



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Facultad de Ingeniería
y Ciencias
Ingeniería Electrónica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

Sistema de control para ASRS con robot cartesiano

Juan Fernando Rios Rodríguez

Director

Ing. Simón Alfredo José Plata Eastman

16 de febrero de 2026

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Dr. Mateo López Victoria
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

Dr. Luis Eduardo Tobón
Director Carrera Ingeniería Electrónica

Ing. Simón Alfredo José Plata Eastman
Director Trabajo de Grado

Dr. Alexander Martínez Álvarez
Jurado 1

Mag. Hader Alberto Madera Bermeo
Jurado 2

Santiago de Cali, 16 de febrero de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Mateo López Victoria
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Sistema de control para ASRS con robot cartesiano”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

Juan Fernando Rios Rodríguez

Santiago de Cali, 16 de febrero de 2026

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Mateo López Victoria

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certifico que el presente Trabajo de Grado titulado “Sistema de control para ASRS con robot cartesiano”, realizado por Juan Fernando Rios Rodríguez, estudiante de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,

Ing. Simón Alfredo José Plata Eastman
Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana Cali y al Centro de Automatización de Procesos (CAP) por el financiamiento de recursos para la ejecución del trabajo de grado.

Al laboratorista Bleider Arizala quien colaboró en los procesos realizados en el laboratorio.

A mis padres por su apoyo incondicional.

A mi asesor Simón Plata, por su apoyo y paciencia durante este proceso de aprendizaje.

¡Muchas gracias!

Glosario

Acrónimos y Abreviaturas

ASRS	Automated Storage and Retrieval System.
CAP	Centro de Automatización de Procesos.
CMF	Celda de Manufactura Flexible.
CNC	Control Numérico Computarizado.
E-Stop	Emergency Stop o parada de emergencia.
HMI	Human Machine Interface.
PCB	Printed Circuit Board.
PLC	Programmable Logic Controller.
PTO	Pulse Train Output.
RFID	Radio Frequency Identification.
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.
UID	Identificador único asociado a cada pallet mediante tecnología RFID.

Términos

Arquitectura de control	Organización estructurada de los componentes de hardware y software de un sistema automatizado, que define las funciones, responsabilidades e interacciones entre subsistemas.
Cinta conductora	Elemento fabricado en material conductor utilizado para implementar superficies de detección capacitiva en el sistema de detección de colisiones.
Control por coordenadas	Modo de operación en el cual el robot cartesiano se desplaza a posiciones específicas definidas por valores en los ejes X, Y y Z.
Detección de colisiones	Mecanismo de seguridad que permite identificar contactos no deseados durante el movimiento del sistema y generar una señal de detención.
Inventario	Registro lógico del estado de ocupación de las estanterías del ASRS, asociado a la identificación de pallets.
Máquina de estados	Modelo de comportamiento que representa los distintos estados del sistema y las transiciones entre ellos según eventos y condiciones.
Modo automático	Modo de operación en el cual el sistema ejecuta de forma autónoma secuencias completas de almacenamiento y recuperación de pallets.
Modo manual	Modo de operación que permite el control directo de los ejes del robot para tareas de ajuste, verificación y mantenimiento.
Rutina de homing	Procedimiento de inicialización mediante el cual el sistema establece las posiciones de referencia de cada eje del robot.
Sistema embebido	Sistema electrónico basado en un microcontrolador, diseñado para realizar funciones específicas dentro de un sistema automatizado.
Sistema supervisor	Aplicación ejecutada en un computador que coordina el modo automático y gestiona información de alto nivel del sistema.

Resumen

Los sistemas automáticos de almacenamiento y recuperación (Automated Storage and Retrieval Systems, ASRS) constituyen una solución ampliamente utilizada en entornos industriales y logísticos para la gestión eficiente de materiales, mediante la integración de subsistemas mecánicos, eléctricos y de control. Sin embargo, su complejidad técnica y su alto costo suelen limitar su disponibilidad como plataformas didácticas para la formación en ingeniería.

El presente trabajo desarrolla e integra un sistema de control para un ASRS con robot cartesiano, orientado a la rehabilitación y puesta en operación de un equipo real dentro de una celda de manufactura flexible con fines académicos. El proyecto se abordó desde un enfoque de ingeniería aplicada, siguiendo la metodología CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate), lo que permitió estructurar de manera sistemática las etapas de análisis del estado inicial del sistema, definición de requerimientos, diseño de la arquitectura de control, implementación del hardware y software, e integración operativa del sistema.

La arquitectura de control propuesta se basa en un controlador lógico programable (PLC) como núcleo del control de movimiento y de la lógica secuencial del ASRS, complementado por un sistema supervisor en PC para la gestión de órdenes, la visualización del estado del sistema y la interacción con el usuario. Adicionalmente, se integró un sistema embebido dedicado a la adquisición de señales de sensores específicos, permitiendo desacoplar funciones auxiliares del control principal.

Como resultado, se logró la puesta en operación segura y funcional del ASRS, validando la ejecución de los ciclos automáticos de almacenamiento y recuperación, el manejo de condiciones de seguridad y la comunicación entre los distintos niveles de la arquitectura de control. El sistema desarrollado demuestra la viabilidad de utilizar un ASRS real como plataforma didáctica para la enseñanza de control industrial, automatización y sistemas mecatrónicos, evidenciando las posibilidades de integración entre componentes industriales y desarrollos embebidos en un entorno académico.

Palabras clave: ASRS, automatización industrial, PLC, control de movimiento, robot cartesiano, CDIO.

Abstract

Automated Storage and Retrieval Systems (ASRS) are widely used in industrial and logistics environments for efficient material handling through the integration of mechanical, electrical, and control subsystems. However, their technical complexity and high cost often limit their availability as educational platforms for engineering training.

This work presents the development and integration of a control system for a Cartesian-robot-based ASRS, aimed at the rehabilitation and commissioning of a real system within a flexible manufacturing cell for academic purposes. The project was conducted from an applied engineering perspective, following the CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) methodology, which enabled a structured approach to the analysis of the system's initial condition, requirement definition, control architecture design, hardware and software implementation, and operational integration.

The proposed control architecture is based on a programmable logic controller (PLC) as the core of motion control and sequential logic, complemented by a PC-based supervisory system for order management, system monitoring, and user interaction. Additionally, a dedicated embedded system was integrated for the acquisition of specific sensor signals, allowing auxiliary functions to be decoupled from the main control system.

The results demonstrate the safe and functional operation of the ASRS, validating the execution of automatic storage and retrieval cycles, the handling of safety conditions, and the communication between the different control levels. The developed system confirms the feasibility of using a real ASRS as a didactic platform for teaching industrial control, automation, and mechatronic systems, highlighting the integration of industrial components and embedded developments within an academic environment.

Keywords: ASRS, industrial automation, PLC, motion control, Cartesian robot, CDIO.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo General	5
3.2. Objetivos Específicos	5
4. Marco de Referencia	7
4.1. Áreas Temáticas	7
4.2. Marco Teórico	7
4.2.1. Automatización industrial y logística inteligente	8
4.2.2. Sistemas Automáticos de Almacenamiento y Recuperación (ASRS)	8
4.2.3. Robots cartesianos y mecanismos de manipulación en ASRS	10
4.2.4. Control de movimiento en sistemas multieje	11
4.2.5. Sistemas de control en ASRS y arquitecturas industriales	12
4.2.6. Sistemas embebidos y control auxiliar en automatización	12
4.2.7. Sensado, detección de colisiones e instrumentación en ASRS	12
4.2.8. Identificación automática (RFID) y gestión de inventario en ASRS	13
4.2.9. Comunicación industrial y buses de comunicación en automatización	13
4.2.10. Confiabilidad, seguridad y normatividad aplicable	13
4.3. Trabajos Relacionados	14
4.3.1. Development of a Small-Scale Material Handling Machine for ASRS [1]	14
4.3.2. Development of Low-Cost Multi-Input Automated Storage and Retrieval System [2]	14
4.3.3. Development of Automated Storage and Retrieval System for Small Scale Industries [3]	14
5. Materiales y Métodos	15
5.1. Enfoque metodológico	15
5.2. Determinación de los requerimientos funcionales y no funcionales (CDIO – Concebir)	15
5.3. Arquitectura general del sistema de control (CDIO – Diseñar)	17
5.3.1. Arquitectura de control propuesta	17
5.3.2. División en módulos funcionales y responsabilidades	18
5.3.3. Comunicación entre módulos	20
5.3.4. Arquitectura de seguridad	21
5.4. Materiales y componentes hardware (CDIO – Diseñar / Implementar)	22

5.4.1.	Controlador lógico programable	22
5.4.2.	Actuadores y drivers	23
5.4.3.	Sensores y dispositivos de seguridad e identificación	24
5.4.4.	Sistema embebido de adquisición e identificación	26
5.5.	Herramientas de software y lenguajes de programación (CDIO – Implementar)	28
5.6.	Métodos, técnicas y algoritmos Implementarados (CDIO – Diseño / Implementación)	28
5.6.1.	Control de movimiento	28
5.6.2.	Lógica secuencial y coordinación del proceso	29
5.6.3.	Seguridad y detección de colisiones	30
5.6.4.	Gestión básica de inventario	30
5.7.	Proceso de desarrollo e integración del sistema (CDIO – Implementar / Operar) . . .	31
5.8.	Plan de pruebas y estrategia de validación (CDIO – Implementar / Operar)	33
5.9.	Consideraciones de operación y uso académico (CDIO – Operar)	34
6.	Resultados y Discusión	35
6.1.	Contexto de validación del sistema	35
6.2.	Resultados de la validación del sistema ASRS	36
6.2.1.	Ciclos completos de almacenamiento y recuperación	36
6.2.2.	Repetibilidad y consistencia operativa	36
6.2.3.	Inicialización, referenciación y modos de operación	36
6.2.4.	Seguridad, manejo de fallos y observabilidad	37
6.3.	Verificación técnica de requerimientos	37
6.3.1.	Requerimientos funcionales	38
6.3.2.	Requerimientos no funcionales	39
6.4.	Impacto académico y aporte a la formación en ingeniería	39
6.4.1.	Aprendizajes asociados a los subsistemas del ASRS	39
6.4.2.	Integración de aprendizajes y progresión curricular	41
7.	Conclusiones	43
8.	Recomendaciones	45
8.1.	Trabajo futuro	45
9.	Anexos	47
Anexos		47
9.1.	Anexo 1 – Plan de pruebas del sistema ASRS	49
9.1.1.	Alcance, supuestos y responsabilidades	49
9.1.2.	Convenciones de evidencia y trazabilidad	49
9.1.3.	Plantilla de especificación de prueba (formato estándar)	50
9.1.4.	TP-01: Ciclo completo de almacenamiento	51
9.1.5.	TP-02: Ciclo completo de recuperación	54

9.1.6. TP-03: Repetibilidad del sistema	56
9.1.7. TP-04: Inicialización y referenciación (<i>homing</i>)	57
9.1.8. TP-05: Modos de operación (manual y automático)	58
9.1.9. TP-06: Paro de emergencia (E-Stop)	59
9.1.10. TP-07: Colisión / condición anómala	59
9.1.11. TP-08: Observabilidad del sistema	60
9.1.12. Registro maestro de evidencias	61
9.1.13. Cierre del anexo: criterio de cumplimiento global	61

Índice de figuras

4.1. Caracterización general y criterios de clasificación de ASRS. (Tomado de [4]).	9
4.2. Relación entre diseño físico y diseño de control en ASRS y su vínculo con el desempeño. (Tomado de [4]).	10
5.1. Diagrama de bloques de la arquitectura de control del ASRS.	18
5.2. Esquema conceptual por niveles de control, interfaces disponibles y responsabilidades del ASRS.	20
5.3. Perfil de velocidad para el movimiento por coordenadas. Tomado de manuales Xinje	29
5.4. Perfil de velocidad Homing. Tomado de manuales Xinje	29
5.5. Máquina de estados general del sistema de control del ASRS.	30
5.6. Diagrama de flujo del proceso de inventario: verificación/creación de archivo en el PC y lectura RFID bajo demanda en el sistema embebido (ciclo continuo).	31
5.7. Esquemático PCB.	32
5.8. PCB realizada en el CAP.	33
9.1. Evidencia EV-TP01-01 (placeholder).	53
9.2. Evidencia EV-TP01-02 (placeholder).	53

Índice de cuadros

5.1. Requerimientos funcionales del sistema ASRS	16
5.2. Requerimientos no funcionales del sistema ASRS	17
5.3. Módulos funcionales y responsabilidades principales del ASRS.	19
5.4. Resumen de comunicaciones entre módulos del sistema.	21
5.5. Eventos de seguridad y respuesta del sistema de control del ASRS.	22
5.6. Comparación de PLC evaluados para el control del ASRS (3 PTO y 3 HSC) ^{1,2,3}	23
5.7. Comparación de plataformas embebidas para el sistema de sensado e identificación (mínimo: 2×RC522 + 1×MPR121).	27
6.8. Validación técnica de los requerimientos funcionales del sistema ASRS	38
6.9. Verificación de requerimientos no funcionales del sistema ASRS	39
9.10. Resumen del plan de pruebas del sistema ASRS	50
9.16. Registro maestro de evidencias (para diligenciar)	61

Introducción

Los sistemas automáticos de almacenamiento y recuperación (Automated Storage and Retrieval Systems, ASRS) constituyen una solución ampliamente utilizada en entornos industriales para la gestión automatizada de materiales, mediante la coordinación de sistemas mecánicos, eléctricos y de control. Este tipo de sistemas permite mejorar la eficiencia operativa, optimizar el uso del espacio y reducir errores asociados a la manipulación manual de cargas, integrándose de manera natural en procesos de manufactura y logística automatizada [4, 5].

Diversos estudios reportan que la implementación de ASRS tiene un impacto positivo en el desempeño de las operaciones de almacenamiento, particularmente cuando estos sistemas se integran de manera adecuada con los procesos productivos y los sistemas de control, contribuyendo a una mayor confiabilidad y trazabilidad de los materiales [6].

Debido a su carácter multidisciplinar, los ASRS representan además un escenario pertinente para la formación en ingeniería, al involucrar tecnologías propias de la automatización industrial, el control de movimiento, los sistemas embebidos y la comunicación industrial. Lo que posibilita su uso como plataformas de aprendizaje aplicado en automatización y control.

El Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la Pontificia Universidad Javeriana Cali dispone de un sistema ASRS basado en un robot cartesiano de tres ejes, adquirido con el propósito de ofrecer a los estudiantes una experiencia formativa cercana a la que se presenta en entornos industriales reales. No obstante, al inicio del presente proyecto el sistema presentaba una condición de inoperatividad superior a tres años. Si bien en etapas anteriores se habían realizado intentos de implementación empleando plataformas como BeagleBone, al comienzo del proyecto no existía un control operativo ni documentación técnica que soportara el funcionamiento del sistema, lo que imposibilitaba su uso académico y evidenciaba la necesidad de una intervención.

El proyecto se abordó desde un enfoque aplicado, considerando la estructura física existente del ASRS como base para el diseño e implementación de un sistema de control desde cero. El problema central consistió en dotar al sistema de una arquitectura de control coherente, modular y alineada con prácticas industriales, que permitiera su operación automatizada bajo condiciones de seguridad, supervisión y control, y que facilitara su utilización como plataforma didáctica dentro de una CMF. Este enfoque es consistente con experiencias previas que destacan el valor de los sistemas automatizados reales como herramientas para la enseñanza integrada de automatización, control y robótica [7].

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto se basó en el enfoque CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate), utilizado como marco de referencia para estructurar de manera ordenada las etapas de concepción, diseño, implementación e integración del sistema. Este enfoque permitió mantener coherencia entre los objetivos planteados y las actividades realizadas, priorizando

una solución técnica viable y alineada con las condiciones reales del entorno de operación. Desde el punto de vista conceptual, el proyecto se fundamenta en principios de automatización industrial, control de movimiento en sistemas multieje, control basado en PLC, sistemas embebidos, identificación automática mediante RFID y comunicación industrial, los cuales constituyen el soporte teórico necesario para el diseño e implementación del sistema de control propuesto.

Frente a esto se establecieron objetivos específicos orientados a la determinación de los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema. En un primer lugar se llevó a cabo el diseño de la arquitectura de control y la implementación de los distintos modos de operación. Posteriormente, se procedió con el desarrollo de un sistema de detección de colisiones como mecanismo de seguridad complementario, junto con la integración de un sistema básico de gestión de inventario. Finalmente se realizaron pruebas y validaciones del sistema desarrollado. Adicionalmente, se evaluó el aporte del ASRS como herramienta didáctica para prácticas de laboratorio, demostraciones docentes y futuros trabajos de grado.

Planteamiento del Problema

La problemática general identificada se manifiesta en la ausencia total de operación del sistema. Si bien, los motores y drivers del ASRS se encontraban funcionales y habían sido sometidos a mantenimiento, no existía un sistema de control que permitiera accionar los drivers ni realizar pruebas de movimiento. En consecuencia, el ASRS no podía operar ni en modo manual ni automático, debido a la inexistencia de una arquitectura de control que habilitara la generación de señales de mando, la supervisión del estado del sistema y la ejecución de rutinas básicas de movimiento.

La principal causa de esta situación se atribuye a la obsolescencia de los sistemas de control originales del ASRS, los cuales habían quedado fuera de servicio y sin soporte técnico, impidiendo su operación normal. Esta condición generó como consecuencia la inexistencia práctica de una arquitectura de control industrial funcional que integrara de manera coherente los subsistemas del sistema. En particular, se evidenció (i) la ausencia de un sistema de control operativo que permitiera accionar y coordinar los ejes del robot cartesiano, (ii) la falta de mecanismos de supervisión e inventario que soportaran la lógica de almacenamiento y recuperación, y (iii) un esquema de seguridad insuficiente para un sistema con movimiento multieje, basado únicamente en protecciones internas de los drivers y sensores de límite en los extremos de recorrido. Estas limitaciones son consistentes con problemáticas reportadas en la literatura cuando sistemas ASRS antiguos no cuentan con procesos de actualización tecnológica o integración adecuada entre control, supervisión y seguridad, lo que compromete su confiabilidad y operatividad [4, 8]. Adicionalmente, la ausencia de repuestos y documentación actualizada del sistema original dificultaba cualquier intento de restauración directa, haciendo necesaria la redefinición completa de la arquitectura de control.

La ausencia de mecanismos activos de seguridad generaba riesgos para la integridad del sistema y de los usuarios. En sistemas ASRS con movimiento multieje, la falta de detección de colisiones puede derivar en impactos contra estructuras, estanterías o unidades de carga, comprometiendo la integridad del equipo y la confiabilidad del sistema [8]. En el caso particular del ASRS del CAP, la única condición de detención del sistema correspondía a la generación de errores por sobrecarga en los drivers de los motores, lo que implica que la detención se produciría únicamente después de que el actuador ejerciera fuerzas excesivas, el sistema ya había presentado daños mecánicos por esta causa.

En este contexto, se evidencia la necesidad de diseñar e implementar un sistema de control que permita reactivar el ASRS del CAP, habilitando su operación automatizada con mínima intervención humana, incorporando mecanismos de seguridad complementarios y una gestión básica de inventario. Asimismo, la solución propuesta debe permitir la validación del sistema en un entorno real y sentar las bases para su futura integración con la CMF, de modo que el ASRS pueda cumplir su función como plataforma didáctica.

Objetivos

3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar el sistema de control para el sistema automático de recuperación y almacenamiento (ASRS) de la celda de manufactura del CAP

3.2. Objetivos Específicos

- Determinar los requerimientos funcionales y no funcionales de la solución.
- Diseñar la arquitectura del sistema de control.
- Implementar el sistema de control para la solución.
- Diseñar e implementar un sistema de detección de colisiones.
- Realizar pruebas y validaciones de la solución y el sistema.
- Evaluar el aporte del ASRS como herramienta didáctica.

Marco de Referencia

4.1. Áreas Temáticas

El proyecto se enmarca en las siguientes áreas temáticas relacionadas con la automatización industrial, la robótica, los sistemas de control y la formación en ingeniería:

- Systems engineering and theory – System analysis and design – Industrial automation systems.
- Systems engineering and theory – Control – Motion control systems.
- Robotics and automation – Industrial robots – Cartesian robots.
- Robotics and automation – Automated storage and retrieval systems.
- Computers and information processing – Real-time systems – Industrial real-time control.
- Computers and information processing – Software – Programmable logic controllers.
- Computers and information processing – Software – Embedded software.
- Computers and information processing – Computer networks – Industrial communication protocols.
- Engineering education – Laboratory-based learning – Automation and control education.

Ver clasificación en <https://www.ieee.org/content/dam/ieee-org/ieee/web/org/pubs/ieee-taxonomy.pdf>.

4.2. Marco Teórico

El presente marco teórico tiene como objetivo establecer los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan el diseño e implementación de un sistema de control para un ASRS. Para ello, se abordan: (i) el contexto de la automatización industrial y la logística inteligente, (ii) los principios de operación y clasificación de los ASRS, (iii) el diseño físico y el diseño de control como dimensiones complementarias, (iv) el control de movimiento multieje y las arquitecturas de control industrial, (v) los sistemas de sensado, identificación y comunicación industrial, y (vi) consideraciones de confiabilidad y seguridad aplicables al dominio del problema.

La organización del marco busca explicar cómo los ASRS integran componentes mecánicos, eléctricos/electrónicos y de software para operar de manera segura y confiable, y cómo estos sistemas se articulan con las prácticas actuales de automatización industrial [5, 8, 9]. Adicionalmente, se reconoce el valor de los ASRS como plataformas didácticas para la formación en ingeniería, al permitir el aprendizaje integrado de control, automatización, sensórica, comunicaciones e inventarios [9, 7, 2, 1].

4.2.1. Automatización industrial y logística inteligente

La automatización industrial se define como la aplicación de sistemas de control, instrumentación y tecnologías de información para operar procesos con mínima intervención humana, garantizando repetibilidad, precisión y seguridad. En el ámbito logístico, la automatización del almacenamiento y el manejo de materiales es un factor determinante para mejorar productividad, reducir tiempos de operación y disminuir errores asociados a procesos manuales [5, 8].

En el marco de la Industria 4.0, los sistemas logísticos tienden a operar como sistemas ciberfísicos, donde el flujo físico de materiales se integra con un flujo digital de información para soportar trazabilidad, monitoreo en tiempo real y decisiones basadas en datos. En este contexto, tecnologías como controladores industriales, sistemas embebidos, identificación automática y software de gestión habilitan operaciones más eficientes y flexibles [9, 7].

4.2.2. Sistemas Automáticos de Almacenamiento y Recuperación (ASRS)

Los ASRS son sistemas de manejo de materiales destinados al almacenamiento y recuperación automática de unidades de carga mediante dispositivos de manipulación, estructuras de almacenamiento y un sistema de control que coordina movimientos y decisiones operativas. Su adopción se relaciona con la necesidad de incrementar densidad de almacenamiento, mejorar exactitud del inventario y elevar el desempeño logístico global [4, 6, 8].

Desde el punto de vista operativo, un ASRS ejecuta ciclos de almacenamiento, recuperación o ciclos combinados, cuyos resultados pueden evaluarse mediante métricas como tiempo de ciclo, *throughput*, utilización del sistema y confiabilidad. Estas métricas permiten comparar configuraciones, dimensionar capacidades y analizar el impacto del ASRS en el desempeño del almacén [6, 4].

4.2.2.1. Clasificación de los ASRS: criterios estructurales y funcionales

La clasificación de ASRS puede abordarse desde criterios de estructura, tipo de dispositivo de manipulación, patrón de movimiento, esquema de *picking* y tipo de unidades de carga, entre otros. La Figura 4.1 presenta una caracterización jerárquica que resume estas dimensiones y evidencia que un ASRS no es una solución única, sino una familia de configuraciones con compromisos distintos en velocidad, flexibilidad, complejidad de control y costo [4, 6].

De manera complementaria, en la literatura se describen tipologías ampliamente utilizadas en la práctica, como: *Unit Load ASRS* y *Mini Load ASRS* para diferentes escalas de carga, ASRS basados en shuttles, módulos de elevación vertical (VLM) y carruseles, además de enfoques robóticos

(AGV/AMR) en almacenes automatizados [10, 11, 12, 9]. Estas tipologías constituyen referencias para analizar alternativas de arquitectura y control en función del contexto de aplicación.

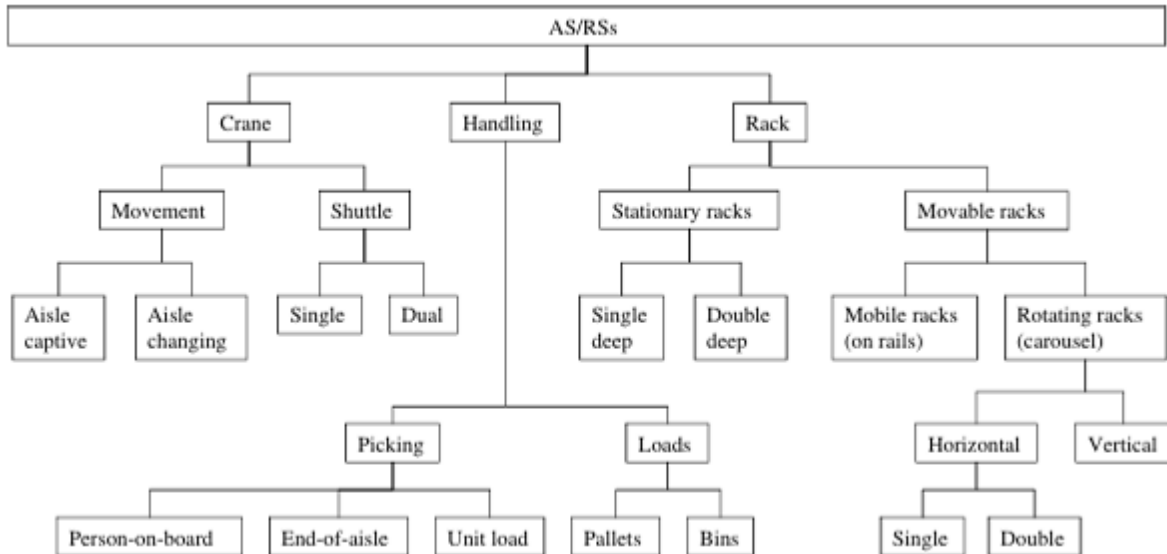


Figura 4.1: Caracterización general y criterios de clasificación de ASRS. (Tomado de [4]).

4.2.2.2. Diseño de un ASRS: diseño físico y diseño de control

El diseño de un ASRS puede conceptualizarse como la interacción entre dos dominios: el **diseño físico** y el **diseño de control**. El diseño físico comprende la selección de la configuración del sistema, su geometría, capacidad, estructura de racks y mecanismo de manipulación; mientras que el diseño de control abarca las decisiones lógicas y algorítmicas que determinan el comportamiento operativo del sistema: asignación de almacenamiento, políticas de *batching*, secuenciación de tareas y selección de puntos de espera (*dwell points*). La Figura 4.2 resume esta relación y destaca que la medición del desempeño conecta ambos dominios [4].

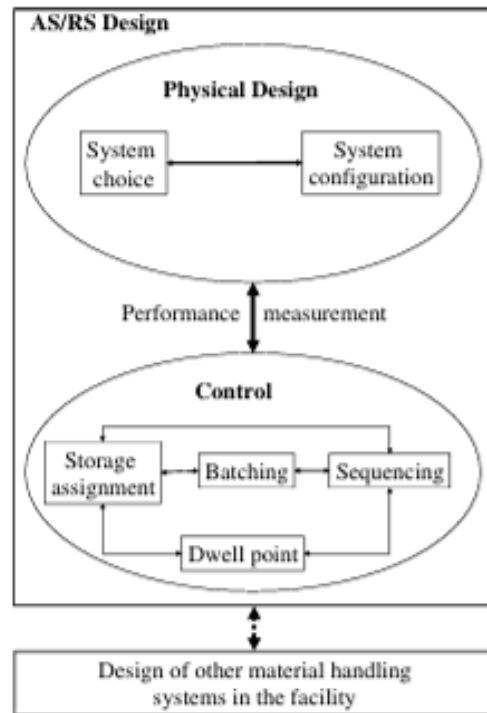


Figura 4.2: Relación entre diseño físico y diseño de control en ASRS y su vínculo con el desempeño. (Tomado de [4]).

Este marco permite analizar un ASRS como sistema integral: el desempeño logístico no depende únicamente de la estructura o del mecanismo de movimiento, sino también de las decisiones de control y de la integración con el resto de sistemas de manejo de materiales y producción [6, 8].

4.2.3. Robots cartesianos y mecanismos de manipulación en ASRS

Los robots cartesianos se caracterizan por movimientos ortogonales en ejes lineales, lo que simplifica la definición de posiciones discretas en matrices de almacenamiento y la implementación de trayectorias basadas en coordenadas. En ASRS, esta cinemática es compatible con racks organizados por filas y columnas, facilitando la asociación entre coordenadas físicas y ubicaciones de inventario [5, 4].

En comparación con otras soluciones de manipulación (p. ej., shuttles multinivel o robots móviles), los sistemas cartesianos suelen ofrecer alta repetibilidad y una relación directa entre la referencia geométrica del sistema y el espacio de trabajo. Estas características los hacen relevantes tanto en aplicaciones industriales como en entornos académicos orientados al aprendizaje de control de movimiento y automatización [9, 2, 1].

4.2.4. Control de movimiento en sistemas multieje

El control de movimiento en sistemas multieje comprende el conjunto de técnicas y arquitecturas destinadas a gobernar de forma coordinada la posición, velocidad y aceleración de múltiples actuadores, garantizando precisión, repetibilidad y operación segura. En aplicaciones industriales como los ASRS, el desempeño global del sistema depende directamente de la confiabilidad del control de movimiento y de su integración con la lógica secuencial del proceso [13, 14].

En robots cartesianos, el control de movimiento se implementa mediante el accionamiento independiente de ejes ortogonales, cuyas trayectorias se definen a partir de posiciones discretas previamente establecidas. En el contexto de los ASRS, esta estrategia es adecuada debido a que los movimientos requeridos corresponden principalmente a desplazamientos lineales en los ejes X, Y y Z, organizados en secuencias determinísticas, priorizando la repetibilidad del posicionamiento y la robustez operativa sobre la interpolación continua de trayectorias complejas [4, 12].

Una práctica extendida en el control industrial de movimiento es la utilización de perfiles de velocidad predefinidos, particularmente perfiles trapezoidales, los cuales permiten limitar de manera explícita las aceleraciones y desaceleraciones de los actuadores. Este enfoque contribuye a la reducción de esfuerzos mecánicos, a la disminución de vibraciones y a una mayor estabilidad del sistema. Aunque existen perfiles más avanzados, como las curvas en S, los perfiles trapezoidales continúan siendo ampliamente utilizados en aplicaciones industriales por su simplicidad de implementación y comportamiento predecible [13].

El control de movimiento puede implementarse mediante controladores dedicados o a través de controladores lógicos programables (PLC) que incorporan funcionalidades específicas para el manejo de ejes, tales como salidas de alta velocidad y generación de trenes de pulsos (Pulse Train Output, PTO). En esta arquitectura, el PLC asume el rol de coordinador del sistema, integrando la generación de señales de mando con la lógica secuencial del proceso, la supervisión del estado de los actuadores y la gestión de condiciones de seguridad [15].

En sistemas multieje, el control de movimiento debe considerar además mecanismos de protección y supervisión que permitan prevenir fallos y daños al sistema. La integración de sensores de límite, el monitoreo de estados de los drivers y la incorporación de mecanismos complementarios de detección de eventos anómalos constituyen prácticas habituales para incrementar la confiabilidad y seguridad de la operación. La literatura resalta que la ausencia de una integración adecuada entre control de movimiento y estrategias de protección puede afectar negativamente la disponibilidad y la vida útil de los ASRS [8].

Desde una perspectiva de mantenibilidad y uso académico, el empleo de PLC como núcleo del control de movimiento facilita la modificación de la lógica de control, la integración con sistemas de supervisión e interfaces hombre-máquina, y la extensión futura del sistema. Esta aproximación resulta especialmente pertinente en plataformas didácticas basadas en ASRS, donde se busca alinear la implementación con tecnologías ampliamente utilizadas en la industria y, al mismo tiempo, facilitar su comprensión y reutilización en contextos formativos.

4.2.5. Sistemas de control en ASRS y arquitecturas industriales

El sistema de control en un ASRS coordina subsistemas de accionamiento, sensado e interacción con el usuario, garantizando que las órdenes de almacenamiento y recuperación se ejecuten sin conflicto y dentro de condiciones seguras. En términos de arquitectura, se reconocen enfoques **centralizados, jerárquicos y distribuidos**. En arquitecturas centralizadas, un controlador principal concentra la lógica del sistema; en arquitecturas jerárquicas, el control de bajo nivel (tiempo real y seguridad) se separa de funciones supervisoras (gestión, planificación, interfaces); y en arquitecturas distribuidas, subsistemas o nodos inteligentes asumen funciones locales para mejorar modularidad y escalabilidad [16, 8].

En la práctica industrial, los PLC son una tecnología frecuente para control determinístico y robusto de automatización, mientras que capas de supervisión (HMI/SCADA) y software de gestión (WMS) permiten monitoreo, visualización de estados y administración de inventario [7, 8]. Esta separación por capas también resulta pertinente en ASRS con fines académicos, al permitir que diferentes módulos del sistema representen problemas reales de integración industrial [9, 2].

4.2.6. Sistemas embebidos y control auxiliar en automatización

Los sistemas embebidos, basados en microcontroladores o microprocesadores, se utilizan como nodos auxiliares en automatización para ejecutar tareas específicas de sensado, adquisición de datos, identificación o comunicación. Su utilización se asocia a ventajas como bajo costo, flexibilidad de integración y capacidad de implementar interfaces de comunicación de bajo nivel. En ASRS, estos nodos pueden complementar al PLC en funciones específicas, especialmente cuando se requiere integrar sensores o tecnologías de identificación que operan mediante buses como SPI o I2C.

Desde una perspectiva de ingeniería, la integración de sistemas embebidos con control industrial introduce problemáticas relevantes: interoperabilidad, temporización, sincronización de eventos y robustez ante ruido eléctrico, aspectos comunes en ambientes industriales

4.2.7. Sensado, detección de colisiones e instrumentación en ASRS

El sensado en ASRS cumple funciones críticas: detección de fin de recorrido, validación de posiciones, presencia de carga y prevención de eventos peligrosos como colisiones. Sensores inductivos y mecánicos suelen emplearse para límites y referencias, mientras que sensores capacitivos u otras soluciones de instrumentación pueden contribuir a detectar contacto o proximidad no deseada en zonas de riesgo [17].

La detección de colisiones es especialmente relevante en sistemas con movimiento multieje y operación automática, dado que una colisión puede comprometer integridad mecánica, generar fallos en actuadores o controladores, e introducir riesgos para el entorno. Por ello, la instrumentación y la estrategia de detección se consideran parte fundamental del diseño orientado a seguridad y confiabilidad [17, 8].

4.2.8. Identificación automática (RFID) y gestión de inventario en ASRS

La identificación automática permite vincular unidades físicas de carga con información digital del inventario. Entre las alternativas de identificación se encuentran códigos de barras, RFID y visión artificial; estas tecnologías habilitan trazabilidad y automatización en la gestión del almacenamiento [1, 6]. En particular, RFID es una tecnología relevante para ASRS por su capacidad de lectura sin contacto y su potencial para automatizar la actualización del inventario conforme se ejecutan operaciones de almacenamiento y recuperación [1, 2].

La gestión de inventario en un ASRS se relaciona con (i) el modelo de ocupación de ubicaciones, (ii) el mapeo entre identificadores de carga y posiciones del sistema, y (iii) las políticas operativas que determinan dónde almacenar o desde dónde recuperar. En el plano conceptual, estas funciones corresponden a capas superiores de control y se articulan con el desempeño del ASRS, de acuerdo con el marco de diseño físico-control presentado en la Figura 4.2 [4, 6].

4.2.9. Comunicación industrial y buses de comunicación en automatización

La comunicación industrial permite integrar controladores, sensores, actuadores y sistemas de supervisión. A nivel de planta, se emplean protocolos industriales (p. ej., Modbus, Profinet, Ethernet/IP) y, en escenarios de instrumentación y sistemas embebidos, buses y protocolos de bajo nivel (UART, RS-232, RS-485, SPI, I2C) para adquisición y transmisión de datos [5, 8]. La selección y coexistencia de múltiples mecanismos de comunicación responde a necesidades de interoperabilidad, disponibilidad de hardware y requerimientos de temporización.

En sistemas donde coexisten control industrial y software de supervisión/gestión, la comunicación soporta el intercambio de variables de proceso, estados, alarmas y comandos. En este sentido, la confiabilidad de la comunicación se considera un requisito transversal para operación segura y determinística, especialmente cuando el sistema ejecuta secuencias automáticas [8].

4.2.10. Confiabilidad, seguridad y normatividad aplicable

La operación de ASRS implica riesgos asociados al movimiento de ejes, manipulación de cargas y presencia de actuadores eléctricos. Por ello, la literatura resalta la necesidad de incorporar estrategias de seguridad y tolerancia a fallos, tales como paradas de emergencia, enclavamientos, sensores de límite, detección de colisiones y rutinas de detención controlada ante eventos anómalos [17, 8]. Estas prácticas contribuyen a proteger tanto la integridad del sistema como el entorno donde opera.

En cuanto a normatividad, incluso cuando el enfoque del proyecto es académico, el dominio del problema exige considerar estándares y buenas prácticas de seguridad industrial y robótica, así como criterios de diseño eléctrico y control seguro. Adicionalmente, se deben reconocer limitaciones contextuales (ambientales, sociales y económicas) relacionadas con el uso responsable de recursos, la sostenibilidad del mantenimiento y la disponibilidad de infraestructura institucional para la operación del sistema.

4.3. Trabajos Relacionados

4.3.1. Development of a Small-Scale Material Handling Machine for ASRS [1]

Yeo et al. presentan el desarrollo de una máquina de manejo de materiales a pequeña escala orientada a sistemas ASRS, con el objetivo de validar su funcionamiento mediante pruebas experimentales. El trabajo demuestra que es posible construir un prototipo funcional que permita evaluar conceptos fundamentales como repetibilidad, precisión y control del movimiento, utilizando una arquitectura simplificada respecto a sistemas industriales. Aunque el enfoque principal es técnico y experimental, el carácter reducido del sistema lo hace adecuado para contextos académicos, donde puede emplearse como plataforma de aprendizaje para introducir conceptos de automatización, robótica y sistemas de manejo de materiales.

4.3.2. Development of Low-Cost Multi-Input Automated Storage and Retrieval System [2]

En este trabajo se propone el diseño y desarrollo de un ASRS de bajo costo orientado a fines educativos, integrando múltiples métodos de entrada como control por coordenadas y sistemas de identificación. Los autores destacan que el sistema permite a los estudiantes interactuar con distintas estrategias de control y comprender el funcionamiento general de un ASRS sin requerir infraestructura industrial compleja. El estudio resalta el valor pedagógico del sistema como herramienta didáctica para la enseñanza de automatización, control de motores y sistemas embebidos, evidenciando su utilidad para reducir la brecha entre la teoría y la práctica en programas de ingeniería.

4.3.3. Development of Automated Storage and Retrieval System for Small Scale Industries [3]

Murali Krishna et al. abordan el desarrollo de un ASRS destinado a pequeñas industrias, con énfasis en la reducción de costos y la mejora de la eficiencia operativa. El estudio describe el diseño del sistema y su implementación para optimizar los tiempos de almacenamiento y recuperación, así como la gestión del inventario. Los resultados muestran que los ASRS pueden adaptarse a contextos industriales de menor escala, mejorando la trazabilidad de los productos y reduciendo errores asociados a procesos manuales. Este trabajo evidencia que la automatización del almacenamiento no es exclusiva de grandes empresas, sino que puede ser viable en distintos niveles productivos.

Materiales y Métodos

5.1. Enfoque metodológico

El proyecto se estructuró siguiendo el enfoque CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar, Operar), el cual tiene como finalidad organizar de manera sistemática las etapas de análisis del problema, diseño de la solución, Implementación técnica e integración operativa del sistema. A continuación, se describe paso a paso la metodología de Implementación adoptada.

5.2. Determinación de los requerimientos funcionales y no funcionales (CDIO – Concebir)

Durante la fase Concebir, se identificaron las necesidades técnicas y académicas asociadas al ASRS, considerando tanto el estado inicial del equipo como su rol dentro de la CMF. A partir de este análisis se definieron los requerimientos que guiaron el diseño del sistema de control, priorizando la robustez, la seguridad operativa y la alineación con prácticas industriales.

La definición de los requerimientos del sistema de control del ASRS se realizó a partir de un proceso de análisis previo orientado a comprender tanto el funcionamiento esperado del sistema en el momento de su adquisición como su estado real al inicio del proyecto. Este análisis incluyó la revisión del diseño físico del ASRS, la evaluación de los componentes electromecánicos existentes y la consulta con el coordinador del CAP respecto a las necesidades operativas y académicas del equipo.

A partir de esta información se identificaron las funciones que el sistema debía cumplir, entre las que se incluyen la ejecución de ciclos básicos de almacenamiento y recuperación, la coordinación del movimiento de los ejes cartesianos, la detección de condiciones de límite y la Implementación de mecanismos de parada segura. Estas funciones se tradujeron en **requerimientos funcionales**, mientras que aspectos como la seguridad, la confiabilidad y la posibilidad de uso académico fueron considerados como **requerimientos no funcionales**. Los requerimientos funcionales del sistema ASRS se presentan en la Tabla 5.1. De manera complementaria, los requerimientos no funcionales del sistema se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.1: Requerimientos funcionales del sistema ASRS

ID	Requerimiento	Descripción	Justificación
RF-01	Operación automática de almacenamiento	El sistema ASRS deberá ejecutar de manera autónoma el ciclo completo de almacenamiento de una unidad de carga, desde la orden de inicio hasta la confirmación de la ubicación asignada.	El almacenamiento automático constituye la función principal del ASRS; su ausencia invalida el sistema como tal.
RF-02	Operación automática de recuperación	El sistema deberá ejecutar el ciclo completo de recuperación automática de una unidad de carga previamente almacenada, garantizando la coherencia con el estado del inventario.	La recuperación es esencial para la trazabilidad y la funcionalidad integral del sistema de almacenamiento.
RF-03	Precisión de posicionamiento	El sistema deberá posicionar la unidad de carga dentro de una tolerancia compatible con la geometría del sistema y los requisitos de inserción y extracción segura.	La precisión es necesaria para evitar colisiones, errores de ubicación y fallos mecánicos durante la operación.
RF-04	Repetibilidad del sistema	El sistema deberá garantizar una repetibilidad adecuada al ejecutar ciclos consecutivos hacia una misma ubicación de almacenamiento.	La repetibilidad asegura estabilidad operativa y confiabilidad en la gestión del inventario.
RF-05	Ejecución del ciclo de almacenamiento	El sistema deberá completar el ciclo de almacenamiento dentro de un tiempo compatible con un entorno académico seguro y controlado.	Permite evaluar el desempeño del sistema sin priorizar la productividad sobre la seguridad.
RF-06	Ejecución del ciclo de recuperación	El sistema deberá completar el ciclo de recuperación de forma consistente con el ciclo de almacenamiento.	Facilita la comparación funcional y la evaluación simétrica del sistema.
RF-07	Actualización del inventario	El sistema deberá actualizar el estado del inventario de manera coherente tras cada operación de almacenamiento o recuperación.	Evita inconsistencias entre el estado físico y el estado lógico del sistema.
RF-08	Identificación correcta de unidades de carga	El sistema deberá identificar cada unidad de carga de forma correcta mediante un mecanismo de identificación automática.	Garantiza trazabilidad y correcta asignación de las unidades dentro del inventario.
RF-09	Detección de presencia de carga	El sistema deberá detectar la presencia o ausencia de carga antes de los movimientos críticos del sistema.	Previene errores de operación, colisiones y estados inseguros.
RF-10	Inicialización y referenciación	El sistema deberá ejecutar una secuencia de inicialización y referenciación que garantice la coherencia de las posiciones del sistema.	Requisito fundamental para asegurar consistencia espacial y operación confiable.
RF-11	Modos de operación	El sistema deberá disponer de modos de operación automático y manual, con restricciones funcionales activas durante ambos modos.	Permite un uso seguro y controlado en entornos académicos y de prueba.

Tabla 5.2: Requerimientos no funcionales del sistema ASRS

ID	Requerimiento	Descripción	Justificación
RNF-01	Seguridad funcional	El sistema deberá incorporar mecanismos que garanticen la transición a un estado seguro ante eventos de emergencia o fallo.	Protege al sistema, al entorno y a los usuarios durante la operación.
RNF-02	Limitación de velocidad	El sistema deberá operar dentro de rangos de velocidad compatibles con un entorno académico y de experimentación.	Reduce riesgos asociados a energía cinética y movimiento no controlado.
RNF-03	Operación segura en modo manual	En modo manual, el sistema deberá restringir su comportamiento para permitir la intervención humana de forma segura.	Minimiza riesgos durante tareas de ajuste, prueba y mantenimiento.
RNF-04	Disponibilidad operativa	El sistema deberá presentar un nivel de disponibilidad adecuado para su uso continuo en actividades académicas.	Asegura confiabilidad y continuidad en prácticas y experimentos.
RNF-05	Consistencia del inventario	El sistema deberá mantener coherencia entre el inventario físico y el inventario lógico tras la recuperación de la operación.	Garantiza confiabilidad global del sistema automatizado.
RNF-06	Observabilidad del sistema	El sistema deberá permitir la visualización del estado operativo, posiciones y estado del inventario durante su funcionamiento.	Favorece el aprendizaje y el análisis del comportamiento del sistema.
RNF-07	Mantenibilidad	El sistema deberá permitir ajustes y reconfiguraciones funcionales sin modificaciones profundas en la lógica de control.	Facilita la reutilización académica y la evolución del sistema.

5.3. Arquitectura general del sistema de control (CDIO – Diseñar)

El diseño de la arquitectura del sistema de control del ASRS se desarrolló como un proceso progresivo de análisis y estructuración, orientado a definir una base técnica robusta antes de la Implementación. En una primera etapa se realizó una evaluación del estado inicial del sistema, considerando los componentes de hardware disponibles, así como las condiciones eléctricas, mecánicas y de seguridad del equipo.

A partir de este análisis se definió una arquitectura de control modular y jerárquica, diseñada para soportar los modos de operación manual, coordenadas, homing y automático, y para permitir su integración futura con la CMF.

5.3.1. Arquitectura de control propuesta

La arquitectura se organiza en dos configuraciones operativas:

- **Arquitectura básica:** empleada en los modos manual, coordenadas y homing. En esta configuración el PLC ejecuta el control del movimiento y la lógica principal del sistema, con

interacción del usuario a través de la HMI o de la interfaz del computador. La detección de colisiones permanece activa mediante el sistema embebido.

- **Arquitectura extendida:** utilizada en el modo automático. Incorpora un computador de control que asume la planificación de trayectorias y la gestión del inventario, manteniendo al PLC como ejecutor del movimiento y autoridad de seguridad.

El sistema se rige por un esquema de jerarquía de control claramente definido, en el cual el Controlador Lógico Programable (PLC) actúa como el ente principal responsable del control del movimiento y de la gestión de la seguridad del sistema. Por su parte, el computador de control asume el rol de planificación únicamente cuando el sistema opera en modo automático. Asimismo, el PLC cuenta con la capacidad de invalidar cualquier orden externa en caso de detectarse una condición de riesgo o un fallo operativo, garantizando así la integridad y seguridad del sistema. La detección de colisiones permanece activa de manera permanente como medida preventiva, mientras que la lectura mediante tecnología RFID se ejecuta exclusivamente bajo solicitud expresa del computador de control.

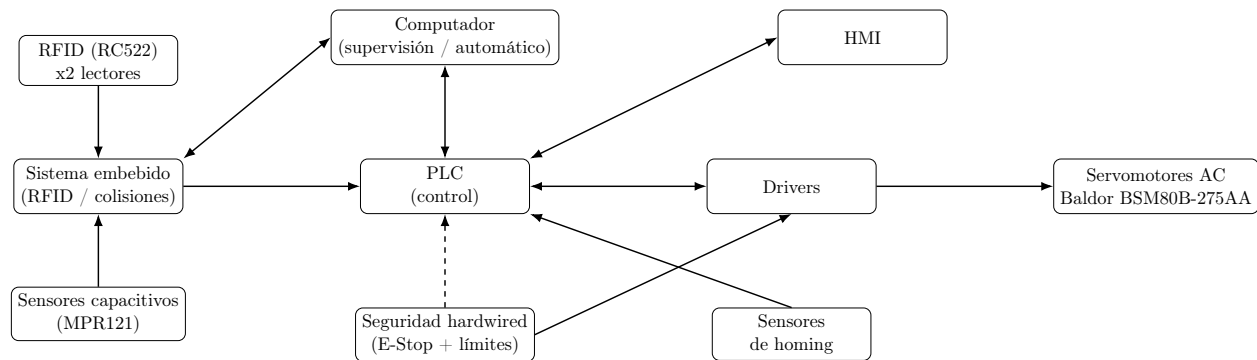


Figura 5.1: Diagrama de bloques de la arquitectura de control del ASRS.

En esta figura se representa la señal de seguridad en línea punteada porque no está cableada directamente al PLC. Las líneas continuas con flecha son las señales y si tienen flecha en ambos lados es que son bidireccionales.

5.3.2. División en módulos funcionales y responsabilidades

El sistema se divide en cinco módulos principales: (i) control y seguridad (PLC), (ii) automatización y planificación (PC), (iii) colisiones e identificación (sistema embebido), (iv) accionamiento (drivers y actuadores) y (v) interfaz de usuario (HMI y GUI en PC). La Tabla 5.3 resume sus responsabilidades.

Tabla 5.3: Módulos funcionales y responsabilidades principales del ASRS.

Módulo	Responsabilidades
PLC (control y seguridad)	Ejecución del movimiento en los modos manual, coordenadas, homing y automático. Gestión de señales de homing, sensores de límite y E-Stop. Supervisión de condiciones de seguridad y fallo. Invalidación de órdenes externas ante eventos de seguridad.
PC (automatización e inventario)	En modo automático: planificación de trayectorias y secuencias de almacenamiento y recuperación. Gestión del inventario y asociación de identificadores RFID con ubicaciones. Envío de comandos de alto nivel al PLC y recepción de estados del sistema. Interfaz de usuario para los modos manual, coordenadas, homing y automático.
Sistema embebido (colisiones e identificación)	Detección de colisiones siempre activa mediante sensor capacitivo MPR121. Generación de señal digital ante evento de colisión. Adaptación de señal de 5 V a 24 V mediante módulo de relés para ingreso a entradas NPN del PLC. Lectura RFID bajo demanda del PC mediante dos módulos RC522.
Drivers y actuadores (accionamiento)	Accionamiento de servomotores AC Baldor BSM80B-275AA mediante drivers Baldor FlexDrive FD2A02TR-RN23. El driver cierra el lazo de control de posición con el encoder del servomotor y ejecuta las consignas de movimiento. Recepción de referencias desde el PLC (PUL/DIR por PTO) y entrega de señales de estado (fin de movimiento/fallo) para supervisión.
Interfaz de usuario (HMI y PC)	HMI local para operación de los modos manual, coordenadas y homing, y visualización de estados. Interfaz gráfica en el PC para operación de todos los modos, incluyendo el modo automático y la gestión de inventario.

La figura 5.2 describe la jerarquía de los módulos de la arquitectura de control

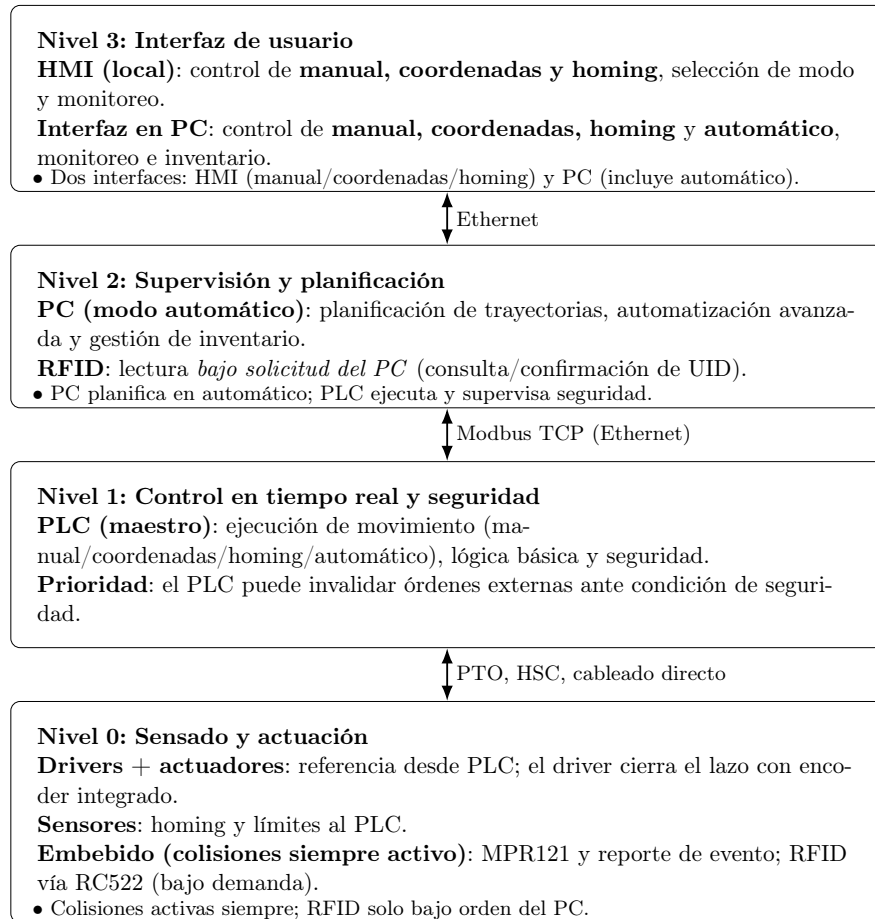


Figura 5.2: Esquema conceptual por niveles de control, interfaces disponibles y responsabilidades del ASRS.

5.3.3. Comunicación entre módulos

La comunicación entre módulos se definió considerando confiabilidad, inmunidad al ruido, facilidad de Implementación e integración. La Tabla 5.4 resume medio físico, protocolo y función de cada enlace. En caso de pérdida de comunicación PLC-PC, el sistema detiene el movimiento y transita a un estado seguro definido por la lógica del PLC.

Tabla 5.4: Resumen de comunicaciones entre módulos del sistema.

Enlace	Medio físico	Protocolo / Señal	Propósito
PLC – PC	Ethernet	Modbus TCP (PC: PyModbusTCP)	Intercambio bidireccional de comandos, estados y sincronización para el modo automático. Ante pérdida de comunicación, el PLC detiene el movimiento y pasa a estado seguro.
HMI – PLC	Ethernet	Protocolo nativo del fabricante	Selección de modos (manual, coordenadas y homing), ejecución de comandos locales y visualización del estado del sistema.
Sistema embebido – PC	RS485	UART (protocolo personalizado)	Transmisión de UID RFID (bajo demanda) y eventos de colisión para supervisión y registro.
Sistema embebido – MPR121	I ² C	I ² C	Lectura de canales de sensado capacitivo para detección de colisiones.
Sistema embebido – RC522 (x2)	SPI	SPI	Lectura de UID RFID desde dos lectores ubicados en la bandeja de recogida de pallets.
PLC – Drivers	Cableado dedicado	PUL/DIR (PTO) + señales de estado	Envío de referencias de movimiento (pulso/dirección) y recepción de señales de estado para verificación de fin de movimiento y condiciones de fallo.

5.3.4. Arquitectura de seguridad

El sistema cuenta con un **E-Stop físico cableado** que actúa sobre un relé de seguridad, desenergizando un contactor encargado de alimentar los actuadores. Se disponen tres grupos de sensores: (i) sensores de homing para referencia de ejes, (ii) sensores inductivos de límite, cuya activación genera alarma y desenergiza los actuadores y (iii) sensores capacitivos para detección de colisiones en bandeja, su activación genera alarma y desenergiza los actuadores. Ante colisión, límites o E-Stop, el sistema ejecuta una **parada de emergencia de categoría 0** (corte inmediato de energía).

Tabla 5.5: Eventos de seguridad y respuesta del sistema de control del ASRS.

Evento	Origen	Respuesta del sistema
Parada de emergencia (E-Stop)	Pulsador físico cableado duro; relé de seguridad y contactor de potencia	Parada de emergencia categoría 0 : desenergización inmediata de los actuadores mediante relé de seguridad y apertura del contactor de potencia.
Activación de sensor de límite	Sensores inductivos NBB1.5-8GM40-E2-V1 conectados al PLC	Generación de alarma y desenergización de actuadores. El PLC invalida órdenes externas y mantiene el sistema en estado seguro.
Evento de colisión en bandeja	MPR121 → sistema embebido → módulo de relés → entrada NPN del PLC	El MPR121 detecta un cambio de capacitancia y lo reporta al sistema embebido (I ² C). El embebido activa una salida digital de 5 V hacia un módulo de relés, el cual adapta la señal a 24 V para ingresar a una entrada NPN del PLC. El PLC ejecuta paro y activa alarma por lógica, manteniendo el monitoreo de colisiones siempre activo.

5.4. Materiales y componentes hardware (CDIO – Diseñar / Implementar)

5.4.1. Controlador lógico programable

El controlador principal del ASRS se seleccionó a partir de los requerimientos mínimos de entradas/salidas y, principalmente, de capacidad de *motion control*. El sistema exige, como mínimo, 16 entradas digitales (DI), 18 salidas digitales (DO), 3 salidas de tren de pulsos (PTO) y 3 entradas de conteo rápido (HSC). En una etapa inicial se empleó un Allen-Bradley Micro850 disponible en laboratorio para pruebas preliminares; sin embargo, su capacidad limitada de PTO restringe el control independiente de ejes y compromete la escalabilidad, por lo que se descartó como solución definitiva.

Posteriormente se compararon controladores comerciales (Tabla 5.6), priorizando PTO/HSC integrados, operación simultánea de ejes y costo relativo. Con base en esta comparación se seleccionó el **Xinje XD5E-60T10-C**, al cumplir los requerimientos de *motion control* sin requerir módulos adicionales y al ser el de menor costo.

Tabla 5.6: Comparación de PLC evaluados para el control del ASRS
(3 PTO y 3 HSC)^{1,2,3}

Modelo	DI	DO	PTO	HSC	Precio (COP)	Observaciones
Xinje XD5E-60T10-C	36	24	4	4	1 800 000 – 2 100 000	E/S muy cercanas al requerimiento del ASRS; orientado a motion (PTO/HSC integrados).
Mitsubishi FX5UJ-60MT/ES	36	24	3	8	5 200 000 – 5 800 000	E/S equivalentes al XD5E; soporta posicionamiento por pulsos (PTO) y mayor número de HSC.
Allen-Bradley Micro850 2080-L50E-48QBB	28	20	3	6	2 800 000 – 3 400 000 + 1 800 000 (3 modulos HSC)	Menor densidad de E/S que el XD5E (posible requerir expansión); hasta 3 ejes PTO y hasta 6 HSC; Ethernet/IP.
Siemens S7-1200 CPU 1215C (6ES7215-1AG40-0XB0)	14	10	4	6	3 900 000 – 4 700 000	Cumple PTO/HSC (hasta 4/6), pero E/S base bajas para el ASRS; típicamente requiere módulos de expansión para alcanzar 36/24.

Nota: (1) Solo se incluye PLC con al menos 3 PTO y 3 HSC. (2) El precio del **Siemens 1215C** corresponde a referencia en tienda colombiana. (3) Los demás precios son estimaciones de referencia convertidas desde listados en USD con una tasa USD/COP reciente (pueden variar por proveedor, impuestos y disponibilidad).

5.4.2. Actuadores y drivers

El sistema ASRS emplea servomotores de corriente alterna para el accionamiento de los ejes cartesianos X, Y y Z, los cuales se encuentran acoplados a drivers industriales Baldor FlexDrive. Estos componentes formaban parte de la infraestructura existente del sistema y cumplen con los requerimientos de una solución industrial en términos de robustez, precisión y confiabilidad.

En particular, se utilizan servomotores Baldor referencia BSM80B-275AA, controlados mediante drivers Baldor FlexDrive modelo FD2A02TR-RN23. Aunque estos elementos no se encontraban operativos al inicio del proyecto debido a la ausencia de un sistema de control funcional, fueron sometidos a procesos de mantenimiento preventivo y verificación eléctrica y mecánica, garantizando su correcto funcionamiento durante la etapa de integración.

El control del movimiento se realiza de forma jerárquica. El PLC Xinje XD5E-60T10-C actúa como generador de referencias de movimiento, mientras que los drivers se encargan del control

directo de los motores. Cada driver cierra internamente el lazo de control de posición utilizando el encoder integrado del servomotor, regulando corriente y velocidad de acuerdo con las consignas recibidas.

La integración entre el PLC y los drivers se Implementara mediante trenes de pulsos generados por las salidas Pulse Train Output (PTO) del PLC, empleando el esquema de control pulso/dirección (PUL/DIR). A través de esta interfaz, el PLC define el sentido de giro, la velocidad y el desplazamiento de cada eje, mientras que los drivers ejecutan el movimiento con precisión.

Adicionalmente, los drivers proporcionan señales de estado hacia el PLC, utilizadas para verificar la finalización de los movimientos y detectar condiciones anómalas (fallos de servo o pérdida de referencia). Este esquema permite al PLC supervisar el comportamiento del sistema sin asumir el control de bajo nivel del motor.

5.4.3. Sensores y dispositivos de seguridad e identificación

La seguridad del sistema ASRS se aborda mediante la combinación de sensores de referencia, dispositivos de protección física cableados y sistemas complementarios de detección de colisiones. En conjunto, estos elementos permiten garantizar un funcionamiento seguro del sistema, evitando sobreesfuerzos mecánicos, colisiones no previstas y daños en los componentes electromecánicos.

Sensores inductivos de homing

Para la referencia inicial de los ejes cartesianos X, Y y Z se emplean sensores inductivos industriales **NBB1.5-8GM40-E0-V1**, instalados en posiciones previas a los sensores de seguridad. Estos sensores permiten definir una posición de referencia repetible para cada eje durante el proceso de homing.

La activación de un sensor de homing es utilizada por el PLC para establecer el origen de coordenadas del sistema, sin provocar la detención de emergencia del movimiento. De esta forma, se garantiza una inicialización controlada del ASRS antes de la ejecución de cualquier modo de operación.

Sensores inductivos de límite y seguridad

Adicionalmente, cada eje cartesiano del ASRS cuenta con sensores inductivos industriales **NBB1.5-8GM40-E2-V1** instalados en los extremos de su recorrido. Estos sensores permiten detectar cuando un eje alcanza o supera los límites físicos de desplazamiento definidos por el diseño mecánico del sistema.

La activación de cualquiera de estos sensores dispara el circuito de seguridad, el cual interrumpe la alimentación de los accionamientos (desenergización de motores) mediante relé/contactador y, en paralelo, genera una señal de alarma que es leída por el PLC. Con base en dicha señal, el PLC inhibe las órdenes de movimiento y registra el evento para fines de supervisión. Estos sensores constituyen el principal mecanismo de protección física del sistema y permanecen activos durante todos los modos de operación.

Proceso de selección del sistema de detección de colisiones

De manera complementaria a los sensores de límite, se identificó la necesidad de Implementar un mecanismo de detección de colisiones en la bandeja encargada del transporte de los pallets. Este requerimiento surge debido a la posibilidad de contactos no previstos entre la bandeja del elevador y elementos del entorno, particularmente en las zonas de interacción con las estanterías y la banda transportadora.

Durante las etapas iniciales del diseño se desarrollaron diversos prototipos de detección de colisiones basados en sensores mecánicos de tipo *switch*. No obstante, estas soluciones presentaron limitaciones significativas asociadas al espacio reducido disponible en el sistema, así como a la complejidad mecánica y al riesgo de interferencias físicas durante el movimiento.

A partir de estas restricciones, se descartaron las soluciones mecánicas y se inició la evaluación de alternativas de sensado sin contacto, enfocadas en sensores capacitivos.

Detección de colisiones mediante sensor capacitivo MPR121

Como resultado del proceso de evaluación, se seleccionó una solución basada en el sensor capacitivo **MPR121**, el cual permite monitorear múltiples canales de entrada y utilizar electrodos personalizados.

La Implementación final emplea **cintas de cobre dispuestas alrededor de la bandeja del elevador** como electrodos capacitivos. Estas cintas permiten detectar variaciones de capacitancia asociadas a la proximidad o contacto con objetos externos, posibilitando la detección de colisiones desde distintos lados de la bandeja sin añadir componentes mecánicos adicionales.

El sensor MPR121 es gestionado por un sistema embebido dedicado, encargado de la adquisición y el procesamiento de las señales capacitivas. Cuando se detecta una colisión, el sistema embebido genera una señal digital de alerta que es adaptada eléctricamente mediante un módulo de relés y enviada al PLC, provocando la detención del movimiento y la activación de una alarma.

Este sistema de detección de colisiones actúa como un mecanismo de seguridad funcional complementario a los sensores inductivos, permaneciendo activo durante todos los modos de operación del ASRS.

Identificación de pallets mediante sensores RFID

La identificación de las unidades de carga se realiza mediante sensores RFID basados en módulos **RC522**, instalados en la bandeja encargada de la recogida de los pallets. Estos sensores permiten la lectura del identificador único (UID) de las etiquetas RFID asociadas a cada unidad de carga.

Los módulos RC522 son gestionados por el sistema embebido, el cual se encarga de la comunicación y el procesamiento de la información de identificación. La lectura RFID se realiza únicamente bajo solicitud del computador de control, en función de los requerimientos del modo automático.

La selección de los módulos RC522 se fundamentó en su **bajo costo**, su **amplia disponibilidad** y su **facilidad de integración con sistemas embebidos**, dado que cuentan con interfaces estándar como SPI y una extensa documentación técnica. Estas características permitieron su incorpo-

ración al sistema sin requerir modificaciones significativas en la arquitectura de hardware existente, cumpliendo adecuadamente con los requerimientos de identificación definidos para el ASRS.

5.4.4. Sistema embebido de adquisición e identificación

Además del controlador principal basado en PLC, el ASRS incorpora un **sistema embebido dedicado** para la adquisición y el procesamiento de señales provenientes de sensores especializados, así como para la identificación de las unidades de carga mediante tecnología RFID. Este sistema embebido no interviene en el control del movimiento, sino que actúa como un subsistema auxiliar de sensado y acondicionamiento de señales, manteniendo la lógica crítica de operación y seguridad en el PLC.

Funciones gestionadas por el sistema embebido

El sistema embebido centraliza dos funciones principales:

- **Detección de colisiones en la bandeja:** lectura del sensor capacitivo MPR121 mediante bus I²C y generación de una señal digital de evento ante una condición de colisión. Esta función permanece activa durante todos los modos de operación.
- **Identificación RFID:** gestión de dos lectores RFID RC522 mediante interfaz SPI para la lectura del identificador único (UID) de los pallets. La lectura RFID se realiza únicamente bajo solicitud del computador de control.

Ante la detección de una colisión, el sistema embebido genera una señal digital de 5 V que es adaptada eléctricamente mediante un módulo de relés a 24 V, permitiendo su conexión a una entrada NPN del PLC para la ejecución del paro y la activación de la alarma correspondiente.

Selección de la plataforma embebida

Para la Implementación del sistema embebido se utilizó hardware basado en **Arduino Nano** (ATmega328). Esta decisión se fundamentó en criterios técnicos, económicos y de disponibilidad, alineados con los requerimientos reales del sistema.

Desde el punto de vista funcional, el ATmega328 ofrece un conjunto de recursos suficiente para la aplicación: interfaces **SPI** (lectores RC522), **I²C** (sensor MPR121) y **UART** para comunicación externa, así como un número adecuado de entradas y salidas digitales para la generación de señales de evento. El dispositivo opera a 5 V, lo cual facilita la integración eléctrica con los módulos de sensado y el acondicionamiento de señales hacia el PLC.

En cuanto al entorno de desarrollo, el firmware fue Implementado en **lenguaje C** utilizando el compilador **AVR-GCC**, lo que permitió control directo del hardware, independencia del entorno Arduino y coherencia con prácticas de programación embebida de bajo nivel.

Comparación con plataformas alternativas

Con el fin de justificar la selección del Arduino Nano, se evaluaron plataformas embebidas de características similares. La Tabla 5.7 presenta una comparación resumida.

Tabla 5.7: Comparación de plataformas embebidas para el sistema de sensado e identificación (mínimo: 2×RC522 + 1×MPR121).

Plataforma	Voltaje lógico	Interfaces relevantes	Costo aprox. (COP)	Evaluación para el ASRS
Arduino Nano (ATmega328)	5 V	SPI (2×RC522), I ² C (MPR121), UART	22 000 – 30 000	Cumple el mínimo requerido de interfaces (SPI e I ² C) para dos lectores RFID y un sensor capacitivo. Plataforma compacta, ampliamente documentada.
Arduino Pro Mini (ATmega328)	5 V	SPI (2×RC522), I ² C (MPR121), UART	15 000 – 35 000	Soporta el mínimo de sensado e identificación; requiere hardware externo para programación y mayor esfuerzo de integración en pruebas.
STM32F103C8T6 (“Blue Pill”)	3.3 V	SPI (2×RC522), I ² C (MPR121), UART (múltiples)	20 000 – 45 000	Cumple ampliamente el mínimo de interfaces; mayor capacidad de procesamiento, pero exige adaptación de niveles lógicos y mayor complejidad de desarrollo.
ESP32	3.3 V	SPI (2×RC522), I ² C (MPR121), UART + Wi-Fi/BT	26 000 – 60 000	Cumple el mínimo técnico; incorpora conectividad inalámbrica no requerida, aumentando la complejidad sin beneficios funcionales directos.

La elección del Arduino Nano se justifica, además, por el hecho de que el hardware ya se encontraba disponible, lo que permitió reducir el costo incremental del proyecto y acelerar la etapa de integración. Asimismo, esta plataforma cuenta con documentación técnica de alta calidad y am-

pliamente disponible, respaldada por una comunidad extensa de desarrolladores, lo que facilita la implementación, depuración y mantenimiento del sistema embebido. Dado que los requerimientos de procesamiento y comunicación del sistema son moderados, el uso de plataformas de mayor capacidad no representaba una mejora funcional significativa y habría incrementado innecesariamente la complejidad del sistema.

5.5. Herramientas de software y lenguajes de programación (CDIO – Implementar)

La Implementación del sistema ASRS se realizó empleando distintas herramientas de software y lenguajes de programación, seleccionados de acuerdo con el rol de cada subsistema dentro de la arquitectura de control. El **PLC** se programó utilizando **Ladder** mediante el entorno **XDpro**, por tratarse de un lenguaje estándar en automatización industrial que facilita la lectura, mantenimiento y validación de la lógica de control. La automatización y supervisión en el **computador** se desarrolló en **Python**, seleccionado por su flexibilidad, amplia disponibilidad de librerías y facilidad de integración con sistemas externos. El **sistema embebido** fue programado en **lenguaje C** utilizando el entorno **MPLAB X** y el compilador **AVR-GCC**, debido a su control directo del hardware, eficiencia en el uso de recursos y compatibilidad con microcontroladores AVR. Para el diseño y documentación del sistema se emplearon herramientas CAD y ECAD industriales, incluyendo **SolidWorks**, **SolidWorks Electrical** y **KiCad**, seleccionadas por su uso extendido en entornos de ingeniería y su compatibilidad con procesos de diseño mecánico, eléctrico y electrónico integrados.

5.6. Métodos, técnicas y algoritmos Implementados (CDIO – Diseño / Implementación)

5.6.1. Control de movimiento

El control de movimiento del ASRS se implementó mediante la generación de señales de tipo *Pulse Train Output* (PTO) desde el PLC hacia los drivers de los motores, utilizando el esquema **PUL/DIR**. Los desplazamientos de los ejes se definieron como secuencias discretas asociadas a posiciones preestablecidas dentro del sistema de almacenamiento y recuperación.

Para el control de la velocidad y la aceleración se emplearon perfiles de movimiento trapezoidales, los cuales permiten limitar de forma explícita las aceleraciones y desaceleraciones, reduciendo esfuerzos mecánicos y favoreciendo la estabilidad del sistema durante la operación.

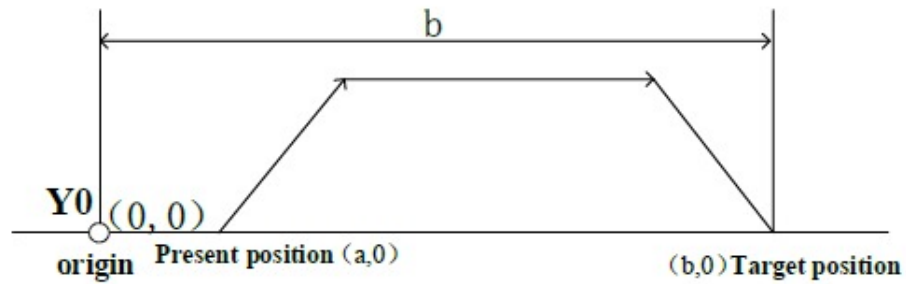


Figura 5.3: Perfil de velocidad para el movimiento por coordenadas. Tomado de manuales Xinje

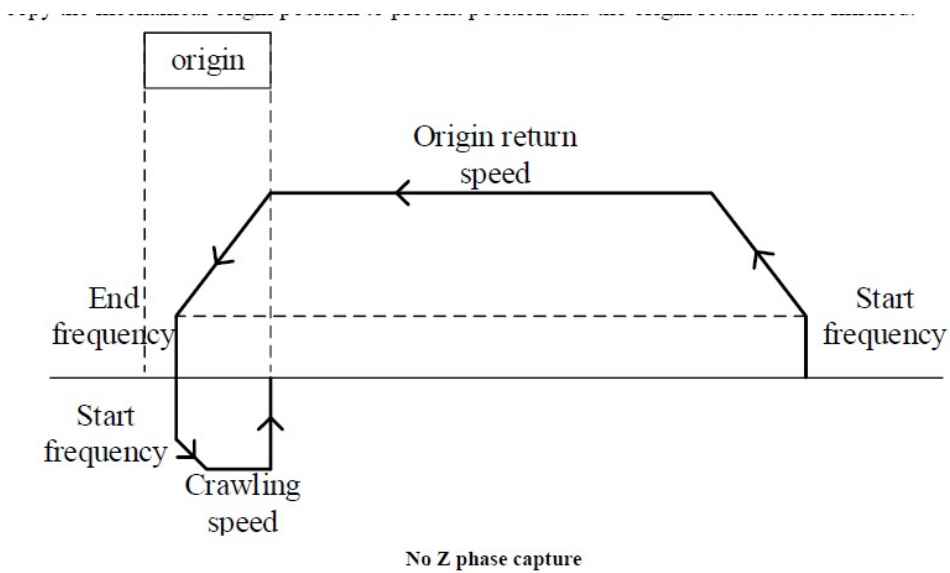


Figura 5.4: Perfil de velocidad Homing. Tomado de manuales Xinje

5.6.2. Lógica secuencial y coordinación del proceso

La lógica de control del ASRS se estructuró mediante una secuencia de estados encargada de coordinar las distintas etapas del proceso de almacenamiento y recuperación. Esta lógica integra el control de movimiento de los ejes, la lectura de sensores y la validación de condiciones de seguridad antes de la ejecución de cada acción.

El uso de una estructura secuencial facilita la comprensión del proceso, la depuración del programa y la modificación futura del sistema.

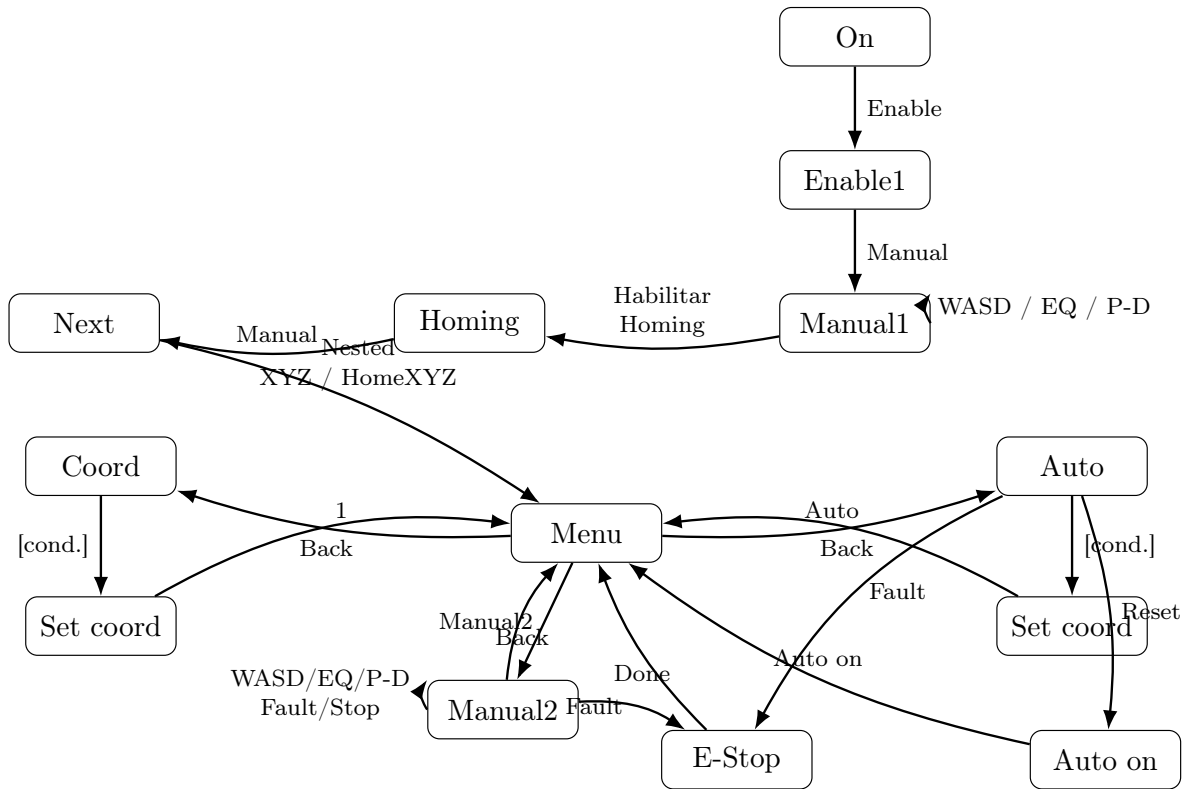


Figura 5.5: Máquina de estados general del sistema de control del ASRS.

5.6.3. Seguridad y detección de colisiones

El sistema incorpora mecanismos de seguridad a nivel físico (cableado duro) y funcional (lógica de control). Los sensores inductivos de homing y de límite actúan como protección primaria del movimiento. La detección de colisiones se Implementara mediante el sensor capacitivo MPR121 gestionado por el sistema embebido; ante un evento de colisión, el PLC procesa la señal recibida y ejecuta rutinas de paro y alarma, manteniendo la autoridad de seguridad del sistema.

5.6.4. Gestión básica de inventario

Como parte del sistema de control se Implementará una gestión básica de inventario, orientada a asociar las posiciones del ASRS con los elementos almacenados. Esta funcionalidad permite registrar de manera elemental la ubicación de los objetos y sirve como base para futuras ampliaciones del sistema.

5.7. Proceso de desarrollo e integración del sistema (CDIO – Implementar / Operar)

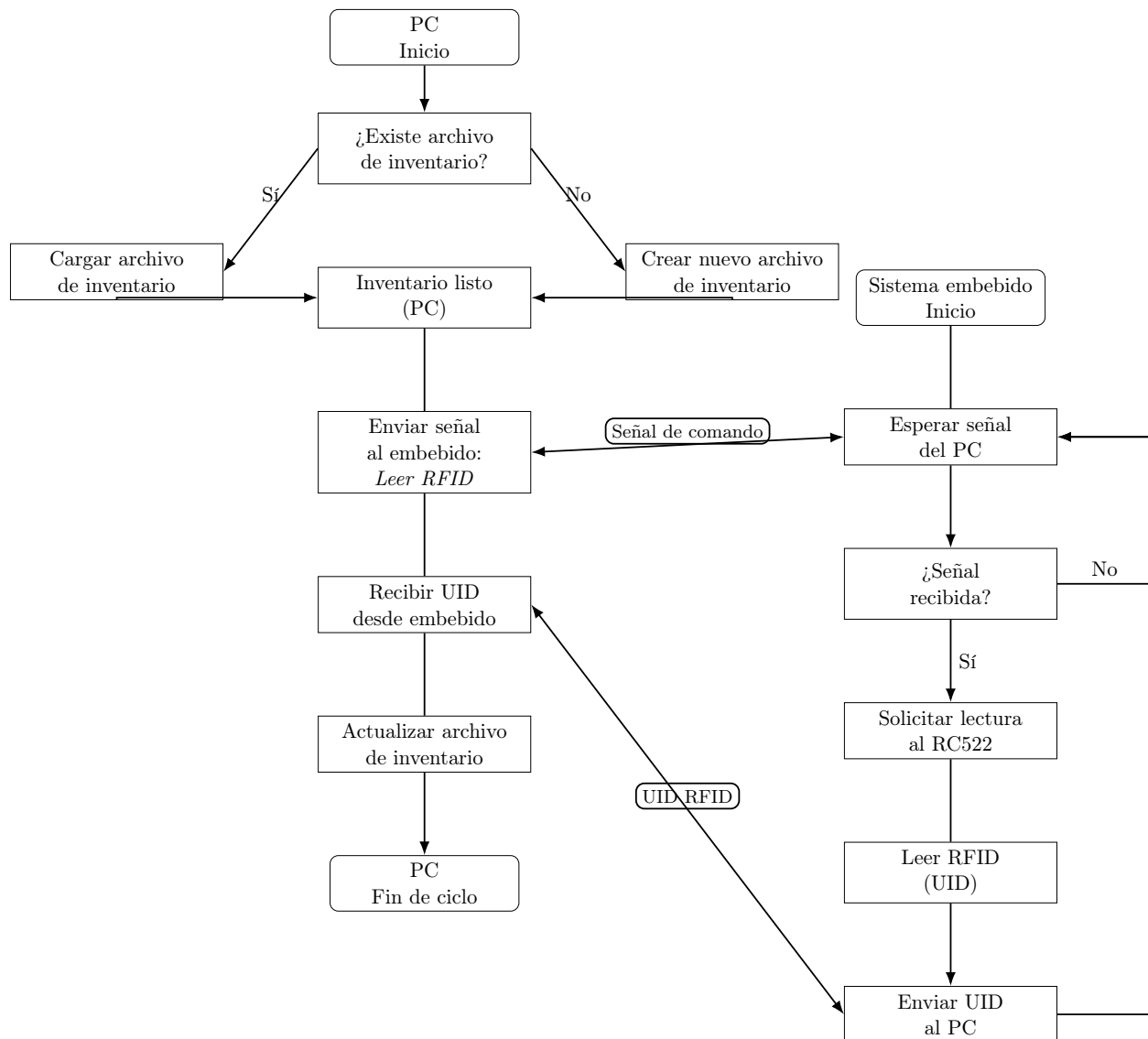


Figura 5.6: Diagrama de flujo del proceso de inventario: verificación/creación de archivo en el PC y lectura RFID bajo demanda en el sistema embebido (ciclo continuo).

5.7. Proceso de desarrollo e integración del sistema (CDIO – Implementar / Operar)

La integración del sistema de control del ASRS se realizó mediante una estrategia progresiva, orientada a asegurar la compatibilidad entre subsistemas y a minimizar riesgos durante la puesta en operación. El proceso se centró en integrar de forma controlada los distintos niveles del sistema

—control, supervisión y sensado— validando cada etapa antes de avanzar a la siguiente.

En una primera fase se integró la arquitectura básica de control, estableciendo el PLC como eje central del sistema y verificando la correcta interacción con los drivers y actuadores. Esta integración permitió disponer de una base estable sobre la cual incorporar funcionalidades adicionales sin comprometer la seguridad ni el control del movimiento.

Posteriormente, se integró el nivel de automatización, conectando el computador de control con el PLC y validando el intercambio de órdenes y estados necesarios para la ejecución de secuencias automáticas. Esta etapa se abordó una vez asegurado el funcionamiento del control básico, de modo que los posibles fallos de comunicación o lógica pudieran aislarse sin afectar la operación manual del sistema.

En una tercera fase se integró el sistema embebido de sensado, encargado de la detección de colisiones y de la identificación RFID. Para facilitar su incorporación al sistema y garantizar una integración eléctrica y mecánica confiable, se diseñó y fabricó una placa de circuito impreso (PCB) dedicada, que permitió concentrar los dispositivos de sensado y los circuitos de adaptación de señal en un único módulo compacto. La Figura 5.7 muestra la PCB desarrollada para este propósito.

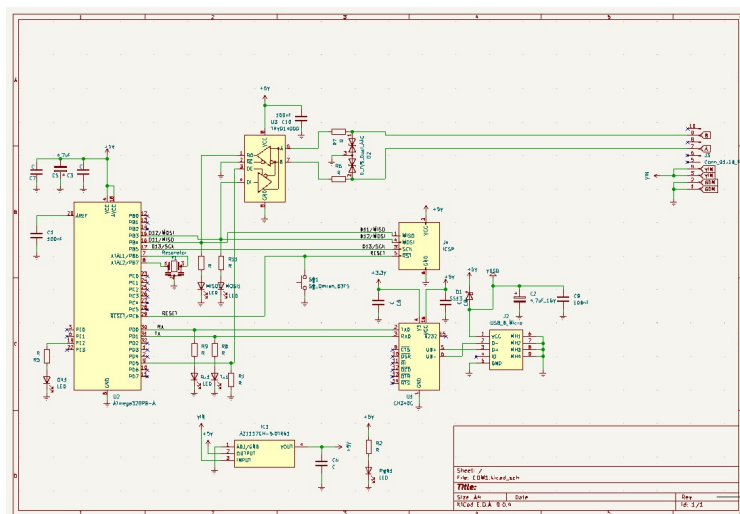


Figura 5.7: Esquemático PCB.

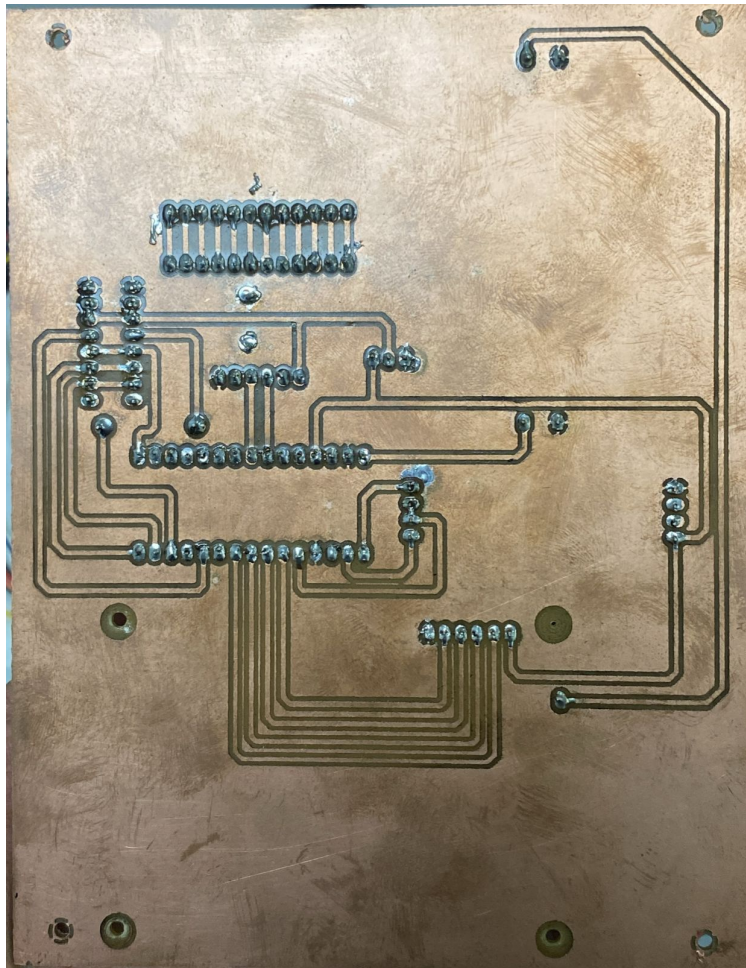


Figura 5.8: PCB realizada en el CAP.

Finalmente, se realizó la integración global del sistema, conectando simultáneamente los subsistemas de control, automatización y sensado, y verificando su funcionamiento conjunto en el entorno real del CAP. Este enfoque de integración por etapas permitió detectar y corregir incompatibilidades de forma temprana y asegurar una operación coherente y estable del ASRS antes de su validación formal.

5.8. Plan de pruebas y estrategia de validación (CDIO – Implementar / Operar)

La validación del sistema ASRS se definió a partir de los requerimientos funcionales (RF) y no funcionales (RNF) establecidos en la fase *Concebir*. Cada requerimiento se adoptó como **criterio de aceptación** y se asoció a una o más pruebas de validación del **sistema integrado**, garantizando

trazabilidad entre especificación, verificación y evidencia.

El plan de pruebas se orientó a comprobar el comportamiento global del ASRS una vez integrados todos sus subsistemas mecánicos, eléctricos y de control. Las pruebas individuales por componente o subsistema se ejecutaron durante el proceso de Implementación e integración; sin embargo, el presente plan de pruebas se enfoca exclusivamente en la validación del **funcionamiento completo del sistema** en condiciones operativas reales y controladas.

La estrategia de validación se estructuró de manera **progresiva e incremental**, siguiendo la lógica de integración del proyecto:

- **Pruebas de operación del sistema ASRS:** validación de los ciclos completos de almacenamiento y recuperación, verificando la correcta ejecución secuencial de movimientos, identificación de carga, asignación de ubicaciones y actualización del inventario.
- **Pruebas por modo de operación:** evaluación del comportamiento del sistema en modos manual y automático, incluyendo inicialización y referenciación (*homing*), asegurando la aplicación consistente de restricciones funcionales y de seguridad.
- **Pruebas de seguridad y manejo de fallos:** verificación de la respuesta del sistema ante eventos críticos, tales como activación de paro de emergencia, detección de colisión, activación de finales de carrera y pérdida de comunicación PLC-PC. Estas pruebas validan el principio jerárquico de la arquitectura de control, en el cual el PLC mantiene el control del movimiento y la seguridad, invalidando órdenes externas ante condiciones inseguras.

Las pruebas se ejecutaron en el entorno del CAP bajo operación supervisada y con un inventario inicial conocido. La evidencia se recolectó mediante datos **empíricos** (observación del comportamiento del sistema), **experimentales** (medición de tiempos, estados y variables relevantes) y **documentales** (capturas de HMI/PC, registros de eventos del PLC/PC y material fotográfico). Para asegurar repetibilidad, las pruebas asociadas a desempeño y confiabilidad se ejecutaron con un número mínimo de repeticiones definido en sus criterios de aceptación.

El procedimiento detallado de las pruebas de validación del sistema ASRS, incluyendo objetivos, condiciones iniciales, pasos, criterios de aceptación y formato de registro, se presenta en el Anexo 9.1.

5.9. Consideraciones de operación y uso académico (CDIO – Operar)

El sistema desarrollado está concebido para operar con intervención humana supervisada, permitiendo la ejecución de ciclos básicos de almacenamiento y recuperación. Esta forma de operación es adecuada para el contexto académico, donde se busca un equilibrio entre automatización y control manual durante las prácticas.

Adicionalmente, el ASRS rehabilitado queda disponible como plataforma didáctica para asignaturas relacionadas con automatización, robótica y control de procesos, así como para futuros proyectos de integración dentro de la CMF.

Resultados y Discusión

Los resultados presentados en este capítulo se obtienen a partir de la ejecución del plan de pruebas del sistema ASRS definido en la metodología del proyecto y desarrollado en detalle en el Anexo 9.1. Dicho plan permitió validar el comportamiento del sistema como una solución integrada, considerando tanto su desempeño técnico como su uso en un entorno académico real.

De acuerdo con la naturaleza del proyecto, los datos obtenidos durante el proceso de validación se clasifican de la siguiente manera:

- **Empíricos:** obtenidos mediante la observación directa del comportamiento del sistema durante la ejecución de los ciclos de operación, la interacción entre subsistemas y la respuesta ante eventos de seguridad.
- **Experimentales:** obtenidos mediante la medición directa de variables tales como tiempos de ciclo, número de repeticiones exitosas, activación de eventos de seguridad y consistencia en la ejecución de trayectorias.
- **Documentales:** obtenidos a partir de registros del sistema, capturas de la interfaz HMI/PC, archivos de log del PLC y del sistema supervisor, y material fotográfico generado durante las pruebas.

6.1. Contexto de validación del sistema

Las pruebas se realizaron sobre el sistema ASRS completamente integrado en el entorno del Centro de Automatización de Procesos (CAP), bajo condiciones normales de operación y con supervisión directa. El sistema evaluado incluye la estructura mecánica existente, el sistema de control basado en PLC, el sistema embebido de sensado e identificación, los actuadores, los sensores de seguridad y la interfaz de usuario.

La validación se llevó a cabo considerando los distintos modos de operación definidos (manual, inicialización y referenciación, control por coordenadas y automático), así como la respuesta del sistema ante eventos de seguridad y condiciones anómalas. Este enfoque permitió evaluar el comportamiento del ASRS como un sistema integrado, más allá del desempeño individual de cada subsistema.

6.2. Resultados de la validación del sistema ASRS

Los resultados presentados en esta sección corresponden a la ejecución de las pruebas de validación del sistema ASRS (TP-01 a TP-08), definidas en el plan de pruebas. Cada prueba evalúa escenarios completos de operación del sistema y se asocia de manera explícita a uno o más requerimientos funcionales y no funcionales.

6.2.1. Ciclos completos de almacenamiento y recuperación

Durante la ejecución de las pruebas TP-01 y TP-02 se validaron los ciclos automáticos completos de almacenamiento y recuperación de unidades de carga. En todos los ensayos realizados, el sistema ejecutó las secuencias de movimiento de forma autónoma, coordinando la actuación de los ejes cartesianos, la lectura de identificadores, la asignación de ubicaciones y la actualización del inventario.

El sistema fue capaz de almacenar y recuperar las unidades solicitadas sin intervención humana, manteniendo activos los mecanismos de seguridad y garantizando la coherencia entre el estado físico y lógico del inventario. La observación directa del proceso, junto con los registros del sistema, confirma el cumplimiento de los requerimientos RF-01, RF-02, RF-03, RF-05, RF-06, RF-07 y RF-08.

6.2.2. Repetibilidad y consistencia operativa

La prueba TP-03 permitió evaluar la repetibilidad del sistema mediante la ejecución consecutiva de ciclos hacia una misma ubicación de almacenamiento. Los resultados evidenciaron trayectorias consistentes y posiciones finales equivalentes entre ciclos, sin colisiones ni fallos mecánicos atribuibles a variaciones de posicionamiento.

Este comportamiento confirma la estabilidad operativa del ASRS y valida el requerimiento RF-04, aspecto fundamental para garantizar confiabilidad en sistemas automáticos de almacenamiento, incluso en un entorno académico.

6.2.3. Inicialización, referenciación y modos de operación

Las pruebas TP-04 y TP-05 validaron la rutina de inicialización y referenciación del sistema, así como el comportamiento del ASRS en los modos manual y automático. La rutina de *homíng* permitió establecer de manera consistente el origen del sistema de coordenadas, habilitando los modos de operación posteriores sin errores.

En el modo manual, el sistema respondió adecuadamente a las órdenes del operador, manteniendo restricciones de velocidad y seguridad, lo que permitió realizar tareas de ajuste y verificación de forma controlada. En el modo automático, el sistema exigió el cumplimiento de las condiciones previas antes de iniciar la operación, evitando estados inseguros. Estos resultados validan los requerimientos RF-10 y RF-11, así como los RNF asociados a seguridad y operación manual.

6.2.4. Seguridad, manejo de fallos y observabilidad

Las pruebas TP-06 y TP-07 evaluaron la respuesta del sistema ante eventos críticos, tales como la activación del paro de emergencia y la detección de colisiones. En todos los escenarios definidos, el sistema detuvo el movimiento de manera inmediata y transitó a un estado seguro, invalidando órdenes externas cuando fue necesario.

Adicionalmente, la prueba TP-08 permitió verificar la observabilidad del sistema durante la operación. La interfaz de usuario mostró de manera coherente el estado operativo, las posiciones de los ejes, las alarmas activas y el estado del inventario, facilitando el seguimiento del comportamiento del ASRS y el análisis posterior de los eventos.

6.3. Verificación técnica de requerimientos

La verificación de los requerimientos funcionales y no funcionales se realizó a partir de métricas observables, repeticiones de prueba y evidencia documentada, conforme al plan de pruebas del sistema.

6.3.1. Requerimientos funcionales

Tabla 6.8: Validación técnica de los requerimientos funcionales del sistema ASRS

RF	Prueba(s)	Criterio técnico de validación	Repeticiones / escenarios	Evidencia	Resultado
RF-01	TP-01	Ejecución autónoma del ciclo completo de almacenamiento con actualización del inventario	≥ 3 ciclos	EV-TP01	Cumple
RF-02	TP-02	Recuperación correcta de la unidad solicitada según inventario lógico	≥ 3 ciclos	EV-TP02	Cumple
RF-03	TP-01, TP-02	Inserción y extracción segura sin colisiones	Todos los ciclos	EV-TP01/02	Cumple
RF-04	TP-03	Consistencia de trayectorias y posiciones finales	≥ 5 ciclos	EV-TP03	Cumple
RF-05	TP-01	Tiempo de ciclo compatible con entorno académico	Medición continua	Reg. TP-01	Cumple
RF-06	TP-02	Coherencia temporal del ciclo de recuperación	Comparativa	Reg. TP-02	Cumple
RF-07	TP-01, TP-02	Coherencia entre inventario físico y lógico	Antes/después	EV-TP01/02	Cumple
RF-08	TP-01	Identificación correcta de unidades	Todos los ciclos	Logs/EV	Cumple
RF-09	TP-07	Detección de colisión antes de movimientos críticos	Escenarios C1-C3	EV-TP07	Cumple
RF-10	TP-04	Referenciación consistente del sistema	≥ 3 ejec.	EV-TP04	Cumple
RF-11	TP-05	Operación segura en modos manual y automático	Checklist	TP-05	Cumple

6.3.2. Requerimientos no funcionales

Tabla 6.9: Verificación de requerimientos no funcionales del sistema ASRS

RNF	Criterio de evaluación	Evidencia	Resultado
RNF-01	Transición inmediata a estado seguro ante eventos críticos	EV-TP06	Cumple
RNF-02	Limitación de velocidad adecuada al entorno académico	Registros y observación	Cumple
RNF-03	Restricciones activas en modo manual	Checklist TP-05	Cumple
RNF-04	Disponibilidad operativa para prácticas académicas	Registro de uso	Cumple
RNF-05	Consistencia global del inventario	EV-TP01/02	Cumple
RNF-06	Observabilidad del estado del sistema	Capturas HMI/PC	Cumple
RNF-07	Mantenibilidad del sistema	Análisis de ajustes	Cumple

6.4. Impacto académico y aporte a la formación en ingeniería

El sistema ASRS desarrollado en este proyecto se concibe como una plataforma académica de carácter integrador, cuyo valor formativo radica en la posibilidad de analizar, de manera articulada, los distintos subsistemas que conforman un sistema automatizado real. A diferencia de prácticas fragmentadas o puramente simuladas, el ASRS permite abordar la formación en ingeniería desde una perspectiva sistémica, alineada con el plan de estudios del programa de Ingeniería Electrónica.

Si bien el sistema aún no ha sido incorporado de manera formal en asignaturas regulares, su diseño y validación permiten identificar con claridad los aprendizajes potenciales que pueden derivarse de su uso académico, tanto a nivel de subsistemas como en términos de integración global.

6.4.1. Aprendizajes asociados a los subsistemas del ASRS

El análisis del ASRS por subsistemas permite identificar aprendizajes específicos asociados a cada uno de ellos, los cuales se corresponden con contenidos y competencias desarrolladas a lo largo del plan de estudios.

6.4.1.1. Subsistema mecánico y de movimiento

El subsistema mecánico del ASRS, basado en una estructura cartesiana con múltiples ejes, permite abordar conceptos relacionados con cinemática, dinámica y restricciones físicas del movimiento. Desde una perspectiva académica, los estudiantes pueden analizar la relación entre geometría del sistema, trayectorias posibles, límites mecánicos y efectos del movimiento sobre la estabilidad y seguridad del sistema.

Este subsistema resulta pertinente para reforzar contenidos asociados a cursos de física aplicada, mecánica y análisis de sistemas dinámicos, así como para evidenciar la diferencia entre modelos teóricos de movimiento y su implementación en sistemas reales.

6.4.1.2. Subsistema de potencia y accionamiento

El sistema de accionamiento, compuesto por motores y drivers, constituye un escenario real para el análisis del manejo de energía, la conversión electromecánica y la interacción entre etapas de potencia y control. A partir de este subsistema, es posible estudiar aspectos como selección de actuadores, limitaciones de corriente, efectos térmicos y criterios de seguridad eléctrica.

Estos aprendizajes se articulan con asignaturas de electrónica de potencia, dispositivos electrónicos y sistemas de energía, permitiendo contextualizar conceptos que, en muchos casos, se abordan de forma abstracta.

6.4.1.3. Subsistema de control y automatización

El subsistema de control, implementado mediante PLC, permite analizar la lógica secuencial, la gestión de estados, la jerarquía de control y la coordinación entre múltiples ejes. Desde el punto de vista formativo, este subsistema posibilita comprender la diferencia entre control continuo y control discreto, así como el diseño de estrategias de control orientadas a la seguridad y la confiabilidad.

Este componente es central para asignaturas de control automático, automatización industrial y control de procesos, y permite evidenciar cómo los conceptos teóricos se traducen en decisiones de diseño concretas.

6.4.1.4. Subsistema de sensado y seguridad

El subsistema de sensores, que incluye sensores de posición, finales de carrera y detección de colisiones, permite abordar aprendizajes relacionados con la adquisición de señales, la interpretación de estados y la implementación de sistemas de seguridad funcional. A través de este subsistema, los estudiantes pueden analizar la diferencia entre eventos normales y anómalos, así como las estrategias de detección y respuesta ante fallos.

Este análisis se relaciona con contenidos de instrumentación, procesamiento básico de señales y diseño de sistemas seguros, reforzando la importancia de la seguridad como criterio de diseño y no como elemento accesorio.

6.4.1.5. Subsistema de identificación e información

El uso de mecanismos de identificación automática e inventario introduce aprendizajes asociados a la trazabilidad de información, la coherencia entre estados físicos y lógicos, y la gestión de datos en sistemas automatizados. Este subsistema permite analizar cómo la información fluye entre niveles de control y supervisión, y cómo errores en la identificación o actualización del inventario afectan el comportamiento global del sistema.

Estos aprendizajes se vinculan con asignaturas de sistemas digitales, bases de datos básicas y sistemas de información, ampliando la visión tradicional de la automatización hacia la gestión integral del sistema.

6.4.1.6. Subsistema de supervisión e interfaz

La interfaz de usuario y el sistema supervisor permiten trabajar aprendizajes relacionados con observabilidad, monitoreo y diagnóstico de sistemas. A través de este subsistema, es posible analizar cómo se presentan los estados del sistema, cómo se registran eventos y cómo la información disponible influye en la toma de decisiones del operador.

Este componente resulta especialmente relevante para reforzar la comprensión de sistemas distribuidos, interacción humano-máquina y análisis de eventos, aspectos cada vez más relevantes en la ingeniería contemporánea.

6.4.2. Integración de aprendizajes y progresión curricular

Más allá de los aprendizajes asociados a cada subsistema, el valor académico del ASRS se manifiesta en la posibilidad de integrar estos conocimientos en un solo entorno. El sistema permite proyectar una progresión formativa en la que, en niveles iniciales, los estudiantes se centren en la identificación y comprensión de componentes, mientras que en niveles intermedios analicen la interacción entre subsistemas y, en niveles avanzados, aborden la validación, el diagnóstico y la mejora del sistema.

Esta integración favorece el desarrollo del pensamiento sistémico y la comprensión de la ingeniería como un proceso que articula análisis, diseño, implementación y operación, en coherencia con los objetivos formativos del programa.

En el marco de la evaluación de su aporte como herramienta didáctica, el ASRS —que ya se encontraba previamente implementado— fue adaptado para su utilización dentro del proyecto académico Automatización de los procesos productivos en la fabricación de lavaplatos, con el propósito de modelar una parte específica del movimiento requerido en dicho proceso. En este contexto, se conectaron sensores directamente al PLC y se empleó uno de los ejes del sistema para simular el desplazamiento de un riel asociado a la lógica productiva planteada en el proyecto. Esta adaptación permitió verificar el comportamiento de las trayectorias programadas, la respuesta de los motores y la correcta ejecución de la programación en lenguaje ladder, asegurando coherencia entre la lógica desarrollada por los estudiantes y su representación física en el sistema. Además de servir como plataforma de modelado, el ASRS fue utilizado para explicar de manera integrada el funcionamiento de los sensores, la interacción con la HMI, la estructura del PLC, los fundamentos del lenguaje ladder y los principios básicos del control de movimiento. De este modo, se evidenció su impacto académico no solo como herramienta de simulación aplicada, sino como recurso pedagógico que facilitó la articulación entre teoría, programación y comportamiento real del sistema, fortaleciendo la comprensión práctica de los conceptos de automatización industrial.

Conclusiones

El desarrollo e integración del sistema de control permitió llevar el ASRS desde un estado no operativo hasta una condición de funcionamiento estable, validando la viabilidad de su uso como plataforma didáctica en un entorno académico. La definición temprana de una arquitectura de control clara y jerárquica fue un factor determinante para lograr la integración progresiva de los subsistemas y reducir los riesgos asociados a la puesta en operación.

La decisión de centralizar la lógica secuencial y el control de movimiento en un controlador lógico programable (PLC) demostró ser adecuada para este tipo de sistema, al ofrecer un comportamiento determinista, una implementación robusta de las condiciones de seguridad y una estructura de programación alineada con prácticas industriales reales. Esta elección facilitó la comprensión del sistema por parte de los usuarios y simplificó las tareas de depuración durante las pruebas de integración.

La separación funcional entre el PLC, el sistema supervisor en PC y el sistema embebido dedicado permitió distribuir responsabilidades de control y adquisición de señales, evitando la sobrecarga del controlador principal y favoreciendo una arquitectura modular. Esta modularidad resultó clave para la integración de sensores específicos y para la adaptación del sistema a los recursos disponibles, evidenciando las ventajas de un enfoque distribuido en sistemas de automatización.

Las pruebas de integración realizadas confirmaron el cumplimiento de los ciclos automáticos de almacenamiento y recuperación, así como la respuesta del sistema ante eventos de seguridad y condiciones anómalas de operación.

Finalmente, el proyecto evidencia que la rehabilitación de un sistema similar a los encontrados en la industria, abordada desde un enfoque de ingeniería aplicada y estructurada bajo la metodología CDIO, constituye una estrategia efectiva para la formación en ingeniería electrónica. El ASRS desarrollado permite a los estudiantes interactuar con problemas reales de integración, control y seguridad, fortaleciendo la comprensión de arquitecturas industriales y sentando bases sólidas para futuras ampliaciones y estudios más avanzados.

Recomendaciones

8.1. Trabajo futuro

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo e implementación del sistema de control del ASRS, se identifican diversas líneas de trabajo futuro orientadas a fortalecer su integración, mejorar su usabilidad y ampliar su aprovechamiento académico.

En primer lugar, se recomienda realizar la integración completa del ASRS con la CMF, una vez esta se encuentre nuevamente en operación. Esta integración permitiría evaluar el desempeño del sistema en un entorno más cercano a un escenario productivo real, validar la interacción con otros equipos de la celda y analizar de manera coordinada el flujo de materiales entre los distintos procesos automatizados. Asimismo, facilitaría la evaluación del ASRS como parte de un sistema de mayor complejidad, incluyendo sincronización entre estaciones y gestión distribuida de eventos.

Como línea de mejora a nivel de interacción, se sugiere optimizar las interfaces de usuario, tanto en el HMI como en el sistema supervisor. El desarrollo de interfaces más intuitivas y visualmente estructuradas permitiría mejorar la experiencia de uso para estudiantes y operadores con distintos niveles de formación, facilitar la comprensión de los modos de operación y reforzar la ejecución segura de las tareas asociadas al ASRS.

Adicionalmente, se propone como trabajo futuro la formalización y ampliación del uso académico del ASRS como plataforma de experimentación. Si bien el sistema ya permite la observación y el análisis práctico de sus distintos subsistemas, la definición de prácticas guiadas, actividades de laboratorio y ejercicios de modificación del sistema de control permitiría estructurar su uso dentro de los espacios formativos del programa.

Este enfoque posibilitaría que el ASRS sea utilizado de manera sistemática para el aprendizaje de programación de PLC, control de movimiento, sistemas embebidos e integración de sistemas automatizados, fortaleciendo su impacto académico y su alineación con el plan de estudios.

Finalmente, se identifican como posibles extensiones técnicas la optimización de tiempos de ciclo, la mejora de la gestión del inventario y la evaluación del comportamiento del sistema bajo operación prolongada. Estas líneas de trabajo permitirían profundizar en el análisis del desempeño del ASRS y servir como base para futuros proyectos de investigación o de grado.

CAPÍTULO 9

Anexos

9.1. Anexo 1 – Plan de pruebas del sistema ASRS

Anexo de plan de pruebas.

Este anexo presenta el plan de pruebas detallado para la validación del sistema ASRS como un **sistema integrado**, en coherencia con los requerimientos funcionales (RF) y no funcionales (RNF) definidos en la fase *Conceive*. Las pruebas unitarias por subsistema se ejecutaron durante la implementación; en consecuencia, el presente plan se orienta a demostrar mediante evidencia empírica, experimental y documental que el comportamiento reportado en el capítulo de resultados es verificable y repetible.

9.1.1. Alcance, supuestos y responsabilidades

9.1.1.1. Alcance

Las pruebas cubren: ciclos completos de almacenamiento y recuperación, repetibilidad, inicialización/referenciación, modos de operación, seguridad y manejo de fallos, y observabilidad del sistema durante la operación.

9.1.1.2. Supuestos

- El ASRS se encuentra instalado en el CAP y en condición operativa.
- El PLC mantiene autoridad sobre movimiento y seguridad.
- Se dispone de unidades de carga con identificadores válidos (RFID u otro mecanismo).
- Se cuenta con inventario inicial conocido y un conjunto de ubicaciones habilitadas.

9.1.1.3. Roles

- **Operador de prueba:** ejecuta el procedimiento y documenta evidencias.
- **Supervisor de seguridad:** autoriza activación de pruebas con eventos críticos (E-Stop, colisión).
- **Observador:** registra tiempos, incidencias y verifica criterios de aceptación.

9.1.2. Convenciones de evidencia y trazabilidad

9.1.2.1. Tipos de evidencia

- **Evidencia observacional:** comportamiento físico del sistema, verificación visual, checklist.
- **Evidencia experimental:** tiempos, conteos, repetición de ciclos, medidas de estado/variables.
- **Evidencia documental:** capturas de HMI/PC, logs del PLC/PC, fotos, videos, tablas de registro firmadas.

9.1.2.2. Codificación de evidencias

Para mantener trazabilidad, cada evidencia se identifica como:

EV-TPxx-n (p. ej., EV-TP01-01), con descripción, fecha, responsable y ubicación del archivo.

9.1.2.3. Resumen de pruebas y RF/RNF asociados

Tabla 9.10: Resumen del plan de pruebas del sistema ASRS

ID	Prueba	Propósito	RF/RNF
TP-01	Ciclo completo de almacenamiento	Validar ejecución end-to-end: orden, movimiento, identificación, asignación, inserción, confirmación y actualización del inventario.	RF-01, RF-03, RF-05, RF-07, RF-08; RNF-06
TP-02	Ciclo completo de recuperación	Validar recuperación end-to-end según inventario: selección, movimiento, extracción, entrega, confirmación y actualización del inventario.	RF-02, RF-03, RF-06, RF-07; RNF-06
TP-03	Repetibilidad del sistema	Validar consistencia de trayectorias/posiciones finales y comportamiento ciclo a ciclo hacia una misma ubicación.	RF-04
TP-04	Inicialización y referenciación	Validar rutina de <i>homing</i> y coherencia del origen de coordenadas para habilitar operación segura.	RF-10
TP-05	Modos de operación (manual/automático)	Validar restricciones activas, coherencia entre modos, permisos, e imposibilidad de acciones inseguras.	RF-11; RNF-03, RNF-02
TP-06	Paro de emergencia (E-Stop)	Validar transición a estado seguro ante activación del E-Stop en distintos momentos del ciclo.	RNF-01, RNF-02
TP-07	Colisión / condición anómala	Validar detección y reacción ante colisión o evento anómalo: detención, alarma, bloqueo y recuperación segura.	RF-09; RNF-01
TP-08	Observabilidad del sistema	Validar visualización de estados, posiciones, alarmas e inventario durante operación y tras eventos.	RNF-06

9.1.3. Plantilla de especificación de prueba (formato estándar)

Cada prueba TP se documenta con el siguiente formato estándar:

- **Objetivo y alcance**
- **Requerimientos asociados (RF/RNF)**

- Precondiciones
- Recursos e instrumentos
- Riesgos y controles
- Procedimiento paso a paso
- Variables/mediciones a registrar
- Criterios de aceptación
- Resultados y observaciones
- Evidencias (fotos, capturas, logs)

9.1.4. TP-01: Ciclo completo de almacenamiento

9.1.4.1. Objetivo

Validar que el ASRS ejecuta de manera autónoma el ciclo completo de almacenamiento de una unidad de carga, desde la orden de inicio hasta la confirmación de la ubicación asignada y la actualización coherente del inventario.

9.1.4.2. RF/RNF asociados

RF-01, RF-03, RF-05, RF-07, RF-08; RNF-06.

9.1.4.3. Precondiciones

1. ASRS energizado, sin alarmas activas, E-Stop liberado.
2. Rutina de *homing* ejecutada exitosamente (si aplica).
3. Inventario inicial cargado y verificado (registro INV-0).
4. Ubicaciones habilitadas: _____.
5. Unidad de carga con ID válido (RFID/identificación): _____.

9.1.4.4. Recursos e instrumentos

- Interfaz HMI/PC (pantallas relevantes: _____).
- Registro de logs del PLC/PC (ubicación o método: _____).
- Cronómetro / temporizador (manual o software).
- Cámara (foto/video) para evidencia.

9.1.4.5. Riesgos y controles

- Riesgo de colisión: mantener supervisor presente y acceso al E-Stop.
- Riesgo de atrapamiento: mantener zona delimitada y no intervenir durante movimiento.
- Control: prueba en velocidad limitada académica (RNF-02).

9.1.4.6. Procedimiento

1. Registrar fecha/hora, responsables y condiciones iniciales en el Formato TP-01.
2. Verificar en la interfaz el estado *Ready/OK* del sistema.
3. Ingresar/seleccionar unidad a almacenar (ID: _____) y confirmar orden.
4. Confirmar lectura correcta del identificador (si aplica) y registro previo en inventario.
5. Ejecutar ciclo automático de almacenamiento.
6. Observar: trayectoria, paradas intermedias, inserción en ubicación, y confirmación final.
7. Verificar en interfaz y/o log: ubicación asignada, estado de inventario actualizado.
8. Repetir el ciclo para N unidades o N iteraciones (definir N): _____.

9.1.4.7. Variables/mediciones a registrar

- Tiempo total de ciclo T_{alm} [s].
- Resultado de lectura ID (éxito/fallo; número de reintentos).
- Ubicación asignada (slot) y confirmación.
- Incidencias: alarmas, detenciones, intervención humana.
- Evidencias: capturas HMI/PC, logs, fotos.

9.1.4.8. Criterios de aceptación

1. El ciclo se completa sin intervención humana no planificada.
2. La unidad queda almacenada en la ubicación asignada sin colisiones ni eventos inseguros.
3. El inventario lógico se actualiza coherentemente tras el almacenamiento (RF-07).
4. La identificación de la unidad es correcta (RF-08).
5. El tiempo de ciclo se mantiene en rango compatible con entorno académico (RF-05): _____.

9.1.4.9. Evidencias requeridas (placeholders)

- EV-TP01-01: Foto del estado inicial (vista general del ASRS).
- EV-TP01-02: Captura de pantalla HMI/PC con orden de almacenamiento.
- EV-TP01-03: Video/foto del momento de inserción en ubicación.
- EV-TP01-04: Captura de inventario antes/después.
- EV-TP01-05: Log PLC/PC del ciclo (adjuntar extracto).

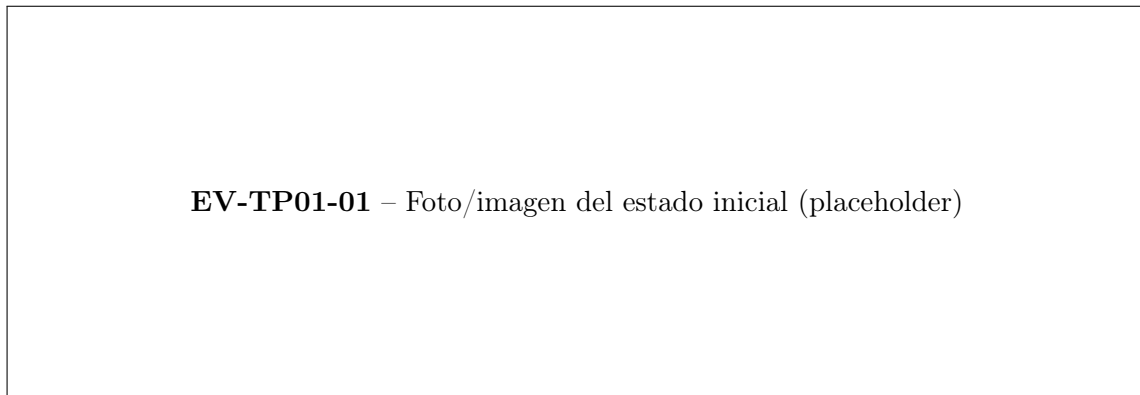
9.1.4.10. Espacios para fotos/capturas

Figura 9.1: Evidencia EV-TP01-01 (placeholder).

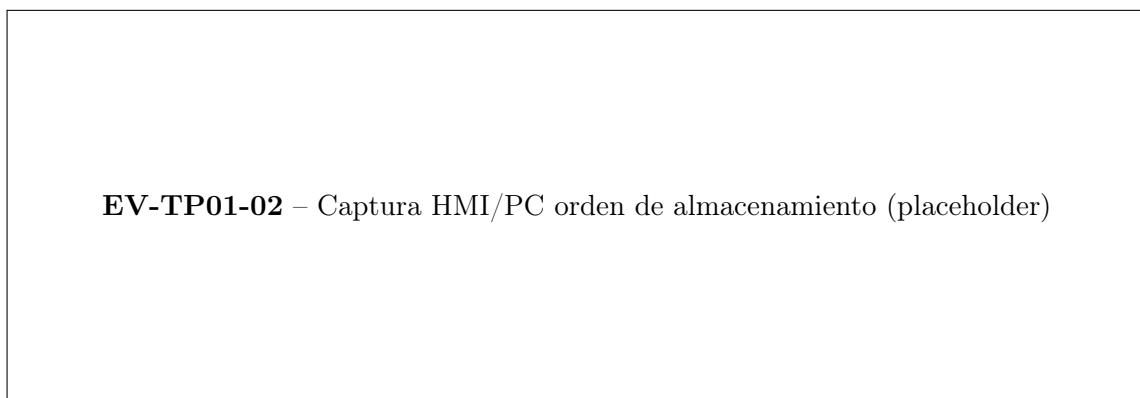


Figura 9.2: Evidencia EV-TP01-02 (placeholder).

Formato de registro TP-01 (para diligenciar)

Campo	Registro
Fecha / Hora	_____
Responsables (Operador/Supervisor/Observador)	_____
Inventario inicial (ID registro)	_____
Unidad(es) de carga (ID)	_____
Ubicación(es) objetivo / asignada(s)	_____
N repeticiones	_____
Tiempos medidos T_{alm}	_____
Incidencias / alarmas	_____
Criterios de aceptación (Cumple/No cumple)	_____
Evidencias generadas (EV-TP01-xx)	_____
Observaciones	_____

9.1.5. TP-02: Ciclo completo de recuperación**9.1.5.1. Objetivo**

Validar que el ASRS ejecuta el ciclo completo de recuperación automática de una unidad previamente almacenada, garantizando coherencia con el estado del inventario.

9.1.5.2. RF/RNF asociados

RF-02, RF-03, RF-06, RF-07; RNF-06.

9.1.5.3. Precondiciones

1. Inventario con al menos una unidad almacenada validada (resultado TP-01 o equivalente).
2. ASRS en estado *Ready/OK*, sin alarmas.
3. Referenciación válida (si aplica).

9.1.5.4. Procedimiento (resumen detallado)

1. Registrar condiciones iniciales (Formato TP-02).
2. Seleccionar en la interfaz la unidad a recuperar según inventario (ID: _____).
3. Ejecutar recuperación automática.

4. Verificar extracción segura, transporte y entrega en punto destino definido.
5. Confirmar actualización del inventario (unidad pasa a estado recuperado/no almacenado).
6. Repetir N veces y/o para k ubicaciones diferentes (definir N, k).

9.1.5.5. Variables/mediciones

- Tiempo total de ciclo T_{rec} [s].
- Exactitud de correspondencia unidad recuperada vs inventario (sí/no).
- Alarmas/pausas/intervenciones.

9.1.5.6. Criterios de aceptación

1. La unidad recuperada corresponde a la solicitada según inventario.
2. El ciclo se completa sin eventos inseguros.
3. El inventario se actualiza coherentemente tras la operación.
4. T_{rec} en rango compatible con el entorno académico: _____.

9.1.5.7. Evidencias (placeholders)

EV-TP02-01 (captura selección unidad), EV-TP02-02 (foto/video extracción), EV-TP02-03 (captura inventario antes/después), EV-TP02-04 (logs).

Formato de registro TP-02 (para diligenciar)

Campo	Registro
Fecha / Hora	_____
Unidad solicitada (ID)	_____
Ubicación origen (según inventario)	_____
Punto de entrega	_____
N repeticiones / k ubicaciones	_____
Tiempos medidos T_{rec}	_____
Correspondencia unidad vs inventario (sí/no)	_____
Incidencias / alarmas	_____
Evidencias (EV-TP02-xx)	_____

Conclusión (Cumple/No cumple) _____

9.1.6. TP-03: Repetibilidad del sistema

9.1.6.1. Objetivo

Demostrar repetibilidad del sistema al ejecutar ciclos consecutivos hacia una misma ubicación, manteniendo consistencia operacional.

9.1.6.2. RF/RNF asociados

RF-04.

9.1.6.3. Diseño de la prueba (muy importante)

Definir:

- Ubicación objetivo fija: _____
- Número de repeticiones N : _____
- Condiciones constantes: mismo peso de carga, misma ruta, misma configuración.
- Métrica de repetibilidad: diferencia entre posiciones finales (si se registra) o consistencia de inserción/extracción sin fallos.

9.1.6.4. Procedimiento

1. Ejecutar homing.
2. Realizar N ciclos consecutivos de movimiento a la ubicación objetivo (con o sin carga, especificar).
3. Registrar para cada iteración: tiempo, alarmas, y evidencia de posición final (pantalla, marca mecánica, etc.).

9.1.6.5. Criterios de aceptación

1. No ocurren colisiones ni fallos de inserción/extracción atribuibles a variaciones de posicionamiento.
2. El comportamiento ciclo a ciclo es consistente (tiempo dentro de rango, sin reintentos anómalos).
3. Si se dispone de indicador/lectura de posición: variación \leq _____ (definir tolerancia compatible).

Formato de registro TP-03 (tabla por iteración)

Iter.	Carga	Tiempo [s]	Pos. final	Incidencias	Cumple
1					
2					
3					
⋮					
<i>N</i>					

9.1.7. TP-04: Inicialización y referenciación (*homing*)

9.1.7.1. Objetivo

Validar la secuencia de inicialización y referenciación que garantiza la coherencia de posiciones del sistema.

9.1.7.2. RF/RNF asociados

RF-10.

9.1.7.3. Procedimiento

1. Registrar estado inicial (posición desconocida/estado tras reinicio).
2. Ejecutar rutina de homing desde interfaz.
3. Verificar activación de sensores de referencia (logs/estado en HMI).
4. Confirmar que el sistema reporta origen coherente y habilita modos posteriores.
5. Repetir *N* veces (definir): _____.

9.1.7.4. Criterios de aceptación

1. Homing finaliza sin intervención y sin alarmas.
2. Origen establecido consistentemente (según estado/lecturas reportadas).
3. Habilitación de modo automático tras homing.

9.1.7.5. Evidencias

Captura de pantalla de estados de sensores, logs del PLC, foto de la posición de referencia.

9.1.8. TP-05: Modos de operación (manual y automático)

9.1.8.1. Objetivo

Validar que el sistema dispone de modos manual y automático con restricciones activas y comportamiento seguro en ambos modos.

9.1.8.2. RF/RNF asociados

RF-11; RNF-03, RNF-02.

9.1.8.3. Procedimiento (checklist por modo)

1. Ingresar a modo manual: verificar límites de velocidad y permisos.
2. Ejecutar movimientos controlados por eje y verificar reacción ante límites.
3. Intentar acciones no permitidas (p. ej., iniciar automático sin homing, exceder límites) y verificar bloqueo.
4. Cambiar a modo automático: verificar que el sistema exige precondiciones (homing, inventario).

9.1.8.4. Criterios de aceptación

1. En modo manual se mantienen restricciones de seguridad.
2. Acciones inseguras son bloqueadas o requieren confirmación.
3. Transición de modos es coherente y no habilita estados peligrosos.

Checklist TP-05 (para diligenciar)

Ítem	Cumple	Evidencia
Modo manual disponible y activable		
Límite de velocidad activo en modo manual		
Finales de carrera bloquean movimiento indebido		
E-Stop operativo en modo manual		
Modo automático exige condiciones previas		
Transición manual→auto segura		
Transición auto→manual controlada		

9.1.9. TP-06: Paro de emergencia (E-Stop)**9.1.9.1. Objetivo**

Validar transición a estado seguro ante activación de E-Stop (paro categoría 0) en diferentes momentos de operación.

9.1.9.2. RF/RNF asociados

RNF-01, RNF-02.

9.1.9.3. Diseño de escenarios

Ejecutar E-Stop en al menos 3 instantes:

- (S1) Durante movimiento en vacío.
- (S2) Durante ciclo automático (almacenamiento o recuperación).
- (S3) Durante aproximación a ubicación (momento crítico).

9.1.9.4. Criterios de aceptación

1. Detención inmediata del movimiento.
2. Señalización/alarma registrada en interfaz y/o logs.
3. Reanudación solo mediante procedimiento seguro (reset autorizado + homing si aplica).

Formato registro TP-06 (por escenario)

Esc.	Momento	Detención	Alarma/Log	Recuperación segura
S1				
S2				
S3				

9.1.10. TP-07: Colisión / condición anómala**9.1.10.1. Objetivo**

Validar detección y reacción ante colisión (MPR121 u otro mecanismo) o condición anómala que implique detención y estado seguro.

9.1.10.2. RF/RNF asociados

RF-09; RNF-01.

9.1.10.3. Escenarios sugeridos (seleccionar los aplicables)

- (C1) Contacto leve intencional en bandeja elevador (seguro) para disparar detección.
- (C2) Presencia inesperada de carga (si existe sensor) antes de movimiento crítico.
- (C3) Condición anómala simulada (pérdida de lectura/estado inválido) sin comprometer integridad.

9.1.10.4. Criterios de aceptación

1. Detección del evento y detención del sistema.
2. Registro de alarma y bloqueo de reanudación automática sin reset seguro.
3. Procedimiento de recuperación seguro documentado.

9.1.10.5. Evidencias

Foto del punto de contacto, captura de alarma, extracto de log.

9.1.11. TP-08: Observabilidad del sistema

9.1.11.1. Objetivo

Verificar que el sistema permite visualizar estado operativo, posiciones, alarmas y estado del inventario durante operación normal y tras eventos críticos.

9.1.11.2. RF/RNF asociados

RNF-06.

9.1.11.3. Procedimiento

1. Durante TP-01/TP-02, capturar pantallas clave (estado, posiciones, inventario).
2. Forzar un evento (p. ej., E-Stop o colisión controlada) y capturar pantalla de alarmas.
3. Validar coherencia: lo mostrado corresponde con el estado real del sistema.

9.1.11.4. Criterios de aceptación

1. Estados visibles y comprensibles (Ready, Running, Alarm, etc.).
2. Posiciones/variables se actualizan durante movimiento.
3. Inventario se refleja coherentemente antes/después de operaciones.
4. Alarmas quedan registradas y son consultables (si aplica).

9.1.12. Registro maestro de evidencias

Tabla 9.16: Registro maestro de evidencias (para diligenciar)

Código	Descripción	Fecha	Responsable	Ubicación/Archivo
EV-TP01-01				
EV-TP01-02				
EV-TP02-01				
EV-TP03-01				
⋮				

9.1.13. Cierre del anexo: criterio de cumplimiento global

El cumplimiento global del plan de pruebas se considera satisfactorio cuando todas las pruebas TP-01 a TP-08 cumplen sus criterios de aceptación, o cuando las no conformidades están justificadas por límites de alcance y se consignan como oportunidades de mejora sin comprometer la operación segura del sistema en el entorno académico.

Bibliografía

- [1] C. B. Yeo, S. U. Iqbal, and U. Nirmal, “Development of a small-scale material handling machine for asrs,” *Current Journal of Applied Science and Technology*, vol. 39, 2020.
- [2] S. Y. Theopilus, S. Santoso, and T. Budiarto, “Development of low-cost multi-input automated storage and retrieval system,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020.
- [3] D. R. Reddy, I. Kumar, S. Singh, M. R. Babu, and D. R. K. Murali Krishna, “Development of automated storage and retrieval system for small scale industries,” *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 12, no. 7, pp. 67–72, 2022.
- [4] K. J. Roodbergen and I. F. A. Vis, “A survey of literature on automated storage and retrieval systems,” *European Journal of Operational Research*, pp. 343–362, 2009.
- [5] K. A. Kumar, A. Ahmed, A. Thomas, and H. M. Hameed, “The automatic storage and retrieval system: An overview,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 177, no. 16, 2019.
- [6] A. Nordeide and S. Rørtveit, “The impact of automated storage and retrieval systems on warehouse operations,” Molde, Norway, 2021.
- [7] L. D. M. Soto, “Diseño del programa de control para una celda de manufactura flexible didáctica,” *Tecnología en Marcha*, vol. 27, no. 3, pp. 41–52, 2014.
- [8] K. Lewczuk, “The study on automated storage and retrieval system dependability,” *Maintenance and Reliability*, vol. 23, no. 4, 2021.
- [9] Y. He and L. Liang, “Application of robotics in higher education in industry 4.0 era,” *Universal Journal of Educational Research*, vol. 7, no. 7, pp. 1612–1622, 2019.
- [10] J. P. Patil, G. M. Joshi, and B. Ketu, “Design and simulation of double deep asrs for engine storage line,” *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 23–27, 2014.
- [11] L. Li, J. Xu, and S. Geng, “Research on scheduling strategy for automated storage and retrieval systems,” *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2022.
- [12] J. Bautista, A. Arango, D. Rodriguez-Quintero, C. Lopez, R. Suarez, J. Jimenez, and G. Maradey-Lazaro, “Design of an as/rs machine for storage and extraction of items using finite element analysis,” *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2023.
- [13] M. P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 4th ed. Pearson, 2016.

- [14] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer, 2010.
- [15] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers*, 6th ed. Elsevier, 2020.
- [16] D. N. N. Tran, “Automation storage and retrieval system,” 2020.
- [17] A. C. Abi-Char and R. P. E. Abi-Char, “A collision-free path planning algorithm for non-complex asrs using heuristic functions,” in *International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, 2021.