

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



"Estudio de viabilidad, diseño e implantación de una flota de AGVs para la automatización de almacenes."

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Julio - 2024

AUTOR: Jaime Marín Miñano  
DIRECTOR/ES: Mónica Ballesta Galdeano

## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
2.	SITUACIÓN DEL MERCADO DE LA ROBÓTICA MÓVIL EN ESPAÑA .....	4
3.	LA ROBÓTICA MÓVIL EN LA LOGÍSTICA .....	6
3.1.	ASPECTOS TÉCNICOS GENERALES: NAVEGACIÓN, SENSORES, SEGURIDADES, NORMATIVAS, BATERÍAS, ETC. ....	6
3.1.1.	SISTEMAS DE NAVEGACIÓN .....	6
3.1.2.	SENSORES Y TECNOLOGÍAS ASOCIADAS.....	10
3.1.3.	SISTEMAS DE SEGURIDAD.....	18
3.1.4.	NORMATIVAS.....	22
3.1.5.	BATERÍAS Y ENERGÍA .....	25
3.2.	CAMPOS GENERALES DE APLICACIÓN.....	27
3.3.	FUNCIONALIDADES DE LA ROBÓTICA MÓVIL EN INTRALOGÍSTICA .....	31
4.	ESTUDIO TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE VIABILIDAD .....	34
4.1.	PUNTOS DE PARTIDA PARA UN PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN EN INTRALOGÍSTICA.....	35
4.2.	REQUISITOS TÉCNICOS PRINCIPALES PARA EL USO DE ROBOTS MÓVILES EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL.....	36
4.3.	CÁLCULO DE UNA FLOTA DE ROBOTS MÓVILES. PRINCIPALES ANÁLISIS DE VIABILIDAD. DATOS DE PARTIDA.....	37
4.3.1.	CÁLCULO DE FLOTA DE AGVs Y AMRs NECESARIOS .....	40
4.3.2.	CÁLCULO ESTIMATIVO DEL RETORNO DE INVERSIÓN .....	44
4.4.	DISEÑO CAD DE LA ZONA DE TRABAJO .....	49
5.	FASES DE IMPLANTACIÓN DE ROBOTS MÓVILES <i>ON-SITE</i> .....	51
5.1.	INFRAESTRUCTURA NECESARIA PARA NAVEGACIÓN .....	51
5.2.	INFRAESTRUCTURA EN ZONA DE TRABAJO Y HARDWARE.....	52
5.3.	PRUEBAS DE INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES - SOFTWARE .....	53
5.4.	PUESTA EN MARCHA DE LA INSTALACIÓN: OPTIMIZACIÓN DE MOVIMIENTOS Y FLUJOS.....	56
6.	CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	59
7.	REFERENCIAS.....	60

## 1. INTRODUCCIÓN

En la era contemporánea, marcada por una revolución tecnológica sin precedentes, la automatización de procesos industriales y logísticos se ha convertido en un factor crucial para la competitividad y eficiencia de las empresas. Uno de los avances más significativos en este ámbito es la implementación de robots móviles autónomos (AMR, por sus siglas en inglés) o vehículos de guiado automático (AGV) en la logística. Este documento desarrolla, detalla y analiza de manera exhaustiva un estudio sobre la logística automática con robots móviles, abordando tanto los aspectos técnicos como las implicaciones estratégicas de su implementación.

El estudio comienza con una revisión del estado del arte de la tecnología de robots industriales, así como de los robots móviles, destacando los principales avances y las innovaciones más recientes. Se exploran las características técnicas de estos dispositivos, incluyendo su capacidad de navegación autónoma, la sensorial que utilizan y los algoritmos de inteligencia artificial que les permiten operar en entornos dinámicos y cambiantes.

A continuación, se examina la integración de estos robots en los procesos logísticos, abarcando desde la recepción y almacenamiento de mercancías hasta la preparación de pedidos y la distribución interna. Se analizará un caso de estudio específico donde se analizará cómo la implementación de AGVs o AMRs puede optimizar la eficiencia operativa, reduciendo tiempos y costes, además de mejorar la trazabilidad de las cargas y la seguridad en almacenes.

El documento también aborda los desafíos y consideraciones prácticas asociados con la adopción de robots móviles en la logística. Esto incluye el análisis de la infraestructura necesaria, los costes de inversión, la formación del personal y las posibles resistencias al cambio. Además, se discuten las tendencias futuras y el potencial de evolución de esta tecnología, proyectando su impacto en la cadena de suministro global.

## 2. SITUACIÓN DEL MERCADO DE LA ROBÓTICA MÓVIL EN ESPAÑA

En general, a nivel mundial, el mercado de la robótica industrial presenta un crecimiento exponencial desde finales del siglo pasado, cuando la automatización comenzó a llegar más allá de las propias líneas de producción, y comenzó a centrarse también en todas aquellas labores que pudieran desempeñar los brazos robóticos antropomórficos, es decir, tareas como el encajado de productos, el paletizado, soldaduras o ensamblaje de piezas. Todo esto, aparte de representar en la gran mayoría de instalaciones, retornos de inversión muy interesantes y aumentos de productividad, se vio reforzado por la problemática en muchas de estas tareas con el peso, la ergonomía y la repetitividad de los movimientos, situaciones que con el paso del tiempo se regulan y se crean normativas que benefician el estado de los trabajadores en sus puestos de trabajo.

Es de este modo que la robótica como tal comienza a cobrar una gran importancia en las industrias y el crecimiento de las inversiones en estas tecnologías por parte de las empresas empieza también a ser una apuesta segura para la mejora y automatización de procesos, en la gráfica de la imagen 2.1. puede verse el crecimiento exponencial de estas soluciones en la última década.[1]

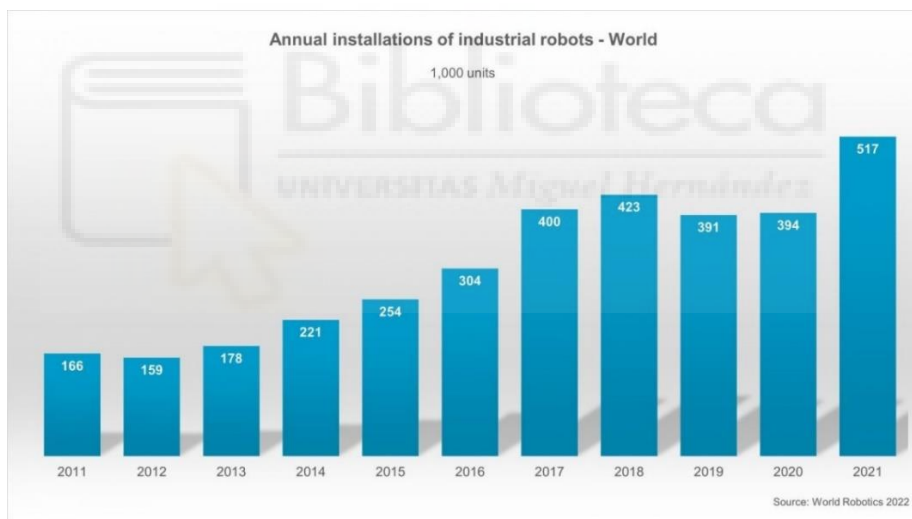


Imagen 2.1. Evolución (en miles de unidades) de los robots industriales instalados en el mundo. Fuente: Informe mundial de robótica de IFR – International Federation of Robotics (2022).

En todo lo que a robótica móvil se refiere, la situación en el mercado mundial [2] es similar a la expuesta anteriormente (véanse las gráficas de la imagen 2.2.), con la particularidad de utilizar y suponer unas tecnologías más novedosas y complejas, con las dificultades y costes que esto puede implicar. No obstante, la introducción de la robótica móvil está siendo potenciada también demográficamente, pues en muchos países, tal como ya sucede en España desde hace unos años, es cada vez más complicado encontrar mano de obra cualificada para desarrollar tareas de intralogística, siendo estas realizadas con carretillas, plataformas de transporte, carros, etcétera.

## Robots in logistics are still the growth drivers

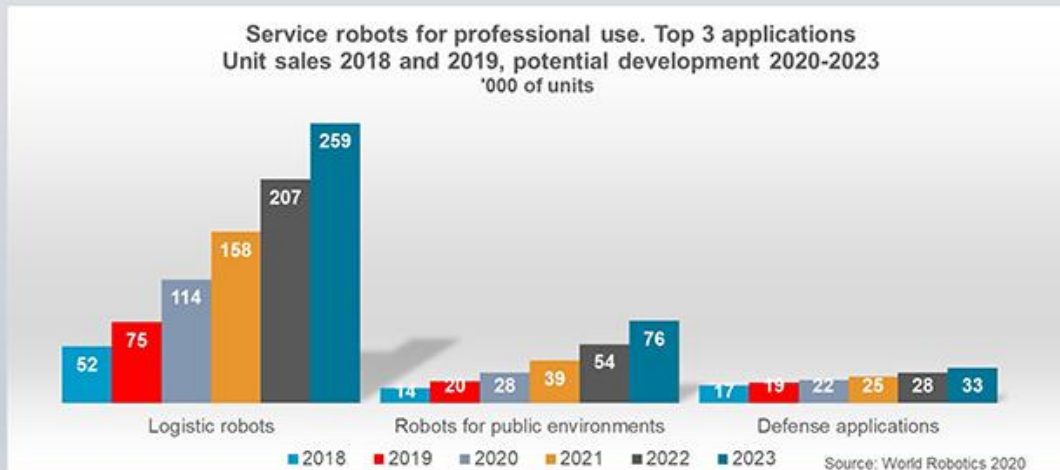


Imagen 2.2. Evolución (en miles de unidades) de los robots móviles y aplicaciones. Crecimiento de robots para intralogística en los últimos años. Fuente: IFR World Robotics 2020

En el caso de España, es probablemente hoy en día el segundo mayor fabricante e integrador mundial de robótica móvil, sólo por detrás de China, hecho bastante desconocido por lo general en Europa y en España. Además de los propios fabricantes existentes, son muy numerosas las empresas de integración de robots móviles que existen en el país. Además de lo anterior, España ocupa actualmente el décimo en nuevas instalaciones de robots industriales mundial, como puede verse en la imagen 2.3. tras los vecinos europeos: Alemania, Italia y Francia.

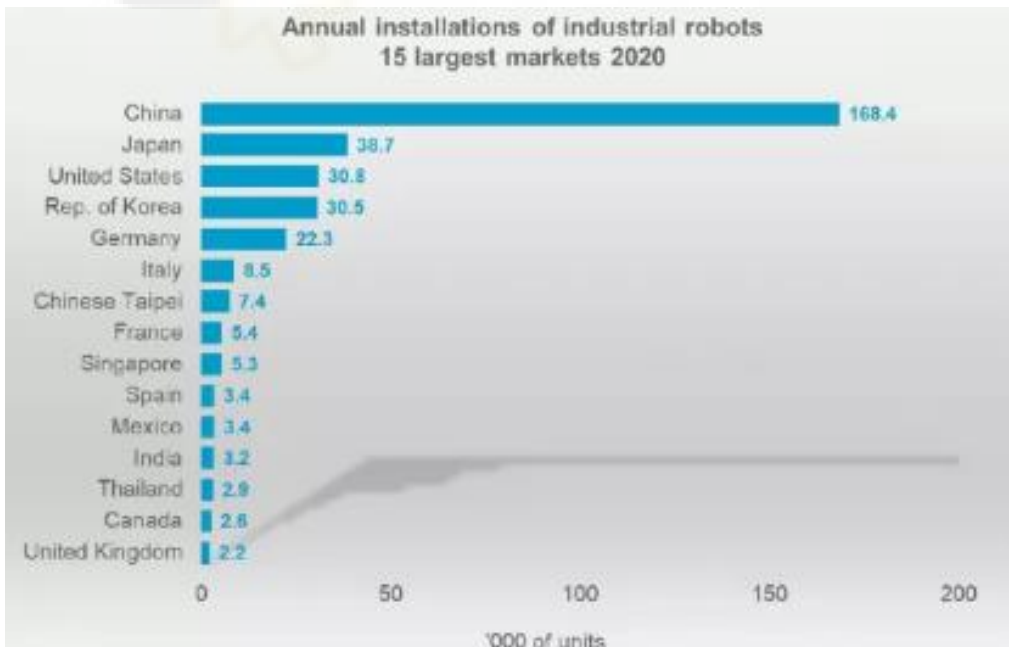


Imagen 2.3. Ranking de instalaciones (en miles de unidades) de robots industriales en el mundo. Fuente: IFR World Robotics 2021.

### 3. LA ROBÓTICA MÓVIL EN LA LOGÍSTICA

Los robots móviles industriales que desempeñan labores logísticas pueden mover diferentes cargas, desde pequeños paquetes en negocios como el e-commerce, o grandes cargas como puede ser una estantería de material, o un vehículo que está siendo ensamblado, por ejemplo, un autobús.



Imagen 3.1. Centro de última milla de Amazon. Varios ejemplos de robótica móvil para e-commerce.

En este apartado se van a mostrar y explicar las principales características o finalidades de estos robots cuando las aplicaciones pasan por transportar cargas de un lugar a otro, bien sea en una fábrica, en un almacén, o en un centro logístico.

#### 3.1. ASPECTOS TÉCNICOS GENERALES: NAVEGACIÓN, SENSORES, SEGURIDADES, NORMATIVAS, BATERÍAS, ETC.

##### 3.1.1. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN

Como principal factor funcional de este tipo de robots, los sistemas de navegación son cruciales para la autonomía y eficiencia de estos. A nivel técnico, estos sistemas se dividen en varios tipos según las tecnologías y metodologías empleadas. En el siguiente listado se describen los principales sistemas de navegación existentes y las tecnologías asociadas en la robótica móvil.

##### i. Navegación Basada en Líneas o bandas

Líneas Pintadas: Utiliza líneas trazadas en el suelo que los robots siguen mediante sensores ópticos. Es sencillo de implementar, y a nivel de costes la sensorica óptica es de las más económicas en cuanto a sistemas de navegación. Esta tecnología es inflexible ante

obstáculos y cambios en el entorno, de modo que, de existir una reestructuración en las instalaciones, o una ampliación de estas, se debe integrar y “pintar” el nuevo recorrido de trabajo de los robots.

Bandas Magnéticas o metálicas: Se basa en cintas magnéticas adheridas al suelo, detectadas por sensores magnéticos de efecto hall [3] en el robot. Ofrece mayor durabilidad que las líneas pintadas y el funcionamiento es idéntico, siendo en este caso los sensores inductivos para el guiado. Este tipo de tecnologías encajan muy bien en industrias de montaje o ensamblaje en cadena, como puede ser la fabricación de automóviles, juguetes, o grupos electrógenos.

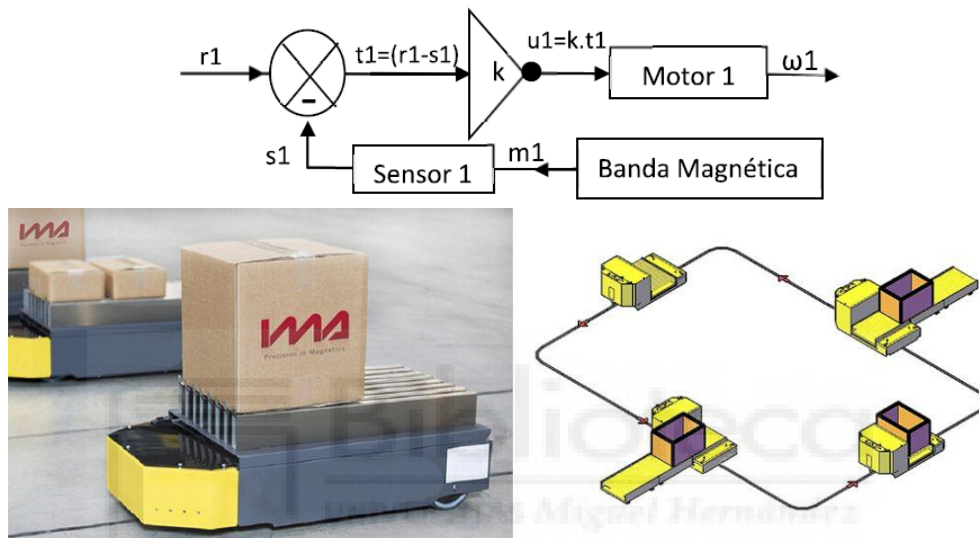


Imagen 3.1.1.i. Ejemplo circuito de guiado por banda magnética con sensor de efecto hall. Trazado fijo del circuito de AGVs.

## ii. Navegación libre (SLAM)

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): Los robots construyen un mapa del entorno [4] como el que se observa en la imagen 3.1.1.iii. mientras se localizan dentro de él. Utilizan diversos sensores como LiDAR, cámaras y odometría. También se implementa actualmente el Visual SLAM o navegación por visión, que utiliza cámaras e inteligencia artificial para interpretar el entorno. Los algoritmos de procesamiento de imágenes identifican características y crean un mapa visual.

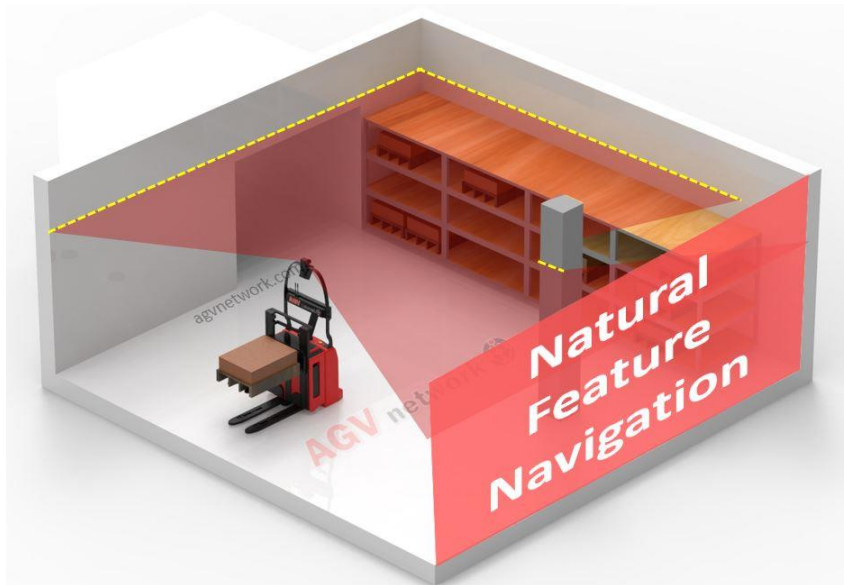


Imagen 3.1.1.ii. Esquema de posicionamiento navegación SLAM láser.



Imagen 3.1.1.iii. Ejemplo mapeo 2d SLAM con LiDAR.

Este tipo de tecnología, la más innovadora en la actualidad, es muy flexible a la hora de esquivar obstáculos y compartir un área de trabajo con personas y otras máquinas manuales, el único punto en contra podría ser tanto la ligera pérdida de precisión en posicionamiento, junto con el precio y velocidad de trabajo, que pueden verse afectados de manera negativa frente a una navegación más “fija”.

### iii. Navegación láser

LiDAR (Light Detection and Ranging): Se trata de la tecnología más extendida en el mundo de los AGVs debido a su precisión y robustez. Se basa en el uso de un láser omnidireccional que triangula y obtiene la posición del robot en base a unos reflectores



[5] debidamente posicionados a lo largo de la zona de trabajo. Esta tecnología presenta precisiones de posicionamiento de +/- 10 milímetros, frente a los +/- 40 milímetros que puede presentar la navegación SLAM. Habitualmente estos navegadores láser se posicionan sobreelevados en lo más alto de los robots, para triangular en un plano que quede por encima de otros elementos de una fábrica como pueden ser máquinas, personas, cargas, etc. Siempre alrededor de los 2,5 metros de altura. En la imagen 3.1.1.iii. puede observarse un ejemplo de en qué consiste este posicionamiento:

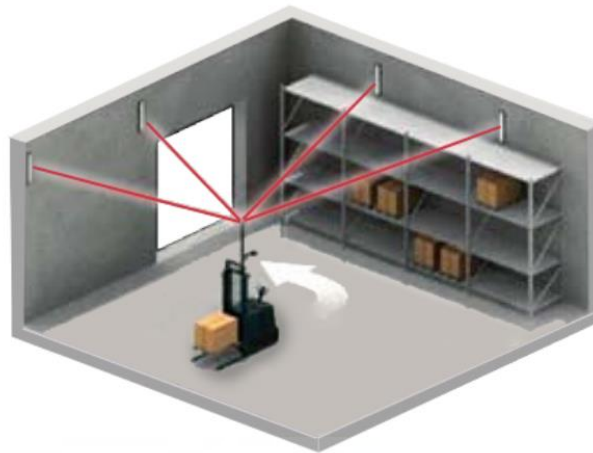


Imagen 3.1.1.iii. Croquis de posicionamiento láser con reflectores. Navegación Láser-guiada.

#### iv. Navegación Basada en encoders - Odometría

La Odometría calcula la posición del robot a partir de sus movimientos medidos por encoders en los engranajes que mueven las ruedas tanto a nivel de ángulo de giro como a nivel de avance o retroceso [6], de esta forma es posible conocer y contrastar con otros sistemas de navegación donde se encuentra el robot. Precisamente por los errores acumulativos que podrían generarse con baches, deslizamientos, etcétera, se combina con otros dispositivos de posicionamiento.

#### v. Navegación Basada en GPS

GPS (Global Positioning System): Utiliza señales satelitales para determinar la posición absoluta del robot [7]. Es ideal para trayectos exteriores, además de utilizarse una tecnología GPS Diferencial, más precisa que el GPS tradicional. Pero esta tecnología tiene limitaciones en interiores, por lo que también es frecuente combinarla con otras tecnologías de navegación.

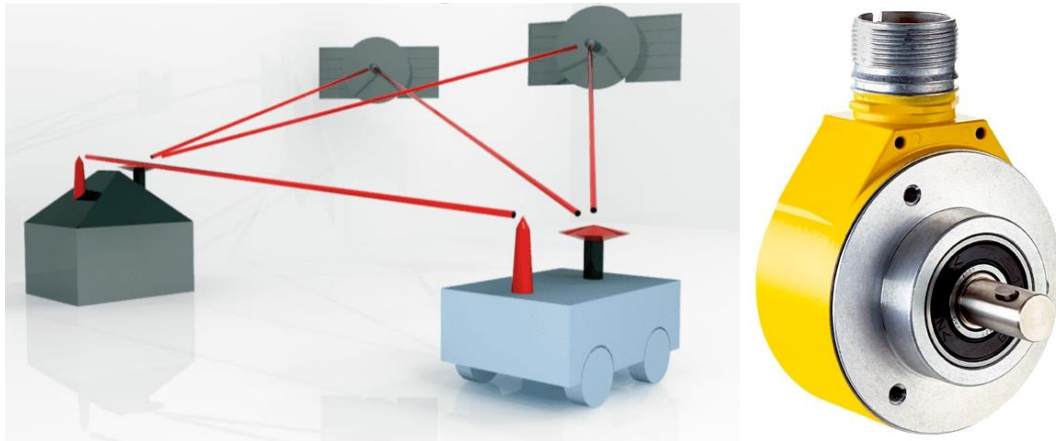


Imagen 3.1.1.v. Izquierda: esquema de navegación GPS diferencial. Derecha: Encoder de seguridad para rueda motriz AGV.

### 3.1.2. SENSORES Y TECNOLOGÍAS ASOCIADAS

Tanto para los diferentes sistemas de navegación como para otros muchos elementos que conforman la tecnología de un AGV o AMR, se utilizan numerosos tipos de sensores y dispositivos que se mencionarán de forma separada en este apartado:

#### i. Sensores

**LiDAR:** Láser de navegación que proporciona datos precisos de distancia y forma del entorno. Puede trabajar con la tecnología de navegación libre o por reflectores explicadas en el capítulo anterior.

Información General sensores LiDAR	
Distancia de medición	Desde 1 hasta 30 y 70 metros
Campo de detección	Plano 2D – 360 grados
Rango de precios	2.000 – 3.500 Eur



Imagen 3.1.2.i.1. Ejemplos de navegadores LiDAR más utilizados en el mundo de la fabricación de AGVs.



Imagen 3.1.2.i.2. Ejemplos de modelos reales con los escáneres LiDAR en la parte superior.

**Cámaras 3D:** Permiten la visión estereoscópica y el reconocimiento de objetos, pueden utilizarse para la navegación y también como elementos de seguridad o prevención.

<b>Información General Cámaras 3D + infrarrojos</b>	
Distancia de medición	Entre 0,5 y 6 metros de forma precisa
Campo de detección	3D – Cono aproximado de 90 grados
Rango de precios	600 – 1.500 Eur



Imagen 3.1.2.i.3. Modelos IFM de cámaras de detección de objetos.

**Sensores Inerciales (IMU):** Miden aceleración y rotación, útiles para la estabilidad y navegación, son los encargados de realimentar las órdenes de funcionamiento del robot en base al comportamiento real del mismo.

<b>Información General Sensores Inerciales IMU</b>	
Sensibilidad de medición	0,005 - 0,01 %/seg
Precisión en ejes X, Y	+/- 0,05 grados
Rango de precios	400 – 1.200 Eur



Imagen 3.1.2.i.4. Sensores Inerciales IMU, ejemplos de modelos industriales.

**Encoders:** Miden la rotación y ángulo de las ruedas por odometría para garantizar el correcto posicionamiento y detectar deslizamientos, saltos, baches...

<b>Información General Encoders</b>	
Sensibilidad de medición	8000 -12000 pasos por revolución
Precisión de rotación	+/- 0,036 grados
Rango de precios	100 – 1.000 Eur



Imagen 3.1.2.i.5. Encoders de eje para ruedas dentadas, ejes de motores, reductoras o ruedas de máquinas industriales.

**Fotocélulas:** Es muy habitual en la gran mayoría de equipos portar fotocélulas o sensores fotoeléctricos para medir distancia a las cargas y a las ubicaciones de recogida/dejada de las mismas.

<b>Información General Sensores fotoeléctricos</b>	
Rango de medición	[0...30] metros
Tipologías	Emisor y receptor activos Emisor activo y receptor pasivo espejo Reflexión directa
Rango de precios	40 – 200 Eur



Imagen 3.1.2.i.6. Fotocélulas. Tipos.

**Finales de carrera:** En ocasiones es habitual, sobre todo en equipos de horquillas, portar este tipo de elementos para tener una detección mecánica de la carga una vez se ha recogido o depositado en una ubicación, se trata de una manera robusta de comprobarlo. El funcionamiento consiste sencillamente en una activación mecánica que abra o cierre un circuito para detectar un evento, como, por ejemplo, haber recogido correctamente un pallet.

<b>Información General Finales de Carrera</b>	
Tipología	NA y NC
Rango de medición	Contacto directo
Rango de precios	20 – 200 Eur



Imagen 3.1.2.i.7. Tipología de finales de carrera, ejemplos.

Sensores inductivos: En ocasiones, aparte de utilizarse para aquellos equipos que incorporan la tecnología de guiado inductivo, también se puede utilizar para detectar cargas si estas son metálicas, o para detectar partes móviles del propio robot, garantizando su posición con una precisión milimétrica.

<b>Información General Sensores inductivos</b>	
Tipo de detección	Metálica: Hierro, aceros al carbono
Rango de medición	Cono apróx. 30° - [0,001 – 40] mm
Rango de precios	50 – 300 Eur



Imagen 3.1.2.i.8. Ejemplo – Sensor inductivo.

Sensores ultrasónicos. También se utilizan comúnmente en la detección de cargas por su delgado cono de detección y también corta distancia de alcance, lo que permite un funcionamiento fluido y garantías de seguridad.

<b>Información General Sensores inductivos</b>	
Tipo de detección	Cualquier objeto o material
Rango de medición	Cono apróx. 45° - [0,05 – 50] mm
Rango de precios	40 – 600 Eur



Imagen 3.1.2.i.9. Sensores ultrasónicos. Uso en detección de horquillas en AGVs.

**Inclinómetros:** En aquellos tipos de robots móviles que requieren de conocer la inclinación de las horquillas o la carga, se instalan normalmente estos dispositivos que ayudan a nivelar la carga en todo momento y mantener la estabilidad y seguridad.

<b>Información General Inclinómetros</b>	
Rango angular de medición	+/- 180 °
Principio de medición	Capacitivo
Precisión	+/- 0,5 °
Rango de precios	60 – 600 Eur



Imagen 3.1.2.i.10. Inclinómetro JN2200 IFM. Utilizado en horquillas inclinables de AGVs retráctiles.

## ii. Algoritmos de Procesamiento

Filtro de Kalman: Fusión de datos de múltiples sensores para mejorar la estimación de la posición [8]. Normalmente los diferentes sensores pueden arrojar picos debidos a reflejos, vibraciones, y todo tipo de influencias del entorno. En muchas ocasiones pueden ser valores puntuales que sobrepasan una tolerancia mínima y pueden afectar sobre el funcionamiento y rendimiento de un robot, por ello se aplican filtros que permitan evitar y garantizar cuándo un detector está enviando un valor correcto [9].

Deep Learning: Para reconocimiento de patrones y toma de decisiones basadas en datos de sensores visuales y ambientales [10]. Utilizado por algunos fabricantes de robots móviles. Principalmente estos algoritmos se utilizan para optimizar y recopilar datos que mejoren el rendimiento de los sistemas de robots móviles.

## iii. Controladores y Sistemas de Gestión

Controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo): Regulan todos los grados de libertad de movimiento y velocidad del robot [11]. Por ejemplo, en un robot móvil tipo Carretilla Retráctil, existen PIDs para el control de: la velocidad de ascenso y descenso de horquillas, la velocidad de navegación de avance y retroceso, la velocidad de inclinación de horquillas, la velocidad de desplazamiento de horquillas, y la velocidad de extracción y recogida del mástil retráctil.



Imagen 3.1.2.iii.a. Ejemplos de AGVs retráctiles.



PC Industrial: Se trata del elemento que incorporan los robots móviles para una conexión vía WiFi con un gestor de flotas o con un sistema externo del cliente (pudiendo ser un PC de línea, un sistema de gestión de almacén, un botón o un detector), además de incorporar las reglas de tráfico y comunicación con el resto de los robots de la flota. Aparte del ordenador industrial que incorpora cada robot móvil en la flota, existe un “maestro de ceremonias” que consiste en otro PC industrial o convencional que gestiona la flota y decide qué robot realiza cada tarea en cada momento.



Imagen 3.1.2.iii.b. PC Industrial para controles de flota y red instalado en cuadro eléctrico de robots móviles.

PLC de control: Se trata del dispositivo que principalmente está supliendo lo que sería un control humano de la máquina, está gestionando todas las entradas recibidas de cada uno de los sensores y detectores mencionados en el anterior apartado, y a su vez gestionando todas las salidas o actuadores que integra la máquina, como serían los motores de tracción, bombas de elevación, y todo tipo de accionamientos.

PLC de seguridad: En este caso, de manera muy similar al PLC de control, este controlador se encarga de actuar en base a las señales seguras de un robot móvil. En dicho circuito de seguridad, las entradas serán los escáneres de seguridad de la máquina que serán explicados a continuación, también los encoders de seguridad, así como todos los botones de paro de emergencia. Las salidas de este PLC actuarán directamente sobre motores o sistemas de la máquina, pudiendo parar cualquiera o todos los movimientos en función de sus detecciones de seguridad.



Imagen 3.1.2.iii.b. Izquierda: PLC de control Siemens S7-1200. Derecha: PLC de seguridad SICK Flexi Soft.

### 3.1.3. SISTEMAS DE SEGURIDAD

Dentro de todos los sensores y detectores que forman parte de los robots móviles industriales, y que ya se han introducido en el capítulo anterior, estos incorporan varios sistemas de seguridad para proteger a los operarios o peatones y prevenir accidentes con elementos del entorno, como máquinas, estanterías, cargas... Algunos de los sistemas de seguridad comunes son:

Escáneres láser: Estos dispositivos crean un mapa 2D del entorno (véase imagen 3.1.3.c.) y detectan obstáculos. Si un objeto inesperado aparece en el camino del robot, se detiene automáticamente. Para ello se configuran zonas de seguridad programables que varían a lo largo de los recorridos y en función de la velocidad, giro y dirección de avance, para así evitar accidentes en zonas de tráfico o de mayor peligro. Estos escáneres de seguridad ajustan la velocidad y la aceleración del robot para evitar movimientos bruscos o peligrosos.



Imagen 3.1. 3.a. Selección de los fabricantes y de los escáneres de seguridad más habituales en el mercado de Robots Móviles.

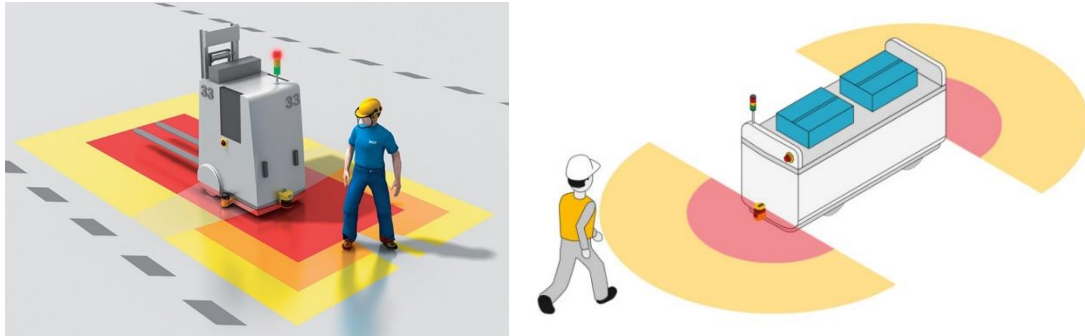


Imagen 3.1.3.b. Esquema de funcionamiento y zonas de detección de escáneres de seguridad en AGVs & AMRs.

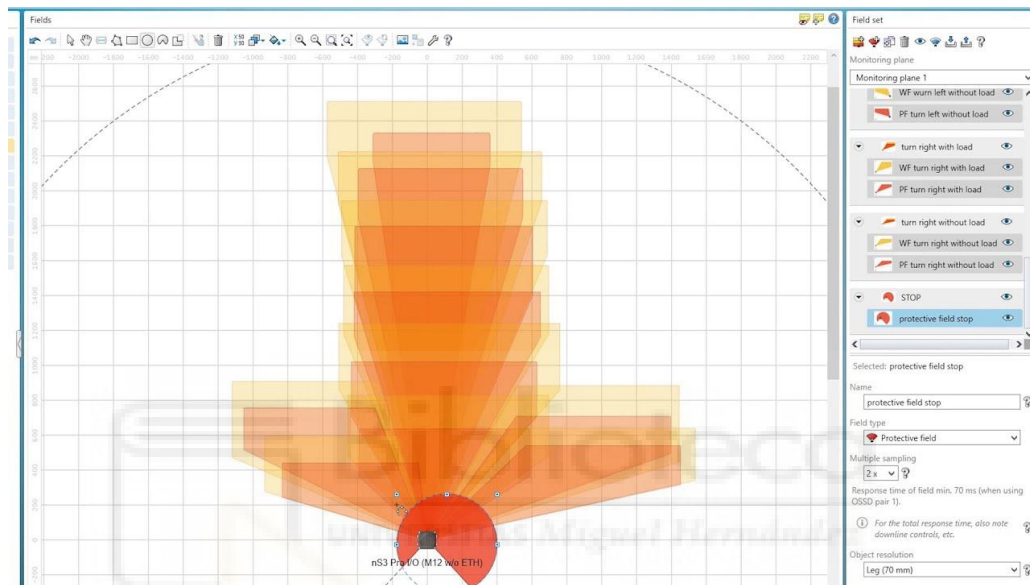


Imagen 3.1.3.c. Mapa de detección real, escáner de seguridad SICK modelo MicroScan.

**Cámaras y sistemas de visión:** Estas permiten al robot “ver” su entorno y reconocer objetos, chalecos o señales. Pueden utilizarse para evitar colisiones con objetos que no están en un plano (forma de trabajo de los escáneres láser), es decir, elementos en voladizo que no están apoyados sobre el suelo, si no que sobresalen de una mesa, estantería... Este tipo de dispositivos con inteligencia artificial se utilizan cada vez en mayor medida en la maquinaria móvil y los robots.

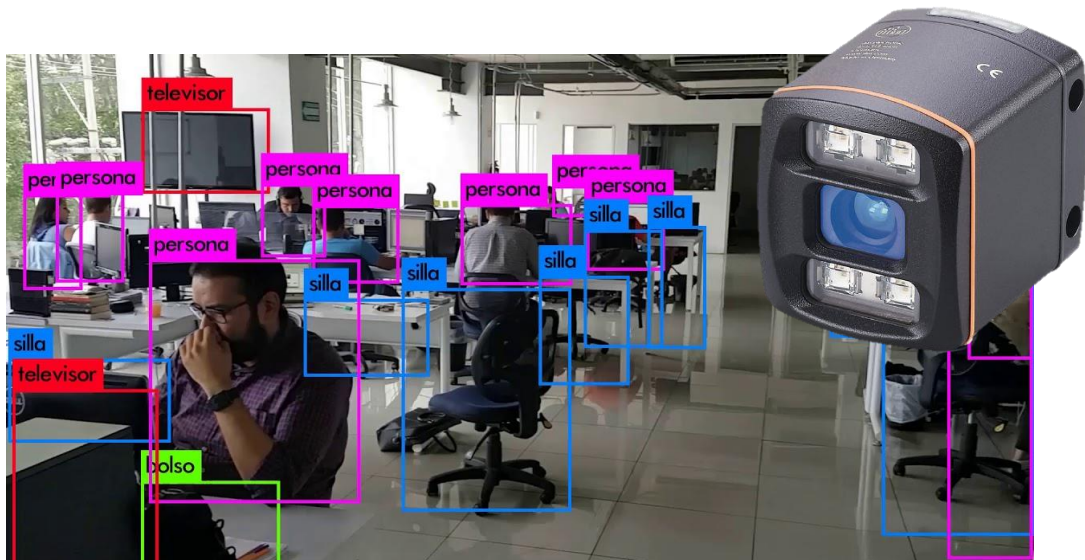


Imagen 3.1.3.d. Cámara de visión 3D IFM, sistemas de visión artificial para detección de objetos concretos y distancias.



Imagen 3.1.3.e. Ejemplo real, AGV de guiado magnético de fabricante CEIT con cámara 3D SICK Visionary-T.

Encoders de seguridad: Tal como se desarrollaron brevemente en el capítulo sobre navegación, estos dispositivos se encargan de medir físicamente el giro tanto en ángulo como en rotación de las ruedas de un robot, de este modo puede garantizar que el posicionamiento es correcto y que no ha habido deslizamientos por hielo o aceite, o un pequeño salto por una zona con un suelo en mal estado.

Setas de parada de emergencia: Estos botones de paro están ubicados estratégicamente en todos los laterales de los robots (según marcan las normativas existentes) y permiten a los operadores detener el robot de inmediato en caso de peligro.

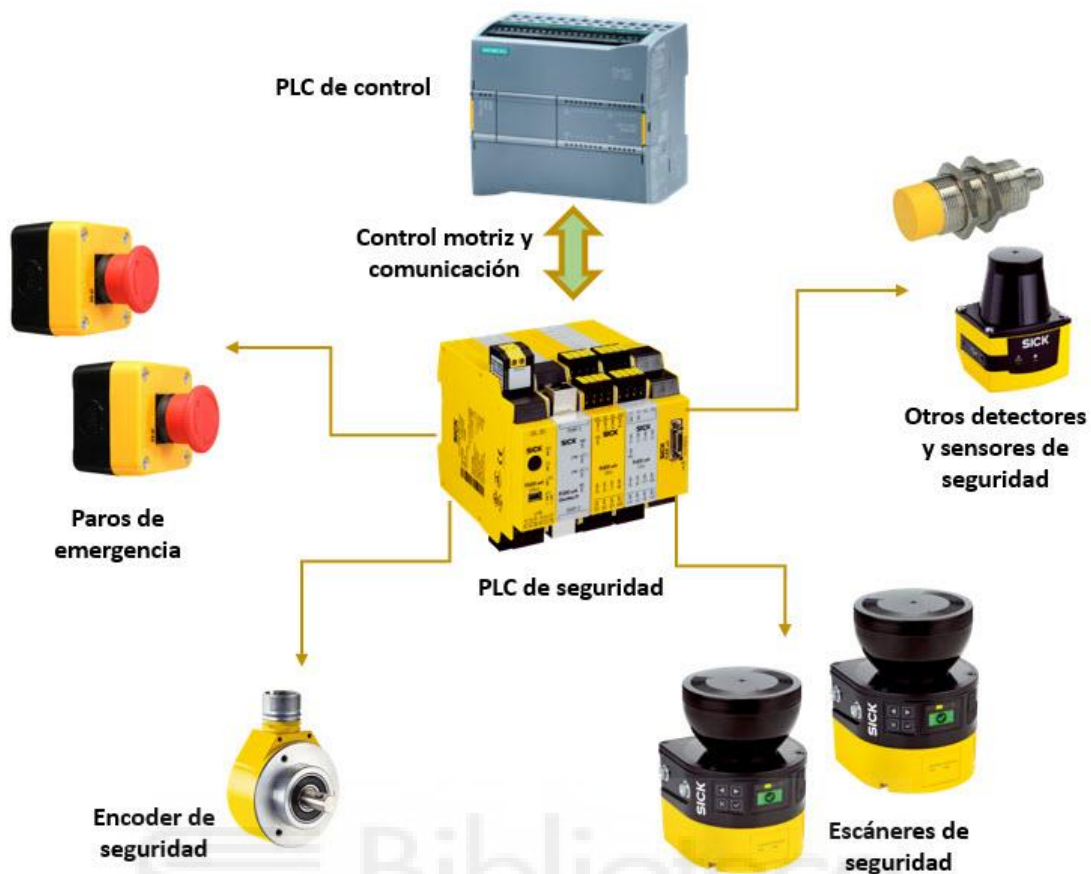


Imagen 3.1.3.f. Esquema de seguridades general AGV/AMR acorde a los elementos mencionados anteriormente.

Como puede verse tanto en las diversas imágenes que componen este capítulo sobre las seguridades, los elementos de seguridad industriales destacan por sus colores amarillos en su mayoría, en algunos casos también con tonos rojos o naranjas. Es importante remarcar que los elementos considerados “de seguridad” reciben certificaciones muy especiales y complejas a nivel de robustez, pues de todos estos componentes y su fiabilidad dependen directamente la vida de las personas que trabajan e interactúan con cualquier máquina que los incorpora. Es habitual que el coste de un elemento “seguro” frente a uno “no seguro” pueda llegar a triplicarse o quintuplicarse, por el hecho de incorporar contactores y sistemas de máxima fiabilidad. En todas las instalaciones de seguridad debe de certificarse y firmarse la velocidad de comunicación de estos sistemas, conocido como PL (Performance level) con softwares de diseño de circuitos y comprobación de tiempo de reacción. [12]

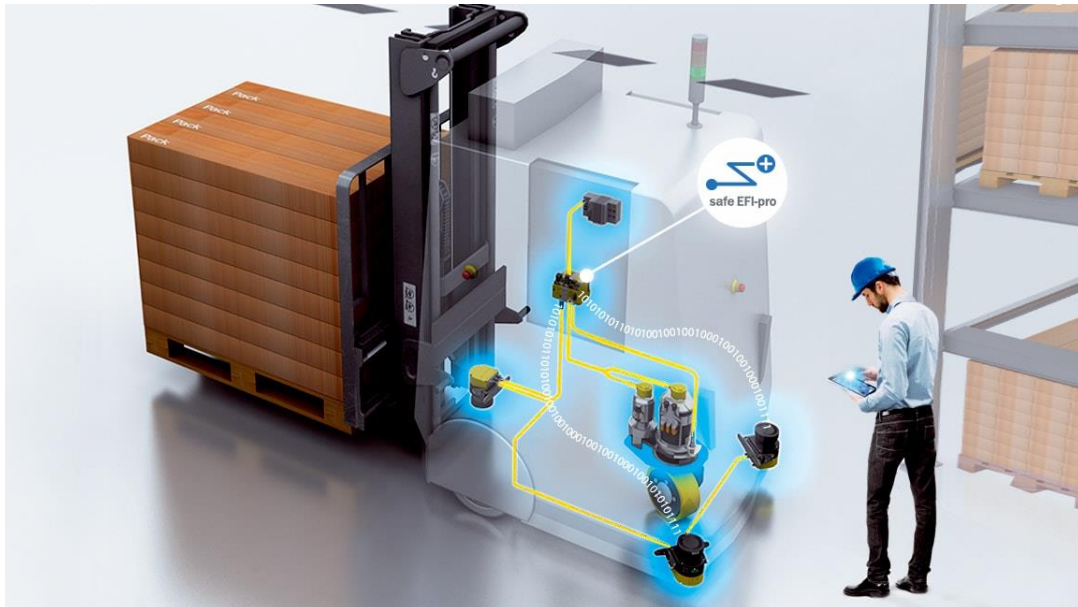


Imagen 3.1.3.g. Esquema de seguridades general sobre modelo de AGV contrapesado.

### 3.1.4. NORMATIVAS

Los robots móviles industriales están sujetos a normativas específicas para garantizar la seguridad de las personas y la operación eficiente. Algunas de las normas relevantes son:

**ISO 3691-4:** Esta norma se centra en plataformas móviles industriales, como los robots móviles autónomos (AMR) y los vehículos de guiado automático (AGV). [13] Establece parámetros y conceptos para el diseño seguro de estos sistemas en plantas industriales. Los fabricantes e integradores deben seguir esta norma para certificar la aplicación como segura una vez instalada. Aprobada en 2020, esta norma reemplaza a su predecesora, la EN 1525:1997. Algunos aspectos destacados de la norma:

**Requisitos de seguridad:** esta norma detalla los requisitos de seguridad que deben cumplir los AGVs y AMRs, incluyendo entre sus contenidos: requisitos generales de seguridad y medidas de reducción de riesgos, sistemas de freno y velocidades, sistemas de carga automática de baterías, sistemas de tracción y estabilidad, dispositivos de protección y distancias mínimas (véanse imágenes 3.1.4 y 3.1.5, con medidas entre robots y los elementos fijos de la planta para evitar colisiones, también con los operarios que trabajan alrededor, y regula la distancia entre los propios robots en zonas de cruce), modos de funcionamiento, verificaciones de seguridad...

	Clearance between the truck and the continuous fixed closed structure <sup>d</sup>		Clearance from the current position to the fixed closed structure/object in the direction of travel, C3	Personnel detection means in travel direction (PL d)	Max speed <sup>e</sup>	Required zone classification <sup>a</sup>	Reachable stop function required within 600 mm	Floor/ground marking or extra warnings required	Automatic restart permitted
	Clearance on one side, C1 mm	Clearance on the other side, C2 mm							
1a	>500	>500	>500	ACTIVE	Rated speed	Operating	NO	NO	YES
1b				MUTED	0,3 m/s	Operating hazard	NO	YES	— <sup>b</sup>
2a	>500	>500	<500	ACTIVE <sup>f</sup>	0,7 m/s	Operating hazard	NO	YES	YES
2b				MUTED	0,3 m/s	Operating hazard	NO	YES	— <sup>b</sup>
3a	>500	<500 and >100	>500	ACTIVE	1,2 m/s	Operating hazard	NO	YES	YES
3b				MUTED	0,3 m/s	Operating hazard	NO	YES	— <sup>b</sup>
4a	>500	<500 and >100	<500	ACTIVE <sup>f</sup>	0,7 m/s	Operating hazard	NO	YES	YES
4b				MUTED	0,3 m/s	Operating hazard	NO	YES	— <sup>b</sup>

Imagen 3.1.4. Extracto tabla de distancias a objetos, norma ISO 3691-4. Fuente: www.certifico.com.

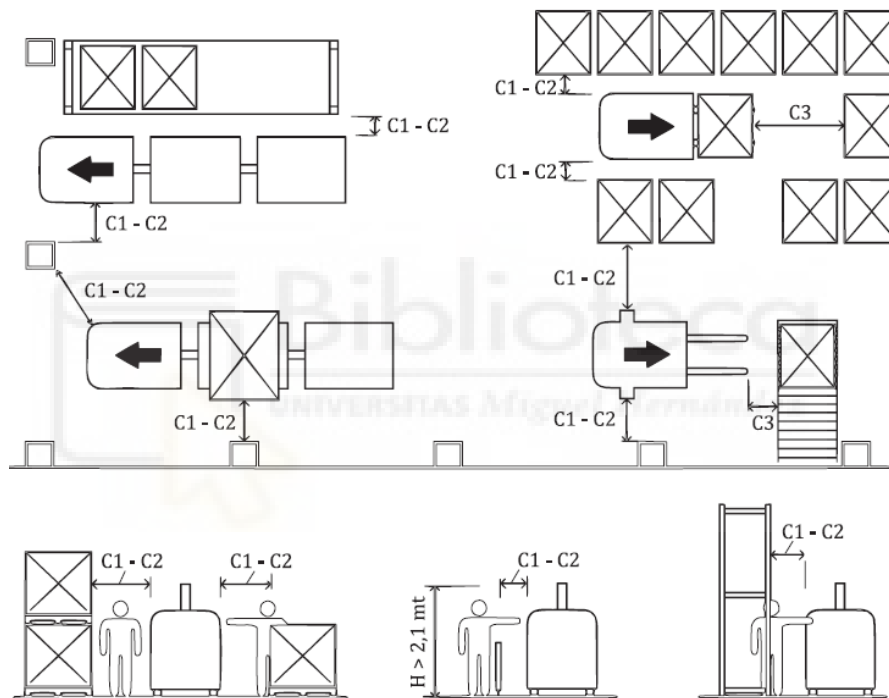


Imagen 3.1.5. Extracto de norma ISO 3691-4. Leyenda de distancias. Fuente: www.certifico.com.

En las imágenes anteriores pueden verse reflejados varios ejemplos de situaciones eventuales que pueden darse en una instalación real en la que hay vehículos industriales sin conductor trabajando, esto define diferentes casos en los que puede haber atrapamientos, colisiones, o implicaciones motrices como velocidades reducidas, reducción de seguridad, avisos acústicos y luminosos, etc. En las columnas 5 y 6 de la tabla 3.1.4. se aprecian los modos de seguridad “Activa” y “Muteada” y las velocidades “estándar” de 1,2 a 0,7 m/s y reducida de 0,3 m/s.

**Verificación y certificación:** Los fabricantes de AGVs y AMRs son responsables de obtener el certificado CE para sus modelos. Sin embargo, también es necesario que el integrador o un tercero realice la certificación de la aplicación en su conjunto acorde con esta normativa. Esto se basa en el trabajo específico a realizar, los espacios transitados y la interacción con personas, acorde a las directrices marcadas en el documento de la norma. Asimismo, si se utilizan útiles personalizados instalados sobre el robot original (como pinzas, plataformas, cobots...), el conjunto requiere de una recertificación debido a la modificación sustancial del equipo. La seguridad no reside solo en el AGV o AMR en sí, sino en la aplicación completa.

**ISO/TS 15066:** Aunque no es específica para robots móviles, esta norma proporciona orientación sobre la seguridad en sistemas de robots colaborativos, dentro de los cuales se contemplan los robots móviles. Es relevante para cualquier robot que interactúe con seres humanos. En este caso los aspectos clave son:

**Colaboración segura:** Define los requisitos de seguridad para la interacción directa entre humanos y robots. En este aspecto se considera la fuerza y velocidad aplicadas por el robot durante la colaboración. Del mismo modo se establecen límites como puede observarse en la imagen 3.1.7. acerca de rangos de presión y fuerza que debe detectar un robot en el empuje [14], así como posibles áreas de contacto humano con el robot, en el caso se los robots móviles generalmente en todo el contorno de la máquina a la altura de los pies, donde se suelen instalar sensores de empuje para evitar atrapamientos.

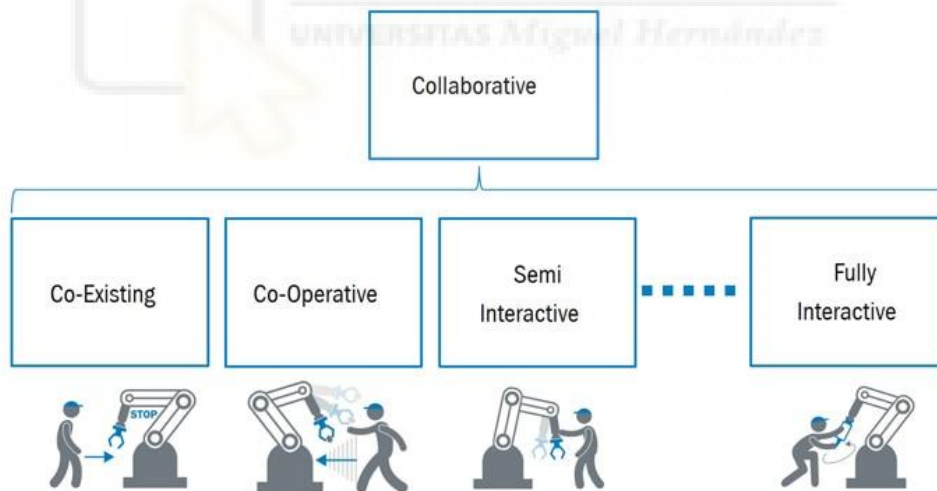
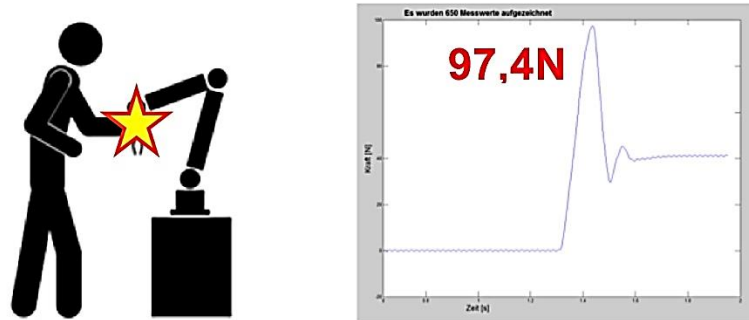


Imagen 3.1.6. Situaciones de trabajo “Colaborativas” con robótica industrial. Fuente: [www.sick.com](http://www.sick.com).





Body Region	Specific Body Area	Quasi-Static Contact		
		Peak Pressure $p_s$ [N/cm <sup>2</sup> ]	Force [N]	
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	298	135
	18	Forefinger pad ND	273	
	19	Forefinger end joint D	275	
	20	Forefinger end joint ND	219	
	21	Thenar eminence	203	
	22	Palm D	256	
	23	Palm ND	260	
	24	Back of the hand D	197	

Imagen 3.1.7. Límites de fuerza de empuje Cobot Antropomórfico. Fuente: www.Fourbythree.eu.

Evaluación de riesgos: La norma guía en la evaluación de riesgos específicos para cada aplicación colaborativa, identificando así los peligros, determinando quién o qué puede estar en riesgo y revisar regularmente la evaluación.

### 3.1.5. BATERÍAS Y ENERGÍA

En el mundo de los vehículos industriales eléctricos, se utilizan diversas fuentes de energía para alimentar las máquinas durante su funcionamiento, es el mismo caso para los robots móviles. Comúnmente se ha hablado siempre de baterías de Plomo-Ácido y de Litio, pero también van entrando en juego otras tecnologías como son las baterías de Plomo Puro, las Pilas de Hidrógeno, o la carga continuada mediante colectores:

Baterías de iones de Litio (Li-ION) [15]: Estas baterías son populares debido a su alta densidad de energía, a larga vida útil y a su capacidad de carga rápida. Los AMR o AGVs equipados con baterías de Litio pueden operar durante más tiempo sin requerir recargas frecuentes. La principal desventaja de este tipo de baterías es comúnmente el coste, actualmente triplicando las baterías de Plomo (aunque esto se compensa con la misma relación del triple en vida útil), y también la sensibilidad frente a las temperaturas extremas.

Baterías de Plomo-Ácido: Aunque menos eficientes que las de iones de litio, las baterías de plomo-ácido [16] son más económicas y se utilizan en una gran cantidad de máquinas manuales y también en AGVs y AMRs. En este tipo de baterías, se suelen tener en muchos casos dos unidades por máquina, de manera que sean intercambiables y los

ciclos de carga sean adecuados para no perjudicar la vida útil de la batería, ya de por sí más corta que la del litio (aproximadamente 3 años frente a 8). Recientemente han entrado en el mercado las baterías conocidas como de Plomo Puro, que son básicamente baterías de plomo ácido que no requieren mantenimiento ni relleno de agua destilada, además de permitir cargas de oportunidad sin dañar la vida útil. Esta tecnología de baterías permanece a medio camino en precio entre el plomo-ácido convencional y el litio [17].

	<b>Batería de Plomo-Ácido</b>	<b>Batería Litio-ion</b>	<b>Pila de Combustible</b>
<b>Capacidad:</b>	500 Ah	300 Ah	290 Ah
<b>Voltaje:</b>	24 V	24 V	24 V
<b>Tiempo de carga completa:</b>	6-8 h	2-3 h	2-3 min
<b>Ciclos (vida útil)</b>	2000	8000	>>
<b>Mantenimiento</b>	Relleno de agua destilada y limpieza	Muy reducido	Muy reducido
<b>Requisitos carga</b>	Sala de carga: gases sulfato de plomo PbSO <sub>4</sub>	Ninguno	Ninguno. Estación de generación de Hidrógeno a alta presión.
<b>Precio apróx.</b>	2.500 euros	9.000 euros	28.000 euros

Tabla 3.1.8. Comparativas -en mismo modelo de máquina- de características generales de baterías y precios.

Pilas de combustible de Hidrógeno: esta tecnología tan popular actualmente, y que básicamente convierte la energía química del hidrógeno en electricidad mediante la creación de H<sub>2</sub>O [18], está revolucionando en los últimos años el mundo de la energía eléctrica en todo tipo de industrias y vehículos, siendo la energía más limpia existente y con una alta eficiencia. Pero a lo anterior hay que sumar ciertas desventajas que impiden que se normalice y empiece a utilizarse de forma general, estas son principalmente los costes de producción del hidrógeno y de los materiales usados para altísimas presiones, la sensibilidad frente a las altas temperaturas, y la complejidad del almacenamiento y transporte. En el presente, ya son algunas las empresas en cada país que empiezan a instalar flotas de hidrógeno verde en sus almacenes y centros logísticos, como puede ser el caso de Leroy Merlin en Francia, pero son instalaciones caras que raramente se ven hoy día.



Imagen 3.1.5.a. Izquierda: Batería de plomo-ácido. Centro: Batería de Litio. Derecha: Pila de combustible de hidrógeno. Todas ellas para una máquina o robot móvil tipo carretilla contrapesada

Alimentación eléctrica directa por colectores: Aunque de forma poco habitual, en ocasiones concretas algunos robots móviles pueden conectarse directamente a la red eléctrica para obtener energía, en tareas ciertamente estacionarias como pueden ser, transportes lineales de cargas (trabajos de almacén en un único pasillo) o manipulación de cargas en distancias muy cortas que permiten una alimentación ininterrumpida y baterías de tamaño y precio reducidos.

### 3.2. CAMPOS GENERALES DE APLICACIÓN

La robótica móvil abarca muy diversos campos de aplicación [19], pasando por la logística interior con el movimiento de cargas u objetos, pero también por otros como la limpieza. A continuación se describen algunas de las aplicaciones actuales:

Logística y Almacenes: Los robots se utilizan para transportar mercancías entre estanterías o áreas de almacenamiento en centros logísticos y de distribución. Principalmente se trata de robots móviles de horquillas, semejantes a las carretillas convencionales, pues la gran totalidad de cargas que se manipulan industrialmente están paletizadas o preparadas para introducir las horquillas o “uñas” de este tipo de máquinas. En la imagen 3.2.1. puede verse un ejemplo de gama de esta tipología de máquinas. También se emplean en aplicaciones de fabricación para mover materiales o manipular piezas entre diferentes estaciones de trabajo de forma autónoma. La falta de mano de obra en este sector es un grave problema en la actualidad, por lo que, sumado a los costes y problemáticas de los operarios, el impulso de los robots también se apoya en ese déficit de personal de intralogística.



Imagen 3.2.1. Gama de AGVs para intralogística. Fuente: www.e80group.com.

Transporte: recientemente también van apareciendo proyectos piloto (imagen 3.2.2.) de robots para transporte de cargas por carretera e incluso equipos de entrega de paquetería, pero este tipo de soluciones se enfrenta también a normativas sobre los vehículos autónomos en la vía pública, así como la convivencia con peatones, vehículos y todo tipo de elementos.



Imagen 3.2.2. Ejemplos de pruebas piloto de robots de reparto. Fuentes: Glovo, DIA.es

Robots con funciones militares y de búsqueda: dispositivos que exploran terrenos peligrosos para la desactivación de explosivos, tanto en el medio acuático como terrestre. Asimismo, también existen robots de rescate para trabajo en zonas peligrosas tras avalanchas o aludes.



Imagen 3.2.3. Ejemplos de vehículos autónomos militares para detección y desactivación de explosivos.

Movimiento de material en hospitales: en algunos centros hospitalarios, donde con frecuencia se transportan manualmente carros con medicinas, materiales de alto consumo como papel, gasas, o alimentos de enfermos, se empiezan a ver soluciones con robots móviles que son capaces incluso de utilizar los ascensores y cambiar de planta. Un ejemplo en España es el Hospital Universitario Doctor Negrín, en Gran Canaria, con un proyecto en activo de robots móviles.



Imagen 3.2.4. Hospital Doctor Negrín, Las Palmas de Gran Canaria. Robots móviles de transporte de carros. Fuente: laprovincia.es

Hostelería: en la actualidad comienza a ser habitual escuchar hablar de algún restaurante donde “los camareros son robots”, esta función básica pero muy eficiente consiste en el transporte de bandejas entre cocina, barra y mesas mediante pequeños robots móviles con poca capacidad de carga nominal, ágiles y sencillos.



Imagen 3.2.5. Varios ejemplos reales de robots en el sector de hostelería.

Robots de limpieza: tanto de forma industrial como de forma doméstica, los robots de limpieza se han convertido en un aliado fundamental, encargándose de barrer o fregar el suelo de las instalaciones durante las horas de menos trabajo o cuando la casa está vacía, se trata de una tarea simple pero que conlleva un trabajo y un coste de operarios de limpieza en el caso de las industrias. Del mismo modo, y apareciendo tras la pandemia de Covid-19, también surgen los robots equipados con luz ultravioleta (UV), que desinfectan habitaciones de hospitales y otros espacios públicos.



Imagen 3.2.6. Robots de limpieza industriales y domésticos.

Producción agrícola robotizada: en agricultura también los robots móviles pueden realizar tareas como la recolección de cultivos o el monitoreo de parcelas o estado de salud de las plantas, en los Países Bajos empieza a ser habitual este tipo de cultivos inteligentes basados en la visión artificial y últimas tecnologías de robótica.



Imagen 3.2.7. Ejemplo de instalación agrícola con robot móvil de recolección en invernadero.

### 3.3. FUNCIONALIDADES DE LA ROBÓTICA MÓVIL EN INTRALOGÍSTICA

Centrando en este capítulo el foco en las instalaciones de robots móviles dedicados a la intralogística, se pueden definir ciertos tipos de movimientos que se contemplarían en este apartado en un almacén o fábrica “tipo”: recepción de materias primas en muelles, almacenamiento de materias primas y de material de embalaje, suministro de materiales y productos auxiliares en zonas de producción, retirada de residuos y material de embalaje sobrante, retirada y almacenamiento de producto acabado o preparación de cargas de camiones con entregas programadas... Los robots dedicados a estas tareas de transporte de cargas entre puntos habitualmente están concebidos para transportar pallets, cajas, cajones, o cualquier tipo de carga ciertamente estandarizada y en muchas ocasiones manipulada por medio de horquillas con carretillas elevadoras (véase de nuevo la imagen 3.2.1.), estos equipos presentan unas funcionalidades y unas ventajas para las empresas que se desarrollarán a continuación:

**Mejoras en la Seguridad:** los robots móviles están diseñados con sistemas avanzados de navegación y sensores de seguridad. Reducen colisiones y accidentes en el almacén. Pueden colaborar de manera segura con los empleados humanos (ya que se incluyen en los *cobots*, o robots colaborativos, que pueden compartir entorno con personas) y asumir tareas peligrosas. La automatización disminuye la probabilidad de accidentes y lesiones laborales. Ajustan sus rutas para evitar colisiones y garantizar la seguridad.



Imagen 3.3.1. Con la maquinaria móvil industrial más del 70% de accidentes son graves.

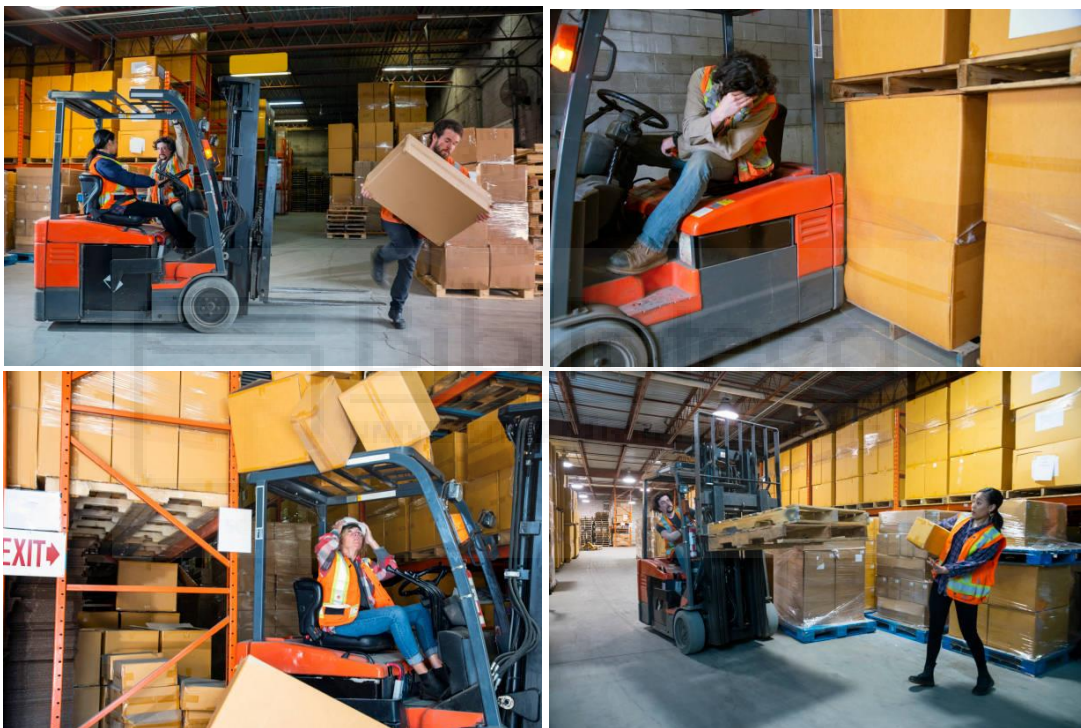


Imagen 3.3.2. Numerosas situaciones pueden ocasionar accidentes con un mal uso de carretillas elevadoras. Fuente: Getty images.

Gestión de Inventario en Tiempo Real: escanean códigos de barras, rastrean artículos y actualizan bases de datos de inventario, además optimizan el almacenamiento. Cuando los trabajos son manuales, es muy frecuente que las empresas requieran de tareas de “inventarios adicionales” para comprobar de forma actualizada los productos almacenados, esto supone un coste elevado en almacenes de tamaño medio a grande. Con la automatización, la trazabilidad es absoluta, pues todo lo que manipula un robot es registrado por un sistema informático, que puede controlar perfectamente qué producto sale y entra a un almacén en tiempo real.





Imagen 3.3.3. Operario haciendo un inventario manual en un almacén. Fuente: Tecny Stand.

Optimización de Rutas y Eficiencia Temporal: calculan rutas eficientes para tareas rutinarias como transporte de pallets, piezas o reabastecimiento [20]. Minimizan el tiempo de desplazamiento, mejorando la productividad en general del almacén.



Imagen 3.3.4. Optimización de rutas y tráfico. Fuente: [www.industria.omron.es](http://www.industria.omron.es).

#### 4. ESTUDIO TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE VIABILIDAD

A partir de este punto, y desarrollado el estado del arte de la robótica móvil industrial actualmente, el presente trabajo reflejará con un caso real, el análisis pormenorizado de un estudio de implantación de robótica móvil en una instalación. El caso por analizar consistirá en un proyecto de automatización integral de una fábrica de sistemas de aire acondicionado y bombas de calor, tanto de uso doméstico como industrial. A partir de este momento se hará referencia a la instalación como “Fábrica” y al cliente como “HVAC Systems”. Los capítulos siguientes se compondrán de una parte teórica o explicativa y de otra práctica, referida a la instalación real de HVAC Systems.

##### RESUMEN DE INSTALACIÓN DEL CLIENTE Y PROYECTO PROPUESTO:

<b>DENOMINACIÓN</b>	HVAC SISTEMAS DE FRÍO S.A.
<b>NEGOCIO</b>	Fabricación de sistemas de climatización industriales y domésticos
<b>FACTURACIÓN ANUAL</b>	218 M€
<b>Nº EMPLEADOS</b>	250-300
<b>UBICACIÓN</b>	Agoncillo, La Rioja
<b>DIMENSIÓN INSTALACIONES</b>	18.000 m <sup>2</sup>
<b>TIPOLOGÍA DE CARGAS</b>	Pallets, Carros, Cajones metálicos
<b>PLANO GENERAL</b>	Imagen 4.1. - ANEXO A

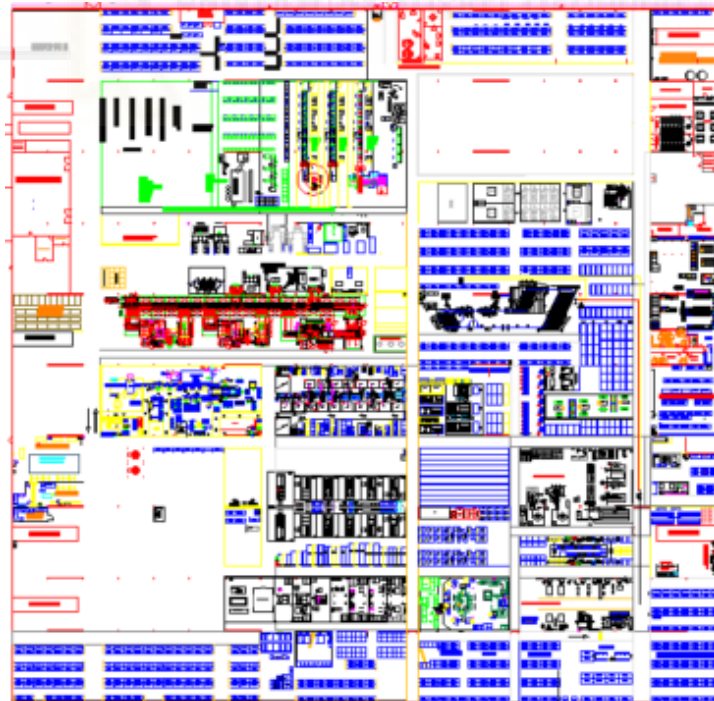


Imagen 4.1. Plano general instalaciones de cliente.

#### 4.1. PUNTOS DE PARTIDA PARA UN PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN EN INTRALOGÍSTICA

Son diversos los puntos de partida principales para afrontar un proyecto de automatización con robots móviles, entre otros, pueden mencionarse los principales que deben estar claramente definidos o tener el enfoque adecuado para llegar a una solución debidamente planteada entre proveedor y cliente.

Definición clara del proceso a automatizar: Es fundamental tener un alcance y objetivo claros para el proyecto. Cuanto más detallado sea, mayores serán los beneficios tanto en términos económicos como de plazos. Comenzar por procesos de menor escala o más sencillos es siempre apropiado para posteriormente escalar y automatizar tareas más complejas e intensas. Es muy importante conocer dentro del propio proceso a automatizar, los niveles de producción existentes en el mismo para valorar si es susceptible de automatizar.

Condiciones del suelo de la zona de trabajo planteada: es tan importante como conocer el flujo o movimientos que se desean realizar. El hecho de disponer de una zona de trabajo con un suelo de las características apropiadas en cuanto a planimetría, rugosidad, que no existan cambios de nivel con fuertes pendientes, tampoco baches o grandes juntas de dilatación.

Selección de la tipología de equipo: Se debe seleccionar un modelo de robot móvil adecuado para el proyecto en función de los puntos clave anteriores, además de contemplar el espacio disponible en planta (pasillos, zonas de paso y de giro, etc.). Además, es importante contemplar las condiciones ambientales del entorno y determinar si se trata de una zona a temperatura ambiente, congelación, refrigeración, o incluso si se trata de una zona de trabajo exterior o con saltos bruscos de temperatura.

Desarrollo de la integración para resolver la operativa: La integración con los sistemas del entorno es fundamental cuando se habla de robots móviles, que deben formar parte de un sistema superior que gestione la intralogística y se encargue de generar llamadas y enviar tareas para que puedan ejecutarse por los equipos.

Voluntad por parte del cliente: uno de los puntos más importantes a tener en cuenta es que el propio cliente sea el que luche y vele por la viabilidad del proyecto mediante su voluntad y su apoyo a la solución automatizada. Una estrategia de integración bien pensada puede ser la clave para el éxito del proyecto. Además de una correcta identificación de los resultados esperados desde todos los enfoques: económico, operativo, seguridad...

#### 4.2. REQUISITOS TÉCNICOS PRINCIPALES PARA EL USO DE ROBOTS MÓVILES EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL

Centrando este capítulo en los aspectos técnicos que pueden considerarse requisitos fundamentales en una instalación de robots móviles, se pueden enumerar como sigue:

- i. Red Wi-Fi: Se trata de un pilar fundamental para que las máquinas puedan funcionar y comunicar entre sí y con elementos del entorno tales como líneas de producción, PLCs de celdas robóticas, sistemas de gestión de almacén (SGA o WMS por sus siglas en inglés), sistemas de gestión de recursos o de materiales (ERP o MRP).
- ii. Buenas condiciones de suelo: es muy importante, para casi cualquier modelo de robot móvil existente en el mercado, un suelo de una alta planimetría y calidad. Desniveles, baches y suciedad que pueda contener el suelo serán causantes de problemas y desajustes en máquinas que se sometan a dichos traqueteos de forma continuada.
- iii. Espacio necesario de paso y de cruce: se trata de un punto bastante obvio, pero es necesario remarcarlo, para poder trabajar debidamente una flota de robots móviles, debe haber espacio suficiente en relación con el número de carriles y la cantidad de robots trabajando al mismo tiempo.

Centrando ahora este mismo apartado en la instalación en estudio, se partirá de las siguientes consideraciones según la información suministrada por el cliente:

- Conexión Wi-Fi existente en toda la fábrica, actualmente ya se utiliza para comunicaciones internas y para conexión de PCs de línea y otros elementos como tabletas y pistolas de lectura de los carretilleros.
- Suelo en buen estado. Resina epoxi instalada hace 8 años en toda la instalación. Hay al menos dos juntas de dilatación que presentan desgaste y suelo cuarteado a ambos lados. El cliente se compromete a la reparación y nivelación del suelo en estas zonas.
- Los pasillos de paso para carretillas, trenes logísticos y carros tienen más de 3,5 metros por normativa interna, por lo que son suficientemente anchos para el trabajo de AGVs o AMRs de cualquier modelo de los que pueden ser planteados para aplicaciones estándar, una vez dimensionada la flota y la tipología de equipo se podrá requerir de una ampliación de los pasillos en algunas zonas.

#### 4.3. CÁLCULO DE UNA FLOTA DE ROBOTS MÓVILES. PRINCIPALES ANÁLISIS DE VIABILIDAD. DATOS DE PARTIDA.

Para el análisis de viabilidad de una flota de robots móviles, más allá de los asuntos técnicos mencionados anteriormente en este documento en los apartados 4.1 y 4.2, se dan otros factores realmente importantes para una empresa, entre los cuales destacan el retorno de inversión (ROI, por sus siglas en inglés) y el tráfico existente, relacionado principalmente con el espacio disponible para personas, robots y maquinaria manual en la zona de trabajo.

Antes de conocer y calcular el retorno de inversión de una instalación de robots móviles, se debe calcular la flota, dicha flota se dimensionará en base a algunos de los datos ya mencionados, pero también otros referidos a la forma de trabajo de estos robots, principalmente el tiempo que tardan en desarrollar cada uno de los movimientos. En la tabla 4.3.1. se reflejan los tiempos medios reconocidos en el mundo de la robótica móvil para las tareas, navegación, y disponibilidad de los equipos. Estos valores parten en la mayoría de los casos, de las tablas y definiciones de la norma ya mencionada EN-ISO 3691-4:2020.

Tarea	Tiempo medio requerido	Velocidad máxima	Velocidad media	Disponibilidad requerida
Navegación normal	$f(v)$	2 m/s	1.2 m/s	-
Navegación en curva	$f(v)$	0.5 m/s	0.5 m/s	-
Navegación en zona restringida	$f(v)$	0.3 m/s	0.3 m/s	-
Tiempo de recogida de carga	55 seg	-	-	-
Tiempo de dejada de carga	50 seg	-	-	-
Disponibilidad tráfico y paradas	$f(\text{entorno})$	-	-	5 %
Disponibilidad carga de baterías	$f(\text{trabajo})$	-	-	15 %

Tabla 4.3.1. Valores principales para cálculo de flotas de AGVs & AMRs.

Con los valores de la tabla puede pasar a calcularse el número de equipos que conformarían una flota de robots para el desarrollo de una o varias tareas. Para desarrollar este cálculo de forma práctica, se llevará a cabo a continuación el cálculo de la flota para los flujos de cargas en la Fábrica del cliente *HVAC Systems*.

## DATOS DE FLUJOS DE MATERIALES DEL CLIENTE:

Movimiento - descripción	Zona de recogida	Zona de dejada	Distancia media	Flujo de movimientos
Recepción de materia prima	Muelles de descarga	Almacén de materia prima	55 m	9 pallets/h
Abastecimiento líneas de producción	Almacén de materia prima	Cabecera de líneas L1, L2, L3	36 m	8 carros/h
Salida de producto terminado	Enfardadora final de línea	Playas de expedición	22 m	18 pallets/h

Tabla 4.3.2. Flujos de carga y distancias medias en instalaciones del cliente.

El cliente indica adjunta además una breve descripción de cada uno de los flujos (véanse imágenes descriptivas 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3) para comprender bien la operativa y el trabajo manual que les supone:

- Flujo 1: La recepción de materia prima se plantea con una frecuencia media de 9 pallets/hora, pero en la actualidad se realizan picos a primera hora de la mañana de este flujo de hasta 50 pallets/hora en unas 3 horas, en las que se descargan aproximadamente 4-5 camiones completos. Como el cliente tiene una operativa basada en stock y trabaja durante dos turnos de trabajo completo, se acuerda y considera que ese movimiento de unos 144 pallets diarios se repartirá, resultando en el flujo definido de **9 pallets/hora**. Este trabajo se realiza actualmente por 2 operarios con carretillas en las horas de más recepción del turno de mañanas. La base de carga de manipulación es un formato de Europallet estándar que puede portar diversos materiales: aislantes, piezas de pequeño tamaño en cajas de cartón, cartones y film para embalaje, planchas metálicas...

- Flujo 2: El segundo de los flujos de cargas consiste en el abastecimiento mediante carros con materiales para las líneas de fabricación, en el almacén se preparan estos carros mediante picking y los operarios directamente los recogen y transportan a las líneas caminando. Hay una persona plenamente dedicada a abastecer este material y retirar los carros vacíos que van quedando tras el consumo de los materiales. El número de carros que se transportan por hora es de **8 llenos + 8 vacíos** de retorno.

- Flujo 3: El último de los trayectos contemplados consiste en el transporte desde una enfardadora automática a la salida de las líneas hasta una playa o pulmón a suelo en la zona de expediciones, donde posteriormente se realiza la carga manual de camiones para su envío a clientes. En cuanto al flujo de pallets terminados de las tres líneas, resulta en unos **18 pallets/hora** de media, donde habitualmente hay una persona dedicada con una transpaleta eléctrica durante cada uno de los turnos.

## DATOS SOBRE UNIDADES DE CARGA DEL CLIENTE:

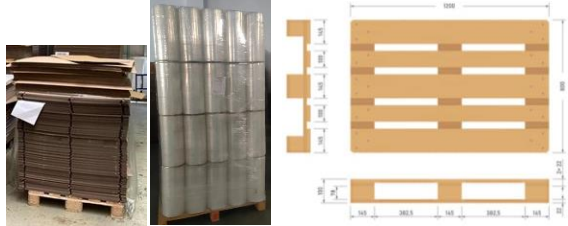
<b>Flujo 1: Europallets (EN 13698-1): 1200 x 800 mm</b>		
L min: 1200 mm L max: 1250 mm Voladizo máximo de 25 mm / lado	Color del palé: Madera natural	Plano del palé / Ejemplos-fotos de la carga: 
W min: 800 mm W max: 850 mm Voladizo máximo de 25 mm / lado	Material del palé: Madera	
Altura máxima: 1400 mm		
Peso máximo: 600 kg. Incluye peso de la carga y el palé.		
Contenido: Cartón, aislante, chapas metálicas, film, motores, cableados, otros materiales auxiliares.		

Tabla 4.3.3. Unidades de carga flujo 1: recepción de materias primas.


<b>Flujo 2: Carros propiedad del cliente: 1000 x 950 mm</b>		
L min: 1000 mm L max: 1000 mm	Color del carro: Azul	Plano del carro / Ejemplos-fotos de la carga: 
W min: 950 mm W max: 950 mm	Material del carro: Acero F-111 pintado	
Altura máxima: 1350 mm		
Peso máximo: 110 kg. Incluye peso de la carga y el carro.		
Contenido: Materia prima para montaje: material eléctrico, placas metálicas, aislante, tornillería...		

Tabla 4.3.4. Unidades de carga flujo 2: Abastecimiento de material a líneas.

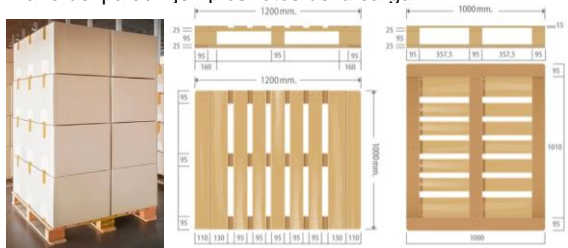
<b>Flujo 3: Industrial pallets (EN 13698-1): 1200 x 1000 mm</b>		
L min: 1200 mm L max: 1200 mm Voladizo máximo de 0 mm / lado	Color del palé: Madera natural	Plano del palé / Ejemplos-fotos de la carga: 
W min: 1000 mm W max: 1000 mm Voladizo máximo de 0 mm / lado	Material del palé: Madera	
Altura máxima: 1500 mm		
Peso máximo: 380 kg. Incluye peso de la carga y el palé.		
Contenido: Producto terminado de HVAC Systems		

Tabla 4.3.5. Unidades de carga flujo 3: Salida de producto terminado.

#### 4.3.1. CÁLCULO DE FLOTA DE AGVs Y AMRs NECESARIOS

Con toda la información aportada por parte del cliente, puede realizarse un cálculo y dimensionamiento de la flota necesaria de AGVs o AMRs para cada uno de los flujos y determinar entonces una estimación económica y posterior cálculo de retorno de inversión resultante frente a la operativa manual:

FLUJO 1	"En vacío"		Secuencia de recogida				"Cargado"
Comentario	Posición de inicio	Distancia hasta "zona de recogida"	Ubicación de recogida	Tipo de recogida	Altura de elevación necesaria	Tiempo en recogida	Distancia hasta "almacén"
<b>Recepción a almacén</b>	Zona de espera junto a muelles	10	Zona muelles de recepción	Ubicación en suelo	0	55	55
<b>Retorno a zona de espera</b>	Zona de almacén	45	Zona de espera junto a muelles	-	0	0	0m
<b>Velocidad media (m/s) =</b>			1,2				
<b>Velocidad de elevación (m/s) =</b>			0,4				
<b>Velocidad en Curva (m/s) =</b>			0,5				
<b>Disponibilidad carga de baterías =</b>			15%				
<b>Factor de tráfico y obstáculos =</b>			5%				
Secuencia de dejada				Cálculos de capacidad			
Ubicación de dejada	Tipo de dejada	Altura de elevación necesaria	Tiempo en dejada	Ciclos / hora	Tiempo por ciclo	Tiempo total requerido	Nº Robots necesarios
Almacén	Ubicación en estantería	5	66,67	9	252,08	2269s	0,63
-	-	0	0	9	67,5	608s	0,17
<b>Nº robots total</b>						<b>1</b>	

Tabla 4.3.1.1. Resumen de cálculo de robots para flujo de recepción de materiales (1).



FLUJO 2	"En vacío"		Secuencia de recogida				"Cargado"
Comentario	Posición de inicio	Distancia hasta "zona de recogida" (m)	Ubicación de recogida	Tipo de recogida	Altura de elevación necesaria	Tiempo en recogida	Distancia hasta "zona de dejada" (m)
<b>Almacén a líneas de producción</b>	Zona de espera en almacén	8	Cabecera de almacén	Ubicación en suelo	0	55	36
<b>Carros vacíos a almacén</b>	Cabecera de producción	5	Ubicación de carro vacío	Ubicación en suelo	0	55	39
<b>Velocidad media (m/s) =</b>				0,8			
<b>Velocidad de elevación (m/s) =</b>				0,4			
<b>Velocidad en Curva (m/s) =</b>				0,5			
<b>Disponibilidad carga de baterías =</b>				15%			
<b>Factor de tráfico y obstáculos =</b>				5%			
Secuencia de dejada				Cálculos de capacidad			
Ubicación de dejada	Tipo de dejada	Altura de elevación necesaria	Tiempo en dejada	Ciclos / hora	Tiempo por ciclo	Tiempo total requerido	Nº Robots necesarios
Cabecera de líneas	Ubicación en suelo	0	50	8	175,25	1402s	0,39
Zona de espera almacén	Ubicación en suelo	0	50	8	175,25	1402s	0,3894444
<b>Nº robots total</b>							<b>1</b>

Tabla 4.3.1.2. Resumen de cálculo de robots para flujo de abastecimiento a líneas (2).

FLUJO 3	"En vacío"		Secuencia de recogida				"Cargado"
Comentario	Posición de inicio	Distancia hasta "zona de recogida"	Ubicación de recogida	Tipo de recogida	Altura de elevación necesaria	Tiempo en recogida	Distancia hasta "zona de dejada"
<b>Salida de líneas a expediciones</b>	Zona de espera salida de líneas	5	Salida de enfardador a	Transportador de rodillos	0,5	56,67	22
<b>Retorno a zona de espera</b>	Zona de expediciones	25	Zona de espera salida de líneas	-	0	0	0m
<b>Velocidad media (m/s) =</b>				1,2			
<b>Velocidad de elevación (m/s) =</b>				0,4			
<b>Velocidad en Curva (m/s) =</b>				0,5			
<b>Disponibilidad carga de baterías =</b>				15%			
<b>Factor de tráfico y obstáculos =</b>				5%			
Secuencia de dejada				Cálculos de capacidad			
Ubicación de dejada	Tipo de dejada	Altura de elevación necesaria	Tiempo en dejada	Ciclos / hora	Tiempo por ciclo	Tiempo total requerido	Nº Robots necesarios
Playa de expediciones	Ubicación en suelo	0	50,00	18	174,08	3134s	0,87
-	-	0	0	18	37,5	675s	0,19
<b>Nº robots total</b>							<b>2</b>

Tabla 4.3.1.3. Resumen de cálculo de robots para flujo de salida de líneas (3).

Los resultados o conclusiones que pueden extraerse de las tres tablas son los siguientes, con los que se procederá a calcular el retorno de la inversión:

- i. **Flujo 1:** Se requiere **un solo equipo** para desarrollar la operativa con la producción dada por el cliente. El tipo de máquina definido para este flujo será del tipo AGV retráctil, máquina diseñada y concebida para el trabajo en alturas de hasta 10 metros de elevación (la estantería del cliente tiene 5 metros). Una máquina inferior en prestaciones y por lo tanto más económica sería un apilador, que de media en el mercado pueden encontrarse modelos que trabajan hasta 4 metros de altura, por lo que la estantería no se podría explotar completamente por parte de los robots. En la imagen 4.3.1.1. se aprecia un AGV retráctil con los datos técnicos siguientes:

<b>Modelo</b>	1x STILL FM-X iGo 20
<b>Capacidad de carga nominal</b>	2.000 kg
<b>Altura de elevación</b>	6 m
<b>Altura de construcción (replegado)</b>	3,2 m
<b>Peso</b>	3.000 kg
<b>Mínimo pasillo de trabajo</b>	3,5 m
<b>Velocidad máxima</b>	2 m/s
<b>Tecnología de navegación</b>	Guiado Láser-Reflector



Imagen 4.3.1.1. Modelo de AGV retráctil planteado para *Flujo 1* del cliente.

- ii. **Flujo 2:** Para este movimiento de suministro de carros con material y retirada de carros vacíos también se requiere tan solo de **un robot**, que suplirá el trabajo de una persona dedicada a este movimiento durante las horas de producción. En este caso la tipología de robot planteada para el movimiento de carros será un AMR tipo plataforma de navegación libre para realizar el recorrido. Este tipo de navegación aportará la flexibilidad para evitar obstáculos que pueda encontrar en la zona de producción entre los operarios de línea. En la imagen 4.3.1.2. se aprecia un AMR tipo plataforma con los datos técnicos siguientes:

<b>Modelo</b>	1x STILL AXH 10
<b>Capacidad de carga nominal</b>	1.000 kg
<b>Altura de elevación</b>	300 mm
<b>Altura de construcción (replegado)</b>	250 mm
<b>Peso</b>	250 kg
<b>Mínimo pasillo de trabajo</b>	2,2 m
<b>Velocidad máxima</b>	1,8 m/s
<b>Tecnología de navegación</b>	SLAM



Imagen 4.3.1.2. Modelo de AMR con navegación libre planteado para *Flujo 2* del cliente.

- iii. **Flujo 3:** Para el tercero de los flujos de carga dados en el proyecto: retirada de pallets con producto terminado de enfardadora, se necesitará a priori una flota de **2 robots móviles** dedicados a dicha operativa. Estos robots serán en este caso del tipo apilador, tratándose de un modelo idóneo para trabajo tanto en posiciones sobreelevadas como a nivel de suelo. En este movimiento los pallets se extraen de un transportador de rodillos y se almacenan en suelo en la zona de expediciones, por lo tanto, un modelo compacto y acorde a la aplicación es el que se muestra en la imagen 4.3.1.3 y que incluye las siguientes características técnicas:

<b>Modelo</b>	2x STILL EXV iGo 16
<b>Capacidad de carga nominal</b>	1.600 kg
<b>Altura de elevación</b>	3,1 m
<b>Altura de construcción (replegado)</b>	2,6 m
<b>Peso</b>	1.850 kg
<b>Mínimo pasillo de trabajo</b>	3 m
<b>Velocidad máxima</b>	2 m/s
<b>Tecnología de navegación</b>	Guiado Láser-Reflector



Imagen 4.3.1.3. Modelo de AGV Apilador planteado para *Flujo 3* del cliente.

#### 4.3.2. CÁLCULO ESTIMATIVO DEL RETORNO DE INVERSIÓN

En primer lugar, deben obtenerse los precios [21] de los diferentes modelos de robot definidos en el capítulo anterior, así como la valoración del proyecto y la implantación, en base a un análisis de mercado basado en algunos fabricantes europeos, se tiene lo siguiente:

<b>Modelo AGV/AMR</b>	<b>Precio medio de mercado</b>	<b>Desarrollo y Puesta en Marcha estimado para operativas</b>
<b>AGV retráctil:</b>	120.000 – 140.000 €	200.000 €
<b>Tarifa Full-Service</b>	600-900 €/mes	-
<b>AMR tipo plataforma:</b>	50.000 – 65.000 €	90.000 €
<b>Tarifa Full-Service</b>	300-500 €/mes	-
<b>AGV tipo apilador:</b>	70.000 – 90.000 €	120.000 €
<b>Tarifa Full-Service</b>	400-600 €/mes	-

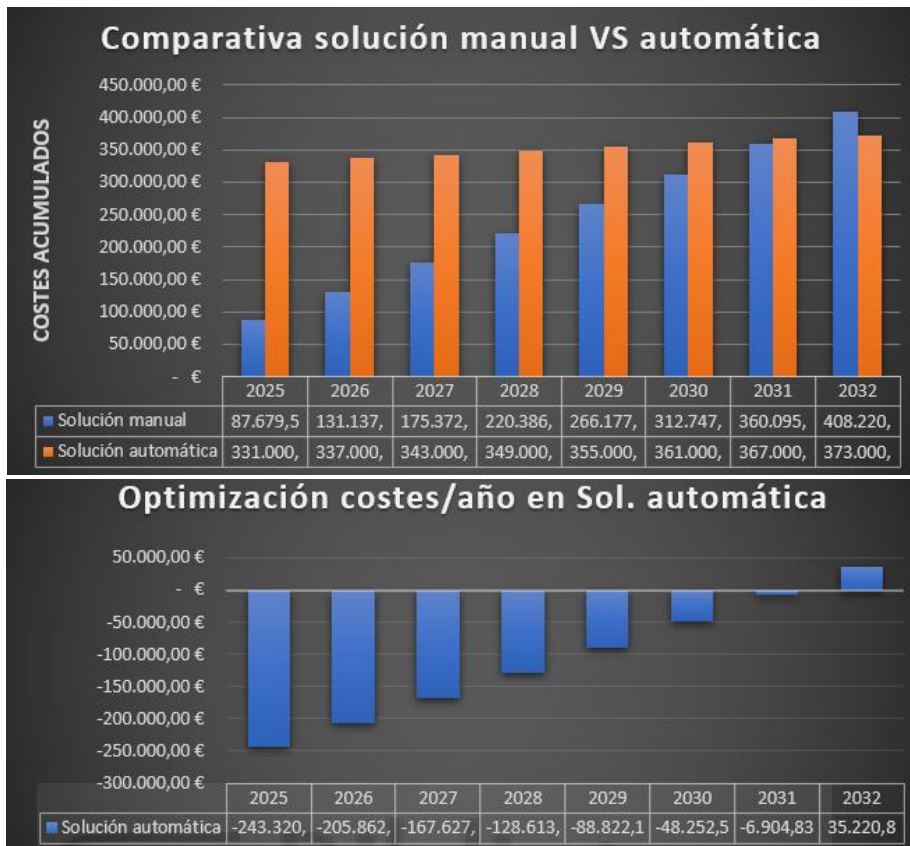
Tabla 4.3.2.1. Principales costes de AGVs.

Además de los valores definidos para los precios de la tabla anterior, también debe definirse el coste de operarios y carretillas medio para contrastarlo con los robots móviles. Estos valores los va a aportar en muchas ocasiones el cliente, aunque también pueden obtenerse en base a convenios laborales nacionales y precios medios de mercado del mundo de las carretillas a nivel alquiler, mantenimiento, etcétera.

<b>PRINCIPALES COSTES DE PERSONAL y MAQUINARIA</b>	<b>Coste medio total empresa</b>	<b>Coste anual de Cliente en caso práctico</b>
<b>Operario de carretilla:</b>	35.000 €/año	35.000 €/año Flujo 1 35.000 €/año Flujo 3
<b>Operario de producción:</b>	30.000 €/año	30.000 €/año
<b>Carretilla contrapesada + mantenimiento Full-Service 60 meses:</b>	585 €/mes	7.020 €/año
<b>Apilador eléctrico + mantenimiento Full-Service 60 meses:</b>	260 €/mes	3.120 €/año
<b>Absentismo laboral:</b>	2.800 €/mes/trabajador	100.800 €

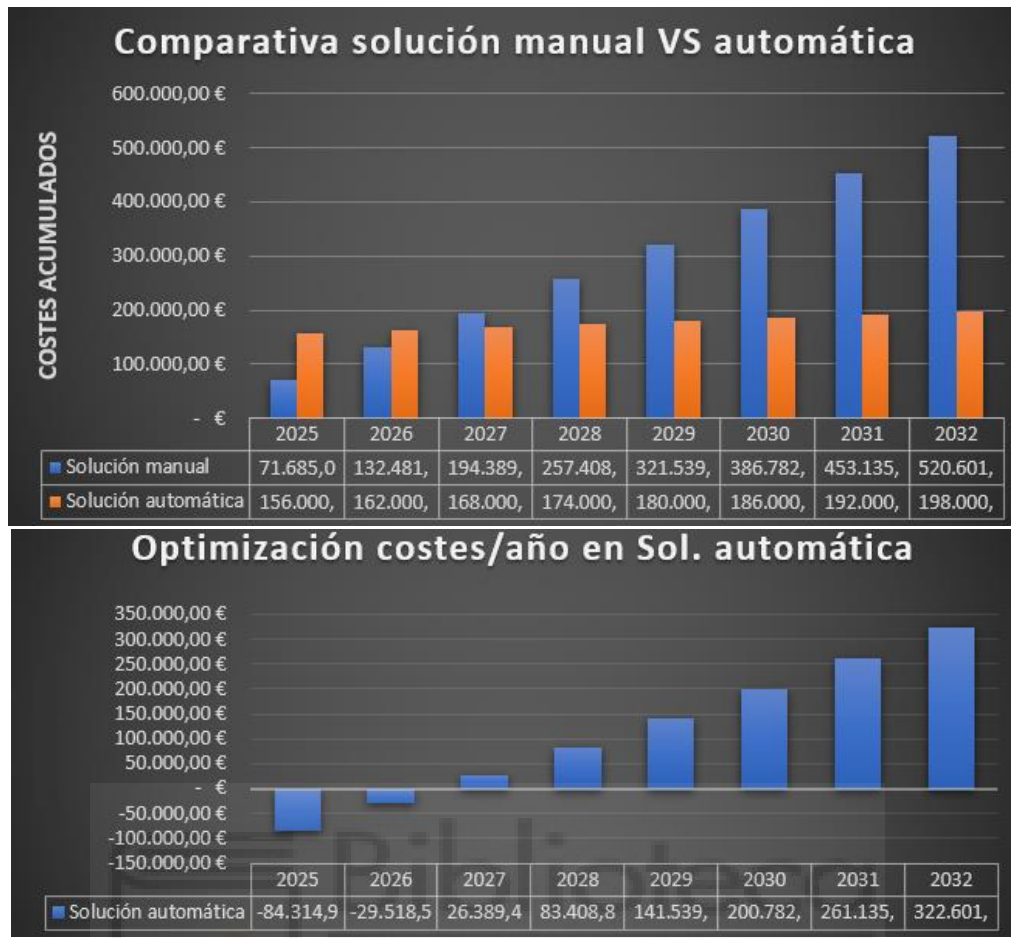
Tabla 4.3.2.2. Principales costes de operativa manual.

Una vez se han obtenido las valoraciones de los gastos de ambas operativas -manual y automática-, se puede estudiar el ROI (Return of investment) para estudiar la viabilidad económica del proyecto, partiendo de que la viabilidad técnica ya se ha acotado debidamente. Introduciendo los valores considerados en una herramienta Excel para el cálculo del retorno, se obtienen los resultados mostrados en las siguientes gráficas.



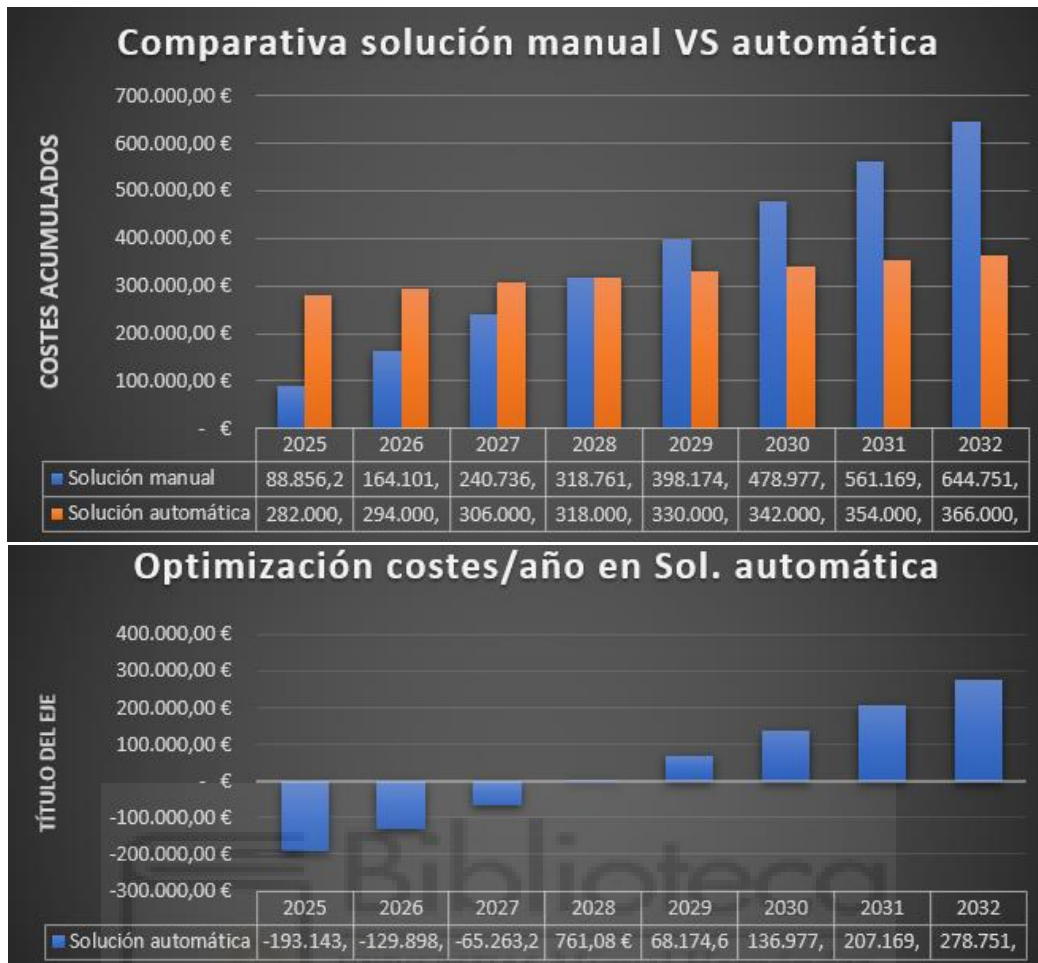
Gráficas 4.3.2.1. ROI Flujo 1.

Para la primera de las soluciones: 1 AGV retráctil transportando los pallets desde la zona de recepción hasta el almacén de materia prima se tiene un resultado del cálculo de ROI algo negativo, con un retorno a los 7,5 años, cuyo periodo se sale del cálculo del cliente, y de los números de la mayoría de las empresas, que fijan habitualmente el límite de los retornos en los 5 años, incluso menos. La operativa manual que realiza actualmente el cliente es más eficiente en costes que la que se lograría con robótica móvil, por lo que inicialmente será un flujo que podrá ser descartado a nivel financiero por el departamento de compras.



Gráficas 4.3.2.2. ROI Flujo 2.

En el caso del flujo 2, se tiene un resultado muy diferente, y es que, al haber una persona centrada en la operativa de movimiento de carros en cada uno de los dos turnos de trabajo, el retorno resulta interesante. Exactamente en 2,54 años de funcionamiento, la instalación de robótica móvil estaría brindando beneficios (o, mejor dicho, ahorrando costes) al cliente, por lo que se trata de una operativa muy interesante a resolver con AMRs de tipo plataforma que gestionen todos los carros entre el almacén y las líneas de producción.



Gráficas 4.3.2.3. ROI Flujo 3.

Por último, las gráficas superiores muestran para la solución del flujo 3 un resultado también interesante en cuanto al retorno puede observarse que, a partir de inicios del 4º año de la compra, este sistema también estaría presentando ahorros frente a una persona en cada turno con una máquina manual dedicada a la preparación de las expediciones. Una flota de 2 apiladores automáticos encargado de esta operativa también sería muy interesante económicamente además de a nivel de prevención y seguridad.



#### 4.4. DISEÑO CAD DE LA ZONA DE TRABAJO

En el listado de apartados acerca de la viabilidad operativa para un proyecto de robótica móvil faltaría un apartado referido al plano y zona de trabajo, bien es cierto que esta debe cumplir los requisitos de anchos de pasillo necesarios, así como cumplir los espacios de seguridad marcados por la norma ISO 3691-4 explicada también en el apartado 3.1.4.

Para comprobar estos requisitos, se solicita al cliente un plano CAD en formato de archivo 2d (.DWG, .DXF) para poder realizar la correcta medición de las zonas de paso con programas como Autocad, ZWCad o similares. En las sucesivas imágenes se procederá a la señalización de las diferentes zonas de trabajo para cada flujo, así como la señalización de las distancias o anchuras de pasillo.

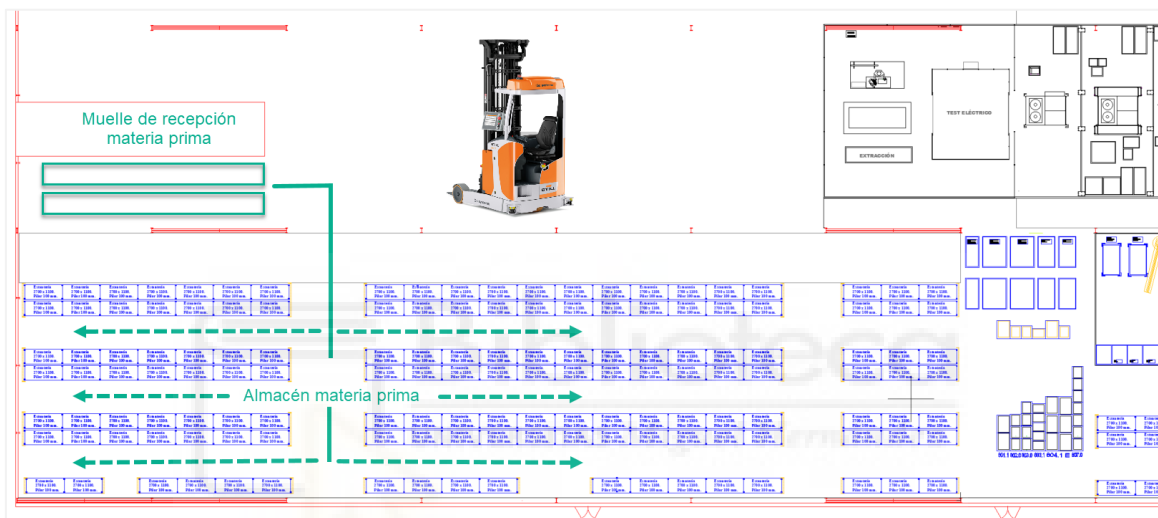


Imagen 4.4.1. Zona de trabajo Flujo 1 marcada en verde. Véanse imágenes en Anexo B.

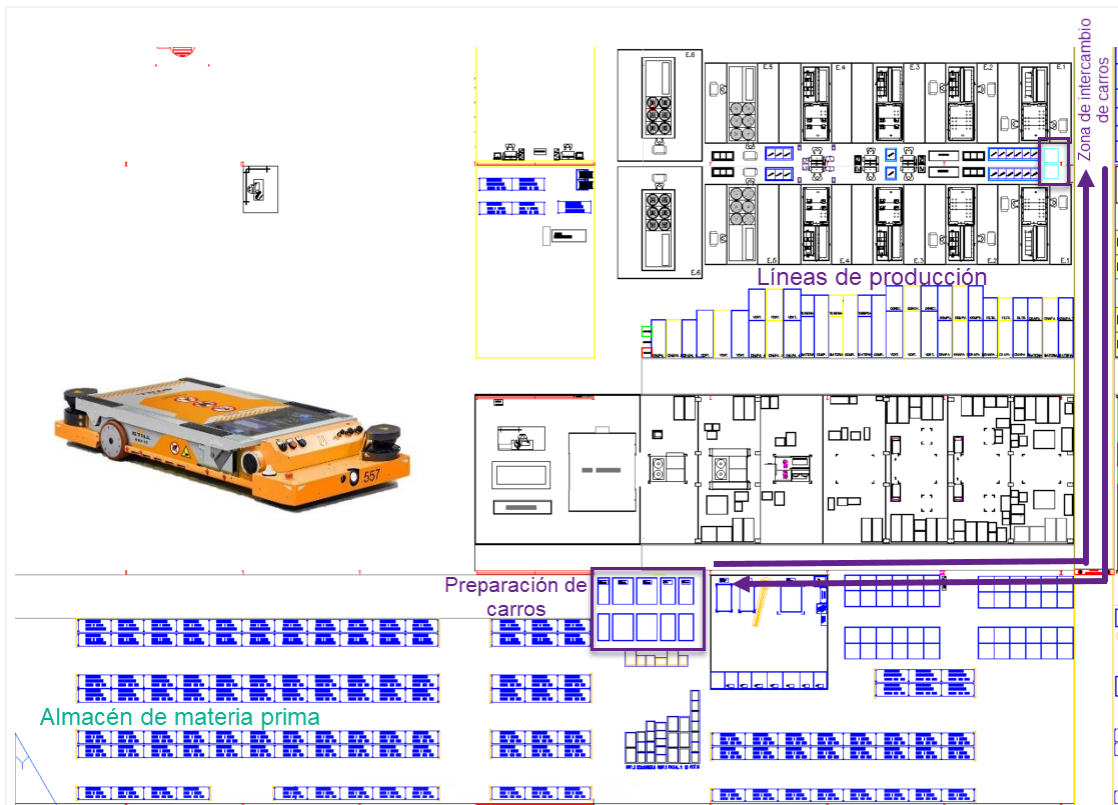


Imagen 4.4.2. Zona de trabajo Flujo 2 marcada en morado. Véanse imágenes en Anexo B.



Imagen 4.4.3. Zona de trabajo Flujo 3 marcada en rojo. Véanse imágenes en Anexo B.

## 5. FASES DE IMPLANTACIÓN DE ROBOTS MÓVILES *ON-SITE*

Una vez un proyecto es lanzado y se procede con el desarrollo e implantación, debe organizarse y gestionarse debidamente para que todos los factores que influyen en el correcto trabajo de los robots estén bien diseñados para la puesta en marcha.

### 5.1. INFRAESTRUCTURA NECESARIA PARA NAVEGACIÓN

A nivel de navegación, los AGVs y AMRs pueden requerir muy diversas tecnologías (véase el apartado 3.1.1. de este documento), por lo que deberá instalarse y corregirse todo aquello que tenga que ver con el posicionamiento. Además de lo anterior, el suelo deberá ser reparado o adaptado en las zonas en las que no se cumplan los requisitos mínimos de estado del suelo suministrados por el fabricante.

Para el caso práctico planteado se encuentran AGVs de navegación láser con reflectores y AMRs con navegación libre, en cada caso se requerirá lo siguiente:

AGVs con navegación láser: para las zonas de trabajo de los flujos 1 y 3 se deberán instalar N reflectores que permitan garantizar el correcto posicionamiento de los AGVs en todo momento, la ubicación de estos reflectores deberá realizarse en el plano de navegación del láser de navegación y sobre elementos fijos de las instalaciones del cliente. En la imagen 5.1.1. y 5.1.2. se aportan, para las zonas de trabajo definidas, un plano orientativo de ubicación de reflectores, la instalación de estos debe ser siempre previa a la puesta en marcha de los robots.

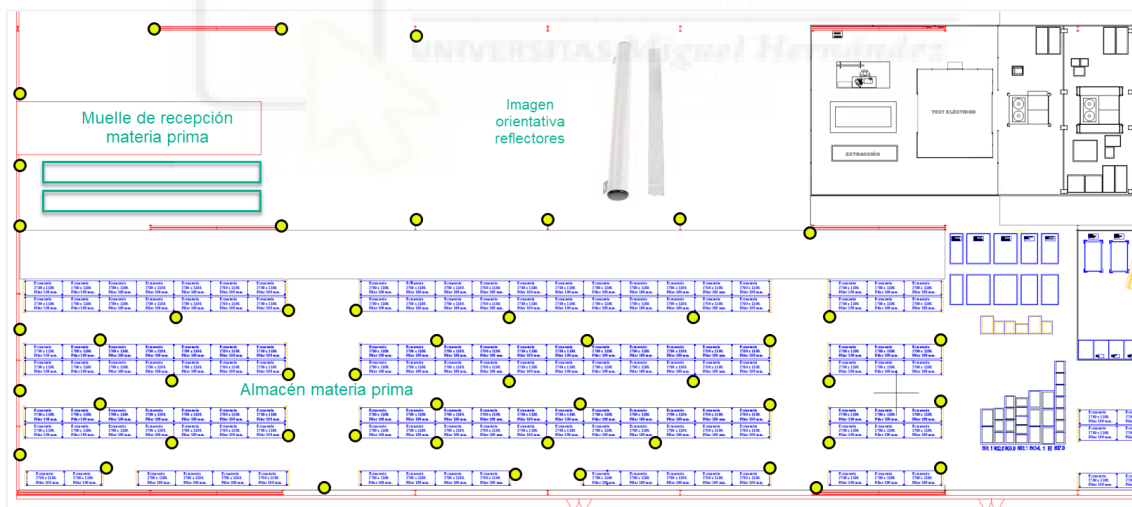


Imagen 5.1.1. Plano de reflectores (en amarillo) para la zona de trabajo de AGV retráctil: Almacén de materia prima.

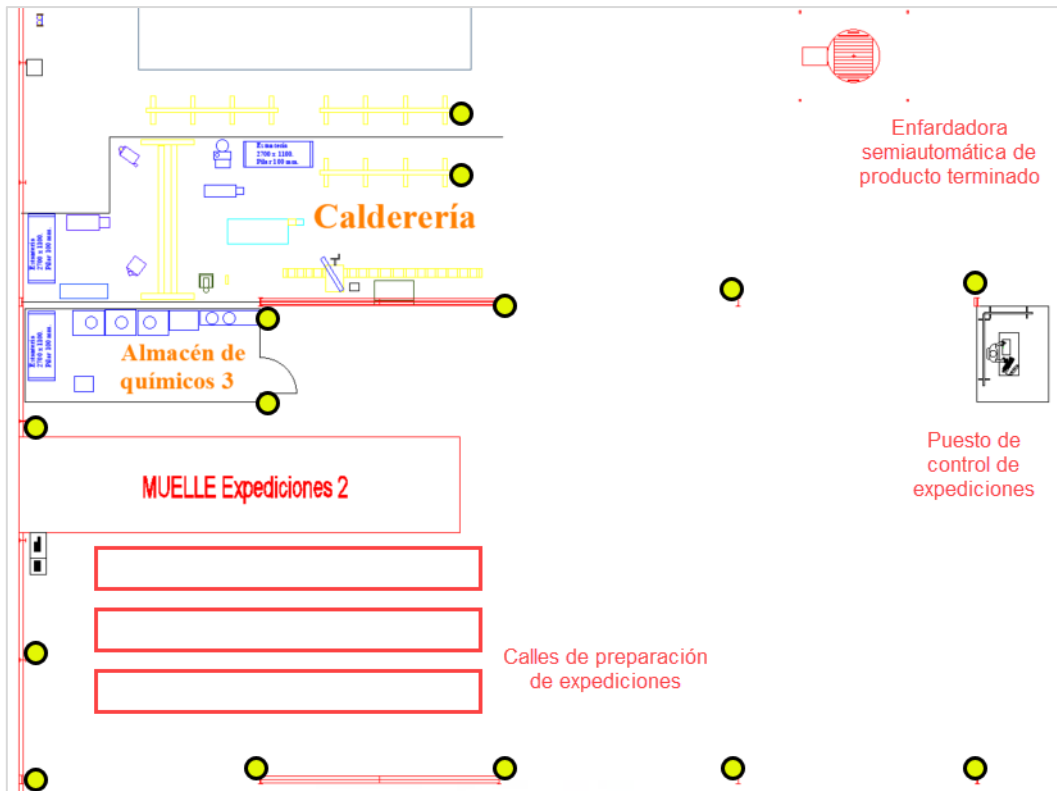


Imagen 5.1.2. Plano de reflectores (en amarillo) para la zona de trabajo de los AGVs Apiladores: Preparación expediciones.

Los AMRs con navegación libre, tal como se ha explicado en el capítulo 3, no requieren de ningún tipo de infraestructura para el correcto funcionamiento, más que un correcto orden y limpieza en la zona de trabajo que les permita trabajar correctamente y evite paradas por obstáculos.

## 5.2. INFRAESTRUCTURA EN ZONA DE TRABAJO Y HARDWARE

Dejando a un lado la infraestructura anterior requerida para la navegación de los diferentes robots móviles, hay otros elementos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema:

- Guías para intercambio de pallets a suelo entre operarios de descarga de camión con AGVs retráctiles.

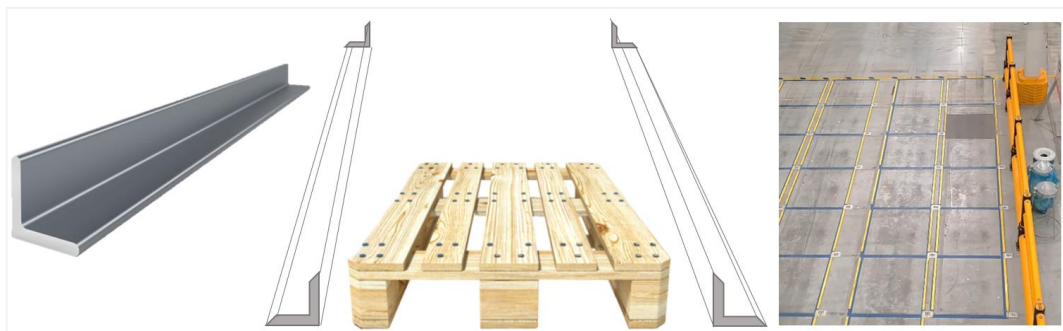


Imagen 5.2.1. Imágenes orientativas de zona de intercambio entre operarios y AGVs en muelles de recepción.

- Escuadras de guiado para ruedas de carros de preparación entre los operarios de almacén de materias primas y los AMRs de abastecimiento a cabeceras de línea. Asimismo, la misma situación para la devolución de carros vacíos desde las líneas de producción hasta el almacén.



Imagen 5.2.2. Imagen orientativa guías de entrada carros para centrado en ubicaciones de recogida de AMRs.

- Pintura y marcado de las zonas de trabajo de robots móviles delimitando claramente las zonas.

### 5.3. PRUEBAS DE INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES - SOFTWARE

Tal como se analizó en el apartado 4.2 de este documento, uno de los requisitos principales para un proyecto de robótica móvil es la red wifi, dado que se trata de la infraestructura de comunicaciones, debe cubrir toda la zona de trabajo con una buena cadencia y velocidad de transmisión de datos. Como estándar entre fabricantes, se suele solicitar una velocidad de envío y recepción de información de entre 30 y 50 milisegundos.

Antes de pasar a la situación analizada en el caso práctico, se añaden a continuación unas descripciones breves de los protocolos de comunicación e integración más comunes en proyectos de este tipo:

#### i. Protocolos de comunicación con sistemas superiores

TCP/IP: Se trata de conjunto de protocolos de comunicación que se utilizan para la transmisión de datos en redes de área local (LAN) y de área amplia (WAN), por ejemplo, HTTP [22]. En la gran mayoría de proyectos de robótica móvil se utiliza este modo de comunicación con diferentes variaciones como pueden ser: intercambio de ficheros, sobrescritura de variables... El funcionamiento fundamentalmente se basa en activar o desactivar una serie de variables que se han configurado previamente para que los controladores las interpreten de una forma determinada y provoquen acciones por parte

de la flota de robots, en este caso, como recoger un tipo de carga en una estación de recogida para llevarla a otra de dejada.

WEB SERVICES REST/SOAP: Se trata de un protocolo de comunicación bastante extendido en las integraciones industriales [23], consiste en el envío de tramas de datos entre los diferentes elementos de control que comparten el *mismo idioma*. De esta manera, un elemento puede decirle a otro lo que ha de acontecer en base a su función en la cadena de trabajo, por ejemplo: en base a la lectura de un código de barras en la salida de línea de producción, un sistema de gestión de recursos (ERP) puede enviar un mensaje codificado que, para un gestor de flotas de AGVs, signifique “*hay un pallet listo en la línea 3 con matrícula 92788874842094, debe ser transportado a la línea de enfardado con una prioridad 4*”. De esta forma con comunicaciones precisas los sistemas quedan perfectamente integrados y puede haber una monitorización centralizada en la que se pueda obtener toda la información de todos los elementos.

## ii. Protocolos de comunicación con PLCs

S7 Protocol Profinet: Este protocolo de comunicaciones es un intercambio de variables bidireccional basado en la arquitectura de PLCs de control del fabricante **Siemens** [24], uno de los más extendidos a nivel industrial. Básicamente se trata de establecer N variables que hacen referencia a todo aquello necesario para una comunicación con un sistema de robots móviles, y suele utilizarse cuando alguna de las máquinas que convive con los AGVs o AMRs incorpora un PLC Siemens, por ejemplo, una celda de paletizado, una enfardadora, o un transportador motorizado.

FINS: *Factory Interface Network Service*, por sus siglas en inglés, se trata, al igual que en el caso anterior de Siemens, del protocolo de comunicación del fabricante de PLCs **Omron**.

AC 800M: Al igual que en el caso de los dos fabricantes mencionados anteriormente, y en orden de popularidad, este protocolo es el de comunicación inalámbrica desarrollado por el fabricante de PLCs y sistemas **ABB**.

## iii. Protocolos de comunicación aislados – *Stand alone*:

Envío de tramas: Se trata del sistema directo de comunicaciones que cada fabricante desarrolla para llamar y enviar tareas a sus robots móviles o gestores de flotas. Suele atacar directamente a los dispositivos y normalmente la información es más básica. Se conocen como sistemas “stand alone” porque permanecen ajenos al resto de comunicaciones y sistemas de la fábrica o el almacén. Ejemplos de este tipo de implantaciones son aquellas en las que un operario debe validar o preparar las cargas que un robot debe manipular, por lo que, hasta que no termina sus tareas manuales no genera

una llamada mediante un botón, un ordenador o una Tablet. Bien es cierto que esta comunicación más sencilla no tiene por qué ser siempre manual, pues puede funcionar mediante un sensor sencillo que dispare una señal que pueda ser interpretada vía WiFi, por ejemplo, si un sensor fotoeléctrico o mecánico se activa, significa directamente que “hay algo que recoger en A y depositar en B”.

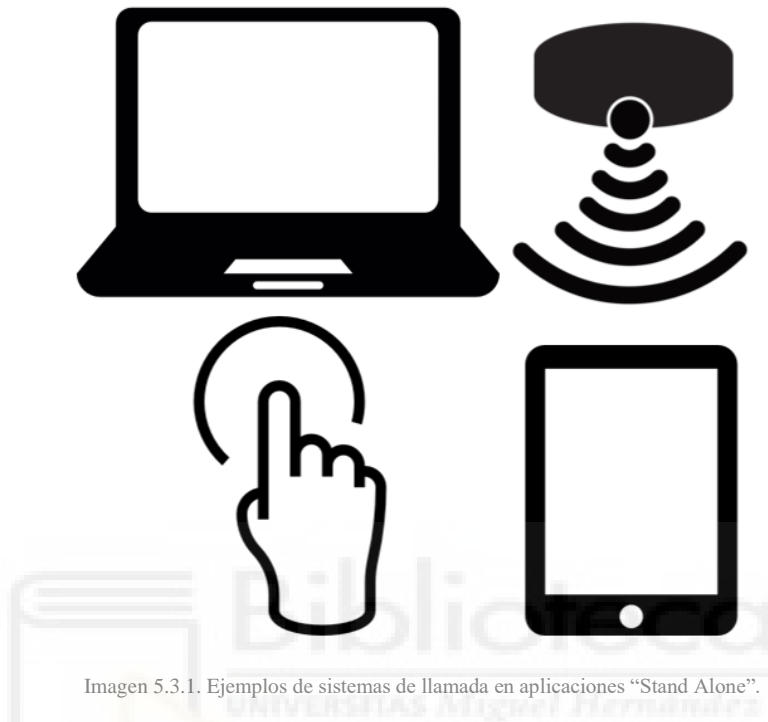


Imagen 5.3.1. Ejemplos de sistemas de llamada en aplicaciones “Stand Alone”.

En el caso práctico estudiado, los sistemas de comunicación e integración tienen diferentes planteamientos para cada uno de los flujos de cargas:

Flujo 1: Entrada de pallets desde muelle de recepción al almacén de materias primas. La comunicación será en este caso vía TCP/IP entre el sistema de gestión de almacén del cliente y el gestor de flotas de AGVs.

Flujos 2 y 3: Se trata de soluciones con llamadas manuales y por lo tanto independientes de cualquier comunicación compleja. En el caso del transporte de carros entre el almacén y las líneas, serán los operarios de almacén los que deberán llamar manualmente mediante un terminal o Tablet a los AMRs para transportar los carros preparados. Y en el caso del transporte de pallets desde la enfardadora semiautomática hasta la playa de expediciones, también será un operario el que valide el enfardado y genere por lo tanto una llamada para transportar los pallets al pulmón en suelo junto al muelle de expedición.

#### 5.4. PUESTA EN MARCHA DE LA INSTALACIÓN: OPTIMIZACIÓN DE MOVIMIENTOS Y FLUJOS

Una vez el proyecto está lanzado, las máquinas preparadas para ser entregadas y toda la preinstalación y pruebas del apartado anterior han sido cumplimentadas, se deberá seguir un orden correcto para la puesta en marcha, que deberá ser meticulosamente completado para lograr un proyecto exitoso.

##### i. Mapeo de zona de trabajo

En primer lugar, tal como se definió en el apartado 5.1. acerca de la infraestructura necesaria para navegación, será el momento de realizar el debido mapeo de cada zona de trabajo y de los reflectores en el caso que sea necesario. Para el caso práctico, en la zona del almacén de materia prima y la salida de producto acabado habría que mapear todos los reflectores previamente ubicados, mientras que para el flujo 2 de abastecimiento a producción, al tratarse de navegación libre SLAM será necesario un mapeo íntegro de la zona en sí con uno de los AMRs, y será muy importante mantener esta zona de trabajo con un orden muy exigente y sin cambios del entorno que puedan restar precisión a los robots. Este es habitualmente un proceso breve que puede llevar entre 2 y 16 horas.

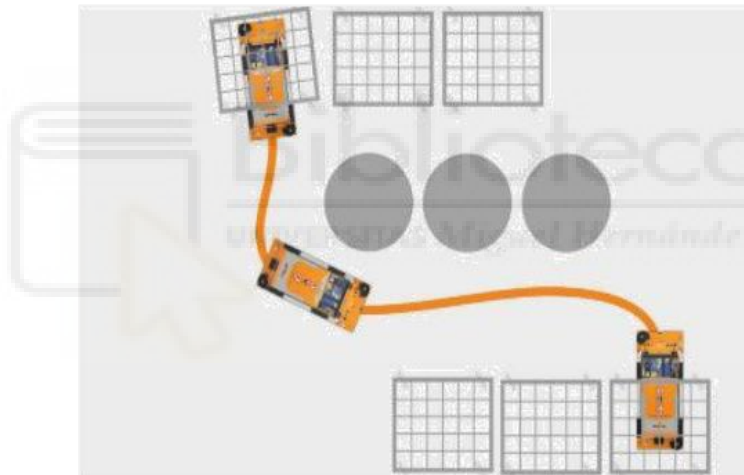


Imagen 5.4.1. Esquema de trabajo con navegación libre.

##### ii. Pruebas en vacío

Una vez el mapeo y la navegación están garantizados mediante los trabajos de definición de rutas, zonas de paso y ajuste de velocidades y seguridades, llega la fase de realización de pruebas en vacío y ajuste preciso de todas las ubicaciones de recogida y dejada de carga. Se entiende normalmente esta fase como la más extensa en el tiempo, por llevar intrínsecas numerosas ubicaciones, como es el caso del almacén de materia prima del caso práctico estudiado. Para cada uno de los puntos donde los robots deben trabajar se tendrá que hacer un ajuste exhaustivo en los ejes X, Y, Z para una robusta manipulación de las cargas sin errores ni faltas de precisión. Se trata de una etapa con una duración muy variable de la puesta en marcha, variando entre 1 y 5 semanas incluso más si se trata de grandes centros logísticos con alta complejidad y número de ubicaciones.



### iii. Pruebas en producción real

Tras las pruebas en vacío, se procede a realizar los mismos movimientos de entrada y salida en todas y cada una de las ubicaciones de trabajo, con el cambio que supone que los equipos lleven ahora carga sobre las horquillas o plataformas, lo que implica en muchas ocasiones pequeñas variaciones milimétricas que requieren un reajuste de la coordenada Z. En esta fase, tanto la flota como las comunicaciones adquieren un proceso de trabajo realista en todo el conjunto, de cara al funcionamiento definitivo del sistema y al importante proceso de adaptación por parte de la planta y los operarios a los nuevos “compañeros de trabajo”. Esta fase puede alargarse unas 2 o 3 semanas aproximadamente.

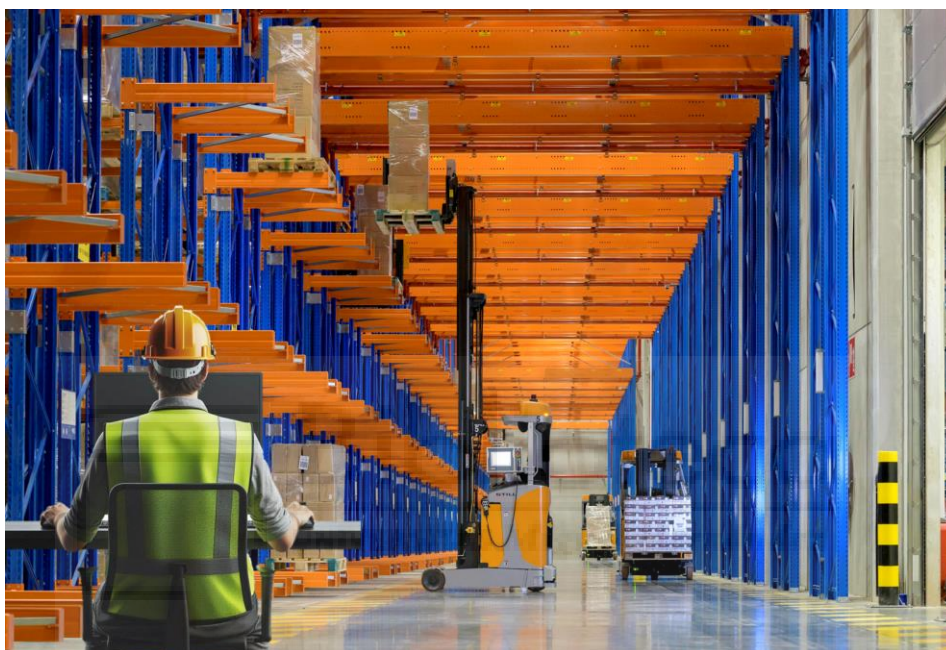


Imagen 5.4.2. Imagen orientativa – Técnico poniendo en marcha sección almacén de materia prima.

### iv. Optimización de movimientos

Una vez las pruebas han sido completadas tanto en vacío como en producción, el sistema comienza a trabajar con normalidad, y es en este punto en el que se pueden trazar y cronometrar los trayectos para ir optimizándolos en función del ancho de paso, de las cadencias, del tráfico real en planta, etcétera. Se dedican habitualmente varias jornadas completas para la optimización y mejora de tiempos de trabajo para llegar debidamente a los valores de producción especificados en los puntos de partida del proyecto.

v. Entrega final de sistema

Alcanzados los flujos de trabajo predefinidos por el cliente en los requisitos de producción del proyecto, así como con un correcto funcionamiento e integración del sistema con todos los elementos del entorno, la instalación queda definitivamente entregada y puesta a disposición del cliente, que deberá ser formado en el uso de los robots y corrección de errores.

<b>Movimiento - descripción</b>	<b>Flujo de movimientos</b>
Recepción de materia prima	9 pallets/h
Abastecimiento líneas de producción	8 carros/h
Salida de producto terminado	18 pallets/h

Imagen 5.4.3. Flujos de producción dados al inicio del análisis técnico de la solución.



## 6. CONCLUSIONES DEL TRABAJO

En un primer lugar, los objetivos del trabajo estaban basados en mostrar de manera detallada y práctica el funcionamiento y equipamiento de los robots móviles con los que convivimos cada día más en todos los ámbitos (hostelería, hospitales, limpieza doméstica, almacenes, drones...), centrando el análisis en un caso práctico de intralogística, campo de trabajo en el que más inversiones se están realizando hoy en día por sus grandes beneficios como la seguridad, la trazabilidad, el orden y el ahorro en costes de mantenimiento y mano de obra, este último factor muy importante también por la falta de personal para trabajo en logística con la que se encuentran las empresas.

En cuanto a los resultados del trabajo, podemos ver cómo la robótica móvil aporta soluciones reales y aplicables a la industria. Bien es cierto, como hemos podido analizar en el presente documento, que no siempre se tiene un retorno interesante, y que puede presentar limitaciones por la reducida velocidad de trabajo o el alto coste que puede suponer frente a la mano de obra. Podemos concluir que, en algunos casos, si una empresa tiene una altísima optimización de recursos manuales (por ejemplo, mover al mismo tiempo 4 pallets con una carretilla manual), es posible que el retorno de inversión de la automatización tenga un resultado poco interesante, mientras que, si dicha empresa trabaja a varios turnos y tiene mucho personal dedicado a una operativa, es muy probable que la inversión en automatización sea realmente interesante económicamente.

Hoy en día es siempre interesante estudiar las posibilidades que aporta la robótica móvil a las industrias, pues en muchos de los casos vamos a observar soluciones perfectamente viables. También cabe destacar que las empresas que más fácil tendrán el “salto” a esta tecnología serán aquellas que ya tengan una cultura de orden, de seguridad, de trazabilidad y de calidad bien interiorizada, pues los robots móviles serán tan sólo un engranaje más que será fácilmente introducido. Ejemplos de estas empresas se encuentran fácilmente en el sector farmacéutico, en el automovilístico y aeronáutico, o en el químico.

En un futuro, y esto es un pensamiento personal, seguramente la inteligencia artificial y las cámaras de visión artificial proporcionarán a los robots móviles la independencia y agilidad necesarias para poder trabajar a unas velocidades más elevadas que los hagan aún más competitivos frente a las personas, además de hacerlos más capaces de manipular cargas menos homogéneas (de gran tamaño, con formas y pesos variables, etc.). Llegado ese punto, difícilmente se podrá competir contra este tipo de dispositivos, que además aportarán la seguridad y robustez comentados en este trabajo.

Para finalizar, estamos ante unos cambios y avances tecnológicos que van mucho más rápido de lo que podemos llegar a interiorizar y asumir a nivel industrial, casi semanalmente aparecen nuevos usos de tecnología que aportan más y más ventajas, probablemente en los próximos 5 años se extienda más la robótica móvil que en los últimos 15, ya que los costes se abaratarán y la tecnología será aún mejor, además de la caída progresiva de la mano de obra en el sector logístico.

## 7. REFERENCIAS

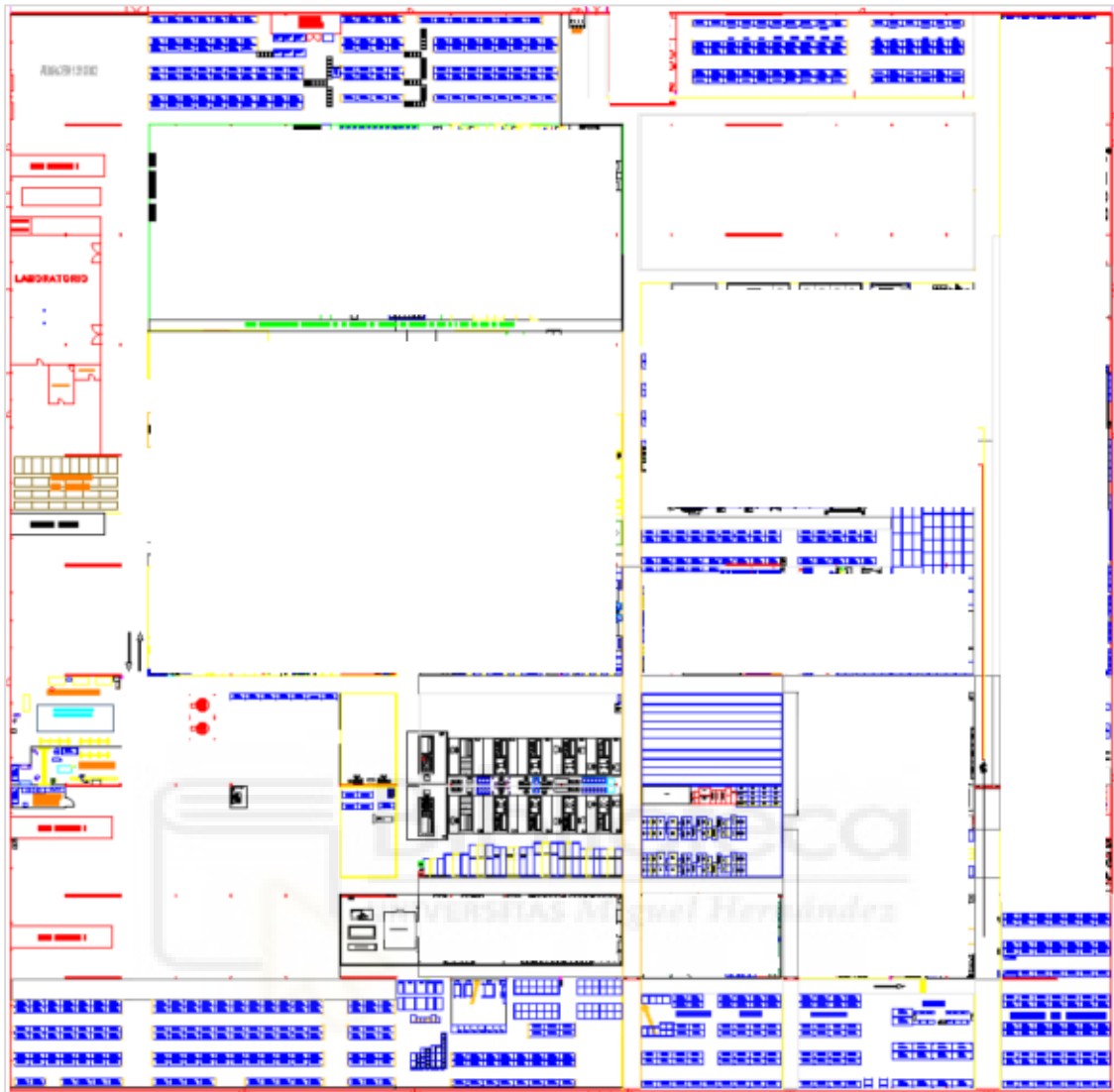
- [1] **Informe mundial de robótica de IFR (2022)**. Gráfica robots industriales: <https://www.izaro.com/informe-mundial-de-robotica-de-ifr-quotmaximo-historico-quot-con-medio-millon-de-robots-instalados-en-un-ano/c-1665909021/>
- [2] **Tendencia de la robótica móvil en la industria**. (2020-2023). Gráfica robots móviles: <https://www.a3mexico.com.mx/perspectivas-de-laindustria/tendencias-de-la-industria-y-potencial-del-mercado-que-sigue-2>
- [3] GUDA-Grupo Universitario de Automatización, Universidad Tecnológica Nacional Argentina, <**Implementación de navegación guiada o autónoma en plataforma móvil empleando fusión sensorica y software libre**>, Pág. 4. (2013)
- [4] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, <**Algoritmo de SLAM en un Robot Móvil gobernado por una Interfaz Cerebro-Computadora**>, Pág 5-10. (2016)
- [5] J.D. Galvis Sarria, Ingeniería Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, <**Diseño, desarrollo y construcción de AGVs e implementación de funciones de navegación mediante sensores láser**>, Pág 6 (2016).
- [6] Sebastián Barquero Meléndez, Instituto Tecnológico de Costa Rica, <**Desarrollo de sistema de locomoción y odometría en un robot móvil para navegación en espacios no uniformes**>, Pág. 56-63. (2020)
- [7] P. Aguilar Albán, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, <**Diseño e implementación de un Robot detector de obstáculos y navegación GPS**>, Pág. 27-30 (2009).
- [8] Josep M. Font y Joaquim A. Batlle. Universidad Politécnica de Cataluña, <**Posicionamiento de Robots Móviles mediante un filtro de Kalman Angular y Triangulación**>, (2006).
- [9] Begoña Fernando Aguado, Janelcy Alferes, CARTIF, PArtque tecnológico de Boecillo, <**Diseño y Simulación de un filtro Kalman para un Robot Móvil**>, Pág. 3-6.
- [10] Víctor Fernández Calderón, Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, <**Navegación mediante realimentación visual de un robot móvil basado en técnicas de aprendizaje automático Deep Learning**>, Pág. 70-73. (2018).

- [11] Ulises Vázquez, Jaime González-Sierra, Instituto Tecnológico Nacional de México, *Revisa Iberoamericana de Automática en Informática Industrial*, <**Análisis del desempeño de un control PID de orden fraccional en un robot móvil diferencial**>, 2022
- [12] Carlos López Ortega, Universidad De Valladolid, <**Análisis de la seguridad industrial en la implantación de máquina X**>, Pág. 13-14 (2013).
- [13] **Carretillas industriales sin conductor y sus sistemas** (2020). Norma ISO 3691-4:2020: <https://www.certifico.com/normazione/234-documenti-riservati-normazione/15477-sicurezza-carrelli-industriali-senza-conducente-agv-lgv-conformi-iso-3691-4>
- [14] Ing. Francisco Rosa (PILZ ES & PT), ISO/TS 15066. <**New safety requirements for a new era of industrial robots**>, 2016.
- [15] Vanessa Quintero, Osvaldo Che, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, <**Baterías de ion Litio: características y aplicaciones**>, (2021).
- [16] Eduardo Cueva, Juan Lucero, Alex Guzmán, Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, <**Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices**>, Pág 6-8 (2018).
- [17] **¿Baterías de plomo ácido o de Litio? Máxima eficiencia:** <https://www.linde-mh.es/es/Acerca-de-Linde/Revista/Innovacion-en-baterias/>
- [18] Jairo Alberto Rodríguez Barrera, Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingenierías Fisiomecánicas, Universidad Autónoma de Bucaramanga: <**Sistema de generación eléctrica con celdas de combustible en vehículos convencionales**>, (2012).
- [19] **AMRs: Diferentes tipos de aplicaciones e industrias objetivo** (2023). <https://tecnologiaparalaindustria.com/robots-moviles-autonomos-descubriendo-las-diversas-aplicaciones-e-industrias-que-revolucionan/>
- [20] Mancebo Cuesta, Marta, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid: <**Optimización de la Gestión de Pedidos Online en un almacén mediante la Introducción de un Robot Móvil**>, (2016).
- [21] **Precios medios de robots móviles: AGVs & AMRs** (2022) <https://www.agvnetwork.com/agv-cost-estimation-how-much-does-an-automated-guided-vehicle-cost>
- [22] Cecilia E. García, Rafael Aracil, Dpto. de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid: <**Teleoperación de un robot industrial a través de Internet**>, Pág. 3 (2020).

- [23] Gustavo Pereira, Juan D'alotto, Iris Sattolo, Facultad de Informática, Universidad de Morón, Buenos Aires: <**Control via Internet de un Robot ubicado en remoto aplicando una Interfase cerebro-Máquina**>, Webservice SOAP, Pág. 6 (2012).
- [24] David Enrique Juan San Valero, ETSII Universidad Politécnica de Valencia: <**Automatización coordinada de dos robots manipuladores con autómatas Siemens S7 1200 mediante comunicación profinet**>, (2020).



## ANEXO A – Layout general instalaciones



## ANEXO B – Recorridos de aplicaciones AGVs y AMRs

