferencia del robot cartesiano, la estación debe *sujetar* activamente la caja para evitar que se mueva durante el ascenso rápido, en la **Tabla 7** se detallan criterios necesarios para que cumplan con lo requerido y distintos mecanismos posibles tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación y ponderación:

- **Rango de Apertura (Stroke):** Capacidad de abrir las mordazas más de 80 mm para alojar la caja. **(35%)**
- **Facilidad de Control:** Simplicidad del algoritmo y la electrónica requerida **(25%)**
- **Fuerza de Sujeción Controlada:** Capacidad de aplicar fuerza suficiente para levantar la carga sin aplastarla. **(20%)**
- **Costo de Fabricación:** Precio de los actuadores y manufactura de piezas. **(15%)**
- **Velocidad de Actuación:** Tiempo para cerrar/abrir completamente. **(5%)**

Tabla 7
Selección Efecto final

Criterios	Peso (%)	Pinza Neumática	Mecanismo de Husillo (Tornillo)	Piñón-Cremallera (Servomotor)	Mecanismo de 4 Barras (Bielas)
1. Rango de Apertura	35%	1 (Limitado <30mm)	5 (Excelente, ilimitado)	5 (Excelente, cremallera)	2 (Difícil lograr gran apertura lineal)
2. Facilidad de Control	25%	2 (Requiere compresor/válvulas)	3 (Requiere Driver + Finales de carrera)	5 (Simple, PWM directo)	4 (Simple, PWM directo)
3. Fuerza de Sujeción	20%	5 (Muy alta, regulable por presión)	5 (Muy alta, auto bloqueante)	4 (Media/Alta, dep. del Servo)	3 (Variable según el ángulo)
4. Costo	15%	1 (Muy costoso >100)	3 (Medio, motor + rodamientos)	5 (Bajo, impreso en 3D)	4 (Bajo)
5. Velocidad	5%	5 (Instantánea)	1 (Muy lenta)	4 (Rápida)	4 (Rápida)
PUNTAJE TOTAL	100%	2.35	3.65	4.60	3.10

Análisis de Resultados y Selección Técnica

1. **Piñón-Cremallera con Servo:** Obtiene el puntaje máximo **(4.60)**.

Es la única posibilidad mecánica simple para convertir 180 grados de un servomotor estándar en un recorrido lineal mayor a 90mm. Al diseñarse la cremallera a medida (Impresión 3D), la apertura exacta para la caja de 80mm se puede ajustar sin restricciones. La utilización de un servomotor elimina la complejidad del uso de drivers o de finales de carrera externos, vinculando el posicionamiento en modo absoluto mediante señal PWM.

2. **Pinza Neumática:** A pesar de ser un estándar industrial, se descarta por su corto rango de apertura y su complejidad de implementación. Las pinzas neumáticas paralelas estándar suelen abrir pocos milímetros, lo cual es insuficiente para la finalidad del mecanismo y una pinza comercial que abra 100mm es excesivamente costosa, pesada y de gran volumen.

3. **Husillo:** Ofrece gran fuerza, pero es innecesariamente lento para abrir y cerrar 90mm en cada ciclo. Por lo tanto aumentaría drásticamente el tiempo de operación de la estación, creando un cuello de botella.

4. **Bielas/4 Barras:** Mecánicamente sencillo, pero la fuerza de agarre no es lineal varía según el ángulo de la biela y es geométricamente complejo lograr una apertura de 90mm manteniendo las mordazas paralelas sin que el mecanismo ocupe mucho espacio lateral.

Conclusión: Se procede con el diseño de un efector final basado en **Piñón y Doble**

Cremallera Opuesta, accionado por un servomotor de alto torque. Dicha configuración

garantiza la apertura requerida 90mm, fuerza suficiente para la carga de 0.20kg y un bajo costo de implementación.

Cinemática del Mecanismo:

Tomando de base las dimensiones existentes de la caja sistema de Piñón-Cremallera doble opuesto para convertir el movimiento rotacional del servomotor en movimiento lineal.

- **Requerimiento de Apertura:** 80mm (Ancho de caja).
- **Actuador Seleccionado:** Servomotor MG996R.
- **Justificación:** Con el uso de un piñón de radio 15mm, un giro de 180 grados desplaza las cremalleras:

$$\text{Desplazamiento} = \theta * r = 3.14 * 15\text{mm} \approx 47\text{mm (Por lado)}$$

De tal manera que genera una apertura total de 94mm, suficiente para liberar la caja que tiene una dimensión de 80mm por lo que se tiene espacio de holgura.

Fuerza de Agarre:

El servo MG996R entrega 9.4kg*cm (0.92 N*m). Con un piñón de 1.5cm, la fuerza aplicada en las mordazas es teóricamente de 60N (6kg), suficiente para asegurar la carga sin aplastarla (se controlará el torque mediante PWM).

Diseño del Sistema de Control y Procesamiento

La definición de la unidad de procesamiento central constituye una etapa crítica en el diseño, dado que el controlador debe ser capaz de gestionar simultáneamente la cinemática de los actuadores en tiempo real y la lectura masiva de la matriz de sensores distribuida.

Análisis de Carga de Entrada/Salida en el controlador

Para justificar la arquitectura, se cuantifican los puntos de conexión necesarios:

1. **Sensores Matriciales:**

$$50 \text{ celdas} \times 1 \frac{\text{sensor}}{\text{celda}} = \mathbf{50 \text{ Entradas}}$$

2. **Sensores de Seguridad y Posición:**

$$9 \text{ finales de carrera} + 3 \text{ sensores de estación} = \mathbf{12 \text{ Entradas}}$$

3. **Control de Motores (STEP/DIR):**

$$3 \text{ cartesianos} + 3 \text{ estaciones} = 6 \text{ motores} \times 2 \text{ pines} = \mathbf{14 \text{ Salidas}}$$

4. **Servos (PWM):**

$$3 \text{ estaciones} \times 1 \frac{\text{gripper}}{\text{estación}} = \mathbf{3 \text{ salidas}}$$

5. **Total de Pines Requeridos:** aproximadamente 79 pines

Para determinar la arquitectura más idónea, se realizó un análisis comparativo técnico entre soluciones estandarizadas que se puede ver en la **Tabla 8** tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación y ponderación:

- **Capacidad de I/O (Pines):** Disponibilidad de pines para manejar >50 sensores y >7 motores. **(35%)**
- **Compatibilidad Lógica (Voltaje):** Facilidad para interactuar con drivers y sensores de 5V sin conversores de nivel. **(20%)**
- **Facilidad de Implementación (Software):** Curva de aprendizaje, librerías disponibles y facilidad de depuración. **(20%)**
- **Costo Total:** Precio del microcontrolador + periféricos necesarios. **(15%)**
- **Velocidad de Procesamiento:** Frecuencia de reloj para generar pulsos y leer datos. **(10%)**

Tabla 8
Selección del controlador

Criterios	Peso (%)	Arduino			PLC Compacto (S7-1200 / Logo)
		Arduino Mega 2560	Mega + Expansión I2C	ESP32	
1. Capacidad I/O (Pines)	35%	3 (54 pines, insuficiente para 80+ señales)	5 (Escalable hasta 128 pines)	2 (aprox. 25 pines útiles, requiere expansión)	1 (Base: 14 pines. Expansión muy costosa)
2. Compatibilidad Lógica	20%	5 (Nativa 5V)	5 (Nativa 5V)	2 (Nativa 3.3V, requiere Level Shifters)	2 (Nativa 24V, requiere optoacopladores)
3. Facilidad Implementación	20%	5 (IDE Arduino, amplia documentación)	4 (Requiere gestión de direcciones I2C)	4 (IDE Arduino, pero gestión de pines compleja)	2 (Ladder/KOP, curva alta, licencias)
4. Costo	15%	5 (Económico, Hardware Libre)	5 (Económico, chips)	5 (Muy económico)	1 (Muy costoso >\$200)

		cuestan centavos)			
		2	3	5	3
5. Velocidad	10%	(16 MHz - Lento para cargas altas)	(16 MHz - Suficiente al delegar I/O)	(240 MHz - Sobrado)	(Ciclo Scan fijo, bueno pero limitado en pulsos)
PUNTAJE					
TOTAL	100%	3.80	4.60	3.00	1.60

Análisis de Resultados y Justificación Técnica

1. **Arduino Mega 2560 con Bus I2C:** Obtiene el puntaje máximo **(4.60)**.

Aunque el microprocesador ATmega2560 es un microprocesador de únicamente 8 bits, alcanzando una frecuencia de 16 MHz, lo que le resultaría lento en comparación con un ESP32, es el único microprocesador que dispone como opción el voltaje nativo de 5 V, lo cual es fundamental puesto que tanto los drivers sobre motor (A4988 y DRV8825), como los sensores de obstáculos y de identificación trabajan a 5 V.

La limitante de los pines se solventa muy bien mediante el uso del protocolo I2C. Al usar expansores de puertos se libera al microprocesador de que tenga que leer 50 cables individuales, pasando la lectura matricial de 50 cables a lectura de datos por 2 hilos en modo serial.

2. **ESP32:** Se anula principalmente por la incompatibilidad de los niveles lógicos. El ESP32 trabaja con 3,3V; si conectamos sensores de 5V los quemaríamos directamente y, a la vez, los conversores de los niveles para arriba de 60 señales permitirían complicar aún más el hardware añadiendo fallos cuyo porcentaje sería inaceptable en un prototipo.

3. **PLC Industrial:** Aunque es el estándar en la industria real, para un prototipo académico de "Bajo Costo" resulta inviable. Un PLC con módulos de expansión para leer 50 entradas digitales superaría por sí solo el presupuesto total del proyecto, además de complicar la integración con algoritmos de optimización en Python.
4. **Mega Solo:** Físicamente ineficiente debido a que solo cuenta con 54 pines digitales, lo cual no puede cubrir la demanda de los aproximadamente 80 puntos de conexión requeridos por el diseño conceptual propuesto.

Conclusión: En base a las características y ventajas del **Arduino Mega 2560 + Expansión I2C** ha sido la seleccionada para el control del prototipo la cual será complementada con una topología Maestro-Esclavo donde un segundo Arduino se encarga exclusivamente de la cinemática para compensar la velocidad de reloj de 16 MHz.

Selección del Expansor I2C

Con la arquitectura de bus I2C ya definida para resolver la saturación de pines del microcontrolador maestro, a continuación, se necesita realizar la elección del circuito integrado que va a funcionar como la interfaz de comunicación distribuida. El integrado seleccionado debe garantizar la multiplexación de las 50 señales de los sensores matriciales que aparecen a la vez, reducir la cantidad de cableado existente a lo largo de la estructura y garantizar la señal.

Análisis de Requerimientos de Expansión

Para justificar la elección del componente, se establecen los parámetros técnicos de operación:

- **Densidad de Pines por Chip:** Se busca maximizar el número de entradas por dispositivo para reducir la cantidad total de chips a soldar.
- **Protocolo de Comunicación:** I2C para aprovechar el bus definido por los análisis anteriores.
- **Direccionamiento Físico:** Capaz de permitir configurar múltiples direcciones para conectar varios dispositivos en el mismo bus con distintas direcciones.
- **Velocidad de Respuesta:** mínimo 100kHz para garantizar correcta velocidad de lectura de datos dados por los sensores.

Para determinar el expansor más idóneo, en la **Tabla 9** se realizó un análisis comparativo técnico entre los integrados más comunes en el mercado, tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación y ponderación:

- **Densidad de Canales (GPIO):** Número de pines útiles por encapsulado. (35%)
- **Capacidad de Direccionamiento:** Cantidad máxima de chips permitidos en un solo bus I2C. (25%)
- **Facilidad de Implementación:** Disponibilidad de librerías y simplicidad de cableado. (20%)
- **Costo por Canal:** Relación precio/pin útil. (20%)

Tabla 9
Selección de Expansor I2C

Criterios	Peso (%)	MCP23017	PCF8574	74HC595
1. Densidad de Canales	35%	5 (16 pines bidireccionales)	2 (8 pines bidireccionales)	3 (8 pines de salida, difícil lectura)
2. Direccionamiento	25%	5 (8 direcciones config. por HW)	5 (8 direcciones config. por HW)	1 (No direccionable, requiere cascada)
3. Facilidad Implementación	20%	5 (Protocolo I2C estándar)	5 (Protocolo I2C estándar)	2 (Protocolo SPI/Serial, sensible a ruido)
4. Costo por Canal	20%	5 (Muy eficiente, 1 chip reemplaza a 2 de 8 bits)	3 (Menos eficiente)	5 (Muy económico)
PUNTAJE TOTAL	100%	5.00	3.35	2.60

Análisis de Resultados y Justificación Técnica

1. **MCP23017:** Obtiene el puntaje máximo **(5.00)**

El presente integrado destaca por ofrecer **16 pines GPIO** en un solo encapsulado, lo que permite cubrir los 50 sensores de la matriz utilizando solo 4 chips. Así se simplifica drásticamente el diseño de las PCBs distribuidas y reduce la carga capacitiva en el bus

I2C en comparación con opciones de 8 bits. Además, sus 3 pines de dirección (A0, A1, A2) permiten coexistir hasta 8 chips sin conflictos.

2. **PCF8574:** A pesar de que cuenta con la comunicación I2C, dispone de 8 puertos, por lo que se necesitan mayor cantidad de chips, lo que aumenta la complejidad y costo del hardware.
3. **74HC595:** No cuenta con una interfaz nativa I2C, además de que tiene un registro de desplazamiento. Su arquitectura de composición en cascada es altamente susceptible al ruido eléctrico y al contar con largas distancias de señal sería un problema, donde un solo bit afectaría la lectura de todos los sensores cercanos a dicha señal.

Conclusión: Debido a sus características se selecciona el **MCP23017** como chip para la interfaz de expansión para la red de sensores del sistema AS/RS.

Selección de sensores de presencia para la matriz de almacenamiento

La fidelidad que puede ofrecer el inventario digital descansará sobre la aptitud del sistema para detectar físicamente el grado de ocupación de todas y cada una de las 50 celdas. El sensor que se seleccionará deberá ser de tamaño reducido, económico, pero que pueda trabajar a la vez en el pequeño espacio disponible en el interior del cubículo sin llegar a dar lecturas erróneas.

Análisis de Requerimientos de Detección

Para justificar la elección del sensor, se cuantifican las condiciones de operación en la celda:

- **Rango de Detección:** Corto alcance (ajustable entre 2 cm y 10 cm) para detectar la caja dentro de la celda.
- **Tipo de Salida:** Salida digital compatible para lectura de los expansores MCP23017 sin necesidad de conversión adicional.
- **Tamaño Físico:** Debe caber en el marco de la celda sin obstruir la entrada de la pala del robot.

Para determinar el sensor más idóneo, en la **Tabla 10** se realizó un análisis comparativo técnico entre los más comunes en el mercado, tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación y ponderación:

- **Costo Total (Escalabilidad):** Impacto económico al multiplicar por 50 unidades. **(35%)**
- **Rango y Ajuste:** Capacidad de limitar la detección para no leer fuera de la celda. **(25%)**
- **Inmunidad a Interferencias:** Comportamiento ante luz ambiental o cruce de señales ("Crosstalk"). **(20%)**
- **Facilidad de Montaje:** Integración mecánica en la estructura. **(20%)**

Tabla 10
Selección sensor de presencia

Criterios	Peso (%)	Infrarrojo HW-870	Ultrasónico HC-SR04	Final de Carrera Mecánico
1. Costo Total	35%	5 (Muy económico)	3 (Medio)	4 (Económico)
2. Rango y Ajuste	25%	5 (Ajustable con potenciómetro)	2 (Zona ciega <2cm, cono muy amplio)	1 (Contacto físico fijo)
3. Inmunidad Interferencia	20%	4 (Buena en corto rango)	1 (Alto riesgo de eco entre celdas vecinas)	5 (Excelente, es mecánico)
4. Facilidad Montaje	20%	5 (Compacto, 1 agujero)	3 (Requiere 2 agujeros grandes)	2 (Requiere ajuste mecánico preciso)
PUNTAJE TOTAL	100%	4.80	2.35	3.10

Análisis de Resultados y Justificación Técnica

1. Módulo Infrarrojo HW-870: Obtiene el puntaje máximo (5.00)

El presente sensor es la solución óptima por su **bajo costo y tamaño reducido**. Cuenta con un potenciómetro integrado que permite calibrar la distancia de disparo exacta para la profundidad de la celda. Su salida digital es compatible directamente con el MCP23017. Al ser una detección puntual óptica, no sufre de dispersión de onda como el ultrasonido.

2. **Ultrasónico HC-SR04:** Se descarta por dos razones técnicas críticas como el ancho del haz ultrasónico que provocaría interferencias entre celdas adyacentes en una matriz densa, la gestión de 50 señales de eco (Trigger/Echo) saturaría los tiempos de procesamiento del controlador.
3. **Final de Carrera Mecánico:** A pesar de ser robusto, requiere contacto físico fijo con la carga. Dado que el peso de las cajas es bajo (200g), existe de que la resistencia del resorte del switch desplace la caja o no se logre accionar, además de sufrir desgaste mecánico.

Conclusión: Debido a las características fue seleccionado el sensor **HW-870** para la detección de cada una de las celdas de la matriz de almacenamiento .

Selección de Sensores de Identificación

Las estaciones de carga requieren un sistema de visión que sea capaz de discriminar el tipo de productos por el color dado por etiquetas o carcasas. La correcta lectura del color y la interfaz de comunicación son determinantes.

Análisis de Requerimientos de Identificación

Para justificar la arquitectura de detección, se definen las necesidades:

- **Fidelidad Cromática:** Capacidad de descomponer la luz en canales RGB reales, no solo intensidad de luz.
- **Interfaz de Comunicación:** Protocolo I2C para integración con el bus de datos principal, evitando el uso de frecuencias de pulso que consumen interrupciones.

- **Seguridad:** Filtro físico para evitar que luz (calor/iluminación ambiente) falsee el color es decir cuente con rechazo de ruido.

Para determinar el sensor más idóneo, en la **Tabla 11** se realizó un análisis comparativo técnico entre los más comunes en el mercado, tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación y ponderación:

- **Tecnología de Medición:** Precisión y filtros ópticos integrados. **(40%)**
- **Interfaz de Datos:** Facilidad de lectura (I2C vs Frecuencia). **(30%)**
- **Gestión de Múltiples Sensores:** Facilidad para conectar 3 sensores iguales. **(20%)**
- **Costo:** (10%)

Tabla 11
Selección de Sensor de color

Criterios	Peso (%)	TCS34725 + TCA9548A	TCS3200	LDR + LED RGB
1. Tecnología Medición	40%	5 (RGB + Clear + Filtro IR)	3 (RGB sin filtro IR)	1 (Muy baja precisión)
2. Interfaz de Datos	30%	5 (I2C Digital Puro)	2 (Tren de pulsos, requiere timers)	1 (Analógica, requiere ADC)
3. Gestión Múltiple	20%	4 (Requiere Multiplexor)	1 (Requiere 5 pines por sensor = 15 pines)	2 (Requiere calibración individual compleja)
4. Costo	10%	4 (Medio)	5 (Bajo)	5 (Muy bajo)
PUNTAJE TOTAL	100%	4.70	2.50	1.60

Análisis de Resultados y Justificación Técnica

1. TCS34725 con Multiplexor I2C: Obtiene el puntaje máximo (5.00)

El sensor TCS34725 es superior al incluir un filtro de bloqueo IR, lo que garantiza que la lectura del color. Su comunicación es I2C. Sin embargo, el sensor tiene una dirección fija de fábrica (0x29). Para conectar 3 sensores al mismo bus, es indispensable el uso de un multiplexor I2C TCA9548A. Dicho componente permite conmutar canales,

permitiendo al Arduino hablar con cada sensor individualmente sin conflictos de dirección.

2. **TCS3200:** Compleja interfaz de salida. Devuelve una onda cuadrada cuya frecuencia depende del color. Leer 3 sensores a la vez tendría el problema de que requeriría 3 pines de interrupción y 12 pines de control (S0-S3 por sensor), saturando el microcontrolador y complicando el código.
3. **LDR + LED:** Opción analógica descartada debido a la existencia de circuitos similares con filtros lo cual disminuye la dependencia de la calibración y la baja repetibilidad.

Conclusión: Se selecciona el sensor **TCS34725** con gestión del chip **TCA9548A** para no duplicar direcciones en el bus de datos, lo que garantiza una identificación precisa y una lectura más limpia en el bus I2C conectado al sistema.

Etapas de Selección de Potencia y Control de Motores

La interfaz de potencia es el nexo crítico entre la lógica de control digital (bajo voltaje/baja corriente) y la ejecución física del movimiento (alto voltaje/alta corriente inductiva). Como el sistema contiene varios motores paso a paso NEMA 17 para el robot cartesiano, la pala y las estaciones, requerimos de una solución de hardware que contemple la conmutación de las bobinas, la regulación de corriente máxima y la protección de nuestro microcontrolador central contra los picos de voltajes.

Análisis de Requerimientos de Actuación

Para justificar la arquitectura de potencia, se cuantifican las demandas eléctricas y funcionales de los actuadores seleccionados:

- **Protocolo de Control:** Se requiere una interfaz estándar tipo STEP/DIR para minimizar el uso de pines del microcontrolador (2 pines por motor en lugar de 4).
- **Micro pasos:** Capacidad de dividir los pasos del motor (1/8, 1/16) para reducir la resonancia eléctrica, suavizar el movimiento mecánica y aumentar la resolución.
- **Regulación de Corriente:** El controlador debe permitir ajustar el límite de corriente en las bobinas para evitar el sobrecalentamiento, sonido excesivo del motor sin afectar al torque.
- **Integración Física:** Debido a la cantidad de motores (6 unidades), se busca una solución que reduzca el cableado, prefiriendo placas que se monten directamente sobre el controlador.

Para determinar el controlador más idóneo, la arquitectura de potencia, se cuantifican las demandas eléctricas y funcionales de los actuadores seleccionados en la **Tabla 12** se realizó un análisis comparativo técnico entre los controladores más comunes del mercado, tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación y ponderación:

- **Integración y Modularidad:** Facilidad para montar sobre el Arduino Mega sin cables sueltos. (35%)
- **Precisión (Microstepping):** Capacidad de resolución y suavidad. (25%)
- **Regulación de Corriente:** Capacidad de limitar la corriente activa (potenciómetro ajustable). (20%)
- **Costo por Eje:** Precio unitario multiplicado por 7 ejes. (20%)

Tabla 12
Selección control motores

Criterios	Peso (%)	CNC Shield + controlador A4988	Puente H L298N (Módulo Dual)	Drivers Industriales TB6600
1. Integración y Modularidad	35%	5 (Excelente, montaje directo)	2 (Requiere mucho cableado manual)	1 (Muy voluminoso, requiere gabinete enorme)
2. Precisión (Microstepping)	25%	4 (Hasta 1/16 pasos, suficiente)	1 (Solo pasos completos/medios, vibra mucho)	5 (Hasta 1/32 o 1/64, excelente)
3. Regulación de Corriente	20%	5 (Ajustable vía potenciómetro Vref)	1 (No tiene, corriente fija/ineficiente)	5 (Ajustable vía Dip-Switch)
4. Costo por Eje	20%	5 (Muy bajo, controlador reemplazable)	4 (Bajo)	2 (Alto, costoso para 7 motores)
PUNTAJE TOTAL	100%	4.75	2.05	2.80

Análisis de Resultados y Justificación Técnica

1. **CNC Shield para Arduino Mega + Drivers A4988:** Obtiene el puntaje máximo **(4.7)**

El conjunto de características es el indicado debido a su arquitectura compacta y modular. El uso de una Shield específicamente diseñada para conformar el Arduino Mega posibilita la conexión de hasta 5 drivers de forma simultánea sin la adecuación de un solo cable de puente, distribuyendo de forma directa la alimentación de potencia (12V) y las señales lógicas por las pistas del PCB. El controlador A4988 seleccionado es capaz de permitir una resolución de micropasos de 1/16, transformando los 200 pasos nativos del motor en 3200 por revolución, eliminando vibraciones. También dispone de un potenciómetro de ajuste de corriente, esencial para la calibración de la frecuencia exacta de cada motor y evitar el sobrecalentamiento.

2. **Drivers Industriales TB6600:** A pesar de sus características superiores en disipación térmica y resolución de paso (1/32), su tamaño y costo los hacen poco prácticos para el presente proyecto. Por lo que implementar 6 unidades TB6600 requeriría un gabinete eléctrico industrial de gran tamaño y un presupuesto muy superior.

3. **Puente H L298N:** Descartado por ser una tecnología obsoleta para el control de precisión necesario. No soporta micropasos lo que haría el movimiento brusco y ruidoso, además que no limita corriente por lo que el motor se calentaría y requiere 4 pines de control por motor, lo que saturaría al controlador.

Conclusión: Se selecciona la implementación de **Shields de Expansión CNC** compatibles con Arduino Mega, equipadas con controladores **A4988** configurados a 1/16 de paso. La arquitectura garantiza un montaje limpio, mantenimiento sencillo (drivers reemplazables) y un control preciso del torque y posición.

Diseño Electrónico y Energético

La confianza en el sistema mecatrónico está supeditada a que la energía que le da sustento no se vea afectada por perturbaciones del proceso de conmutación, ya que el ruido del ciclo de los motores podría perturbar el tratamiento de la información. Con ello, se espera no sólo aislar las distintas fuentes, sino también conferir una determinada topología de aislamiento de fuentes energéticas, que separa físicamente la alimentación de energía lógica (5V de Vcc) a la alimentación de energía motor (12V de Vcc), que son unidas exclusivamente a través de una referencia de tierra común de GND para el retorno de las señales.

Balance de Energía: Red Lógica y Servos (Circuito 5V)

El circuito alimenta la parte lógica y de control del sistema y los actuadores de las estaciones. La fuente seleccionada es de 5V DC con capacidad de 5 Amperios (25 Watts).

Cuantificación de Cargas

Se calcula el consumo considerando que los microcontroladores están procesando datos activamente y los sensores están energizados, en la **Tabla 13** se realiza un cálculo de las cargas que validan la fuente seleccionada.

Tabla 13
Cuantificación de cargas 5v

Componente	Cantidad	Consumo Unitario Estimado (mA)	Consumo Total (Amperios)
Arduino Mega 2560	2	250 mA (con I2C activo)	0.50 A
Sensor IR (HW-870)	50	10 mA (Promedio)	0.50 A
Sensor Color (TCS34725)	3	15 mA (con LED encendido)	0.045 A
Bus I2C (Pull-ups)	1	$\frac{V}{R} = \frac{5V}{4.7K\Omega}$	0.005 A
Servo MG996R (Estación)	3	800 mA (Movimiento con carga)	2.40 A
TOTAL DEMANDADO			3.45 A

Validación de la Fuente

- **Capacidad de la Fuente:** 5.0A.
- **Consumo Calculado:** 3.45A.
- **Margen de Reserva:** 1.55A (31%).

Justificación Técnica

La fuente de alimentación de 5A se considera adecuada. El consumo crítico está en los 3 servomotores. Su corriente de bloqueo puede llegar hasta 1.5A cada servomotor (4.5A), pero el software se tiene que diseñar para controlar la apertura de las estaciones secuencialmente, no pudiendo abrir las 3 estaciones simultáneamente bajo condición de bloqueo, por lo que el consumo se mantendría en el rango nominal de 2.4A. El margen del 31% protege a los controladores ante las caídas de voltaje durante el arranque de los servos.

Balance de Energía: Red de Potencia (Circuito 12V)

El circuito alimenta la parte de mayor demanda de potencia: los motores paso a paso del robot cartesiano, la pala telescópica y la elevación de las estaciones, además del sistema de refrigeración. La fuente seleccionada es de 12V DC con capacidad de 10 Amperios (120 Watts).

Cuantificación de Cargas Inductivas

Para los motores paso a paso, el consumo no es fijo, sino que se limita mediante el potenciómetro de los drivers A4988. Se ha configurado una corriente de fase de 1.2A para equilibrar torque y temperatura, en base a dicha configuración en la **Tabla 14** se hace un análisis de las cargas:

Tabla 14
Cuantificación de cargas 12v

Componente	Cantidad	Corriente Limitada por Driver (A)	Factor de Simultaneidad (Ks)	Consumo Ponderado (A)
NEMA 17 (Robot X, Y)	2	1.2 A	1.0 (Siempre activos)	2.40 A
NEMA 17 (Pala Z)	1	1.2 A	0.5 (Intermitente)	0.60 A
NEMA 17 (Estaciones)	3	1.2 A	0.33 (Uno a la vez)	1.20 A
Ventiladores (80mm)	2	0.15 A	1.0 (Continuo)	0.30 A
TOTAL DEMANDADO				4.50 A

Si sumáramos la corriente pico de los 6 motores simultáneamente $6 \text{ Nema17x12 Amperios} = 7.2\text{A}$ más ventiladores, tendríamos 7.5A. Sin embargo, en operación real, rara vez se mueven todos los ejes y estaciones al mismo tiempo. Aplicando un factor de simultaneidad realista (robot moviéndose + 1 estación subiendo), el consumo promedio ronda los **4.5 A** calculados en la **Tabla 14**.

Validación de la Fuente

- **Capacidad de la Fuente:** 10.00A.
- **Consumo Pico (Peor Caso):** 7.50A.
- **Consumo Promedio:** 4.50A.
- **Margen de Seguridad (Pico):** 25%.

Justificación Técnica

La fuente de 10A está correctamente dimensionada con un Factor de Seguridad de 1.33 con respecto al peor de los escenarios posibles (Homing general). Al tener un diseño sobredimensionado es crítico en cargas inductivas para conseguir absorber los picos de corriente transitoria y el frenado regenerativo de los motores a la vez que la fuente no entra en modo de protección, asegurando la parte de la estabilidad del torque en el robot cartesiano, el cual tiene altas velocidades.

Gestión Térmica del Gabinete

La confiabilidad operativa de los sistemas mecatrónicos depende intrínsecamente de una gestión térmica eficiente. Dado que el sistema AS/RS concentra múltiples actuadores y controladores gestionados desde un único gabinete de control, la densidad de potencia disipada por los drivers y las fuentes de alimentación genera un incremento significativo de la temperatura interna. Si el calor no es evacuado correctamente, los semiconductores pueden

superar su temperatura máxima de unión, provocando el apagado térmico, la pérdida de pasos en los motores o la degradación permanente de los componentes electrónicos.

El cálculo de la **Potencia Disipada**, que representa la energía perdida en forma de calor debido a la ineficiencia de la conmutación interna, se realiza un análisis individual de las fuentes de alimentación y los componentes que pueden llegar a disipar calor:

Fuente de Alimentación Switching 5V 5A S-25-5 WESTOR:

Potencia de salida:

$$P_s = V_s * I_s$$

$$P_s = 5V * 5A = 25W$$

La eficiencia se analiza a carga máxima (el peor de los casos); es decir, cuando la fuente trabaja al límite, y en esas circunstancias la eficiencia baja al:

$$\eta = 75\% = 0.75$$

Potencia consumida:

$$P_c = \frac{P_s}{\eta} = \frac{25W}{0.75}$$

$$P_c = 33.33 W$$

Potencia disipada:

$$P_D = P_s - P_c = 33.33 - 25 = 8.33W$$

Fuente de Alimentación conmutada de un solo grupo AC 110V/220V a DC 12V 10A

Potencia de salida:

$$P_s = V_s * I_s$$

$$P_s = 12V * 10A = 120W$$

Las fuentes estándar tipo 12V 10A suelen tener una eficiencia del 80-85% a plena carga, lo que significa que ese porcentaje de la energía se usa y el restante se convierte en calor; en dicho caso el análisis de la eficiencia no se hará a carga máxima si no que solo a plena carga con la eficiencia conservadora del 80%.

$$\eta = 80\% = 0.80$$

Potencia consumida:

$$P_c = \frac{P_s}{\eta} = \frac{120 \text{ W}}{0.80}$$

$$P_c = 150 \text{ W}$$

Potencia disipada:

$$P_D = P_s - P_c = 150 - 120 = 30 \text{ W}$$

- Placa de Control:

Aunque la placa de Control cuenta dos controladores con controladores que disipan calor, 4 MCP23017-E/SP y 6 controladores A4988 con disipadores de calor, estos terminan siendo despreciables para la transferencia de calor dado a que son valores sumamente pequeños.

Cálculos temperatura

Una vez definida la potencia que van disipar los elementos dentro del gabinete, se calcula la temperatura de cada sólido para poder realizar un análisis CFD; para poder calcular la temperatura se necesita la fórmula de Ley de Enfriamiento de Newton por Convección:

$$\dot{Q} = h * A * \Delta T$$

En donde ($\dot{Q}$) es la potencia, A el área es la superficie del sólido, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $\frac{W}{m^2} * K$; ΔT es la diferencia de temperatura entre la temperatura interna de la fuente y la temperatura ambiente.

Se tienen en cuenta el valor típico de h en un flujo de aire natural el cual está alrededor de $5 - 25 \frac{W}{m^2} * K$; y la disipación térmica ya que dentro del gabinete no solo disipa por radiación térmica sino también por conducción y convección, lo que significa que el calor también se transfiere hacia el aire que lo rodea.

Una vez aclarado los parámetros se calcula la Temperatura despejando de la fórmula previamente escrita:

$$T = \left(\frac{P}{\varepsilon * \sigma * A} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Para el área se toman en cuenta las dimensiones de cada fuente, mismas que se utilizan para el diseño en el software Solid Works:

- **Fuente de Alimentación Switching 5V 5A S-25-5 WESTOR:**

Alto: 110 mm

Largo: 95 mm

Ancho: 35mm

$$A_1 = 110 \text{ mm} * 95 \text{ mm} = 10450 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 0.010450 \text{ m}^2$$

- **Fuente de Alimentación conmutada de un solo grupo AC 110V/220V a DC 12V (S-120-12 120W 12VDC 10A)**

Alto: 160 mm

Largo: 95 mm

Ancho: 40 mm

$$A_2 = 160 \text{ mm} * 95 \text{ mm} = 15200 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 0.0152 \text{ m}^2$$

- **Gabinete:**

Alto: 400 mm

Largo: 300 mm

Ancho: 200 mm

$$A_3 = 200 \text{ mm} * 300 \text{ mm} = 60000 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = 0.06 \text{ m}^2$$

Al conocer la potencia disipada ($\dot{Q}$) y el coeficiente de transferencia de calor (h) para la convección, se calcula la temperatura.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{h \cdot A}$$

La temperatura interna de la fuente será la temperatura ambiente (T_{amb}) más la diferencia de temperatura (ΔT):

$$T_{\text{interno}} = T_{\text{amb}} + \Delta T$$

- **Fuente 5V 5A:**

- Potencia disipada: $\dot{Q} = 8.33 \text{ W}$
- Área superficial: $A = 0.06 \text{ m}^2$
- Coeficiente de convección típico $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (valor aproximado para ventilación natural).

$$\Delta T = \frac{8.33 \text{ W}}{10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.06 \text{ m}^2} = 13.88 \text{ K}$$

temperatura ambiente 25°C:

$$T_{\text{interno}} = 25^{\circ}\text{C} + 13.99^{\circ}\text{C} = 38.88^{\circ}\text{C} \approx 312.03^{\circ}\text{K}$$

- **Fuente 12V 10A:**

- Potencia disipada: $\dot{Q} = 30 \text{ W}$
- Área superficial: $A = 0.05 \text{ m}^2$
- Coeficiente de convección típico $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (valor aproximado para ventilación natural).

$$\Delta T = \frac{30 \text{ W}}{10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.06 \text{ m}^2} = 50 \text{ K}$$

temperatura ambiente 25°C:

$$T_{\text{interno}} = 25^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C} = 75^{\circ}\text{C} \approx 348.15^{\circ}\text{K}$$

Diseño y simulación en el software Solid Works

Con el objeto de validar la eficacia del sistema de refrigeración y determinar la configuración óptima para la disipación térmica dentro del gabinete de control, se llevó a cabo un análisis numérico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando el software SolidWorks Flow Simulation. El estudio evaluó el comportamiento termodinámico del volumen de control bajo tres escenarios operativos diferenciados permitiendo así contrastar los gradientes de temperatura y seleccionar la estrategia más eficiente para mantener los componentes dentro de su rango de operación seguro:

- **Sin Ventilación**

Bajo un caso convección natural con el gabinete hermético se toman en consideración las dimensiones previamente analizadas de las fuentes de energía y para el gabinete se toman las dimensiones reales:

Alto: 400 mm

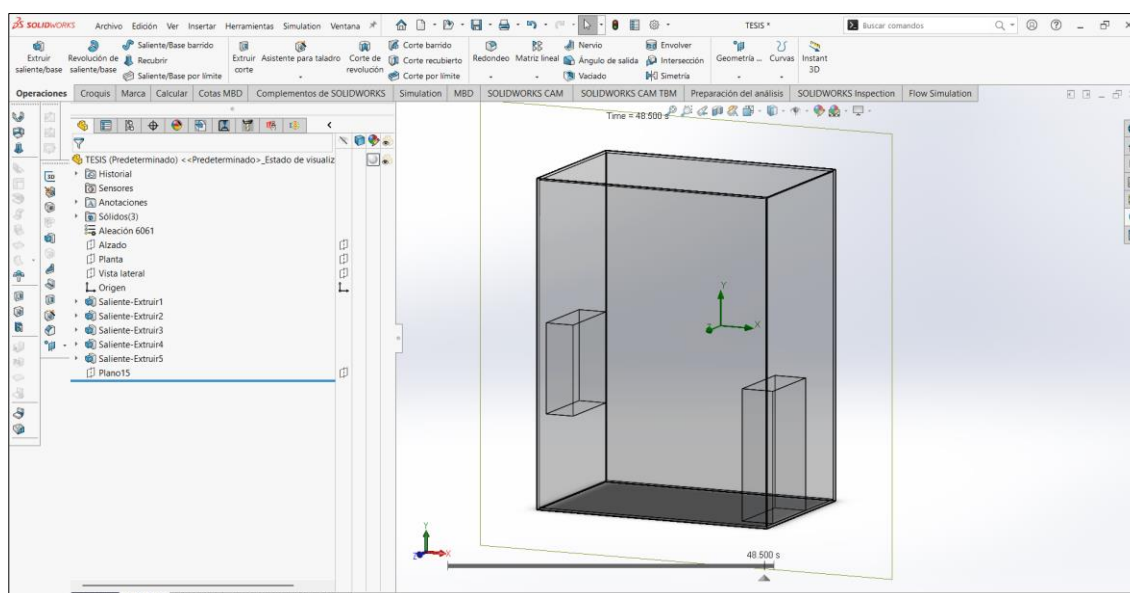
Largo: 300 mm

Ancho: 200 mm

Espesor: 2 mm

Tomando en cuenta la disposición de las fuentes dentro del gabinete se obtiene un modelo que se observa en la **Figura 2**.

Figura 2
Esquema implementado SolidWorks

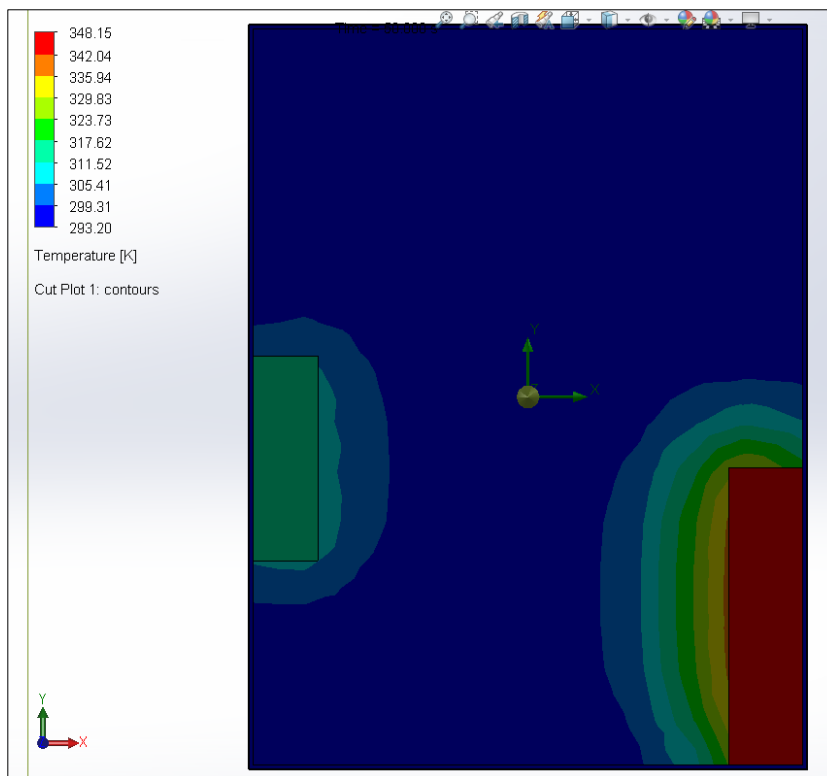


Nota. [Autoría Propia]

Análisis CFD

Se observa la disipación de temperatura dentro del gabinete, tomando en cuenta que en su interior se tiene temperatura ambiente inicial, se tiene el resultado en la **Figura 3**.

Figura 3
Contornos térmicos sin ventilación



Nota. [Autoría Propia]

El gráfico de contornos térmicos revela una concentración de calor crítica alrededor de la fuente de potencia, alcanzando picos de temperatura cercanos a los **348.15 K (75 °C)** en la superficie del componente, mientras que la temperatura promedio de los sólidos se estabiliza en **313.38 K (40.2 °C)**. El hecho de que la temperatura promedio del fluido circundante se mantenga baja (**295 K o 22 °C**) demuestra que el aire actúa como un aislante estático en lugar de un refrigerante, confirmando que la disipación pasiva es insuficiente para evacuar la carga térmica y justifica la necesidad técnica de implementar ventilación forzada.

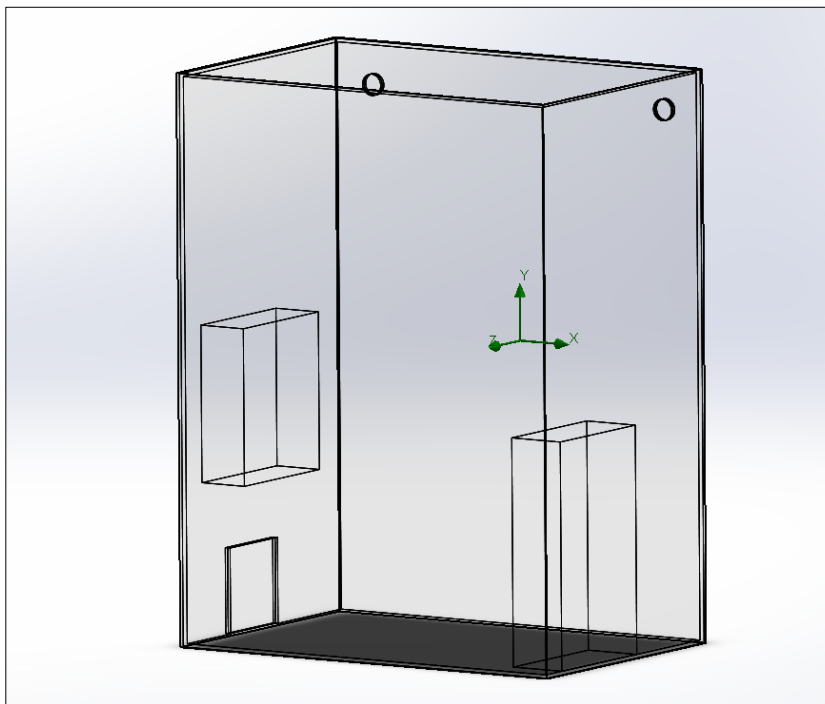
- Con Ventilación forzada de absorción

Bajo el segundo escenario, se evalúa el comportamiento termodinámico del sistema bajo un régimen de convección forzada, mediante la implementación de un ventilador de inyección (Brushless Fan DC12V) posicionado estratégicamente en la zona inferior del gabinete, adyacente a la fuente de alimentación de 5V. Como se evidencia en la **Figura 4**, la presente configuración busca romper la capa límite térmica identificada en el análisis pasivo, forzando la entrada de aire fresco al volumen de control.

Al integrar dicho actuador, el software de simulación permite visualizar cómo el incremento en la presión interna desplaza las masas de aire caliente, mejorando significativamente el coeficiente de transferencia de calor por convección en los componentes críticos de la etapa de control y potencia.

Figura 4

Esquema con ventilación de absorción



Nota. [Autoría Propia]

El ventilador produce una velocidad de rotación alrededor de 5000 RPM, para calcular la velocidad de entrada se necesita el flujo del aire que de acuerdo con las dimensiones (60*60*15), el ventilador puede llegar a producir entre 30 a 90 CFM (se toma valor de 60CFM dado que tiene velocidad de rotación de 5000 RPM):

- CFM a $\frac{m^3}{h}$

$$60CFM \times 1.699 = 101.94 \frac{m^3}{h}$$

- Área de la sección transversal:

$$\text{Área} = 0.06m \times 0.06m = 0.0036m^2$$

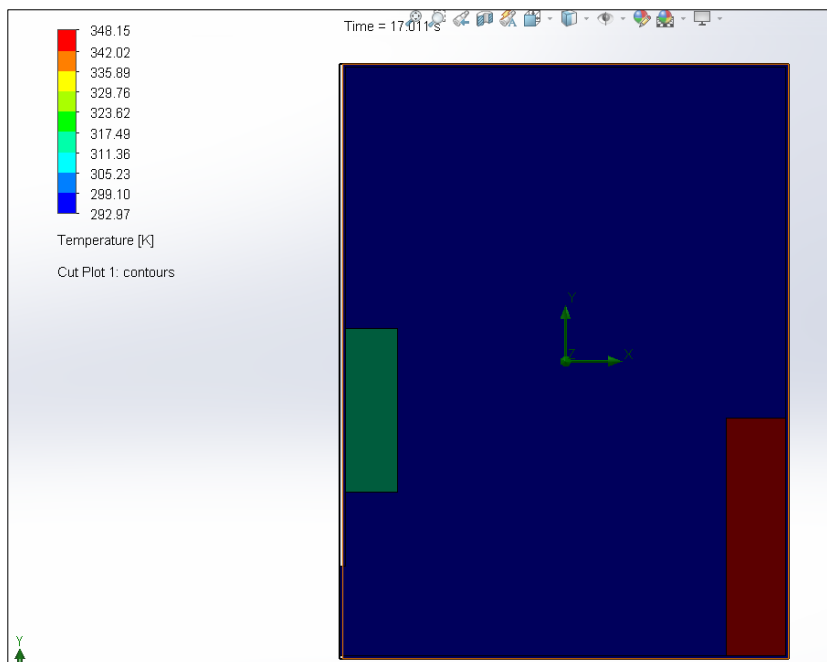
- Cálculo de la velocidad del aire producida por el ventilador:

$$\text{Velocidad del aire} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\text{Flujo de aire} \left(\frac{m^3}{h} \right)}{\text{Área de la sección transversal} (m^2)}$$

$$\text{Velocidad del aire} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{101.94 \frac{m^3}{h}}{0.0036m^2} * \frac{1 h}{3600 s} = 7.9 \frac{m}{s}$$

A partir de las magnitudes físicas y parámetros obtenidos en los cálculos precedentes, se procedió a la parametrización del entorno virtual para evaluar el comportamiento del sistema bajo un régimen de convección forzada mediante ventilación de absorción única. Al integrar dichas variables en el software de simulación, se obtuvieron los perfiles de velocidad de flujo que se observan en la **Figura 6** y los gradientes térmicos detallados en la **Figura 5**, los cuales permiten identificar la eficacia del barrido de aire sobre los componentes críticos de potencia.

Figura 5
Contornos térmicos ventilación forzada absorción

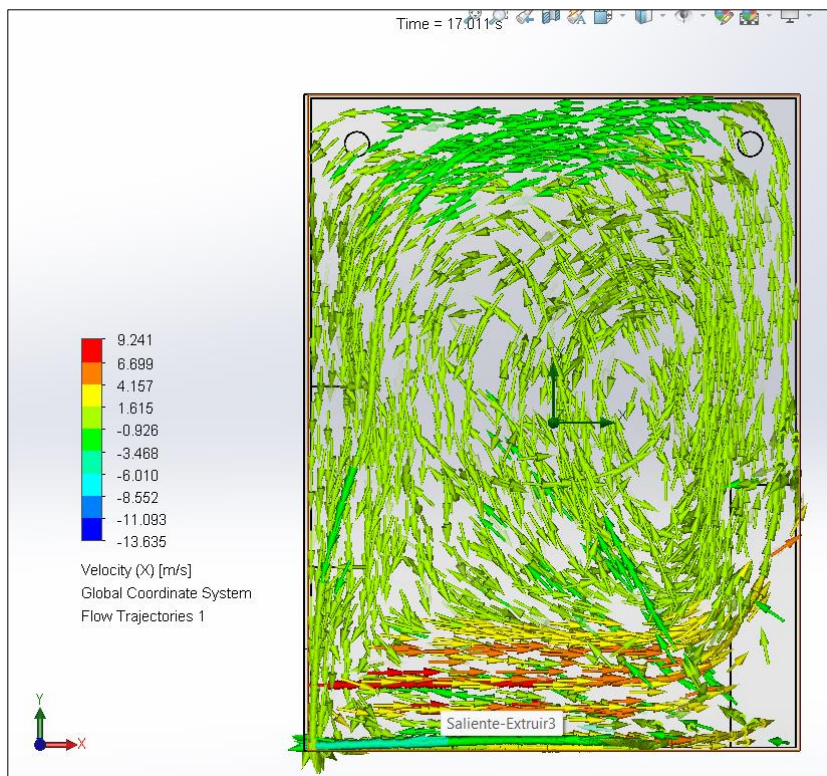


Nota. [Autoría Propia]

En comparación con el escenario pasivo, la introducción de un ventilador de absorción genera un cambio significativo en la dinámica térmica del gabinete:

- **Disipación Localizada:** El gráfico de contornos de temperatura revela que, aunque los componentes de alta potencia mantienen un núcleo de calor, existe una reducción en la extensión del gradiente térmico hacia el fluido circundante. La temperatura promedio del fluido desciende a 293.31 K (20.16 °C), lo que indica una mayor capacidad del aire para retirar calor del sistema de manera activa.
- **Estabilidad de los Sólidos:** La temperatura promedio de los componentes sólidos se estabiliza en **313.40 K (40.25 °C)**. Si bien el valor es similar al del caso cerrado, la diferencia radica en que la energía térmica ya no se acumula de forma exponencial, sino que es transportada por el flujo de aire, evitando el riesgo de un reinicio térmico.

Figura 6
Perfiles de velocidad térmica ventilación de absorción



Nota. [Autoría Propia]

La efectividad de la configuración se evidencia en el comportamiento del fluido capturado en la simulación de trayectorias:

- **Velocidad de Flujo:** Se registra una velocidad promedio en el eje X de 0.204 m/s. La magnitud es suficiente para romper la capa límite térmica estática que aislaba a los componentes en el escenario anterior.
- **Vorticidad y Mezcla:** Se observa un patrón de flujo con vectores que alcanzan velocidades máximas superiores a los 9.24 m/s cerca de la entrada. Sin embargo, las trayectorias de flujo muestran la formación de vórtices y zonas de recirculación en la parte superior del gabinete. Muestra que, si bien el aire fresco entra con fuerza, la ausencia de un punto de salida dedicado (extracción) genera una sobrepresión interna

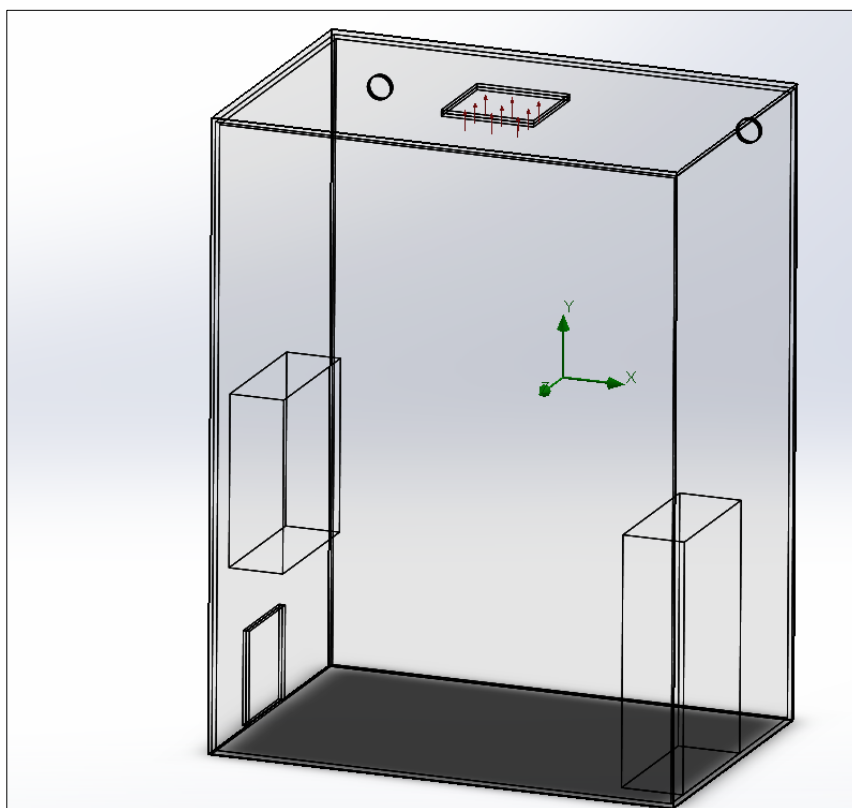
que limita el "barrido" total del calor, sugiriendo que una configuración *Push-Pull* (absorción/expulsión) optimizaría aún más el enfriamiento.

- **Con Ventilación forzada de absorción y expulsión**

Finalmente se evaluó la configuración de mayor eficiencia térmica mediante un sistema de ventilación forzada simultánea de absorción y expulsión. En dicho escenario, se integra un segundo Brushless Fan DC12V en el panel posterior del gabinete, actuando específicamente como un extractor de aire. Como se observa en la **Figura 7** el componente se ubica de forma simétrica en el centro geométrico de la cara posterior para forzar un gradiente de presión que optimice el barrido de calor.

Figura 7

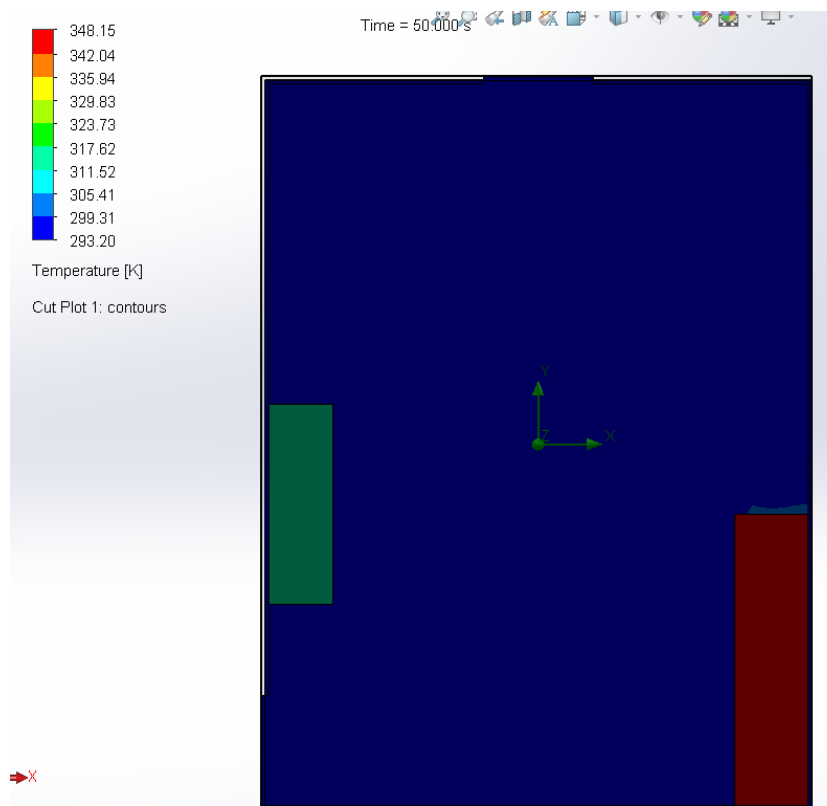
Esquema con ventilación de absorción y expulsión



Nota. [Autoría Propia]

La implementación de un sistema de ventilación combinada (un ventilador de inyección y un extractor de aire) representa la solución definitiva para la estabilidad térmica del gabinete. El análisis se fundamenta en la comparativa de los perfiles de temperatura y los vectores de velocidad de temperatura observados en la **Figura 8** y **Figura 9** respectivamente.

Figura 8
Contornos térmicos ventilación absorción – extracción



Nota. [Autoría Propia]

El gráfico de contornos de temperatura muestra una mejora sustancial en la disipación del calor de los componentes críticos:

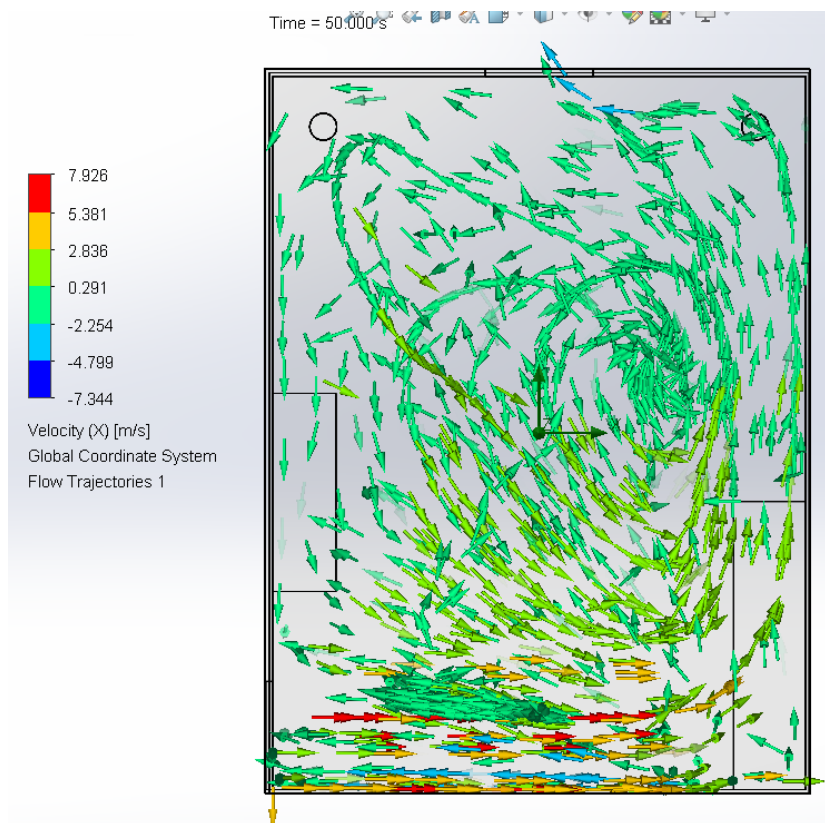
- **Evacuación Eficiente del Calor:** A diferencia de los casos anteriores, el "barrido" de aire es total. Se observa una zona de influencia de baja temperatura (azul profundo) que rodea casi la totalidad de los componentes internos. La temperatura promedio del fluido

se estabiliza en 294.13 K (21.0 °C), manteniendo el aire interno prácticamente a temperatura ambiente.

- **Mitigación de Puntos Calientes:** Los componentes sólidos registran una temperatura promedio de 313.42 K (40.27 °C). Aunque el valor promedio es constante, la simulación visual indica que las crestas de calor en las superficies de los drivers y la fuente son menores, ya que el flujo constante de aire fresco evita la acumulación de energía térmica por estancamiento.

Figura 9

Perfiles de velocidad térmica ventilación de absorción – Extracción



Nota. [Autoría Propia]

El comportamiento cinemático del aire en dicha configuración es el factor determinante para su éxito:

- **Incremento de la Velocidad de Barrido:** Se registra una velocidad promedio en el eje X de 0.206 m/s. Aunque el valor numérico es cercano al Caso 2, la diferencia radica en la direccionalidad. Las trayectorias muestran un flujo que entra por la parte inferior y es succionado directamente hacia el extractor central, cubriendo un área transversal mayor.
- **Reducción de Zonas de Estancamiento:** Al existir una salida de aire forzada, se eliminan los vórtices de recirculación al interior del gabinete que se formaban en la parte superior en el escenario anterior. Las líneas de flujo son más directas y alcanzan velocidades pico de hasta 7.92 m/s en las zonas de transición crítica de temperatura, garantizando una renovación constante del volumen de aire.

Analizando los escenarios detallados en la **Tabla 15**, se concluye que la configuración ideal es la ventilación Push-Pull ya es la única que garantiza un entorno operativo seguro para el sistema AS/RS.

Tabla 15
Selección de sistema de ventilación

Parámetro	Sin Ventilación	Ventilador	Ventiladores
Temperatura Fluido (Avg)	295.75 K	293.31 K	294.13 K
Temperatura Sólidos (Avg)	313.38 K	313.40 K	313.42 K
Velocidad de Aire (X Avg)	0.000 m/s	0.204 m/s	0.206 m/s
Comportamiento del Flujo	Estático (Aislante)	Recirculación (Vórtices)	Flujo Cruzado (Barrido)

Nota. [Autoría Propia]

Se valida el diseño del gabinete con dos ventiladores Brushless DC12V, posicionando el extractor en el centro posterior para maximizar la succión de los puntos calientes generados por la fuente de alimentación y los drivers de los motores NEMA 17.

Integración Mecatrónica y Arquitectura de Control

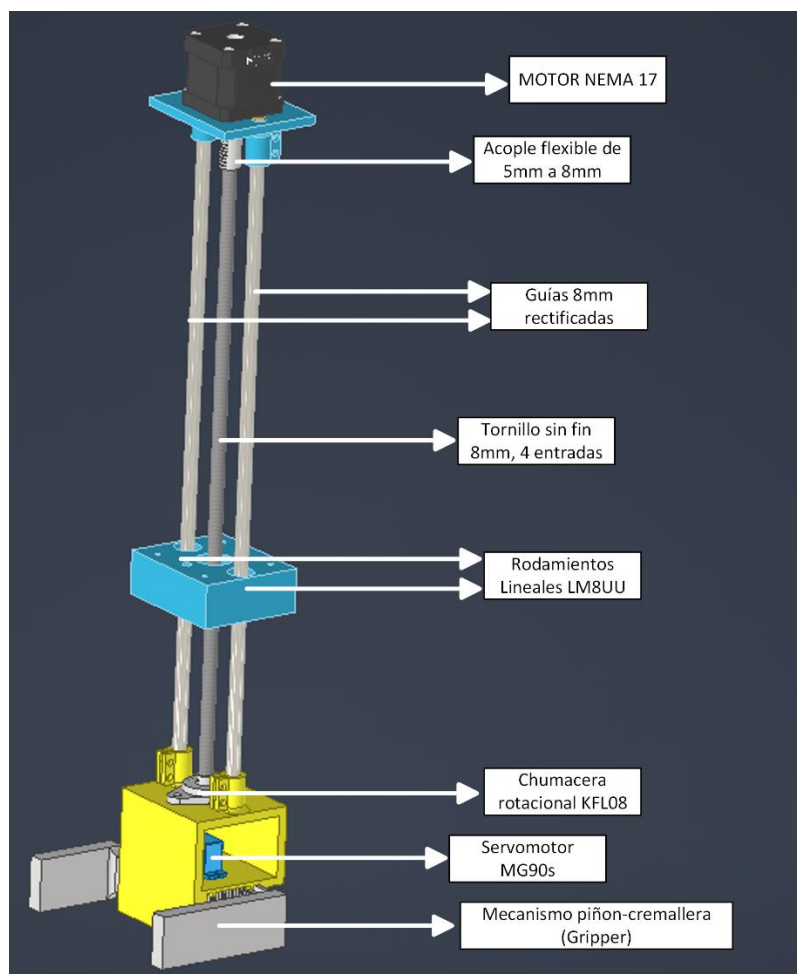
La validación operativa del sistema AS/RS se halla fundamentada, esencialmente, en la convergencia sinérgica que existe entre la infraestructura electromecánica y la aplicación de algoritmos para el control distribuido. La estrategia de integración es llevada a cabo bajo una topología jerárquica con el propósito de asegurar que el flujo de datos desde la detección mediante sensores hasta la ejecución, mediante motores, se produzca con la mínima latencia e inmunidad al ruido eléctrico.

Integración Mecánica de las Estaciones de Transferencia

Las estaciones de carga y/o descarga se han construido como unidades compactas de concepto mecatrónico apoyadas en una arquitectura híbrida que combina la rigidez estructural de la perfilería metálica con componentes de precisión fabricados mediante manufactura aditiva convencional de alta densidad, el sistema completo, representado en la **Figura 10**, muestra una geometría de tres columnas capaz de enmarcar el conjunto móvil que garantiza su estabilidad cinemática.

Figura 10

Modelo CAD de estaciones de carga



Nota. [Autoría Propia]

- **Sistema de Transmisión Rígida:** Para la conversión de movimiento rotacional a lineal, se implementaron husillos trapezoidales T8 de acero inoxidable con tuerca de bronce (**Figura 11**), descartando correas dentadas por su elasticidad bajo carga. La configuración de 4 entradas define un avance de $\frac{8mm}{rev}$ ($Avance = 2mm * 4$) permitiendo velocidades de elevación de hasta **100 mm/s** sin comprometer el torque.

Figura 11
Husillo T8 con acople bronce



Nota. Tomado de (modafinipls, 2024)

- **Guiado y Estabilidad:** El husillo trabaja en conjunto con dos ejes lineales rectificados de 8mm y rodamientos LM8UU (**Figura 12**) formando una estructura de tres columnas que elimina vibraciones y momentos flectores garantiza el avance lineal de las guías en movimiento.

Figura 12
Rodamiento lineal LM8UU



Nota. Tomado de (grupoelectrostore, 2023)

- **Acoplamiento y Centrado:** El motor NEMA 17 se vincula al husillo mediante acoples flexibles que compensan desalineaciones angulares residuales (**Figura 13**). Todas las geometrías fueron centradas mediante herramientas de medición de precisión durante el montaje para garantizar un desplazamiento libre de puntos duros.

Figura 13
Acople flexible 8mm



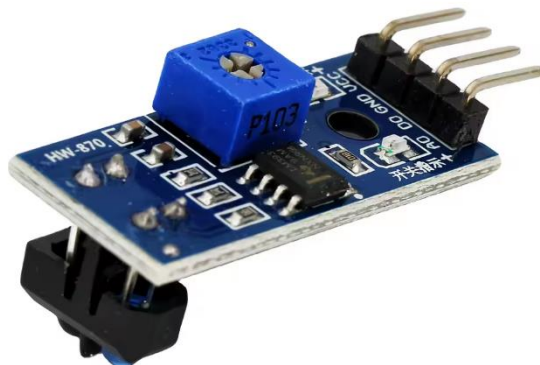
Nota. Tomado de (grupoelectrostore, 2026)

Subsistema de Percepción y Expansión I2C

La fiabilidad del inventario digital depende de la validación física de cada una de las 50 celdas mediante sensores infrarrojos HW-870 el que se ve detalladamente en la **Figura**

14.

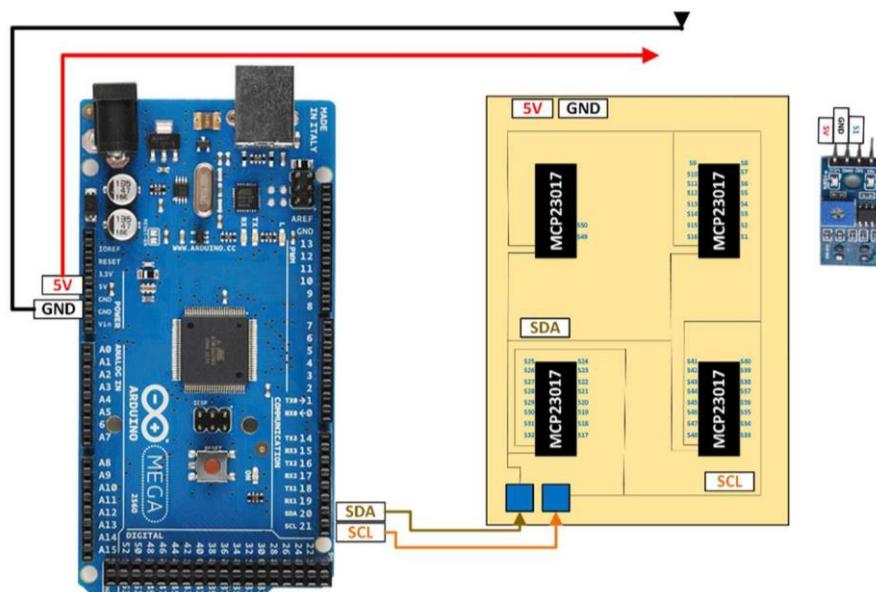
Figura 14
Sensor infrarrojo HW-870



Nota. Tomado de (Leantec, s. f.)

- **Arquitectura de Expansión:** Dado que el número de señales supera los puertos GPIO del ATmega2560, se diseñó una red basada en cuatro integrados MCP23017 (**Figura 15**). Estos actúan como periféricos esclavos que añaden 16 pines de E/S cada uno, utilizando únicamente el bus I2C (SDA/SCL).

Figura 15
Esquema de Expansión de pines



Nota. [Autoría Propia]

- **Protocolo de Interrogación:** Cada expansor posee una dirección hexadecimal única 0x20 hasta 0x27 configurada por hardware, permitiendo al Arduino Maestro interrogar selectivamente a grupos de 16 sensores sin colisión de datos.
- **Clasificación de Color:** Se utiliza el sensor de color **TCS34725 (Figura 16)**, el cual ofrece una medición RGB digital con filtro de bloqueo IR integrado. Debido a que estos sensores comparten la misma dirección I2C estática, se integra un **multiplexor TCA9548A**, permitiendo al microcontrolador conmutar entre los canales para leer de forma independiente el color de los productos en cada estación de carga.

Figura 16
Sensor de color TCS34725



Nota. Tomado de (Bdtronics, s. f.)

Gestión de Energía e Integridad de Señal

Para mitigar fallos por interferencia electromagnética (EMI) y picos inductivos, se implementaron estándares de montaje industrial.

- **Distribución de Energía (Buses Independientes):**
 - **Bus 12V/10A:** Dedicado exclusivamente a la potencia de los controladores A4988 para garantizar el torque de los motores NEMA del robot y las estaciones.
 - **Bus 5V/5A:** Provee energía para la lógica de control, placa de expansión, sensores y servomotores.
- **Tratamiento de Señales:** Se implementó una configuración en donde las tierras de cada fuente de alimentación como los controladores, motores, sensores y servomotores convergen en un único punto para mitigar bucles de tierra y reinicios involuntarios.

- **Conectividad Robusta:** Se fabricaron placas PCB personalizados que se montan sobre los controladores (Arduinos), integrando borneras de tornillo para eliminar el riesgo de desconexiones accidentales, además que todas las uniones críticas cuentan con soldadura reforzada y aislamiento termo retráctil.

Subsistema de acoplamiento y comunicación con AMRs

La inclusión de la robótica móvil en los entornos destinados a la logística interna requiere llevar a cabo la estandarización de las interfaces para llegar a conseguir la interoperabilidad entre diferentes fabricantes. Siguiendo mencionado lema, el diseño de las estaciones de carga y de descarga se basa clara y decididamente en el principio de la "Arquitectura Abierta", que establece unos parámetros, tanto mecánicos como lógicos, que aseguran que el desarrollo futuro de los Robots Móviles Autónomos (AMRs) no dependa estricta o muy atenta a una tecnología de navegación determinada.

- **Interfaz Física y Mecánica**

Para asegurar una transferencia de material fluida y sin errores de posicionamiento, la estructura de la estación incorpora características geométricas pasivas que asisten al acoplamiento del agente externo

- **Estandarización de la Altura de Transferencia (Distancia en Z)**

Se ha fijado una cota vertical de entrega/recepción constante, calculada en función de la altura promedio de las plataformas móviles que se podrían implementar en el modelo ya sea comerciales o académicas. La altura libre garantiza que el efector final de la estación pueda depositar y retirar la carga sobre la superficie del robot sin colisiones cinemáticas.

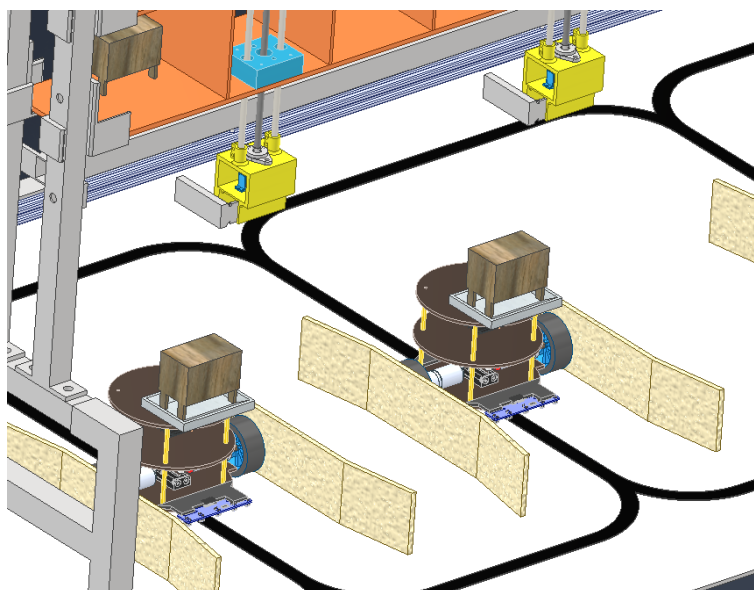
- **Guías de Auto centrado Pasivo**

La base de la estación contempla la instalación de guías mecánicas en forma de cuña o embudo como se puede ver en la **Figura 17**. Estos elementos permiten corregir las desviaciones laterales en la trayectoria de aproximación del AMR, asegurando que el receptáculo de carga del robot quede alineado coaxialmente con el gripper de la estación.

- **Zona de Seguridad**

El diseño estructural reserva una distancia libre inferior, desprovisto de cableado o estructuras, permitiendo el ingreso/salida del robot por ambos lados de la estructura hasta y desde la posición definida.

Figura 17
Guías mecánicas dispuestas en la trayectoria del ARM



Nota. [Autoría Propia]

Arquitectura de Control, Interfaz HMI y Protocolos de Comunicación

La integración lógica del sistema se rige por una topología de control jerárquico que garantiza la integridad de los datos y la sincronización de eventos en tiempo real.

Jerarquía de Control Embebido (Maestro-Esclavo)

El control distribuido se ejecuta mediante dos unidades de procesamiento ATmega2560, dividiendo las tareas de gestión lógica y ejecución cinemática:

- **Firmware del Maestro:** Actúa como el núcleo del sistema, ejecutando un bucle principal que sondea cíclicamente la red de sensores matriciales mediante el bus I2C y gestiona las solicitudes de E/S. Al asignar una tarea específica, el maestro encapsula la instrucción en una trama de datos y la transmite al esclavo a través de comunicación serial.
- **Firmware del Esclavo:** Cumple la función como una máquina de estados finitos que permanece en espera de una trama válida hasta recibir una orden. Tras la decodificación del comando, utiliza rutinas de interrupción y timers para generar trenes de pulsos con rampas de aceleración y desaceleración suaves, reportando el estado "Tarea Completada" al finalizar.

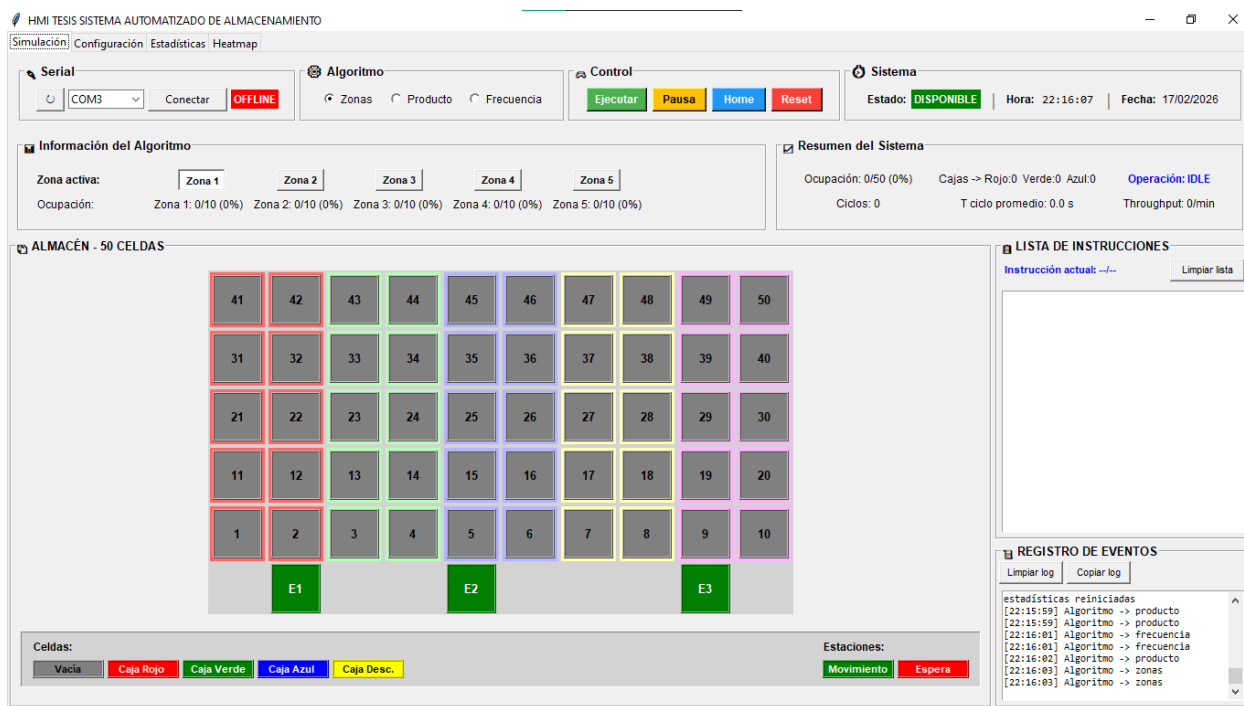
Nivel de Supervisión: Interfaz HMI (Python)

La capa superior de integración consiste en un sistema de control y adquisición de datos desarrollado en Python dentro del entorno Visual Studio Code que se comunica mediante una conexión serial USB-UART. Se tiene varias secciones que nos permiten visualizar información, configuración, estado del sistema, etc. Se detallan a continuación:

- **Protocolo de Comunicación Serial:** Se implementó una estructura de trama propietaria: [Header | Comando | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Checksum | Footer]. El uso de un Checksum es fundamental para la fiabilidad, permitiendo al microcontrolador descartar paquetes corruptos por ruido electromagnético.

- **Selección del algoritmo:** La interfaz está disponible para la selección del algoritmo a preferencia del usuario, siendo clara e intuitiva.
 - **Control:** Se tiene disponibilidad de 4 funciones claves para el control sobre el sistema: EJECUTAR (ejecuta una lista de instrucciones predefinidas o aleatorias), PAUSA (permite detener momentáneamente la ejecución de comandos), HOME (coloca tanto el robot cartesiano como a las estaciones en su posición home), RESET (elimina datos guardados para comenzar con el sistema vacío).
 - **Sistema:** Permite visualizar el estado del sistema, así como la hora y fecha actual.
 - **Información del algoritmo:** Se visualiza información correspondiente al algoritmo seleccionado y en algunas permite seleccionar opciones de configuración.
 - **Resumen del sistema:** se muestran variables generales, importantes para entender el estado del sistema.
 - **Almacén:** La interfaz gráfica decodifica los datos en tiempo real para actualizar el "Mapa del Almacén", utilizando códigos cromáticos para indicar el estado de las celdas (ocupada dependiendo del color, vacía), además que se resalta las zonas correspondientes a cada color.
 - **Lista de instrucciones y eventos:** Se muestra las instrucciones a ejecutar, y el estado del log, que es donde se visualiza los eventos que suceden en sistema.
- La interfaz realizada se puede visualizar en la siguiente **Figura 18**.

Figura 18
Interfaz HMI diseñada en Python



Nota. [Autoría Propia]

Considerando el sistema, se optó por agregar otras pestañas que nos sirven para visualizar como a configurar las variables disponibles en el sistema.

- **Pestaña de configuración:** Se pueden cambiar el valor de algunas de las variables presentes en el funcionamiento del sistema, así mismo, se pueden crear y eliminar instrucciones y crear aleatoriamente para poder simular el sistema en funcionamiento real. Se puede visualizar en la **Figura 19**.

Figura 19
 Interfaz HMI diseñada en Python, pestaña de configuración

HMI TESIS SISTEMA AUTOMATIZADO DE ALMACENAMIENTO

Simulación | Configuración | Estadísticas | Heatmap

Parámetros del Sistema

PARÁMETROS DE ALGORITMOS

MIN_CAUSAS (Stock mínimo por zona): (Mínimo de cajas en zona frecuente)

HISTERESIS (Margen cambio líder): (Diferencia para cambiar zona)

HIST_N (Tamaño del historial): (Número de descargas a recordar)

CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

PASOS_POR_MM (Pasos por mm): (Resolución del motor)

ALTURAS DE FILAS (mm):

Fila 1:

Fila 2:

Fila 3:

Fila 4:

Fila 5:

POSICIONES DE ESTACIONES (mm):

Estación 1: X: Y:

Estación 2: X: Y:

Estación 3: X: Y:

☒ APLICAR CONFIGURACION

Generador de Instrucciones

Instrucción manual

Instrucción:

N° Estación:

Color de caja:

Instrucciones aleatorias

Cantidad:

Lista de instrucciones

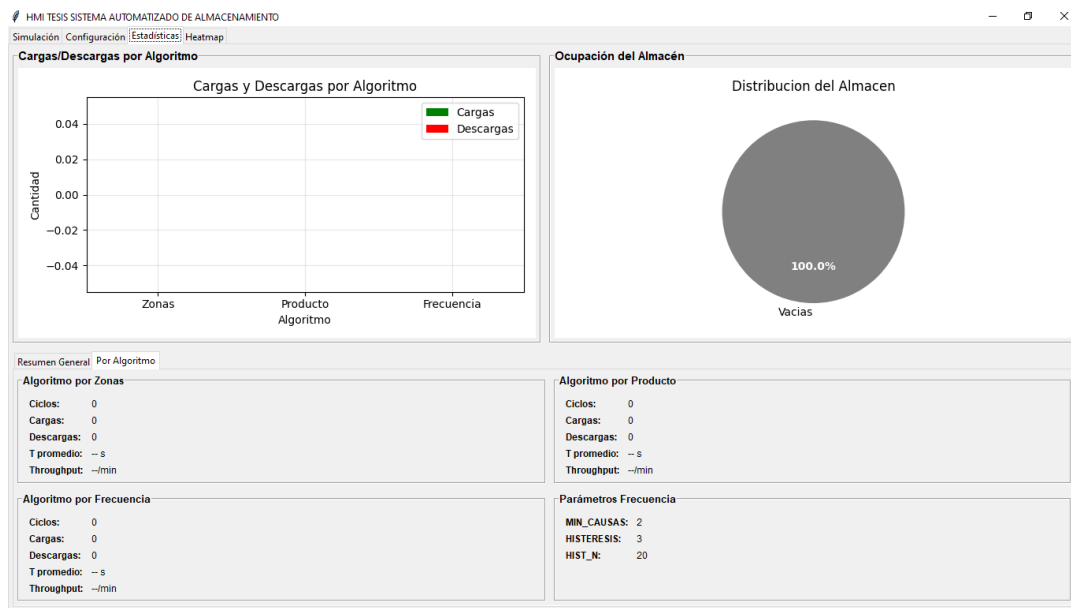
1. CARGA -> Estación 1
2. CARGA -> Estación 1
3. CARGA -> Estación 3
4. DESCARGA -> Estación 3 (Verde)
5. CARGA -> Estación 2
6. CARGA -> Estación 3
7. DESCARGA -> Estación 1 (Verde)

Nota. [Autoría Propia]

- **Pestaña de estadísticas:** Nos permite visualizar gráficos y variables importantes presentes en los diferentes algoritmos, como se visualiza en la **Figura 20.**

Figura 20

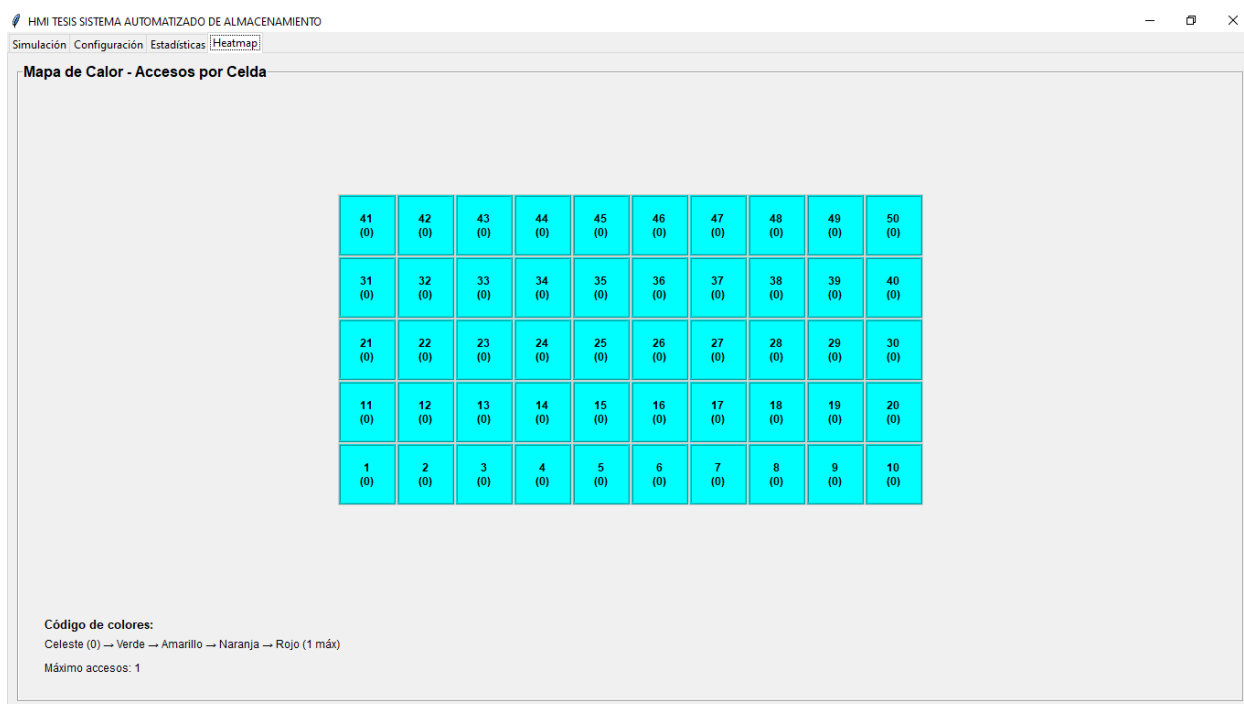
Interfaz HMI diseñada en Python, pestaña de estadísticas.



Nota. [Autoría Propia]

- **Pestaña de Heatmap (mapa de calor):** Nos permite visualizar la cantidad de veces que se ocupa cada celda del storage, poniendo en rojo las que más se ocupan y en azul las que menos se ocupan, y escalando los tonos para tener una mejor visualización de la ocupación del sistema como se visualiza en la **Figura 21**.

Figura 21
Interfaz HMI diseñada en Python, pestaña de heatmap.

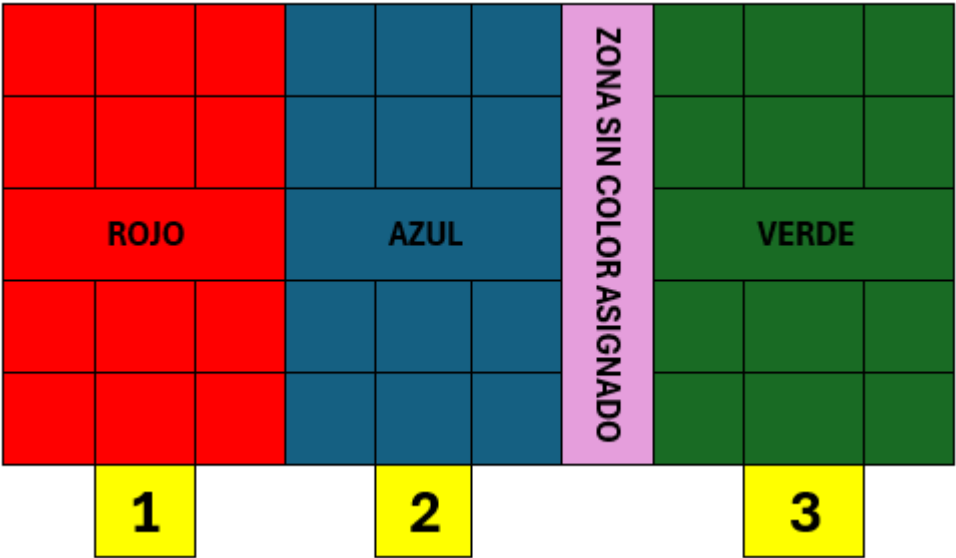


Nota. [Autoría Propia]

Por tipo de producto

En dicho algoritmo tenemos que los tipos de producto se clasifican por el color de cada caja (rojo, verde o azul), de forma similar dividimos el storage en 4 zonas predefinidas, una para cada color y otra para los colores no registrados, ya que puede darse el caso de que se registre un color diferente a los establecidos. Así en cada ciclo de almacenamiento dependiendo su color ya queda definido a una zona específica a la cual puede almacenarse. La distribución de las zonas se visualiza en la **Figura 23**.

Figura 23
Clasificación del Storage por tipo de producto



Nota. [Autoría Propia]

Por frecuencia de requerimiento

El más complicado de implementar teniendo en cuenta que debe ser dinámico. Primero debemos especificar cómo funciona el algoritmo, consideramos que cada estación va a tener sus propios requerimientos, es decir, que cada zona va a tener un color que se descarga con más frecuencia, para lo cual, se implementa 3 índices para cada estación,

uno para cada color, siendo 1 como más frecuente y 3 como menos frecuente, así cuando un tipo de caja se comience a descargar con mucha frecuencia por cualquier estación, entonces se tomará como prioridad asignándole el índice 1 a dicho color para almacenarlo lo más cerca posible, logrando que en cada ciclo de descarga de ese color más requerido, pueda descargarla lo más rápido posible. El tipo de caja con índice 2 serán aquellos que se descargan con una frecuencia moderada, estos tienden a almacenarse a continuación de la zona donde se almacena el tipo de caja con índice 2. De igual manera las cajas con índice 3 se almacenan a continuación de las cajas con índice 2, lo que nos permite la distribución es decir almacenar cada tipo de producto a una distancia proporcional a la frecuencia de requerimiento

Tabla 16*Asignación de los índices de frecuencia*

Frecuencia	Número de índice	Distancia de almacenamiento
		respecto a la estación
ALTA	1	Cerca
MEDIA	2	Media
BAJA	3	Lejos

Nota. [Autoría Propia]

Aplicando esto, podemos guardar cada tipo de cajas según su índice asignado más cerca o más lejos, para optimizar la descarga y disminuir tanto tiempo como desgaste del robot cartesiano.

Similar a los anteriores predefinimos 5 zonas en 3 tipos que se detallan a continuación:

- **Zona frecuente:** 3 tipos de zona, una para cada estación, se utiliza para almacenar los colores más frecuentes que se requieren en cada estación, es

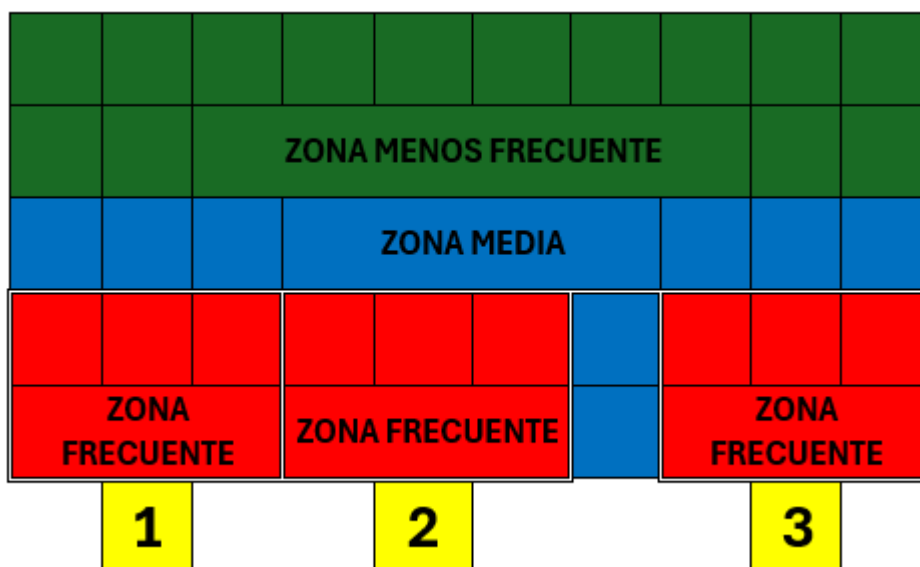
decir, se almacenan el tipo de caja con índice 1, priorizando por encima de los otros 2. Cada zona frecuente es independiente y solo pueden almacenarse los tipos de cajas de índice 1.

- **Zona media:** Consisten en 1 sola zona que está a distancia media respecto a todas las estaciones, entonces se pueden almacenar cualquier tipo de caja, priorizando los de índice 2.
- **Zona menos frecuente:** Es la zona más alejada respecto a las estaciones, igual a la zona media, en la cual se puede almacenar cualquier tipo de caja priorizando los de índice 3.

La distribución de las zonas se puede visualizar mejor en la **Figura 24**.

Figura 24

Clasificación del Storage por frecuencia de requerimiento



Nota. [Autoría Propia]

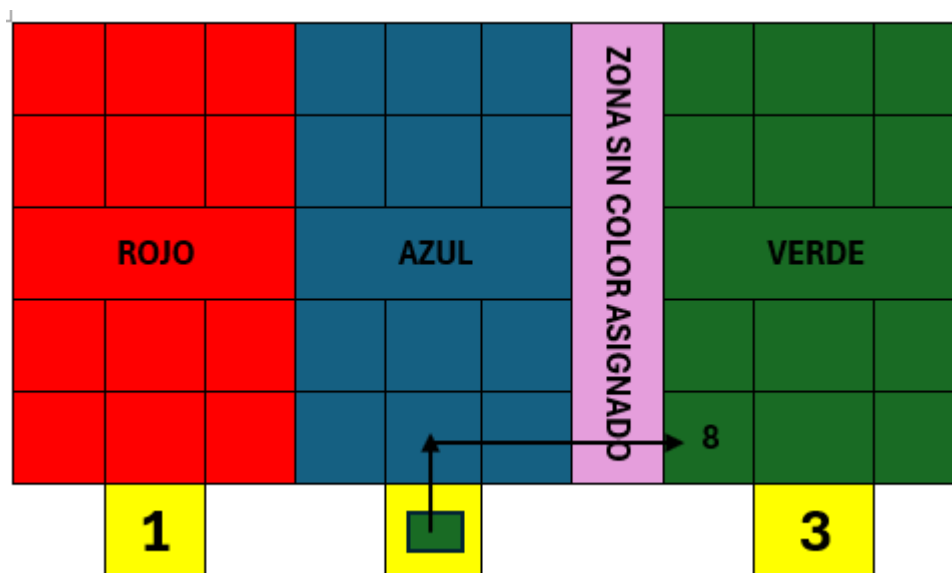
Optimización de trayectorias

Disponemos de varias opciones que nos permiten optimizar la trayectoria como Dijkstra, A*, etc. Considerando que nuestro robot cartesiano opera en 2D, es decir, en “X” y en “Y” y también la construcción mecánica nos limita en cuanto a su movimiento, no nos es posible poder aplicar estos algoritmos, sin embargo, se opta por lo que podemos aplicar.

Distancia Manhattan: Como ya se mencionó, tanto las limitantes mecánicas como el plano de trabajo del robot cartesiano nos permiten únicamente optar por seguir la distancia Manhattan más corta calculada en función al algoritmo de gestión de almacenamiento utilizado. Cada uno de los algoritmos de almacenamiento define zonas para poder operar de acuerdo al requerimiento de cada uno de ellos y según las zonas designadas nuestro algoritmo compara las celdas más cercanas donde puede almacenarse, para el ciclo de carga. Tenemos un ejemplo en la **Figura 25**, si consideramos que se realiza una carga en la estación 2 de una caja verde con el algoritmo de tipo de producto, el algoritmo buscará la zona más cercana donde puede almacenarse, al ser verde debe ir a la zona de cajas verdes y la más cercana es la celda 8 que pertenece a la zona de cajas verdes.

Figura 25

Ejemplo de almacenamiento con algoritmo de tipo de producto.

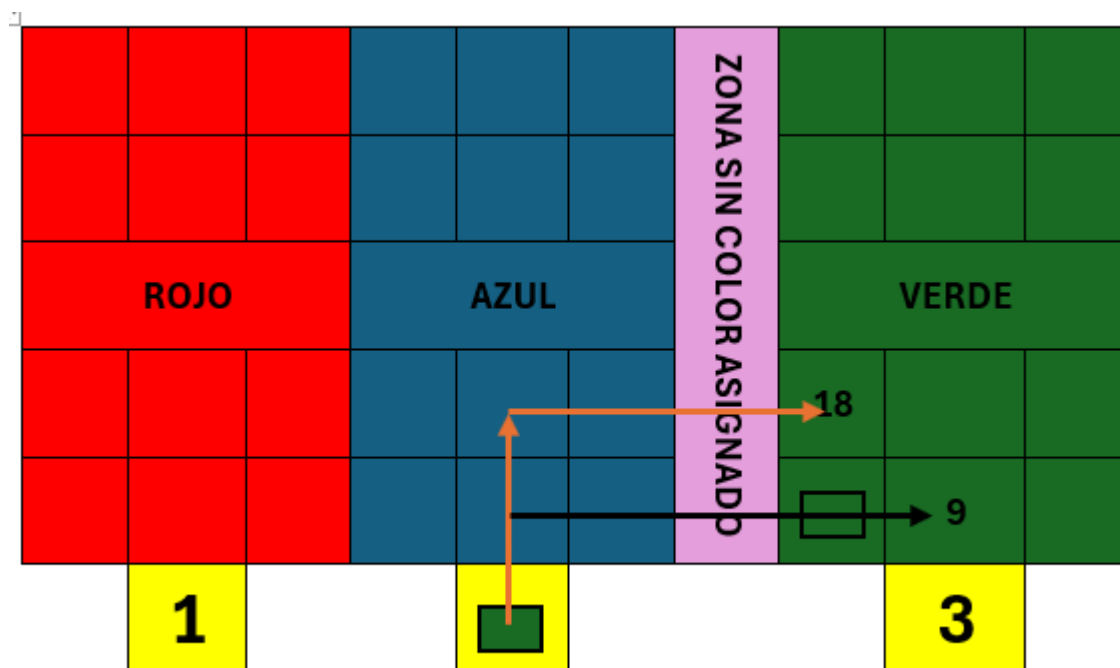


Nota. [Autoría Propia]

En caso de estar ocupada la celda 8, buscará la siguiente celda más cercana, como se visualiza en la **Figura 26**, tenemos 2 candidatos que se recorre la misma distancia, pero se elegirá la celda 9 ya que se compara también el orden de las celdas.

Figura 26

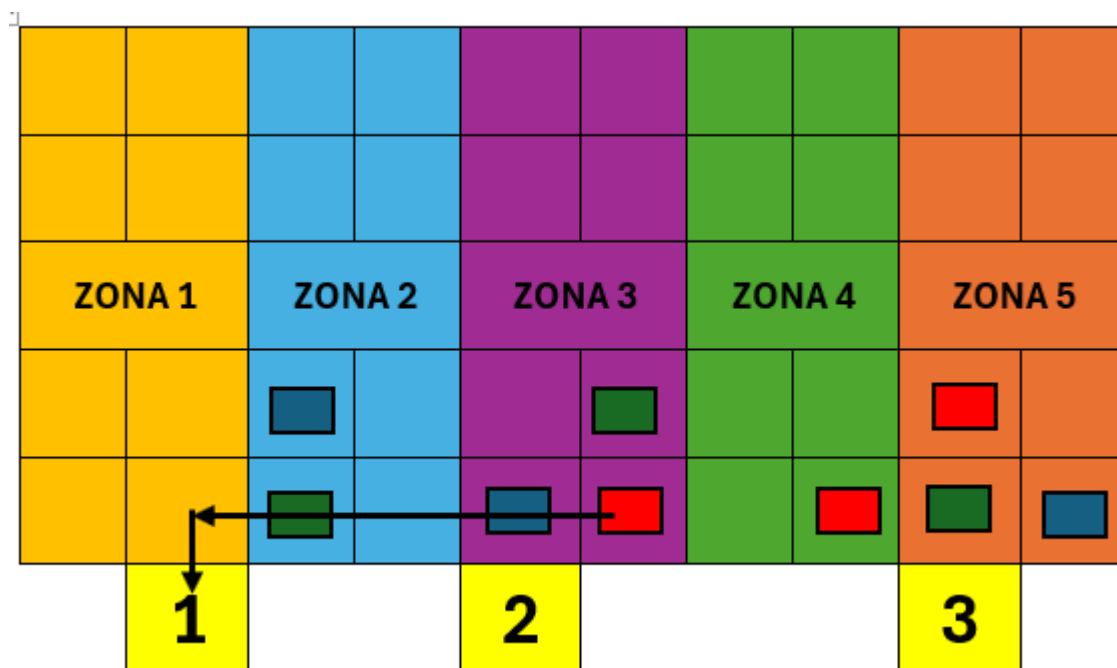
Ejemplo 2 de almacenamiento con algoritmo de tipo de producto.



Nota. [Autoría Propia]

De forma similar, al realizar el ciclo de descarga, de la cual se busca la caja del color requerido más cercano a la estación, sigue garantizándonos la optimización de trayectoria, dicha búsqueda es independiente del algoritmo seleccionado. Por ejemplo, en la **Figura 27** se requiere la descarga de una caja roja en la estación 1, el algoritmo de descarga busca la caja más cercana a la estación 1 y la descarga.

Figura 27
Ejemplo de almacenamiento con algoritmo de zonas.



Nota. [Autoría Propia]

Consideraciones de seguridad y operación

La transición de un modelo teórico a un prototipo funcional industrial exige la implementación de rigurosos protocolos de seguridad y fiabilidad. El diseño del sistema AS/RS incorpora estrategias de protección en tres niveles críticos: lógica de control preventiva, integridad de las conexiones eléctricas y gestión térmica del gabinete de control. A continuación, se detallan las medidas adoptadas para garantizar la operatividad continua y segura del equipo.

Seguridad Lógica y Validación de Movimientos

El algoritmo de control no opera bajo suposiciones, sino bajo confirmaciones físicas. Se han establecido rutinas de interbloqueo que impiden la ejecución de secuencias peligrosas:

- **Validación de Ocupación Redundante:** Antes de iniciar cualquier maniobra de almacenamiento, el sistema consulta el estado lógico en la base de datos y lo cruza con la lectura en tiempo real del sensor de presencia de la celda destino. Si el sensor detecta un obstáculo, el sistema no permite el movimiento y emite una alerta de "Conflicto de Espacio" que se muestra en la pantalla, impidiendo colisiones por intentos de doble apilamiento.
- **Secuencia por Hardware:** La transición entre las etapas de movimiento está condicionada al cambio de estado de acciones que se deben cumplir como el accionamiento de los sensores de final de carrera. El controlador nunca ejecuta el paso siguiente hasta recibir la señal de confirmación del paso anterior, evitando desincronizaciones mecánicas.
- **Estrategia de “Homing” Constante:** Dado que los motores paso a paso operan en lazo abierto y pueden acumular errores de posicionamiento como micropasos perdidos o un “salto” en las correas dentadas debido a su longitud, dichos errores acumulativos están dentro de lo “normal” en un prototipo de gran escala, se implementó una rutina de corrección dinámica. Cada vez que el manipulador cartesiano o las estaciones de elevación tocan un final de carrera (en los límites X, Y, Z o Superior/Inferior), el contador de pasos del microcontrolador se reinicia a cero “HOME”. Así se recalibra el sistema automáticamente en cada ciclo, eliminando la deriva acumulada y garantizando precisión milimétrica a largo plazo. La secuencia previamente explicada se detalla en el diagrama de flujo de la **Figura 28**.

Capítulo 4: Análisis y Discusión de Resultados

En el capítulo se presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos tras la implementación del sistema automatizado de almacenamiento. En la presente etapa se evalúa el desempeño del prototipo mediante pruebas experimentales orientadas a verificar la precisión de detección y clasificación, la correcta gestión de colas, la optimización de trayectorias y la sincronización entre subsistemas. Asimismo, se realiza una comparación entre el diseño actualizado y la versión base, con el propósito de evidenciar las mejoras alcanzadas en eficiencia operativa, confiabilidad y capacidad de integración. Los resultados permiten validar el cumplimiento de los requerimientos planteados y determinar el impacto real de las decisiones de diseño adoptadas.

Comparativa entre sistema actualizado y diseño base

A continuación del siguiente apartado, donde se lleva a cabo la presentación de la validación experimental del prototipo, damos paso a la comparativa técnica donde se evidencia la evolución del prototipo actualizado con las mejoras implementadas, sobre todo del tablero de control del sistema base (**Figura 29**) con el tablero de control del sistema actual (**Figura 30**) y del diseño y funcionalidades del HMI del sistema base (**Figura 31**), con las funcionalidades y diseño de la HMI del sistema actual (**Figura 18**). En el primer diseño del prototipo nos encontramos con una estructura cartesiana funcional, pero limitada en términos de la percepción y de la capacidad de la interfaz externa. En la presente fase del sistema actualizado se incorpora una nueva arquitectura de control distribuido, una red sensorial de elevada densidad y unos subsistemas de transferencia optimizados, mencionadas actualizaciones se pueden ver de manera más detallada en la **Tabla 16** en la cual se compara las instalaciones previas con las actualizaciones.

Figura 29

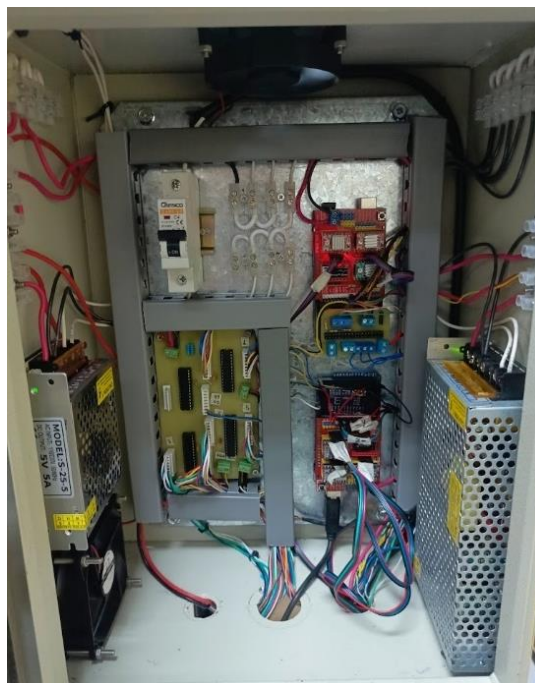
Gabinete de control del sistema base



Nota. Tomado de (Tamayo et al., 2025)

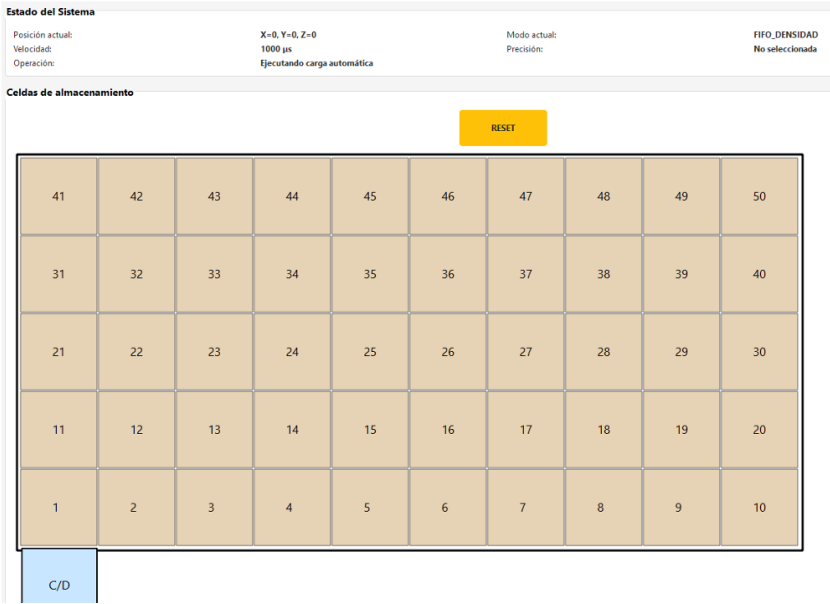
Figura 30

Gabinete de control del sistema actualizado



Nota. [Autoría Propia]

Figura 31
HMI del sistema base anterior



Nota. Tomado de (Tamayo et al., 2025)

Tabla 17
Comparación de diseño base con actualizaciones realizadas

Característica	Diseño Base (Preexistente)	Sistema AS/RS Actualizado
Infraestructura Eléctrica AC	Cable gemelo #20 sin terminales; conexiones con alta resistencia térmica (puntos calientes).	Cable #16 blindado de largo alcance con clavija blindada; protección con interruptor termomagnético y terminales.
	Caja de empotrar en mampostería (no industrial); sin flujo de aire real.	Gabinete industrial IP53 con doble fondo y cableado estructurado.

Control de posición de celda	Coordenadas codificadas una a una; provoca saturación de memoria del controlador.	Cálculo incremental la matriz desde el Home; optimización de memoria y trayectorias.
Gestión Térmica de la electrónica	Ventilador interno pegado; recirculación de aire caliente sin extracción.	Ventilación forzada Push-Pull, análisis CFD para control óptimo de temperatura.
Detección de celdas de almacenamiento	Ausente; basado en supuestos lógicos.	Matriz de sensores con expansión y cableado estructurado.
Cinemática del Cartesiano	Mala gestión de corriente con ruido y vibraciones.	Movimiento suave y silencioso con corriente ajustada.
Seguridad y HMI	Botonera endeble en lateral; interfaz básica.	Paro de emergencia, selector y pilotos en frontal; cableado estructurado; interfaz SCADA avanzada.
Compatibilidad con AMR	Baja altura para modelos propuestos; estación manual exteriores.	Altura libre para tránsito de AMRs; estaciones automatizadas adaptables.
Clasificación y Software	Sin identificación de carga ni algoritmos de optimización.	Clasificación por color; algoritmos por zona, frecuencia y modo aleatorio.

Análisis de las Mejoras en la Integración de Sistemas

- **Optimización Algorítmica y de Trayectorias**

En comparación al modelo anterior, donde el almacenamiento del controlador estaba deteriorado por la declaración a puño y letra, individual de 50 coordenadas y las correspondientes trayectorias, la nueva programación se basa en lógica para pintar la matriz sobre incrementos. Con el Home como 'cero' absoluto, el destino se calcula de forma dinámica en función del cubículo donde se encuentra y de las medidas fijas de la matriz. Esto, por un lado, libera firmware y memoria en el controlador, pero permite usar algoritmos de optimización por frecuencias de productos y de zonificación.

- **Robustez Industrial y Seguridad Eléctrica**

La sustitución de la caja elaborada para ser incrustada en los muros de la mampostería por un gabinete industrial de grado IP53, dotado de cableado estructurado, evita que los componentes se vean afectados por el polvo y la humedad. La acoplación de un interruptor termomagnético y de puntas estañadas con bornes eliminan el riesgo de incendios por fatiga del material o por puntos calientes presentes en el cableado retorcido #20 del diseño base.

- **Interoperabilidad con Sistemas Multirobot**

La modificación de la altura libre de la estructura que subió de 10cm a 25cm permite que el sistema AS/RS se convierta en el núcleo de una operación multirobot. Las nuevas estaciones de carga y descarga, ahora automatizadas con husillos T8 y sensores de color, eliminan la intervención manual, permitiendo que un AMR recoja o deposite mercancía de forma autónoma bajo el sistema.

Simulación del sistema de almacenamiento

Como ya se describió con anterioridad, el HMI integrado muestra información importante para que el operador pueda entender e interpretar de la mejor manera el

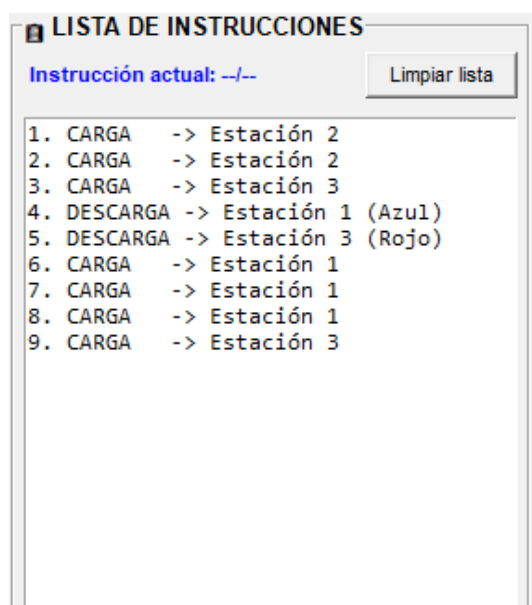
funcionamiento del sistema y además permite visualizar la gestión del almacenamiento, tanto en cantidad, el tipo de caja, estación, etc. A continuación, vamos a detallar de mejor manera la sincronización de la simulación del sistema en físico.

Para poder simular vamos a generar una lista aleatoria de instrucciones de carga y descarga, debido a que según nuestra lógica cuando se implementen los ARMs, estos luego de posicionarse van a enviar van a la interfaz la instrucción de “carga” o “descarga” incluyendo el número de estación y en caso de una descarga el color solicitante, por lo que tenemos las siguientes instrucciones:

1. CARGA -> Estación 2
2. CARGA -> Estación 2
3. CARGA -> Estación 3
4. DESCARGA -> Estación 1 (Azul)
5. DESCARGA -> Estación 3 (Rojo)
6. CARGA -> Estación 1
7. CARGA -> Estación 1
8. CARGA -> Estación 1
9. CARGA -> Estación 3

Mencionadas instrucciones se pueden visualizar en la sección de lista de instrucciones como muestra la **Figura 32**.
de control del sistema actualizado

Figura 32
Sección lista de instrucciones del HMI.

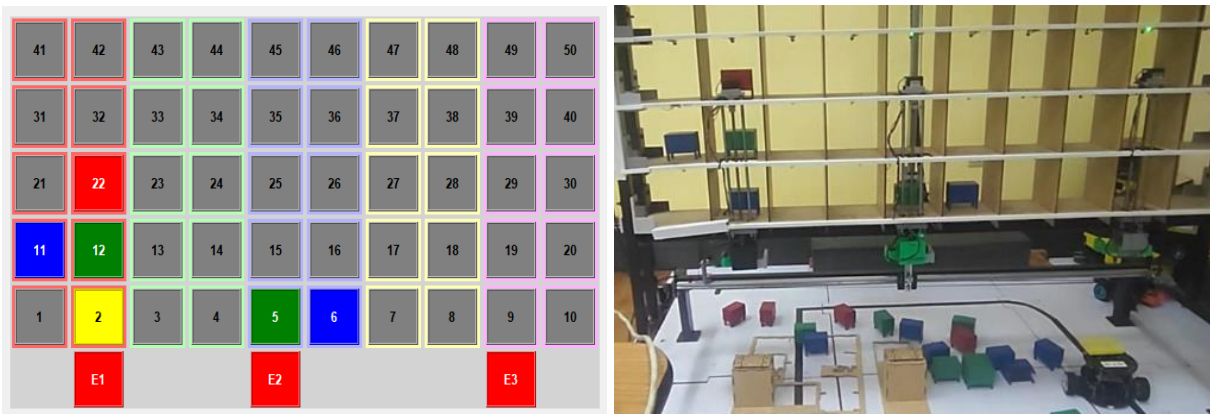


Nota. [Autoría Propia]

Luego de pulsar el botón de ejecutar comienza a realizar cada instrucción una a una, al finalizar tenemos el siguiente grid de la simulación y del grid físico idénticos como en la **Figura 33**.

control del sistema actualizado

Figura 33
Comparación del Grid físico y simulado

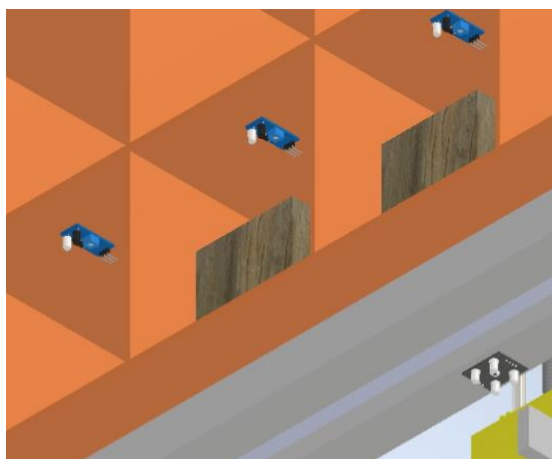


Nota. [Autoría Propia]

Teniendo en cuenta que sigue tanto las instrucciones en lista, almacena en la posición que le corresponde, reconoce el color de cada caja, se lee la presencia de la caja dentro del grid, se clasifica correctamente, podemos concluir que tanto la simulación con el funcionamiento físico está sincronizados y validados.

Pruebas de detección y clasificación

Para la detección se hace uso de los sensores IR FC-51, lo cuales permite detectar la presencia de un objeto al recibir luz infrarroja que el mismo sensor emite, para nuestra necesidad debemos calibrar la distancia a la cual puede percibir la señal infrarroja, y se realiza variando la resistencia de precisión que incluye el mismo sensor. El sensor se coloca en la parte superior de cada celda para detectar la presencia en cada caja, **Figura 34**.

Figura 34*Comparación del Grid físico y simulado*

Nota. [Autoría Propia]

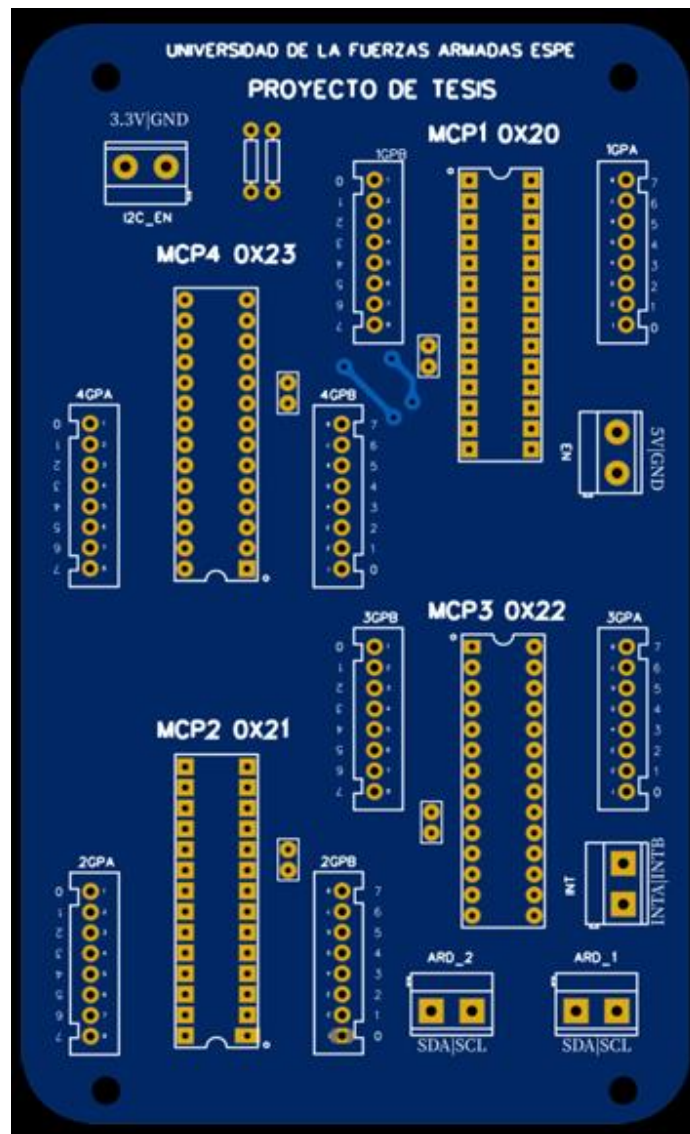
Para poder realizar la lectura de los 50 sensores se utiliza expansores de GPIO, concretamente el MCP23017 que nos brinda 16 PGIO por cada microchip, los expansores se comunican mediante I2C con el Arduino maestro para la lectura de cada celda mediante librerías predefinidas por el fabricante, se debe configurar cada microchip con dirección establecida para cada una teniendo en cuenta la **Tabla 18**.

Tabla 18*Configuración de direcciones I2C de las MCP23017*

A2	A1	A0	DIRECCIÓN
GND	GND	GND	0x20
GND	GND	HIGH	0x21
GND	HIGH	GND	0x22
GND	HIGH	HIGH	0x23

Se diseñó una PCB específicamente para la correcta operabilidad tanto de los MCP23017 como del bus I2C principal que nos servirá para conectar los demás dispositivos I2C, el diseño se muestra en la **Figura 35**.

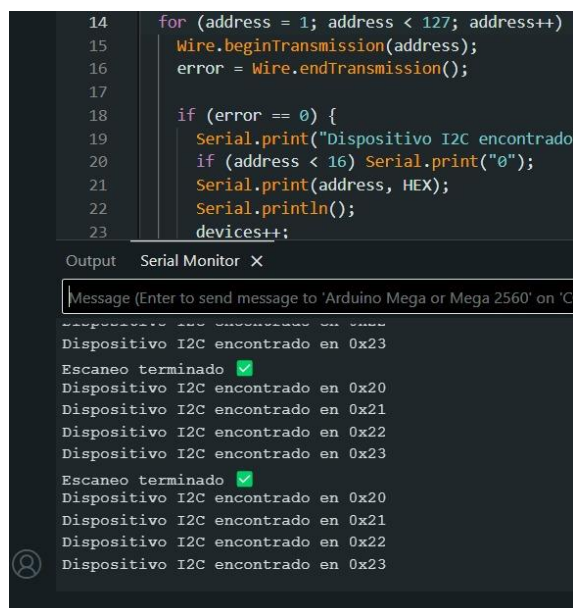
Figura 35
Comparación del Grid físico y simulado



Nota. [Autoría Propia]

Nos permite visualizar el estado de cada celda en el IDE de Arduino. La siguiente **Figura 36** nos muestra que se reconocen los 4 expansores de GPIO así como el estado de los sensores correspondientes.

Figura 36
Reconocimiento de los 4 MCP23017 mediante comunicación I2C



```

14   for (address = 1; address < 127; address++)
15       Wire.beginTransmission(address);
16       error = Wire.endTransmission();
17
18       if (error == 0) {
19           Serial.print("Dispositivo I2C encontrado");
20           if (address < 16) Serial.print("0");
21           Serial.print(address, HEX);
22           Serial.println();
23           devices++;

```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'Arduino Mega or Mega 2560' on 'C

```

Dispositivo I2C encontrado en 0x23
Escaneo terminado ✓
Dispositivo I2C encontrado en 0x20
Dispositivo I2C encontrado en 0x21
Dispositivo I2C encontrado en 0x22
Dispositivo I2C encontrado en 0x23
Escaneo terminado ✓
Dispositivo I2C encontrado en 0x20
Dispositivo I2C encontrado en 0x21
Dispositivo I2C encontrado en 0x22
Dispositivo I2C encontrado en 0x23

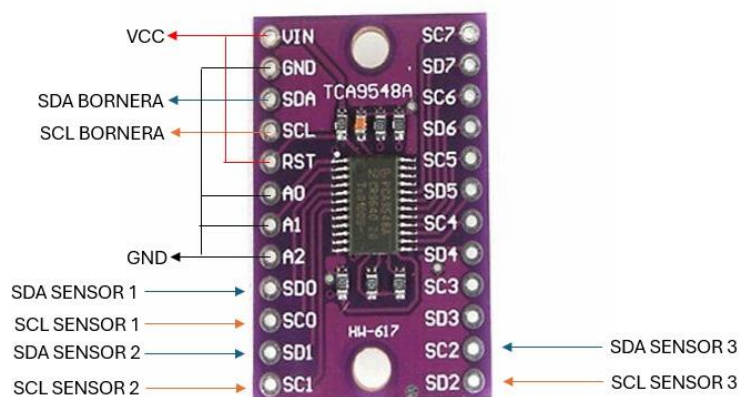
```

Nota. [Autoría Propia]

Para la clasificación de los productos primero se optó por utilizar los sensores TCS3200, pero luego de varias fallas tanto en el hardware como en el software, se cambió por los sensores TCS34725 los cuales nos permiten obtener los valores de lectura (R,G y B) mediante I2C directamente, pero al ser 3 sensores, requerimos de un módulo TCA9548A para multiplexar los diferentes buses I2C de cada sensor viene con una dirección predefinida. La **Figura 37** muestra las conexiones realizadas.

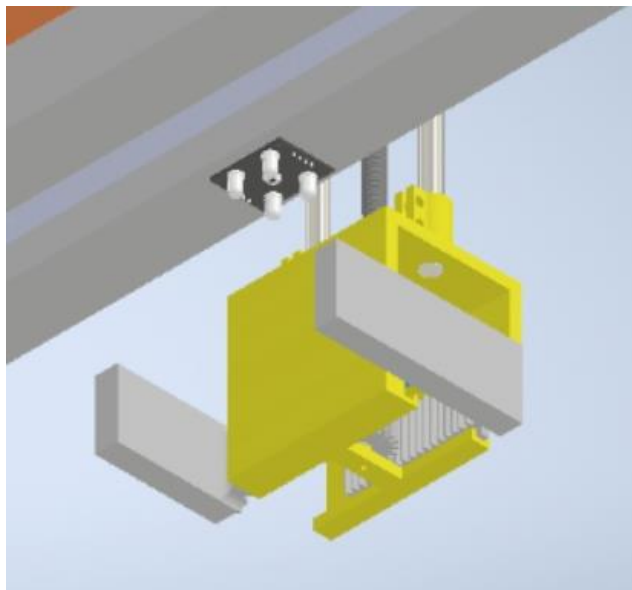
Figura 37

Conexiones de los sensores TCS34725 con el módulo TCA9548A



Nota. [Autoría Propia]

Estos se colocan, debajo de la estructura para la lectura de los colores al momento de realizar una carga en cada estación, como se visualiza en la **Figura 38**.

Figura 38*Implementación de los sensores TCS34725 en el sistema físico*

Nota. [Autoría Propia]

Utilizando librerías definidas podemos leer los valores RGB de cada sensor seleccionando el canal correspondiente, en la **Figura 39** podemos observar que se tiene lectura del color al acercarle una caja.

Figura 39*Lectura de los sensores TCS34725 en el IDE de Arduino*

```

08:50:05.831 -> Int R 85 -- Int V 90 -- Int A 80 ESPACIO VACÍO
08:50:06.434 -> Int R 84 -- Int V 89 -- Int A 80 ESPACIO VACÍO
08:50:07.036 -> Int R 84 -- Int V 89 -- Int A 80 ESPACIO VACÍO
08:50:07.630 -> Int R 90 -- Int V 92 -- Int A 82 ESPACIO VACÍO
08:50:08.236 -> Int R 86 -- Int V 93 -- Int A 82 ESPACIO VACÍO
08:50:08.834 -> Int R 95 -- Int V 95 -- Int A 83 EL COLOR NO HA SIDO REGISTRADO
08:50:09.428 -> Int R 94 -- Int V 93 -- Int A 82 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:10.034 -> Int R 99 -- Int V 96 -- Int A 71 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:10.636 -> Int R 103 -- Int V 83 -- Int A 51 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:11.234 -> Int R 107 -- Int V 57 -- Int A 31 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:11.832 -> Int R 94 -- Int V 56 -- Int A 31 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:12.438 -> Int R 96 -- Int V 57 -- Int A 31 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:13.060 -> Int R 96 -- Int V 57 -- Int A 31 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:13.638 -> Int R 95 -- Int V 56 -- Int A 31 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:14.240 -> Int R 88 -- Int V 57 -- Int A 30 EL COLOR NO HA SIDO REGISTRADO
08:50:14.847 -> Int R 94 -- Int V 56 -- Int A 31 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:15.481 -> Int R 93 -- Int V 56 -- Int A 30 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:16.084 -> Int R 94 -- Int V 56 -- Int A 30 CAJA AZUL DETECTADA
08:50:16.685 -> Int R 87 -- Int V 56 -- Int A 30 EL COLOR NO HA SIDO REGISTRADO
08:50:17.287 -> Int R 93 -- Int V 56 -- Int A 31 CAJA AZUL DETECTADA

```

Nota. [Autoría Propia]

Dado que los valores RGB cambian en cada lectura dependiendo el color, debemos condicionar estos valores dependiendo del rango que nos de lectura al leer cada color, ya que influye bastante con la iluminación haciendo que varíe drásticamente, obligándonos a calibrar los valores de los sensores en cada sesión que se vaya a utilizar.

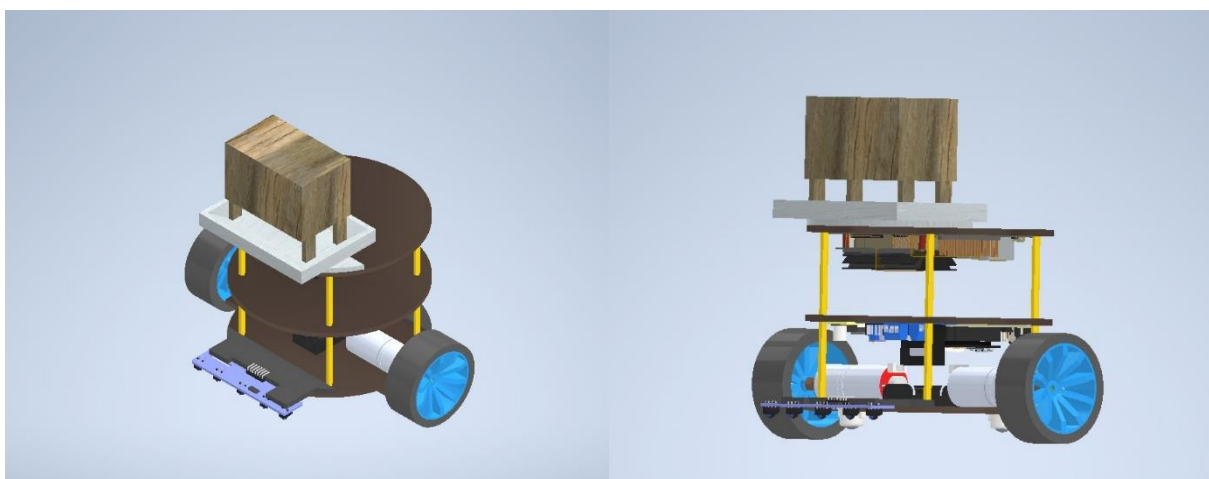
Pruebas de sincronización y acoplamiento con AMRs

Lo importante de la sección es la forma y dimensiones del ARMs, tuvimos que diseñar un modelo base que sea funcional y que tenga bastante procesamiento, debido a que el modelo necesita ser autónomo cuando se haga la incorporación con el storage, debe ser capaz de orientarse y movilizarse solo, únicamente en función de una unidad central que enviará instrucciones para que ejecuten cada ARMs.

Nuestro modelo está basado en un robot móvil diferencia, con seguidor de línea, nuestra propuesta se basa en que el suelo donde se encuentre el storage debe tener guía, (líneas negras) para que el robot pueda orientarse y seguir rutas predefinidas. Por lo cual, nuestro robot de propuesta tiene el aspecto mostrado en la **Figura 40**.

de control del sistema actualizado

Figura 40
Modelo propuesto del ARMs



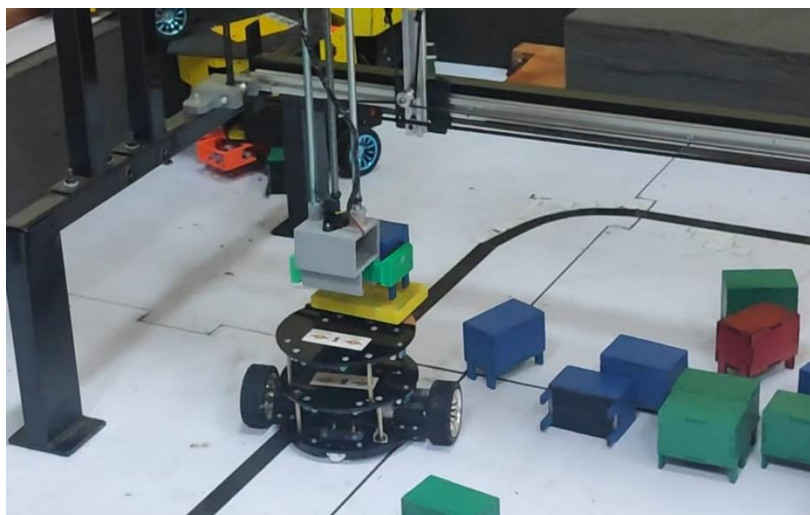
Nota. [Autoría Propia]

Características disponibles en nuestro modelo:

- Incorporación de seguidor de línea
- ESP32
- Jetson nano
- Robot diferencial
- Fácil acceso a la caja (carga y descarga)
- Auto-centrante para mejor acomodación de la caja

Con dichas características logramos que sea compatible con nuestro sistema de almacenamiento. El diseño de las estaciones está ajustado tanto al cómo lleva la caja el AMR como a la altura de la que puede coger o dejar la caja del ARM. Cuenta con un gripper (mecanismo piñón - cremallera), accionado por un servomotor que mantiene la fuerza de agarre del gripper mientras la caja esté subiendo, bajando o leyendo el color para garantizar que haya una buena coordinación y se pueda entregar al robot cartesiano. En la siguiente **Figura 41**, se puede visualizar de mejor manera el cómo sujeta, la caja, se mantiene cerrado el gripper y ejecuta lo comandos correspondientes.

Figura 41
Sujeción de la caja con el mecanismo del gripper

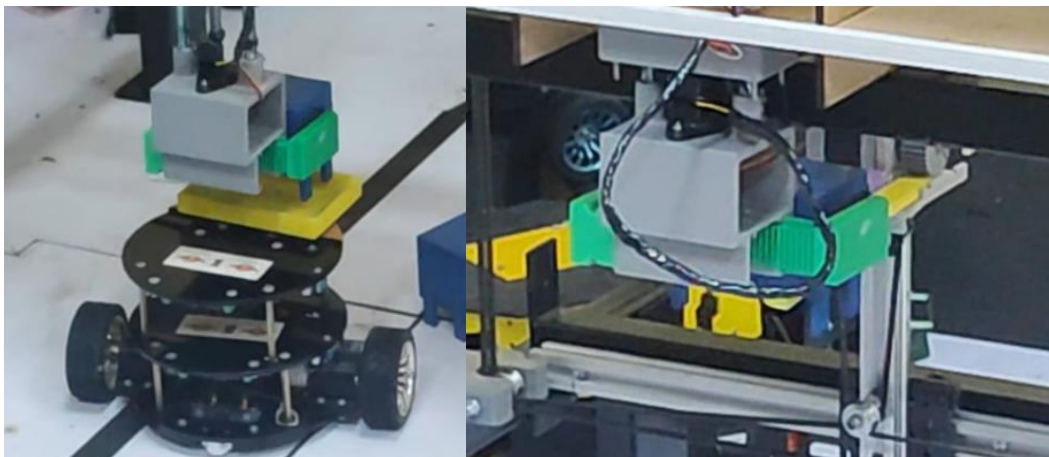


Nota. [Autoría Propia]

Para poder elevar la caja, optamos por diseñar un elevador incorporado en el mismo gripper, evitando traspasos innecesarios y una transferencia directa de la caja con el robot cartesiano, en la **Figura 42** se muestra cómo se eleva la caja y la transferencia con el robot cartesiano.de control del sistema actualizado.

Figura 42

Acoplamiento de las estaciones de carga / descarga con los ARMs



Nota. [Autoría Propia]

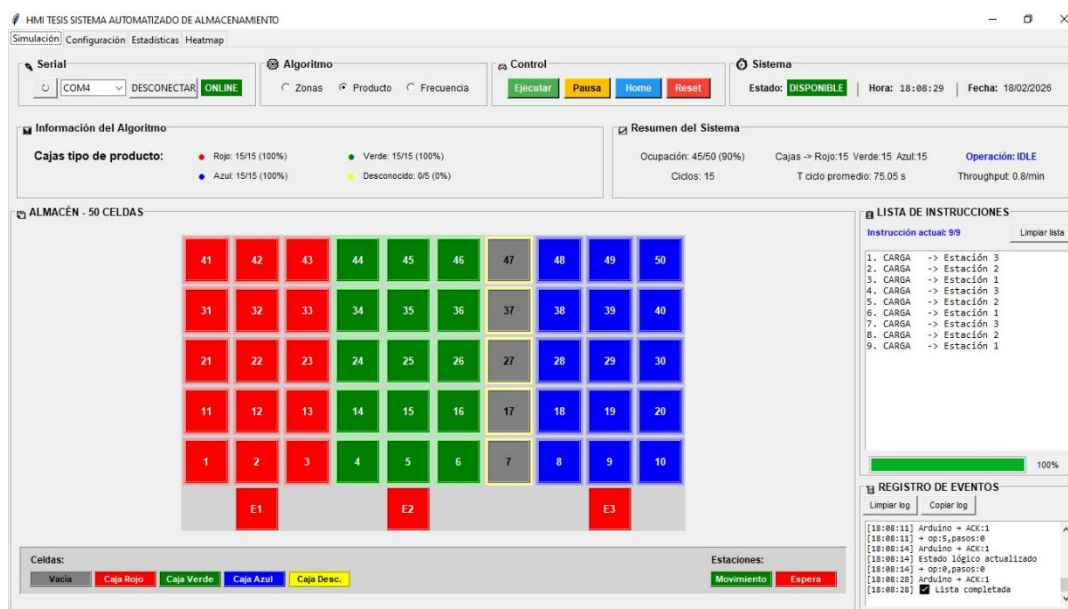
El sistema de estaciones de carga y descarga incorpora finales de carrera para determina cuando han bajado por completo o cuando han subido por completo, la altura que puede alcanzar está establecida para el ARM propuesto, si se realiza algún cambio físico debería considerarse también modificar la estructura de las estaciones.

Análisis comparativo entre algoritmos implementados

Para la comparación de los algoritmos implementados, vamos a comenzar cargando completamente el sistema de almacenamiento, considerando el algoritmo de tipo de producto, tenemos las características que se muestran en las **Figuras 43 y 44**, además de poder visualizar parámetros generales en la **Figura 45** y también el mapa de color en la **Figura 46**.

Figura 43

Estado del sistema de almacenamiento simulado con algoritmo de tipo de producto



Nota. [Autoría Propia]

Figura 44

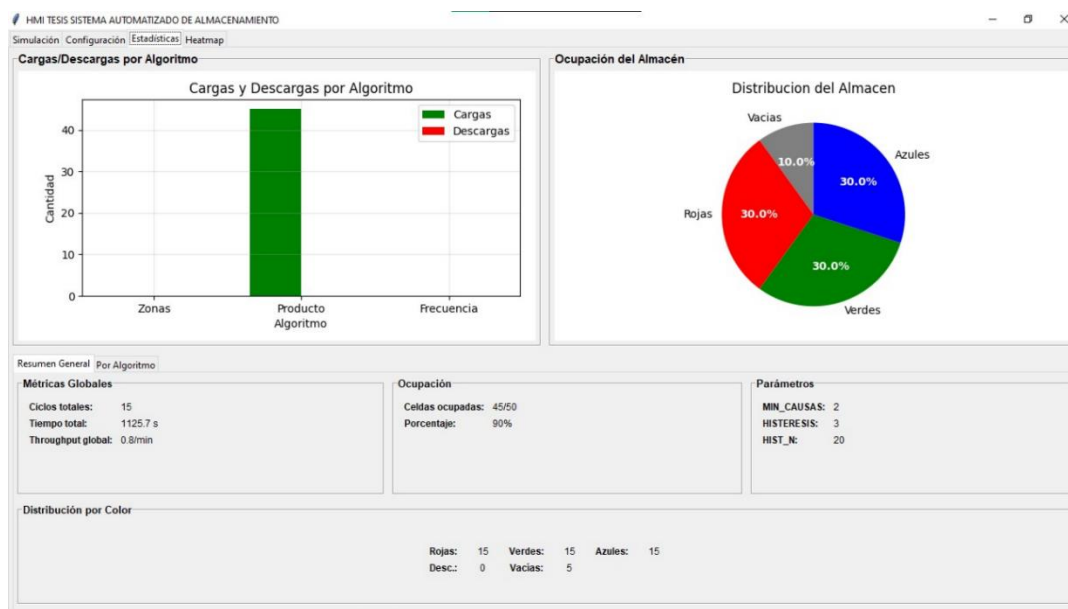
Estado del sistema de almacenamiento real con algoritmo de tipo de producto



Nota. [Autoría Propia]

Figura 45

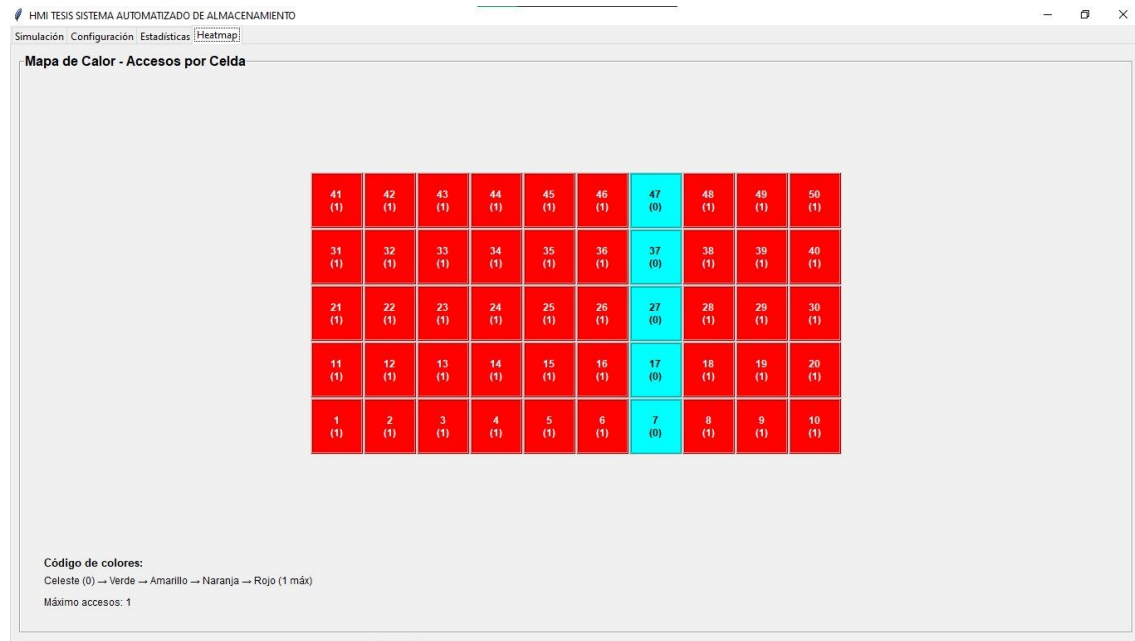
Parámetros generales del sistema lleno con algoritmo de tipo de producto



Nota. [Autoría Propia]

Figura 46

Mapa de calor del sistema lleno con algoritmo de tipo de producto



Nota. [Autoría Propia]

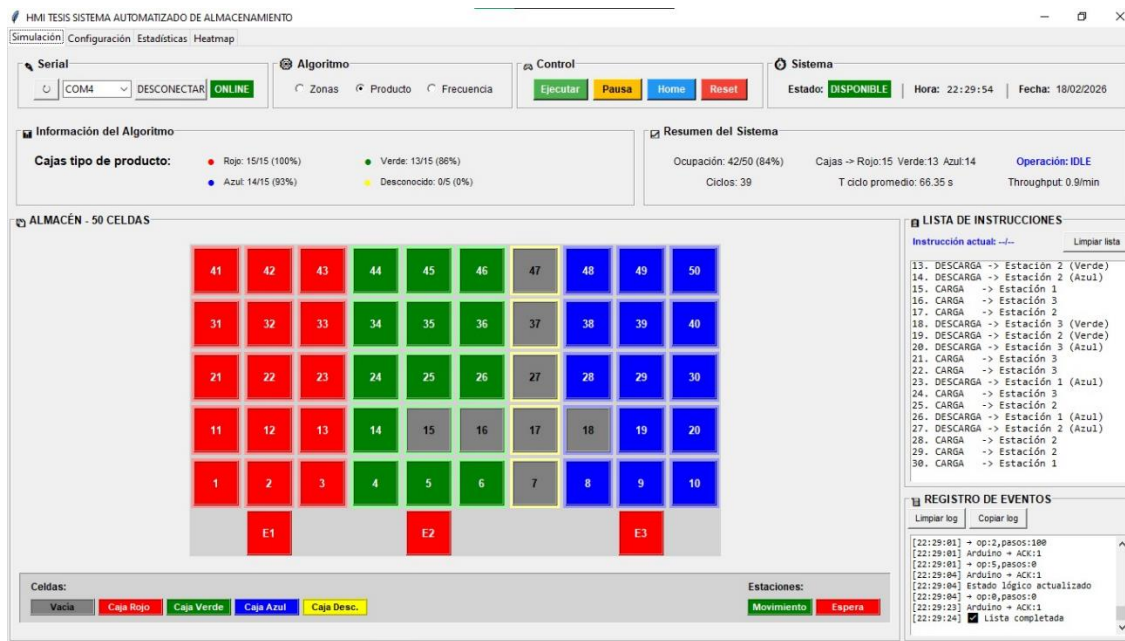
Comenzando la comparación tenemos valores importantes como un tiempo de ciclo promedio de 75.05 segundos, una ocupación del 90% y un throughput de 0.8 cajas/minuto. Partiendo de dichas métricas validaremos si al implementar el algoritmo por tipo de producto mejor o no la eficiencia de nuestro sistema.

Optamos por ejecutar una lista de 30 instrucciones generadas aleatoriamente y se obtuvieron los siguientes resultados.

- **Algoritmo por tipo de producto:**

El estado del sistema luego de ejecutar las 30 instrucciones aleatorias queda como se visualiza en la **Figura 47**.

Figura 47
Estado del sistema con algoritmo de tipo de producto

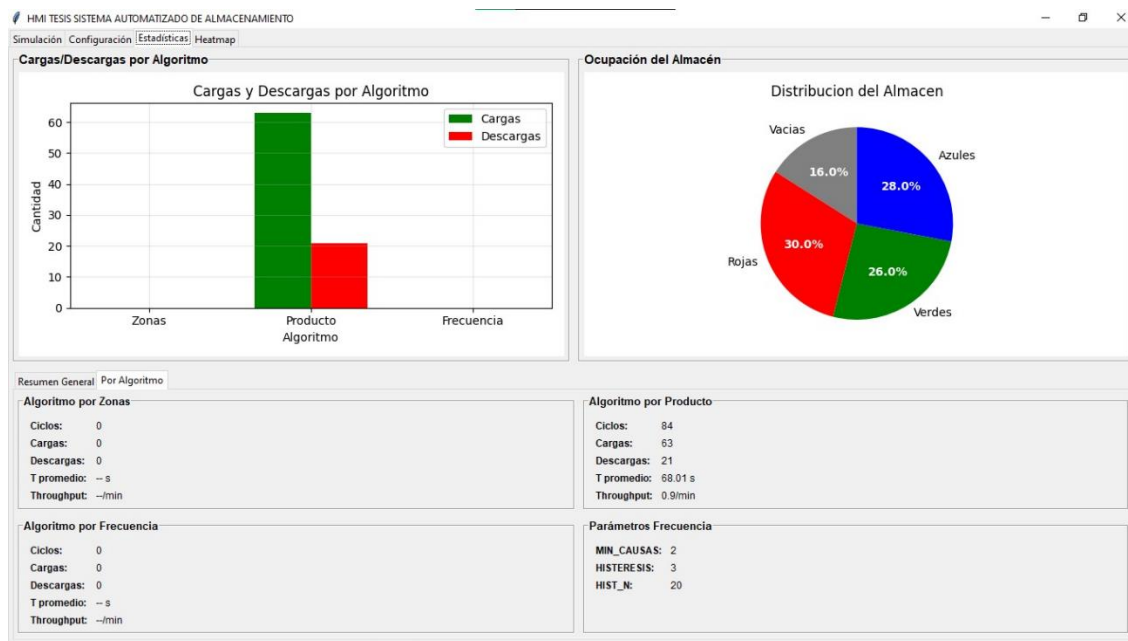


Nota. [Autoría Propia]

Las estadísticas generales que se obtuvieron luego de ejecutar 30 instrucciones se muestran en la **Figura 48**.

de control del sistema actualizado

Figura 48
Estadísticas generales con algoritmo de tipo de producto

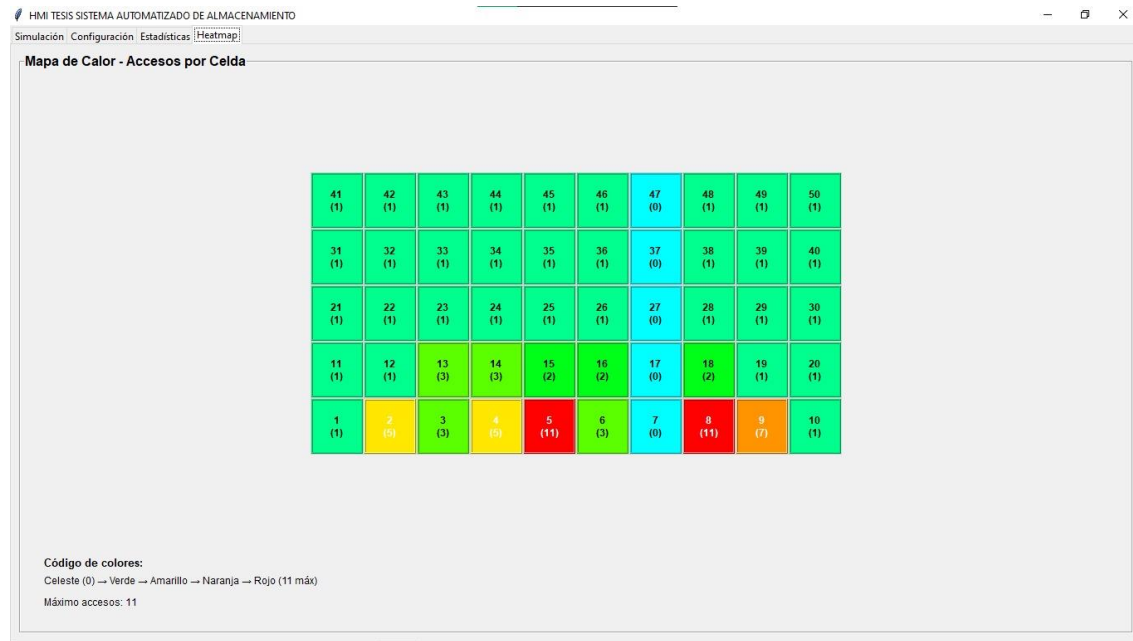


Nota. [Autoría Propia]

El mapa de calor generado por todas las interacciones de las 30 instrucciones nos queda como se muestra en la **Figura 49**.

Figura 49

Mapa de calor del sistema con algoritmo de tipo de producto



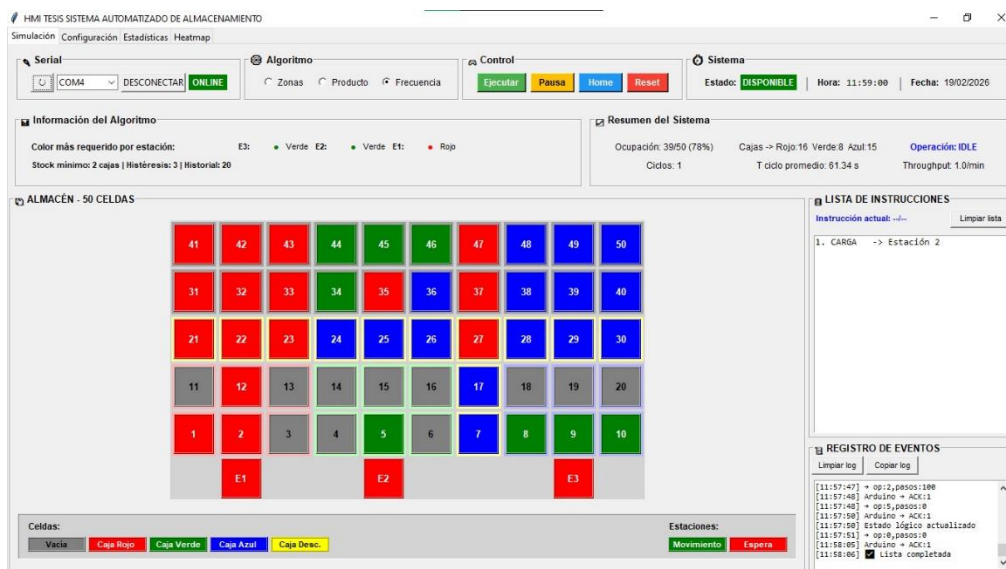
Nota. [Autoría Propia]

Obteniendo variables importantes como el tiempo de ciclo promedio de: 66.35 segundos, así mismo, tenemos el throughput que nos calcula de 0.9 cajas/min. Respecto al mapa de calor podemos ver que hay mayor movimiento en las primeras filas inferiores, concretamente la celda 5 y 8 son las que más se ocuparon durante la ejecución de las 30 instrucciones.

- **Algoritmo por frecuencia de requerimiento**

Continuamos la simulación desde el punto anterior obteniendo el estado del sistema que se visualiza en la **Figura 50**. Se envía 60 instrucciones aleatorias esperando poder obtener alguna variación dependiendo de la frecuencia de requerimiento.

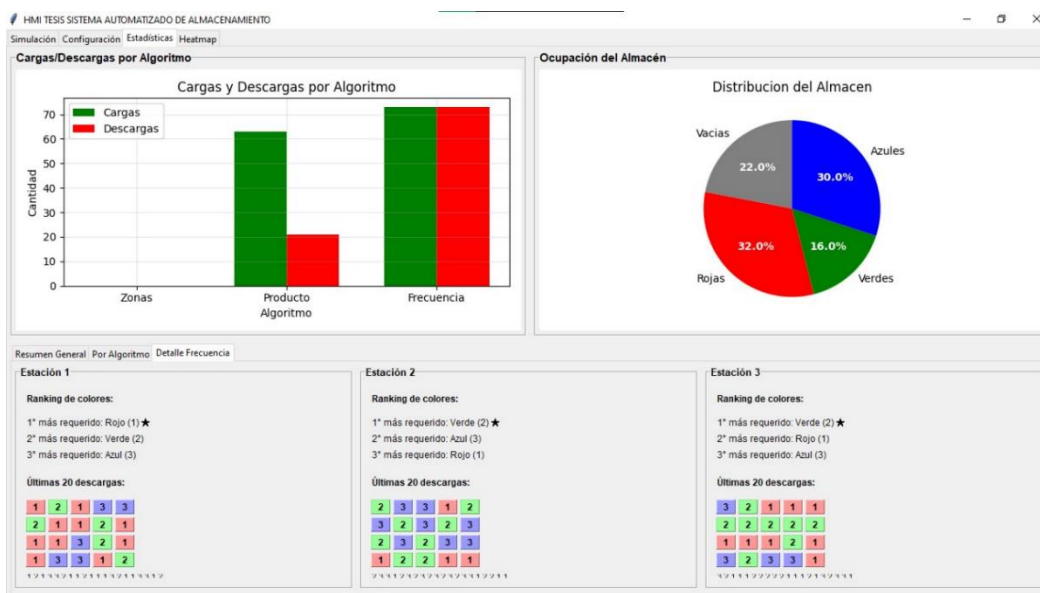
Figura 50
Estado del sistema con algoritmo de frecuencia de requerimiento



Nota. [Autoría Propia]

Las estadísticas generales obtenidas después de ejecutar 60 instrucciones se visualizan en la **Figura 51**.

Figura 51
Estadísticas generales con algoritmo de frecuencia de requerimiento

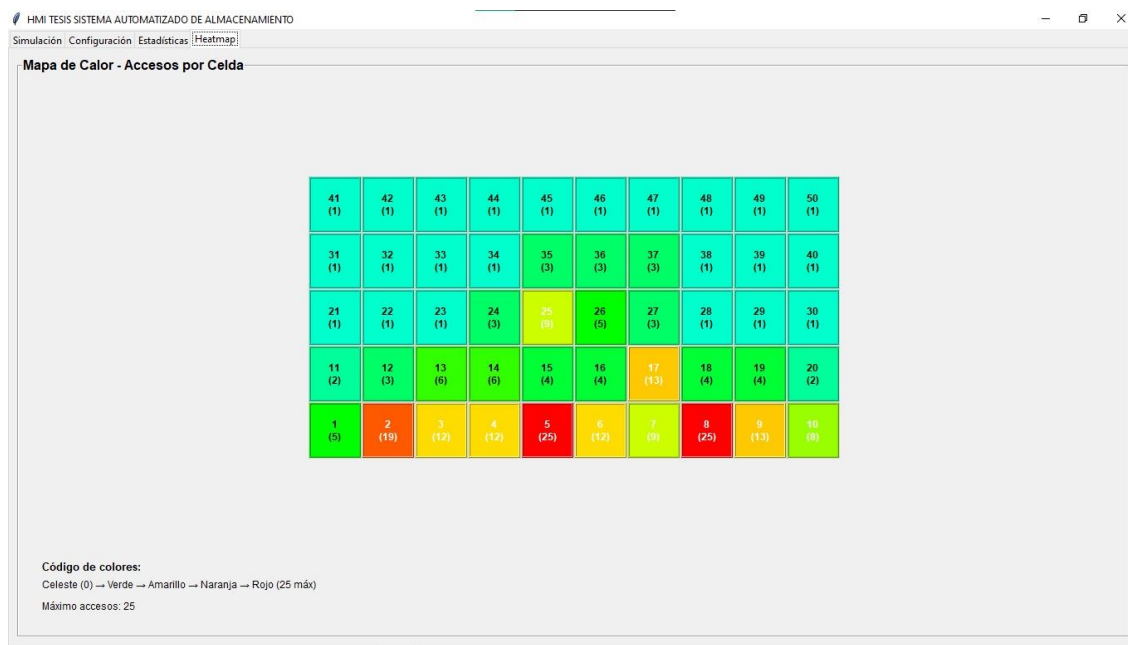


Nota. [Autoría Propia]

El mapa de calor quedó como se visualiza en la **Figura 52**.

Figura 52

Mapa de calor con algoritmo de frecuencia de requerimiento



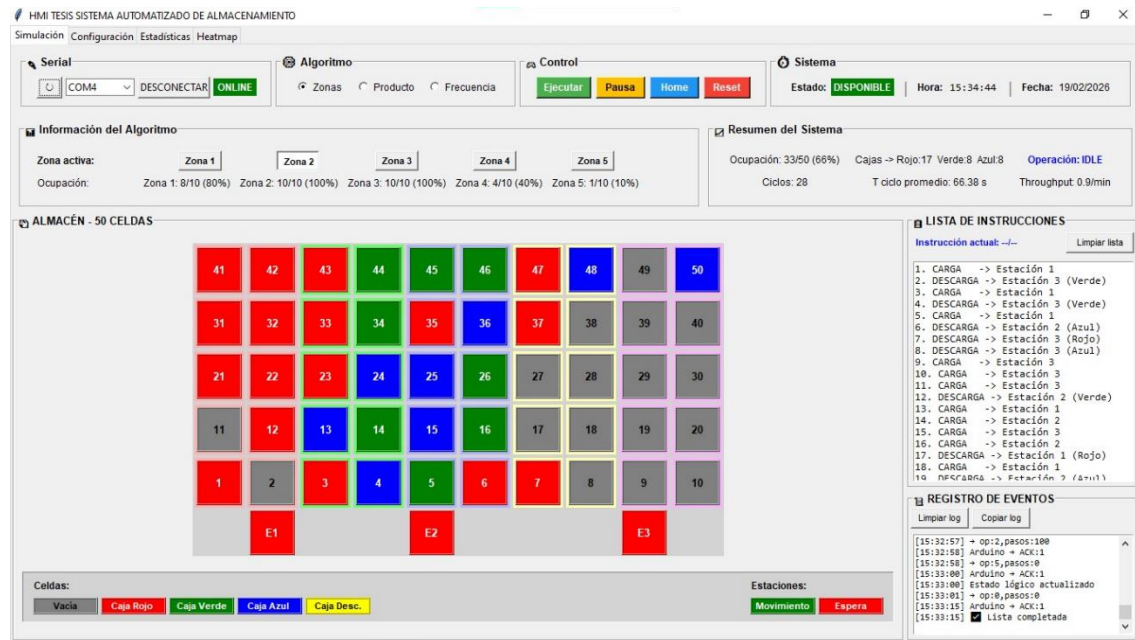
Nota. [Autoría Propia]

Lo más relevante que podemos concluir de la simulación es el tiempo de ciclo promedio de 61.34 segundos, un throughput de 1 caja/minuto y las celdas que más ocupación tuvieron son las 5 y la 8 con 25 ocupaciones cada una. Se debe tener en cuenta el ranking de colores de cada estación, dependiendo de las cajas más requeridas, el algoritmo se adaptará a la necesidad de requerimiento, permitiendo que la zona más frecuente de cada estación se pueda cambiar a necesidad. Adicionalmente, el algoritmo es adaptativo, pero lentamente ya que está configurado para que se el ranking de los tipos de cajas cambie con histéresis de 3, considerando las últimas 20 descargas.

- **Algoritmo por zonas:**

Continuando la simulación anterior, elegimos la zona 2 desde la interfaz HMI, ejecutando 20 muestras, obtenemos los resultados como el estado del sistema que se muestra en la siguiente **Figura 53**.

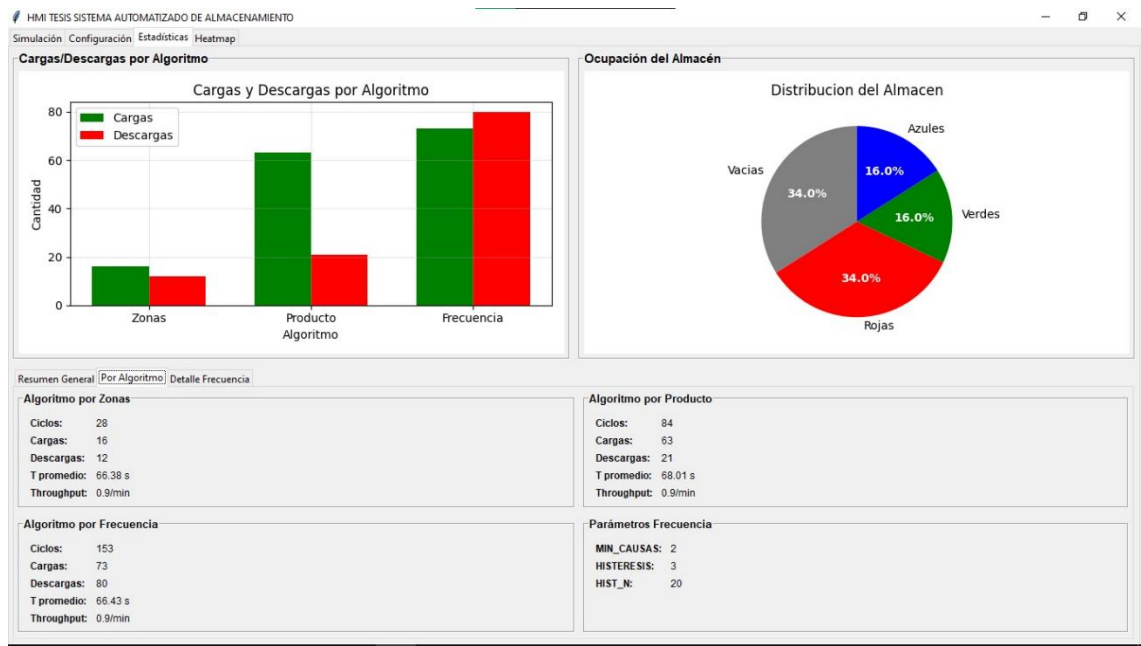
Figura 53
Estado del sistema con el algoritmo por zonas



Nota. [Autoría Propia]

En la siguiente **Figura 54** se muestran las variables generales ejecutadas con el algoritmo por zonas.

Figura 54
Variables generales con el algoritmo por zonas

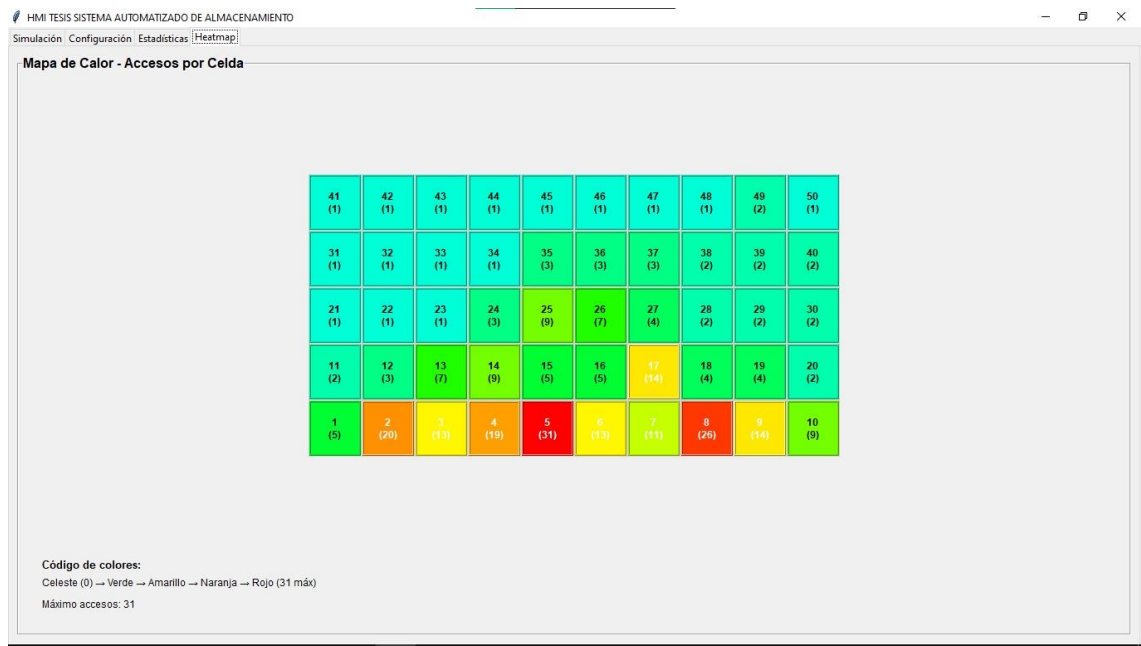


Nota. [Autoría Propia]

Finalmente, en la **Figura 55** tenemos el mapa de calor luego de la ejecución del algoritmo por zonas.

el s actualizado

Figura 55
Mapa de calor con el algoritmo por zonas



Nota. [Autoría Propia]

Con estos resultados retenemos que el tiempo de ciclo promedio es de 66.38 segundos, el algoritmo nos permite obtener un throughput de 0.9 cajas/minuto. Respecto a la ocupación la celda número 5 tiene la mayor cantidad de veces utilizada, específicamente con 31 veces.

Discusión de resultados y evaluación del desempeño

Las variables que consideramos importantes para cada algoritmo se listan en la **Tabla 19**.

19.

Tabla 19

Variables relevantes de algoritmos

Algoritmo	Tiempo de ciclo promedio (s)	Throughput (cajas/min)	Celdas más ocupadas
Por tipo de producto	66.35	0.9	5, 8
Por frecuencia de requerimiento	61.34	1	5, 8
Por zonas	66.38	0.9	5

Analizando la **Tabla 19** podemos concluir que el mejor algoritmo implementado considerando obtener parámetros que nos permitan una buena gestión del almacenamiento, así como una buena optimización de trayectorias es el algoritmo por frecuencia de requerimiento. Comparado a los algoritmos por tipo de producto y por zonas, el algoritmo por frecuencia de requerimiento tiene aproximadamente 5 segundos de ventaja respecto a los otros, que a primera vista no pareciera influir demasiado, pero esto escalando a nivel industrial puede significar un gran incremento de producción. Teniendo en cuenta la producción, el throughput del algoritmo por frecuencia de requerimiento es el mayor con un valor de 1 caja /minuto. Finalmente, la celda con más ocupación en todos los algoritmos es la celda número 5, lo que nos indica que la zona, cerca de la celda 5 tiene gran tráfico que nos puede dar indicio de incluir una mejora a futuro.

En resumen, el desarrollo del sistema automatizado de almacenamiento nos permite integrar de manera efectiva los dominios mecánico, electrónico e informático en una solución funcional y escalable. La ejecución de una arquitectura de control distribuido, junto a sensores de detección y clasificación y algoritmos de optimización de trayectorias, sirvió para

incrementar la eficiencia operativa, la trazabilidad de los productos y la fiabilidad del proceso. El conjunto de pruebas realizadas corroboró el cumplimiento de los requerimientos preestablecidos y demostró un mejor desempeño comparado con el diseño base. Así, el prototipo no sólo valida la viabilidad técnica de la propuesta, sino que también genera una plataforma didáctica y tecnológica con oportunidades de ampliación y aplicaciones en escenarios logísticos automatizados.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones basadas en los resultados y objetivos del proyecto

En base a las actualizaciones realizadas en el proyecto, se logró clasificar el ingreso de las cargas en el sistema AS/RS, en el que se pasó de un sistema manual a un proceso automatizado, todo gracias a la implementación de estaciones de transferencias electromecánicas, las cuales fueron validadas y certificó que la implementación de una transmisión rígida de desplazamiento vertical de la carga. El rediseño de la estructura, que eleva la cota inferior del sistema, lo que brinda un valor añadido a la integración de AMRs garantizando que el flujo de entrada y salida se produzca en forma de un flujo continuo. Cumpliendo con la propuesta de estaciones de carga y descarga que se puedan acoplar a futuras mejoras.

La Integración del sistema de sensores de colores las estaciones de carga, dada por el sensor TCS34725, ayudó a superar las limitaciones que se asocian a la implementación de sistemas de detección analógica convencionales. Gracias a la utilización del protocolo de comunicación digital I2C, con filtro de bloqueo infrarrojo que es un se logró una detección sólida e inquebrantable ante los cambios de la luz ambiente presentes en el entorno. La capacidad de discriminación es fundamental, ya que permite evitar la introducción de datos erróneos, asegurando que el algoritmo de optimización opere con las variables de estado fiables para permitirle asignar la zona de almacenamiento adecuada comandada por los algoritmos implementados.

El despliegue efectuado en la matriz de 50 sensores de infrarrojos HW-870, en base a una arquitectura de distribución de puertos con funcionamiento de chips MCP23017, permitió validar la posibilidad de monitorizar inventarios de gran densidad sin sobrecargar el procesador del controlador central. La red de sensores permitió cambiar la lógica operativa del sistema,

pasando de un control "ciego", fundado en los supuestos de software, a una validación física en tiempo real. Así no solamente anuló la posibilidad de colisiones por intentos de doble apilamiento en celdas ocupadas, sino que además dotó al sistema de una capacidad de autodiagnóstico, con la que verificar las diferencias del inventario lógico (base de datos a distancia) y la ocupación física del almacén.

Se logró la implementación de los algoritmos para la correcta gestión de almacenamiento de los 3 tipos de productos, tanto por zona, por tipo de producto como por frecuencia de requerimiento, nos basamos en que siempre se optimicen las trayectorias haciendo que el robot cartesiano se mueva lo mínimo posible, comparando el cálculo de distancia Manhattan a la celda más cercana a la que puede almacenarse la caja dependiendo de la posición del robot cartesiano en la que se encuentre en ese momento. Cada algoritmo está definido por zonas predeterminadas que les permiten poder identificar el lugar donde se pueden almacenar y donde sería la mejor opción para que se adapte a los requerimientos de cada algoritmo.

La actualización del sistema de simulación y monitorización se vio beneficiada al agregar varios segmentos extras que hacen que el usuario/operador pueda entender y analizar de mejor manera el funcionamiento y comportamiento del sistema de almacenamiento inteligente. Permitiéndole poder comparar entre los 3 algoritmos implementados, cual es más eficiente, cual tiene una mejor distribución, el estado del sistema de almacenamiento como de las estaciones. Consideramos que se implementó las variables más importantes incluyendo un mapa de calor para visualizar la ocupación de cada celda.

Recomendaciones

Se recomienda mantener una iluminación artificial constante y controlada sobre las estaciones de carga para que la tasa de error en la identificación de productos sea precisa. Si bien los sensores que se han seleccionado cuentan con filtros de bloqueo a infrarrojo y un sistema de carcasas impresas en 3D que aíslan la luz parásita de manera efectiva, el crecimiento de la tasa de error en la lectura siempre dependerá del entorno exterior. Por este motivo, es necesario ejecutar rutinas de balance de blancos o reacondicionamientos de umbrales RGB en el software para cualquier cambio de lugar del sistema o si las condiciones de iluminación general.

Se aconseja establecer como estándar de diseño los parámetros mecánicos de este prototipo para futuros trabajos que busquen fabricar e integrar Robots Móviles Autónomos que funcionen con este almacén. Los chasis de los nuevos deben someterse de forma estricta a la altura máxima libre para circular por debajo del sistema, evitando con ello posibles colisiones. Su plataforma de carga debe integrarse de forma fluida a las guías de autocentrado pasivo de las estaciones. También se recomienda equipar a los AMRs con algoritmos de navegación fina con el propósito de limitar al máximo el error de posicionamiento final, el que no puede exceder a la tolerancia de agarre del mecanismo.

Es necesario proceder con la estructuración de un plan de mantenimiento preventivo para los actuadores mecánicos, específicamente para las estaciones de elevación y el robot cartesiano, tal y como se ha dicho anteriormente. Esto llevará a una lubricación periódica (grasa de litio o teflón) en los husillos, para tratar de que el coeficiente de fricción sea mínimo y evitar el desgaste excesivo o la pérdida de pasos en los motores. También se requiere, de igual forma, del control visual y táctil de los cables móviles situados en las cadenas portacables para

llegar a detectar signos de fatiga, endurecimiento de las guías o cizallamiento del cobre, debido a los ciclos de flexión continuos.

Propuestas para trabajos futuros

Mejoramiento de la pala del robot cartesiano, el diseño de dicha parte del robot cartesiano limita en muchos aspectos, desde no poder aumentar la velocidad de los motores del robot cartesiano ya que tiende a hacer caer las cajas por su casi nulo agarre, es un sistema muy frágil y expuesto a varios accidentes que pueden ocurrir por un mal diseño. Nuestra propuesta es la implementación de un sistema de sujeción que garantice el correcto agarre de las cajas desde su transferencia con las estaciones de carga y descarga hasta la colocación o retiro de las celdas del storage, garantizando en todo momento una posición fija en la recepción y entrega de la caja.

Implementación de ROS2, cuando se implementen los ARMs, la mejor manera para la correcta coordinación con el storage va a ser utilizar ROS2, nuestra programación está pensada para que en un futuro se pueda acoplar al sistema de nodos que maneja ROS2 pudiendo comunicar nuestra interfaz con las instrucciones que envíen los ARMs, permitiendo que ambos sistemas puedan trabajar de manera ordenada y secuencial, Además ROS2 cuenta con varios programas para simulación, que permitirían al usuario visualizar de mejor manera el proceso tanto físico como simulado.

Referencias

- BAHOS, N., & BLANCO, B. (2019). *Diseño y construcción de una maquina as/rs para almacenamiento y extracción de artículos electrónicos de una bodega*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA.
- Bdtronics. (s. f.). *Bdtronics*. Bdtronics tcs34725. Recuperado <https://www.bdtronics.com/tcs34725-color-sensor-rgb-development-board-module.html>
- Bélanger, M.-J., Pellerin, R., & Lamouri, S. (2023). A Literature Review on Digital Twins in Warehouses. *Procedia Computer Science*, 219, 370-377. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.302>
- Caride, D., & Figueroa, V. (2024). *Análisis y diseño de una arquitectura inteligente para la optimización del surtimiento en un almacén as/rs*. 45(147), 358-372. <https://doi.org/04-2016-120613261600-203>
- Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., & Stein, C. (2022). *Introduction to Algorithms* (4th ed.). mitpress. <https://books.google.hn/books?id=drZNEAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269-271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Goldenberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison Wesley.
- grupoelectrostore. (2023). *RODAMIENTO LINEAL LM8UU 8*15*24MM* [Venta]. RODAMIENTO LINEAL LM8UU 8*15*24MM. <https://www.grupoelectrostore.com/producto/rodamiento-lineal-lm8uu-81524mm-impresora-3d/>
- grupoelectrostore. (2026). *Acople flexible 8mm* [Tienda]. Acople flexible 8mm. <https://www.grupoelectrostore.com/producto/acople-flexible-88mm-para-motor-a-pasos/>

- Leantec. (s. f.). Módulo Sensor Infrarrojo [Tienda]. *Leantec*. Recuperado 29 de enero de 2025, de <https://leantec.es/tienda/modulo-seguidor-de-lineas-tcrt5000-arduino/>
- modafinipls. (2024). *Husillo roscado Tr8 x 8* [Tienda]. Husillo roscado Tr8 x 8. <https://www.modafinipls.com/producto-p-717333.html>
- Murat, Z., & Zeeshan, Q. (2022, enero). Design and Optimization of Automated Storage and Retrieval Systems: A Review. *Industrial Engineering in the Internet-of-Things World*, 177-190. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76724-2_14
- P. E. Hart, N. J. Nilsson, & B. Raphael. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107. <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
- Rokhforoz, P., Kebriaei, H., & Ahmadabadi, M. N. (2021). A fair task and time allocation of multiple human operators using decentralized Nash bargaining solution. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107027. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107027>
- Santoja, S. (2022). *Prototipo de un pequeño almacén automatizado* [Trabajo fin de grado]. Escuela Politécnica de Elche.
- Tamayo, C., Zambrano, J., & Mideros, D. (2025). *Diseño e implementación de un sistema de almacenamiento automático con una estación de carga/descarga y celdas de almacenamiento, para gestión de almacenamiento mediante control por orden de entrada/salida y por densidad de almacenamiento*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Theopilus, Y., Tjandra, S., & Sagara, B. (2020). *Development of Low-Cost Multi-Input Automated Storage and Retrieval System (AS/RS) for Educational Purposes*. 847. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012072>

Apéndices