

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO: aspectos de control y automatización

Autor: Miguel Navas Alcántara

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

**Diseño de un sistema de producción modular
mediante LEGO: aspectos de control y
automatización**

Autor:

Miguel Navas Alcántara

Tutor:

José Manuel Framiñán Torres

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO: aspectos de control y automatización

Autor: Miguel Navas Alcántara

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

*D*espués de seis años difíciles de describir en pocas líneas, por fin llego a convertirme en ingeniero superior industrial. Fruto de la constancia e ilusión que he entregado es este proyecto fin de máster.

Nadie dijo que el camino fuera a ser fácil, pero personas como mi padre Miguel, mi madre María de la Sierra y mis hermanas María y Ana María me han hecho ver que desde luego el sendero se puede recorrer, de mejor o peor manera, pero siempre hacia adelante. Gracias familia, vuestro cariño no tiene precio.

Como no voy a mencionar a mi compañero de trabajo final, Jose Manuel, con el que he podido ver crecer este proyecto día a día, tanto en sus puntos más amargos como en los más dulces, gracias y enhorabuena por finalizar tus estudios junto a mí, amigo mío.

Recuerdos para el resto de compañeros de universidad, trabajo y amigos, que poco a poco van cumpliendo sueños en sus vidas.

Miguel Navas Alcántara
Ingeniero Superior Industrial
Sevilla, 2019

Resumen

Hacer realidad un proyecto ingenieril, habiendo cumplido todos los objetivos propuestos y dejando satisfechos a todos sus interesados, no es tarea fácil. En general, este conjunto de actividades con plazos de ejecución exigentes, con un nivel de calidad acotado, es un problema que entraña riesgo por su naturaleza.

El riesgo asumido durante la realización de cualquier proyecto estará presente tanto en la parte técnica como en la parte social. La parte técnica engloba los desafíos de diseño e implementación de las especificaciones inicialmente planteadas. La parte social se reservará a los intereses de cada una de las personas que participan de forma directa o indirecta durante la ejecución del proyecto.

Ante la llegada de nuevos desafíos tecnológicos en nuestra sociedad, una buena forma de convencer a los inversores y clientes potenciales podría consistir, en mostrarles directamente cómo funcionaría su producto deseado, antes de que se haya desembolsado una gran cantidad de dinero. Dicho producto, que se podría denominar “prototipo”, cumpliría con la mayor parte de las especificaciones estructurales y funcionales del bien o servicio final.

El objetivo principal del trabajo se centrará en llevar a la práctica una nueva metodología, capaz de desarrollar células de fabricación electromecánicas programables, en este caso utilizando los sets de desarrollo hardware y software del fabricante LEGO Mindstorms. Combinando adecuadamente sus elementos, estos serán capaces de representar ideas de negocio útiles (nuevas máquinas, elementos de transporte, procesos industriales...) para proyectistas, directores de proyecto u otro personal del sector empresarial, que deseen mostrar su potencial a posibles clientes, socios e interesados, de forma intuitiva, anticipada a sus ejecuciones y con costes reducidos.

Abstract

Completing an engineering project, having fulfilled all the proposed objectives, with all your stakeholders satisfied, is not an easy task. In general, this set of activities with strict deadlines and quality requirements, is a problem which involves risk due to its nature.

The risk assumed during the realization of any project will be present both in the technical part and in the social part. The technical part encompasses the design and implementation challenges of the initially set specifications. The social part include interests of people who participate directly or indirectly during the execution of the project.

This work will focus on putting into practice a new method capable of helping designers, project managers and other staff, within the scope of the projects, to be able to present their ideas to potential clients and stakeholders in an easy, anticipated and low cost way.

With the arrival of new technological challenges, a good way to convince investors and potential clients may be to show them directly how their desired product would work, before a large amount of money has been disbursed. Said product that could be called “prototype” would comply with all structural and functional specifications.

The main objective of this project will focus on putting into practice a new methodology, capable of developing programmable electromechanical cells, using LEGO Mindstorms development tools, which properly combined, are capable of representing useful business ideas (new machines, transport elements, industrial processes ...) for designers, project managers and other staff, within the scope of projects or the business sector, who wish to show its potential to clients, partners and interested parts intuitively, in advance of its execution and at a reduced cost.

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
Índice	VI
Índice de Figuras	VIII
1 Objeto del proyecto	1
1.1 <i>Objetivos del proyecto</i>	1
1.2 <i>Sumario de la memoria</i>	2
2 Estado del arte	5
2.1 <i>El camino hacia una cuarta revolución industrial</i>	5
2.1.1 Evolución histórica del sector industrial	5
2.1.2 Mejoras en las técnicas de fabricación. Ejemplo en el sector de automoción	8
2.1.3 Ventajas dentro de la nueva revolución tecnológica	11
2.1.4 Posibles desventajas con la llegada de la Industria 4.0	13
2.2 <i>Sistema y células de fabricación flexibles</i>	14
2.2.1 Sistema de fabricación flexible. Definición, ventajas y desventajas.	14
2.2.2 Células de fabricación	15
2.2.3 Conceptos útiles sobre sistemas de monitorización y control de plantas industriales	17
2.3 <i>La norma ISA SP-95, aplicada a un sistema automatizado</i>	18
2.4 <i>Transporte interno de material en plantas industriales</i>	19
2.4.1 Problemática e importancia de la logística en la industria	19
2.5 <i>Diferentes modos de funcionamiento para un sistema automatizado. Guía GEMMA</i>	20
2.6 <i>Material disponible como punto de partida para el proyecto</i>	22
2.6.1 Parte física. Elementos constructivos LEGO	22
2.6.2 Parte lógica. Controladoras LEGO NXT e interfaz de control	23
3 Metodología propuesta	29
3.1 <i>Especificaciones técnicas y funcionales</i>	29
3.1.1 Especificaciones para el sistema de fabricación automatizado modular	29
3.1.2 Requisitos para el montaje del proceso industrial. Nivel 0 de la norma SP-95	31

3.1.3	Diseño hardware propuesto para las células de fabricación flexibles. Nivel 1 en SP-95	32
3.1.4	Especificaciones lógicas para el controlador a nivel de planta. Nivel 2 en SP-95	34
3.1.5	Especificaciones lógicas para los controladores de cada célula. Nivel 2 en SP-95	35
3.2	Arquitectura de control. Distribución de las comunicaciones	37
4	Implementación del sistema	39
4.1	<i>Solución para la parte lógica del sistema de fabricación</i>	39
4.1.1	Diseño resultante para el sistema SCADA	39
4.1.2	Interfaces para las células de fabricación flexibles	43
4.1.3	Resumen de la solución para el control del sistema de fabricación modular	54
4.2	<i>Soluciones constructivas obtenidas para el sistema de fabricación</i>	55
4.2.1	Diseño final de la estación de procesado	55
4.2.2	Diseño final del separador de material automático	56
5	Pruebas funcionales realizadas	61
5.1	<i>Prueba funcional de sensores y actuadores. Elección de los periféricos adecuados</i>	61
5.2	<i>Cinta transportadora inicial operando con piezas. Una controladora NXT</i>	63
5.3	<i>Dos cintas transportadoras operando con buffer de piezas. Una controladora NXT</i>	65
5.4	<i>Cinta junto a estación de procesado. Una controladora NXT</i>	68
5.5	<i>Cinta trabajando junto a un separador de material. Una controladora NXT</i>	70
5.6	<i>Prueba de ajuste entre el tiempo de parada y la velocidad de avance, en la cinta del separador</i>	72
5.7	<i>Test para múltiples controladoras NXT, comunicación bluetooth</i>	74
5.8	<i>Integración final de varias células para formar un sistema automatizado</i>	76
6	Conclusiones y trabajo futuro	79
	Bibliografía	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Hitos importantes de las cuatro revoluciones industriales (García Gómez, 2018).	6
Figura 2 La inminente llegada de la digitalización del entorno industrial (Michasager, 2017).	7
Figura 3 Modelo T de Ford, 1 de octubre de 1908 (Ford.es, 2019).	8
Figura 4 Línea de producción del Modelo T (Camós, 2013).	9
Figura 5 Línea de producción de vehículos actual (SEAT S.A, 2017).	10
Figura 6 Detalle en línea de producción de (SEAT S.A, 2017).	11
Figura 7 ¿Nuevas técnicas de representación y transmisión de ideas? (Shutterstock, 2003).	12
Figura 8 ¿Privacidad en la Industria 4.0? (Díaz, 2017).	13
Figura 9 Ejemplo de una célula de fabricación flexible (Henao y Jaramillo, 2013).	15
Figura 10 Diagrama de volumen de producción frente a variedad en el producto (Salazar y Vargas, 2010).	16
Figura 11 Relación funcional entre un sistema SCADA y una interfaz HMI (Carberry, 2018).	17
Figura 12 Los cinco niveles de integración propuestos por ISA SP-95 (Devia, 2015).	18
Figura 13 Familia de estados de la guía GEMMA (Rodríguez, 2011).	21
Figura 14 Kit con elementos estructurales LEGO Mindstorms.	23
Figura 15 Kit LEGO Mindstorms education EV3 NXT.	24
Figura 16 Ventana principal del entorno de programación Visual Studio.	25
Figura 17 Interfaz inicial para la comunicación Bluetooth con LEGO NXT (Kirillow, 2017).	26
Figura 18 Elementos activos NXT, sensores y actuadores disponibles.	27
Figura 19 Estructura hardware del sistema de fabricación modular.	30
Figura 20 Estructura software del sistema de fabricación modular.	31
Figura 21 Planteamiento del bucle de control para todo el sistema.	36
Figura 22 Sistema distribuido de comunicaciones para cuatro células.	38
Figura 23 Interfaz general. Subsección de generación de células.	40
Figura 24 Interfaz general. Botón para la puesta en funcionamiento de las células.	40
Figura 25 Interfaz general. Botón para realizar un paro controlado en la producción.	41
Figura 26 Interfaz general. Botón para el testeo controlado de todas las células.	41
Figura 27 Interfaz general. Botón de seguridad para validar el rearme de los equipos.	41
Figura 28 Interfaz SCADA para el control centralizado.	42
Figura 29 Secuencia para el programa inicial.	42
Figura 30 Interfaz HMI para la estación de procesado. Puerto de comunicaciones.	43
Figura 31 Interfaz HMI para la estación de procesado. Parámetros de usuario.	44
Figura 32 Interfaz HMI para la estación de procesado. Panel de control para los sensores instalados.	44

Figura 33 Interfaz HMI para la estación de procesado. Controlador manual de los equipos.	45
Figura 34 Interfaz HMI para la estación de procesado. Botón de activación de la estación.	45
Figura 35 Interfaz hombre-máquina para las estaciones de procesado.	46
Figura 36 Hilo de control para una estación de procesado.	48
Figura 37 Interfaz HMI para el separador de caja. Botonera dedicada a la secuencia de fabricación.	49
Figura 38 Interfaz HMI para el separador de cajas. Ajustes para el puerto de comunicaciones.	49
Figura 39 Interfaz HMI para el separador de cajas. Parámetros para el tipo de movimiento.	50
Figura 40 Interfaz HMI para el separador de cajas. Ajustes principales para los sensores utilizados.	50
Figura 41 Interfaz HMI para el separador de cajas. Opciones de testeo.	51
Figura 42 Interfaz HMI para el separador de cajas. Botón de activación para el separador.	51
Figura 43 Interfaz HMI para el separador de cajas automático.	51
Figura 44 Hilo de control para un separador de material.	53
Figura 45 Bucle de control resultante para un sistema de fabricación genérico.	54
Figura 46 Vista frontal de la estación de procesado.	56
Figura 47 Detalle de funcionamiento para el empujador de material.	57
Figura 48 Vista superior del separador de material.	58
Figura 49 Vista lateral de la célula “separador de material” final.	58
Figura 50 Testeo de sensores y motores.	62
Figura 51 Cinta transportadora inicial con conexiones.	63
Figura 52 Dos cintas transportadoras con sensores, conectadas entre sí.	66
Figura 53 Enlace entre unidades.	66
Figura 54 Una estación de procesado conectada a una cinta transportadora.	69
Figura 55 Un separador unidireccional frente a una cinta transportadora.	71
Figura 56 Comportamiento experimental de la cinta transportadora.	72
Figura 57 Tiempo de respuesta necesario según la potencia de la cinta.	73
Figura 58 Dos estaciones de procesado independientes.	74
Figura 59 Detalle del sistema de fabricación flexible final.	77

1 OBJETO DEL PROYECTO

1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar e implementar un conjunto de células de fabricación flexibles (FMS) a escala reducida, es decir, una serie de estaciones de trabajo interconectadas por medio de un sistema de transporte de materiales automatizado. Serán destinadas a representar fielmente el comportamiento de una serie de procesos industriales, productos o servicios planteados, con la finalidad de ser útiles como herramientas de diseño y presentación, en nuevas ideas de negocio o en fines educativos.

Esta memoria de trabajo de fin de máster se centra en el planteamiento y la ejecución de una metodología para la parte lógica de las células de fabricación (software de control e interfaces de comunicación), así como en la puesta en funcionamiento posterior, en una serie de montajes ejemplo que representan ciertos sistemas de fabricación automatizados. Los elementos funcionales son creados usando tecnología robótica LEGO Mindstorms, cuyos componentes permiten ensamblar y programar fácilmente multitud de células de fabricación.

Los sistemas de fabricación finales serán obtenidos tras combinar varios tipos de célula. Cada una de ellas contará con una interfaz de usuario (HMI- Human Machine Interface, en inglés) para su configuración local y todas las células que sean conectadas se comunicarán a través de un control centralizado tipo SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, en inglés) tratándose este de un software, que permite la monitorización y el control del proceso industrial a distancia. El usuario puede interactuar tanto con una célula en concreto, a través de su interfaz HMI propia, como sobre todo el sistema mediante la interfaz SCADA.

Este documento también muestra información para el lector, sobre la parte física, que ha sido necesaria para validar el trabajo de la parte software, como son los componentes estructurales y mecánicos adecuados para cada tipo de célula necesaria. Esta última se explica en más detalle en el trabajo fin de máster desarrollado de manera paralela a éste, por José Manuel Díaz Cano (2019).

Para satisfacer los requisitos del sistema, a nivel de célula, se desarrollarán modelos a escala de diferentes etapas de fabricación, creadas a partir de elementos constructivos y electrónicos individualizados. En cuanto al procedimiento a seguir, primero se decidirá el tipo de células a crear, teniendo en cuenta aspectos funcionales en el contexto físico y lógico, según cada tipo de máquina. Una vez hecho esto, se llevará a la práctica el desarrollo diferenciado de la parte estructural y cinemática (Díaz, 2019) y por el otro, el diseño de los algoritmos y su programación asociada, para cada tipo de célula y para la herramienta de control tipo SCADA.

Se pretende que las células desarrolladas sean lo más flexibles y escalables posible, pretendiendo aumentar su número para conseguir recrear la complejidad y el nivel de detalle deseado para los procesos industriales objetivo.

La unión y coordinación de varias células, permitirá a los usuarios grandes posibilidades de planificación en un entorno industrial controlado, recreando los posibles modos de funcionamiento encontrados durante la fabricación de un producto. Por ejemplo, se podrán realizar ajustes en una nueva línea de montaje automatizada, simular fallos durante la fabricación, reconfigurar máquinas o cambiar fácilmente la distribución en estaciones de trabajo ya existentes.

1.2 Sumario de la memoria

Este trabajo se ha dividido en seis capítulos principales:

- **Objeto del proyecto:** En este primer capítulo se muestra la motivación del proyecto, de qué partes está compuesto y cómo se ha distribuido la información en esta memoria.
- **Estado del arte:** Aquí se pretende poner en contexto al lector dentro del entorno industrial y sus necesidades futuras. Se tratará de mostrar el potencial de las nuevas tecnologías, con ejemplos de sistemas de fabricación flexibles actuales, incluyendo sus modos de funcionamiento posibles. Estas herramientas cada vez más complejas y sofisticadas, generarán la necesidad de utilizar nuevos métodos, para conseguir persuadir a potenciales clientes e inversores. Finalmente se introduce el material disponible para llevarlo a cabo este proyecto.
- **Metodología propuesta:** Se presentan las especificaciones de diseño que serán consideradas para cada componente necesario, desde a nivel de sistema completo, hasta los elementos de más bajo nivel, las células de fabricación. Con ello se define la metodología de diseño a aplicar en los siguientes capítulos.
- **Implementación del método:** Aquí se recogen las soluciones y justificaciones adoptadas sobre los diseños finales, para tratar de satisfacer los requisitos impuestos en el capítulo anterior. Para cada tipo de célula, se contará con un software específico de control de sus operaciones, y todas las células serán gestionadas por el usuario desde un control centralizado, desde una capa superior de software.
- **Pruebas funcionales realizadas:** Aquí se recogen los testeos que han sido necesarios, hasta obtener un sistema de fabricación flexible automatizado, completamente operativo. Sobre cada célula, se realizarán pruebas funcionales, incrementando el nivel de detalle y de desempeño, hasta conseguir su validación final en el diseño.

Cada prueba tendrá varios objetivos específicos, a cumplir tanto por la parte lógica y de programación de todos los elementos desarrollados (donde se centra más esta memoria) como por la física y cinemática, más avanzada por José Manuel Díaz Cano (2019). Finalmente, se acabarán mostrando las

posibilidades y el potencial que otorga esta metodología, en diferentes escenarios completos que muestran una producción automatizada.

- **Conclusiones y trabajo futuro:** El trabajo finaliza añadiendo unas conclusiones finales, que incluyen los resultados principales obtenidos en cada capítulo y unas propuestas para seguir avanzando con la metodología, en futuros trabajos.

2 ESTADO DEL ARTE

Antes de pasar a desarrollar todo el trabajo teórico-práctico realizado sobre células de fabricación flexibles, se va a resumir cuál ha sido la evolución histórica del sector industrial, señalando algunos tipos de tecnologías destacadas desde el siglo XVIII, con la primera revolución industrial, hasta hoy.

Las anteriores revoluciones industriales han conseguido mejorar notablemente la productividad en las fábricas y las condiciones laborales de los empleados. Además, la perspectiva futura es prometedora, todos los logros del pasado pueden servir de referencia, para lo que está llegando como tecnologías modernas: sistemas de fabricación inteligentes e interconectados, grandes cantidades de información útil o nuevas herramientas visuales de presentación que puedan captar la atención de las personas, desde unos posibles inversores en un proceso de licitación, como de alumnos que requieran una enseñanza avanzada.

El problema planteado en este trabajo, está relacionado con la búsqueda de un nuevo método de representación para nuevos proyectos técnicos, ideas de negocio o para ser empleado en formación académica o laboral, que sea práctico, visual y empleable dentro de un sector industrial que se encuentra a las puertas de una cuarta revolución tecnológica.

2.1 El camino hacia una cuarta revolución industrial

2.1.1 Evolución histórica del sector industrial

Para conocer la tendencia actual y la perspectiva futura en el mundo industrial y empresarial, puede ser útil estudiar la importancia de los principales avances tecnológicos y sociales en la industria, procediendo a analizar lo que está por llegar en el sector. Los sistemas inteligentes conectados, cobrarán un papel fundamental tanto en el área productiva como en los departamentos de investigación, desarrollo e innovación.

Según la Real Academia Española (RAE), la industria se podría definir como un “Conjunto de operaciones materiales ejecutadas para la obtención, transformación o transporte de uno o varios productos naturales”. Desde que se creó el concepto, la filosofía siempre ha sido la misma: definir un “Conjunto de operaciones materiales” cuyo objetivo consiste en la “obtención de productos”, pero conforme ha ido avanzando el tiempo, la forma de realizar dichas operaciones materiales ha experimentado grandes cambios, afectando en gran medida a los aspectos socioeconómicos de las sociedades implicadas.

Por ejemplo, en la primera revolución industrial de Gran Bretaña en 1760, tres cuartas partes de la población británica del siglo XVIII, subsistían con trabajos agropecuarios. Los productos obtenidos se destinaban al autoconsumo y no al comercio, ya que la producción era escasa. Un cambio político hacia una monarquía liberal propició el desarrollo de la revolución, sin apenas represalias (Barja, 2019). Avances como la utilización de nuevos materiales como el acero, nuevas fuentes energéticas (carbón) y máquinas que aprovechen la fuerza del vapor o la energía eléctrica para transformar la materia, fueron el motor del cambio en esos años.

La llegada de una fuente de energía tan avanzada y eficiente como la electricidad, nuevos métodos productivos claramente diferenciadores como la producción en cadena o la presencia de una alta automatización industrial, así como un nuevo medio de comunicación globalizado con la llegada de internet, han permitido que trescientos años más tarde nos encontremos desarrollando una cuarta revolución tecnológica.

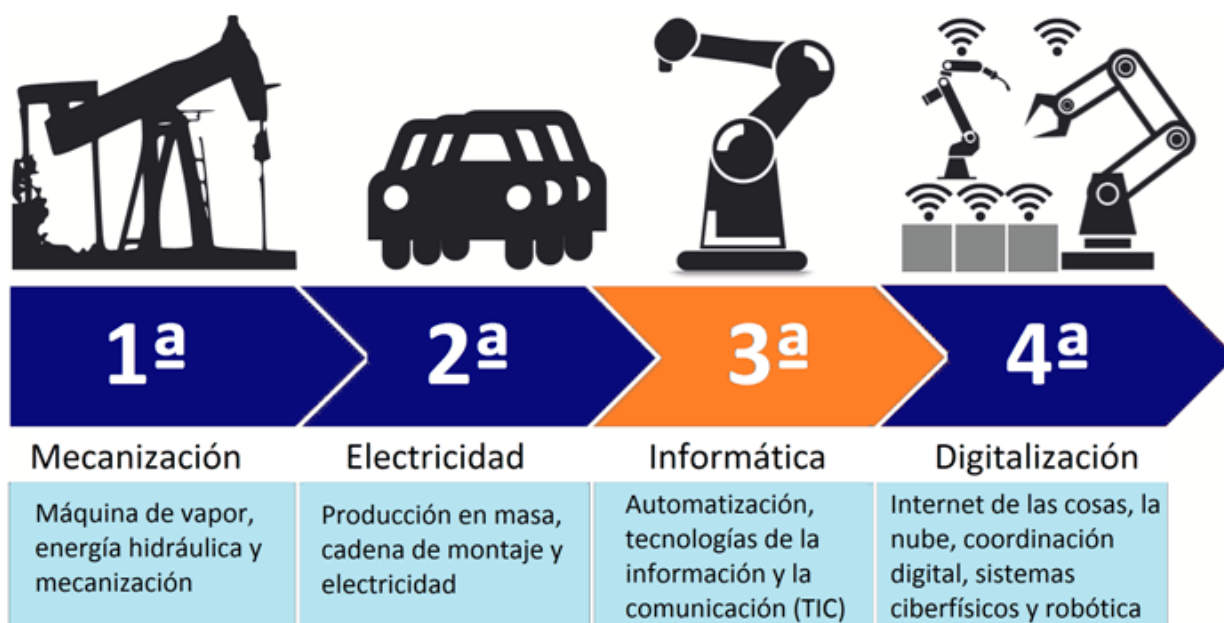


Figura 1 Hitos importantes de las cuatro revoluciones industriales (García Gómez, 2018).

En pleno siglo XXI, en la denominada Cuarta Revolución Industrial, surge el concepto de **Industria 4.0**.

La Industria 4.0 se puede definir como “la integración de lo digital y lo físico” (Transgesa, 2018).

Donde no sólo hay disponibles sistemas electromecánicos trabajando junto a las personas, sino **una interconexión dentro de un mundo digital, que permite la comunicación entre múltiples sistemas conectados**, lo que se denomina **internet de las cosas**.

La integración de características físicas y computacionales, generan **un sistema ciberfísico (CPS)**, que permite superar a los sistemas actuales en cuanto a capacidad, adaptabilidad, escalabilidad, resiliencia, seguridad y usabilidad, llevando a los usuarios a cambiar la forma con la que interactúan con la tecnología. Traerán innovación en sectores como la agricultura, diseño de edificios, fabricación, energía o en transportes. (National Science Foundation, 2014).

Ciertos trabajos que por su naturaleza puedan resultar peligrosos o repetitivos, como ocurría en las cadenas de montaje a principios del siglo pasado, serán sustituidos por desempeños realizados por máquinas inteligentes, que trabajarán por nosotros bajo nuestro control y supervisión.



Figura 2 La inminente llegada de la digitalización del entorno industrial (Michasager, 2017).

Los CPS generan datos sobre su posición y estado, dentro de un sistema de fabricación. La electrónica digital permite automatizar los procesos e identificar materiales, durante cualquier instante de la producción. De esta forma se pueden reconocer, con mayor facilidad, ineficiencias y riesgos en la cadena productiva, aumentar la robustez general del sistema y la capacidad de respuesta a incidencias producidas. Todo lo anterior, puede tener asociada una reducción en los costes de fabricación. (Del Val, 2016).

Las nuevas tendencias buscadas en el mundo laboral parten de la idea de poder desarrollar máquinas, usando nuevos métodos o algoritmos capaces de dotarlas inteligencia, lo que se denomina “**machine learning**”. De esta forma conseguir que, haciendo uso de un **tratamiento de datos disponibles**, los dispositivos sean capaces de **tomar decisiones, con la mínima intervención humana**. Dichas máquinas, serían capaces de coordinarse con los trabajadores, para realizar de forma conjunta trabajos complejos. A este tipo de trabajos se les denominan **colaborativos**. (Transgesa, 2018).

2.1.2 Mejoras en las técnicas de fabricación. Ejemplo en el sector de automoción

Quizás la automoción sea uno de los ejemplos más claros para mostrar el efecto de la automatización en la industria. Aunque los primeros diseños y prototipos se remontan a los años finales del siglo XIX, los vehículos propulsados por motores de combustión interna cogieron fuerza e interés a principios del siglo XX.

2.1.2.1 Revolución en el automóvil, la producción del modelo T de Ford

Uno de los padres del concepto actual que tenemos sobre la forma de producir vehículos a gran escala es **Henry Ford**, que en 1908 llevó a la práctica **la primera línea de producción en cadena para vehículos**. Las consecuencias fueron sobresalientes para su empresa, ya que con esta forma de producir, se consiguieron obtener 10660 unidades del Modelo T de cuatro cilindros y solamente 20 CV de potencia (figura 3) el primer año, pulverizando así todos los records de la época y ofreciendo un coche asequible para la clase media de Estados Unidos (Randstad España, 2017).



Figura 3 Modelo T de Ford, 1 de octubre de 1908 (Ford.es, 2019).

- Sin duda este hito resultó en un crecimiento exponencial de este tipo de industria, acelerando así las economías por todo el mundo y generando en los ciudadanos **una nueva necesidad**, la de disponer de un automóvil propio.
- Su precio inicial era de 850 dólares, **abaratándose por economías de escala** hasta una cifra impensable de 360 dólares, accediendo así a las clases trabajadoras.
- En cuanto a la distribución de la producción, el grupo Ford contrató a mano de obra **no cualificada**, en general granjeros y agricultores, cuya labor consistió en añadir componentes simples de forma repetitiva a los vehículos que pasaban por las nuevas líneas de producción diseñadas (ver figura 4).
- De esta forma, se consiguió abaratar aún más la producción del modelo T y **dominar el mercado**. (Camós, 2013).



Figura 4 Línea de producción del Modelo T (Camós, 2013).

- La llegada de esta nueva estrategia de producción en cadena, trajo consigo una **mejora en la remuneración y en las condiciones laborales**, muy avanzadas para la época.

En resumen, se consiguió un modelo productivo eficiente, muy productivo y con trabajadores satisfechos. Todo ello desencadenado por cambios en la forma de distribuir máquinas, personas y materiales dentro de la planta, en conjunto con unas políticas sociales a nivel de empresa adecuadas para el trabajo desempeñado.

2.1.2.2 Actualidad en automovilismo

Desde principios del siglo pasado, hasta ahora en 2019, donde nos encontramos en un gran proceso de cambio a nivel industrial, surgen nuevas tecnologías en materia de movilidad, como los coches con sistemas basados en pilas de hidrógeno, vehículos híbridos o los eléctricos puros, cuya tecnología empleada para fabricarlos ha evolucionado drásticamente. Un buen ejemplo es el caso de la empresa SEAT S.A., de origen español y actualmente perteneciente al grupo Volkswagen alemán.

La producción se basa en lo que ellos llaman el “ente cordiale” entre personas y máquinas, donde **los operarios ya no se dedican a aportar directamente el valor añadido en las cadenas de montaje, sino su misión consiste en supervisar y controlar el trabajo que realizan los elementos inteligentes que componen la fábrica** (robots manipuladores, AGVs, almacenes automatizados...). De esta forma se facilita la toma de decisiones y se retira al hombre de trabajos manuales que puedan resultar peligrosos, repetitivos o dañinos para la salud. (SEAT S.A, 2017).



Figura 5 Línea de producción de vehículos actual (SEAT S.A, 2017).

Las máquinas utilizan sensores que son capaces de recopilar información útil y emplearla en el futuro, después de ser procesada por algoritmos de “machine learning” o también denominada inteligencia artificial. Estos nuevos “compañeros” de trabajo permiten producir a ritmos más elevados, durante más horas y encontrando errores de fabricación que serán identificados con mayor facilidad por las personas. Tenemos así un **sistema automatizado colaborativo entre humanos y máquinas** (SEAT S.A, 2017).



Figura 6 Detalle en línea de producción de (SEAT S.A, 2017).

Los humanos son indispensables en una producción inteligente. Los robots pueden realizar operaciones peligrosas para las personas o repetitivas, de esta forma cada trabajador puede dedicarse a labores más seguras y sofisticadas. (Heidecker, 2019).

Los innovadores trabajos colaborativos, que implican coexistencia en los empleos entre personas y máquinas se desarrollará de forma ‘orgánica’, en términos de lenguajes y gestos. (Heidecker, 2019).

2.1.3 Ventajas dentro de la nueva revolución tecnológica

En el ecuador del año 2019, los expertos y los medios de comunicación tienen una visión inmediata de lo que implicará una cuarta revolución industrial en nuestra sociedad. La llegada en las telecomunicaciones de las **nuevas redes de quinta generación (5G)**, va más allá de disponer altas velocidades de subida y descarga para los teléfonos inteligentes (lo cual ya está bastante logrado en las redes 4G actuales). Algunos autores (Morán y Monzo, 2018) desglosan la influencia en las personas de la nueva revolución tecnológica, en cinco aspectos:

1. En primer lugar, afectará al concepto de vivienda que tenemos actualmente, donde conviviremos con dispositivos inteligentes conectados a una red de alta velocidad, que aprenderán de nuestros hábitos diarios, mejorarán el consumo energético del hogar y participarán en nuestras actividades de ocio. Se trata de sistemas domóticos hiperconectados de altas prestaciones.
2. Como segundo punto destacado, las ciudades contarán con una gestión energética mejorada. Las smartgrids o redes eléctricas inteligentes se encargarán de generar y proporcionar a los usuarios la cantidad de energía que necesitan, mejorando y optimizando el consumo energético.
3. La automoción no se quedará atrás en todo este proceso, la inminente llegada del coche autónomo y de los vehículos eléctricos puros otorgará infinidad de herramientas y nuevas funcionalidades para los pasajeros, ya que se encontrarán conectados a redes de datos que puedan trabajar sin problema gestionando grandes cantidades de información en tiempo real.

4. En cuanto al sector industrial, los procesos estarán hiperconectados, para maximizar así la productividad, la eficiencia y la calidad obtenida durante la explotación.
5. Como quinto y última característica, las ciudades en su conjunto se convertirán en núcleos urbanos inteligentes, donde una gobernanza electrónica, nuevos métodos de comunicación urbanos y una participación ciudadana de forma masiva serán posibles.



Figura 7 ¿Nuevas técnicas de representación y transmisión de ideas? (Shutterstock, 2003).

Particularizando hacia el sector industrial, las principales novedades serían:

- ✓ Haciendo uso de las amplias posibilidades que proporciona una red de comunicaciones rápida y con un gran número de dispositivos que pueden ser conectados, personas y equipos compartirán información de forma continua, de esta forma se facilitan labores como el mantenimiento, la detección y corrección de errores o la realización de peticiones en tiempo real.
- ✓ Esta nueva filosofía de trabajo puede abrir puertas a grandes posibilidades en el control de la producción, por ejemplo informando a los trabajadores o incluso a otras máquinas presentes de que se ha terminado de fabricar un producto o que se necesita realizar alguna acción correctiva sobre el proceso en marcha. De este modo, se facilitan labores como la modificación en el método o planificación de la producción en todo momento.
- ✓ Otro aspecto interesante a considerar puede ser la posible mejora continua para una determinada empresa que utilice tecnología 4.0. La gran cantidad de datos “big data, en inglés” que es producida en un solo día de trabajo, puede ser recopilada e interpretada por los nuevos sistemas, de esta manera se facilita el trabajo de los departamentos de innovación y desarrollo del producto. (Del Val, 2016).
- ✓ Hechos como conocer el estado de los semielaborados en tiempo real, acortar sus tiempos de fabricación o sus tasas de fallos, pueden conducir a realizar productos y servicios de una forma más eficiente y con un mayor rendimiento, reduciendo así drásticamente los costes de fabricación. (Del Val, 2016).

2.1.4 Posibles desventajas con la llegada de la Industria 4.0

1. Puede darse un período de transición entre lo que conocemos hoy y lo que está por llegar, cada uno de los aspectos comentados implica una gran complejidad de desarrollo y nuevos desafíos para los profesionales. (Aldakin, 2017).
2. La modernización de las industrias actuales hacia nuevas formas de explotación conlleva cierta inercia al cambio, la revolución industrial no deja de ser una inversión de futuro, que en la mayor parte de los casos puede resultar en desembolsos notables en tecnología, tanto en el área productiva como en los departamentos comerciales y de innovación. (Aldakin, 2017).
3. No conviene dejar a un lado los efectos que se puedan desencadenar en el factor humano, ya que avances notables en las estrategias de producción, que incluyan herramientas sofisticadas para el trabajador e incluso casos en los que máquinas y personas tengan que cooperar pueden generar largos períodos de adaptación o incluso rechazo por parte del personal.
4. Riesgos emergentes, desde la llegada de los últimos dispositivos inteligentes, como es el caso de los “smartphones”, que recopilan grandes cantidades de datos personales y se encuentran conectados a internet, han hecho emerger nuevas preocupaciones en la población, sobre el tratamiento que esta electrónica pueda hacer con la información. (Pérez, 2019).

Este concepto puede llegar a extenderse de forma masiva al sector industrial, donde ante la llegada del necesario progreso, el trabajador esté rodeado de sistemas que puedan difundir información privada o desproporcionada hacia compañeros de trabajo o al resto del mundo. Una sólida legislación y un uso responsable de la tecnología deberán progresar al mismo ritmo que el salto tecnológico para combatir estos problemas.



Figura 8 ¿Privacidad en la Industria 4.0? (Díaz, 2017).

2.2 Sistema y células de fabricación flexibles

2.2.1 Sistema de fabricación flexible. Definición, ventajas y desventajas.

Un Sistema de fabricación flexible (también denominado FMS) es un conjunto de estaciones de trabajo interconectadas por un sistema de transporte de materiales automatizado.

El sistema de transporte, así como el resto de sistemas de almacenamiento que pueden utilizarse, deben ser automáticos. Todo el conjunto es controlado por ordenador. (Chen y Adam, 1991). Así, los sistemas de fabricación flexible implican:

- Una inversión en tecnología de fabricación (sistemas de transporte, máquinas automáticas, robótica).
- Un cambio de filosofía de producción que busca la posibilidad de fabricar de forma rápida y automática series de piezas con ligeras modificaciones, eliminando los tiempos de reestructuración y adaptación a las nuevas necesidades en el proceso de fabricación.

Entre **las principales ventajas de los sistemas de fabricación flexibles (Rey, 2004):**

- Eliminan el tiempo de adaptación y puesta a punto entre la fabricación de diferentes productos.
- Se optimiza el método de transferir materiales entre estaciones de procesado y almacenaje.
- Se fabrica solamente el número de unidades necesarias, evitando aumentar la cantidad de elementos en inventario.
- Mejora la gestión de la producción.

Como **desventajas en los sistemas de fabricación flexibles (Rey, 2004):**

- Alto coste en la inversión de sistemas de transporte, almacenaje, fabricación, software...
- La producción ahora está basada en la filosofía de crear familias de piezas, dotando al sistema de más flexibilidad pero una menor tasa de producción posible.

2.2.2 Células de fabricación

Específicamente, este trabajo se va a centrar en el desarrollo e interconexión de células de fabricación flexibles, para poder así formar un sistema de fabricación flexible completo.

Una célula de fabricación flexible es un grupo de máquinas-herramientas, por ejemplo, un control numérico, entrelazado entre sí por un sistema de transporte de piezas común y un sistema de control centralizado (Dolcemascolo, 2004).

Un ejemplo formado por una serie de máquinas automáticas y un sistema de transporte también automatizado (en este caso se trata de un robot manipulador) que componen una célula flexible se encuentra en la figura 9.

Los elementos desarrollados serán capaces de funcionar de forma totalmente automatizada, sin necesitar intervención humana de forma directa. Además, cada uno de los elementos será modificable y escalable con facilidad, tanto en la parte física como lógica.

La idea principal de obtener un sistema a escala reducida de la planta real, consiste en poder validar el desempeño de cada una de las partes de la automatización, durante su funcionamiento, de forma intuitiva y a bajo coste.

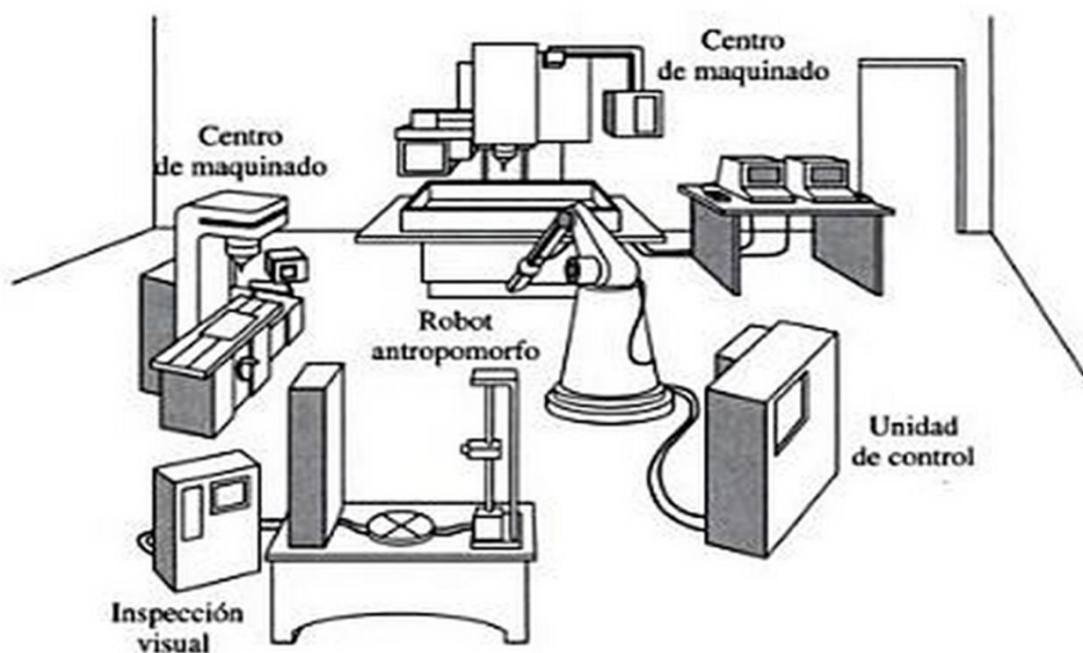


Figura 9 Ejemplo de una célula de fabricación flexible (Henao y Jaramillo, 2013).

Si se traza una gráfica donde se represente la variedad posible en las piezas fabricadas, frente al volumen de producto que el sistema de fabricación es capaz de producir, se obtiene la figura 10 (Henao y Jaramillo, 2013). Hay tres zonas bien diferenciadas en función la variedad y el volumen de producción elegido:

1. **Alto volumen de producción y baja variedad en las piezas:** Este caso pertenece a entornos fuertemente automatizados, propios de líneas de producción, como por ejemplo en el ensamblaje de automóviles. Cada una de las estaciones está diseñada para realizar siempre las mismas funciones, de forma muy rápida y eficiente.
2. **Volumen de producción y variedad de piezas medio:** Los sistemas de fabricación flexibles, objeto de este proyecto, se encuentran dentro de esta modalidad. Aquí se obtiene una solución de compromiso entre la capacidad de producción del sistema y la flexibilidad posible en el producto final. Un ejemplo puede ser un robot manipulador rodeado de varias estaciones de trabajo diferenciadas (figura 9).
3. **Alta variedad y bajo volumen de producción:** Este modelo de producción es propio de fabricaciones centradas en el producto, donde los medios de fabricación se sitúan alrededor de éste. Un ejemplo es el ensamblado de aeronaves.

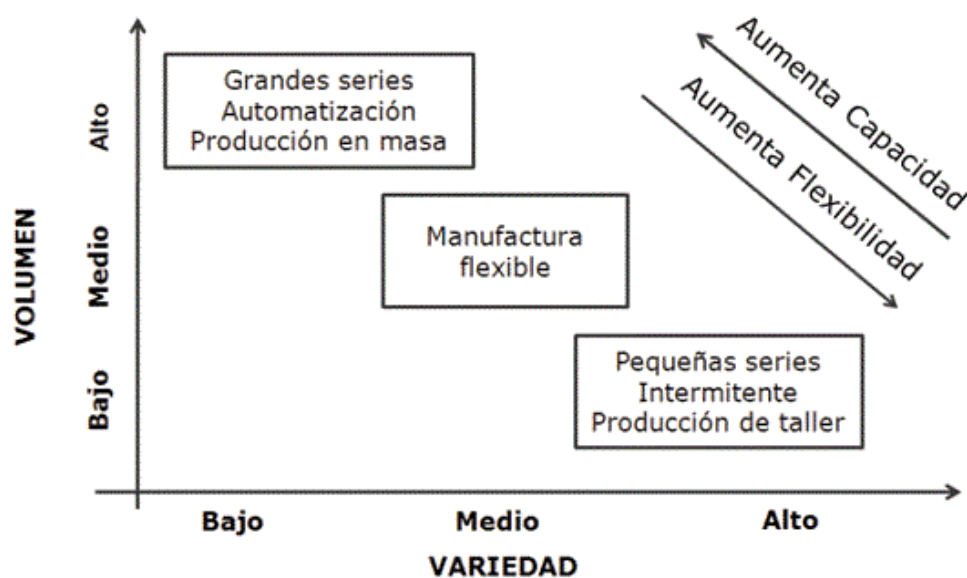


Figura 10 Diagrama de volumen de producción frente a variedad en el producto (Salazar y Vargas, 2010).

2.2.3 Conceptos útiles sobre sistemas de monitorización y control de plantas industriales

Aquí se muestran algunas definiciones, que serán útiles para comprender mejor el desarrollo de un sistema automatizado, como ocurre durante esta memoria.

- **SCADA (supervisory control and data acquisition):** Se trata de un sistema centralizado que es capaz de monitorizar y controlar plantas automatizadas, dotando a los usuarios de información y medios suficientes para operar sobre el proceso industrial de forma remota desde una sala de control (D. Krambeck, 2015).
- **HMI (human machine interface):** Otro concepto muy relacionado con los sistemas SCADA, es el de la interfaz hombre-máquina. Una interfaz hombre-máquina es un terminal que permite programar, controlar y recoger información de una máquina concreta (Zhang, 2010).

Como muestra la figura 11, el vínculo entre un sistema SCADA para una planta industrial concreta y las interfaces hombre-máquina de cada máquina es muy estrecho. Existe una comunicación bidireccional entre el SCADA y los HMI, donde se recoge información útil del proceso y con ella se controla convenientemente todo lo que ocurre en él.

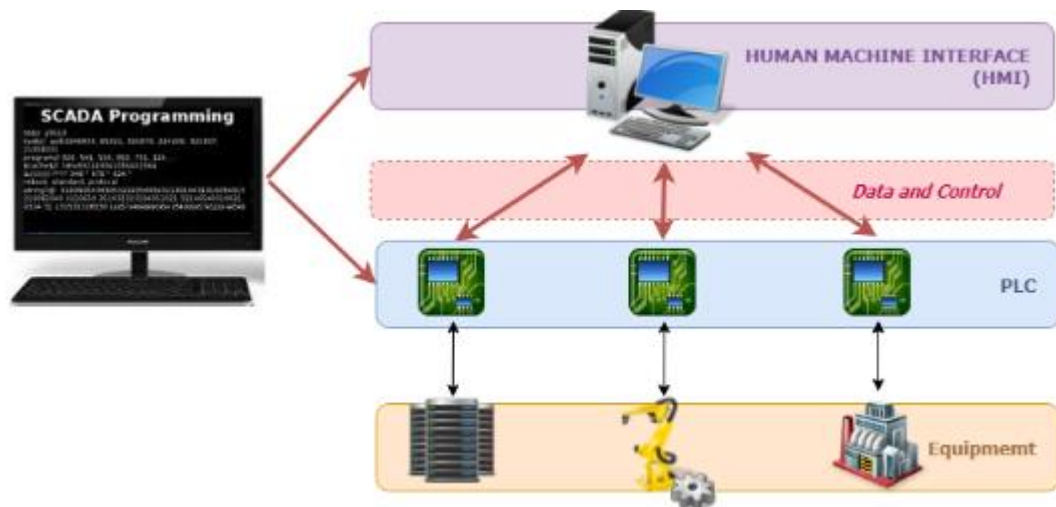


Figura 11 Relación funcional entre un sistema SCADA y una interfaz HMI (Carberry, 2018).

2.3 La norma ISA SP-95, aplicada a un sistema automatizado

Como base para desarrollar este proyecto de automatización, organizando a cada uno de los componentes implicados de forma coherente, es interesante conocer la existencia de la norma SP-95, diseñada por la International Society of Automation (ISA), siendo esta una asociación profesional sin ánimo de lucro que establece estándares aplicados en ingeniería y tecnología con la finalidad de mejorar su gestión, la seguridad y la seguridad cibernética de los sistemas de automatización y controles modernos utilizados en toda la industria.

La norma SP-95 separa en varios niveles o capas las actividades desarrolladas en una empresa, desde el proceso industrial en bajo nivel hasta sistemas de planificación de los recursos empresariales (ERP), tratándose estos últimos de herramientas de organización y gestión de la información intercambiada en el negocio, que pretenden reducir la cantidad de errores, mejorar la comunicación entre diferentes departamentos y reducir costes (Devia, 2015).



Figura 12 Los cinco niveles de integración propuestos por ISA SP-95 (Devia, 2015).

Ya que esta norma está pensada para aplicar en cualquier tipo de proceso y entornos de fabricación, será de gran utilidad para separar cada arquitectura planteada anteriormente. Dentro de los cinco niveles que plantea esta norma (ver figura 12), serán de aplicación los niveles 0,1 y 2. Estos niveles se centran en aspectos de las operaciones durante el proceso industrial en cuestión, en el montaje físico-lógico de cada uno de los elementos activos en planta y en las aplicaciones o herramientas de control superior instaladas a nivel de fábrica, respectivamente.

Los niveles 3 y 4 son interesantes, para conseguir una gestión eficiente de la información intercambiada entre los diferentes departamentos que forman la empresa, quedando fuera los objetivos de este trabajo. (Devia, 2015).

2.4 Transporte interno de material en plantas industriales

2.4.1 Problemática e importancia de la logística en la industria

Un servicio que en muchos casos, dentro de las operaciones comerciales y modelos de producción, podría quedar en segundo plano pero que es tan importante como el resto de disciplinas, es el transporte de materias primas, semielaborados y productos finales dentro de las plantas industriales y exteriorizando hacia los clientes.

En este trabajo se tratará de aportar ideas sobre cómo conseguir diseñar las logísticas internas en las zonas de producción, mediante el montaje y programación de pequeñas plantas industriales, pudiendo así representar fielmente y optimizar el comportamiento esperado de la planta, con bajo coste y recursos.

Para la pequeña y mediana empresa, el gasto en logística interna supone un casi un tercio de los gastos totales, ha pasado de ser “el patito feo” que nadie miraba a ser un importante foco de atención. Un almacén no es un lugar donde depositar mercancías de cualquier manera, es un pilar fundamental para un servicio adecuado al cliente (Palenzuela, 2017).

Algunos problemas clásicos en gestión de inventarios en las empresas son la falta de organización de los productos, la falta de espacio en los propios almacenes y rutas de acceso provocando así el aumento de los plazos de entrega al cliente.

Uno de los problemas más complejos de resolver es la gestión de la información para la toma de decisiones, cuando dicha disponibilidad y fiabilidad en tiempo real no es certera.

Para completar, es importante tener en cuenta la integración entre los diferentes procesos logísticos y resto de departamentos y hacer uso de los indicadores clave específicos para nuestra actividad productiva (KPIs) para conocer entre otros costes y rendimientos importantes, el coste de las operaciones logísticas.

“Las empresas no mejoran sus fallos, simplemente porque no logran identificarlos” (Palenzuela, 2017).

De esta temática surgirá la motivación para realizar este proyecto, se estudiará al completo un nuevo método para pasar del papel a una realidad inmediata, perceptible fácilmente por desarrolladores, que busquen optimizar su producto y por las personas no directamente relacionadas con la idea de negocio (posibles inversores, clientes, público en general...).

2.5 Diferentes modos de funcionamiento para un sistema automatizado. Guía GEMMA

Además del modo de funcionamiento normal, donde un automatismo se encuentra produciendo sin ningún inconveniente, existe la posibilidad de que el proceso cambie de estado, por ejemplo debido un error dentro del propio control del sistema automatizado, el factor humano o un agente externo que saque al sistema de su estado principal.

En un nuevo proyecto de automatización hay que tener en cuenta todos los posibles estados que puedan surgir durante su explotación, como puede ser un funcionamiento manual, automático, estados de emergencia o puesta en marcha tras detectarse un error.

La agencia ADEPA (Agence nationale pour le Developpement de la Production Appliquée a l'industrie) desarrolló la guía GEMMA, que consiste en una representación organizada de todos los modos o estados de marcha y paro en que se puede encontrar un proceso de producción automatizado, orientando sobre los saltos o transiciones que pueden darse de un estado a otro (Ponsa y Vilanova, 2006).

Un automatismo tiene dos partes bien diferenciadas: el sistema físico de producción y la parte lógica que controla al anterior, que puede ser un autómatas programable, un ordenador u otro tipo de sistema electrónico dedicado. El sistema de producción puede llegar a encontrarse en tres estados diferenciados:

1. **Funcionando**, y por tanto aportando valor añadido a los productos.
2. **En paro**, sin producir.
3. **En estado de error**, en el cuál el material tratado será aprovechable o no en función del tipo de error y el tratamiento tomado tras producirse el error.

Durante la ejecución de este proyecto, se pretende mostrar al lector cómo una vez obtenido el sistema automatizado planteado, se tendrá la posibilidad de **comprobar a priori cómo se comportaría todo el sistema real objetivo, durante su explotación, cuando se necesite realizar un cambio de estado en la producción.**

Por ejemplo, se puede producir un cambio de estado hacia una situación de paro como consecuencia de que un operario o máquina implicada detectara un error prioritario y sea necesaria la detección del proceso productivo, hasta nueva orden.

Para poder conmutar entre los diferentes estados posibles, será necesaria una serie de acciones consecutivas para evitar puestas en marcha descontroladas o accidentales, como puede ocurrir entre un estado de paro activado por un incidente identificado y el estado de funcionamiento normal.

Por tanto se pretende considerar, durante el desarrollo del sistema de fabricación flexible, la inclusión de señales que permitan conmutar entre los diferentes estados de funcionamiento definidos (normal, paro, testeo). De esta manera se dota las células de fabricación de un comportamiento más realista.

De forma esquemática, la filosofía de la guía GEMMA puede resumirse en el siguiente gráfico (figura 13):

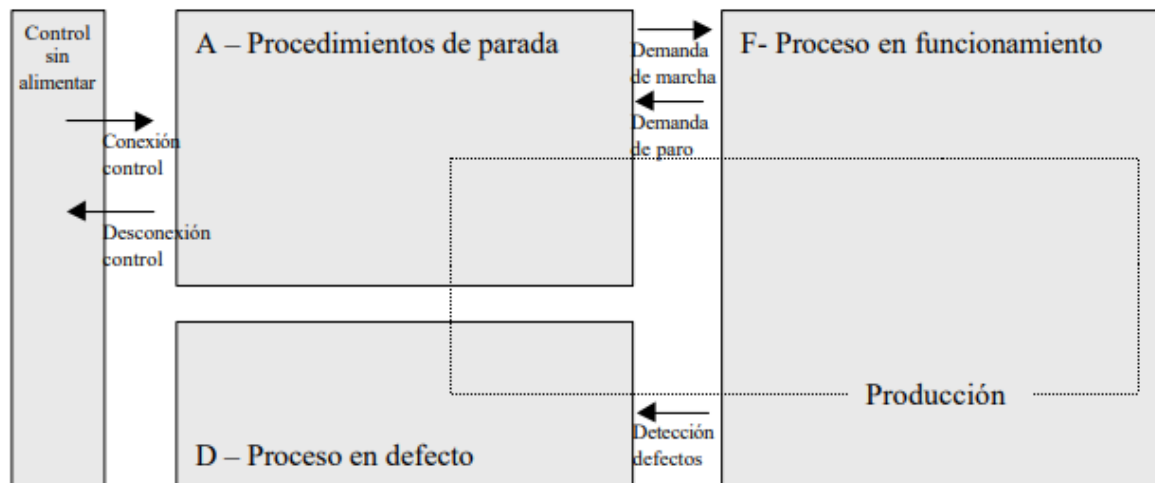


Figura 13 Familia de estados de la guía GEMMA (Rodríguez, 2011).

La guía GEMMA se subdivide en 17 estados posibles y en tres grupos principales: el procedimiento para el funcionamiento normal (Grupo F), el procedimiento para paradas y puestas en marcha (Grupo A) y los procedimientos para tratamiento de defectos (Grupo D).

Según los eventos ocurridos durante el uso del automatismo, se desencadenarán transiciones entre un grupo y otro, definiendo un nuevo estado.

Por ejemplo, si durante el procesado de una pieza se detecta una anomalía por parte del automatismo, se puede lanzar un aviso de detección de defecto que lleve a ejecutar un procedimiento para defectos (dentro del grupo D) o una demanda de paro si puede desencadenar daños mayores a la maquinaria o a las personas (Grupo A).

2.6 Material disponible como punto de partida para el proyecto

A continuación, se describirán los componentes estructurales y electrónicos que serán empleados durante este proyecto. El sistema automatizado surgirá de una combinación de elementos físicos y lógicos, que funcionando conjuntamente forman un sistema de manufactura automático. Los elementos estructurales, electrónicos y software que se van a describir en las siguientes subsecciones, son los siguientes:

1. Set LEGO Mindstorms Education EV3 NXT.
2. Set de expansión LEGO Mindstorms.
3. Interfaz de comunicación Bluetooth para Microsoft Visual Studio (Kirillow, 2017).

2.6.1 Parte física. Elementos constructivos LEGO

Para resolver el montaje de las estaciones de trabajo, medios de transporte y todas las casuísticas de complementos posibles, se ha optado por emplear el kit de expansión LEGO Mindstorms como punto de partida (figura 14).

Estos sets de piezas contienen multitud de objetos útiles para realizar diseños complejos de plantas industriales, en escala reducida, desde partes móviles propias de la maquinaria, hasta elementos de soporte estructural. Algunas piezas destacadas son:

- Engranajes para hacer reductoras.
- Platos giratorios.
- Elementos estructurales básicos: vigas, ejes, conectores o ruedas.
- Elementos estructurales más complejos, como uniones articuladas.



Figura 14 Kit con elementos estructurales LEGO Mindstorms.

2.6.2 Parte lógica. Controladoras LEGO NXT e interfaz de control

En cuanto a la parte digital, que controlará al sistema automatizado, se ha escogido el kit de controladoras y componentes electrónicos LEGO Mindstorms education EV3 NXT (figura 15). El set contiene los siguientes elementos principales:

- Controladora NXT.
- Sensores láser.
- Un micrófono.
- Sensor de contacto.
- Sensor de ultrasonidos.
- Servomotores eléctricos.
- Cableado para sensores y actuadores.
- Multitud de elementos estructurales básicos: vigas, uniones fijas y articuladas, neumáticos, entre otros.

La controladora NXT, es una electrónica de consumo, capaz de ser conectada a diferentes tipos de sensores y servomotores, para crear así montajes funcionales. Dicha unidad es capaz de ser programada usando conexión USB o de forma inalámbrica mediante bluetooth, desde un ordenador.

Los programas pueden ser cargados en su firmware haciendo uso del software proporcionado por el fabricante (LEGO) o la electrónica puede recibir órdenes en tiempo real, usando la red inalámbrica bluetooth y un software de código abierto.



Figura 15 Kit LEGO Mindstorms education EV3 NXT.

Será necesario disponer de un software que sirva para implementar los controladores necesarios, de forma que sea práctico para cualquier usuario final, sin conocimientos avanzados en programación. Un entorno de programación que permite diseñar interfaces de usuario y algoritmos de control al mismo tiempo, con una curva de aprendizaje razonable, es Visual Studio de Microsoft.

Microsoft Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE, en inglés) para Windows, Linux y macOS. Es compatible con múltiples lenguajes de programación, tales como C++, C#, Visual Basic .NET, F#, Java, Python, Ruby y PHP, al igual que entornos de desarrollo web.

C# es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado y estandarizado por Microsoft como parte de su plataforma .NET, que después fue aprobado como un estándar por la ECMA e ISO. En este proyecto, el software será desarrollado en este lenguaje compatible con la plataforma.

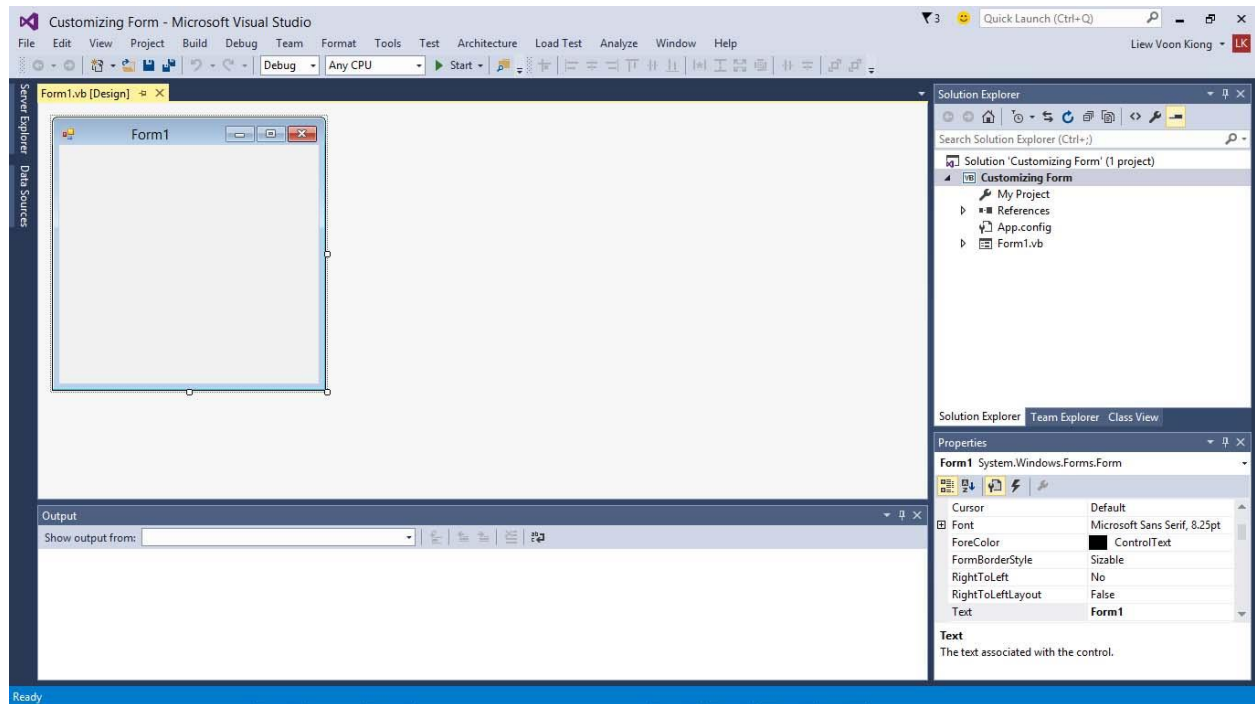


Figura 16 Ventana principal del entorno de programación Visual Studio.

Más en concreto, se dispone de una herramienta básica diseñada en C# que permite la comunicación entre una controladora NXT y un ordenador (Kirillow, 2017) de manera inalámbrica, mediante bluetooth (ver figura 16).

Aforge.Net es una plataforma online diseñada para desarrolladores e investigadores del campo de la visión por ordenador e inteligencia artificial. Comparte programas escritos en C# e ideas útiles para proyectos de robótica, machine learning, redes neuronales o procesamiento de imágenes. Esta interfaz en concreto, cuenta con las siguientes funcionalidades básicas, para utilizar controladoras NXT:

- Sección dedicada a establecer la comunicación bluetooth, donde añadiendo el puerto COM creado por Windows para la controladora NXT, se puede conectar y desconectar al periférico de forma inalámbrica al PC.
- Información sobre la controladora NXT, como su nombre, dirección bluetooth o el nivel de batería.
- Sección que permite controlar por el usuario, de forma básica, a un motor conectado y seleccionado en el desplegable, en diferentes modos de regulación de carga.
- Lectura de valores instantáneos, para un sensor seleccionado en el desplegable.

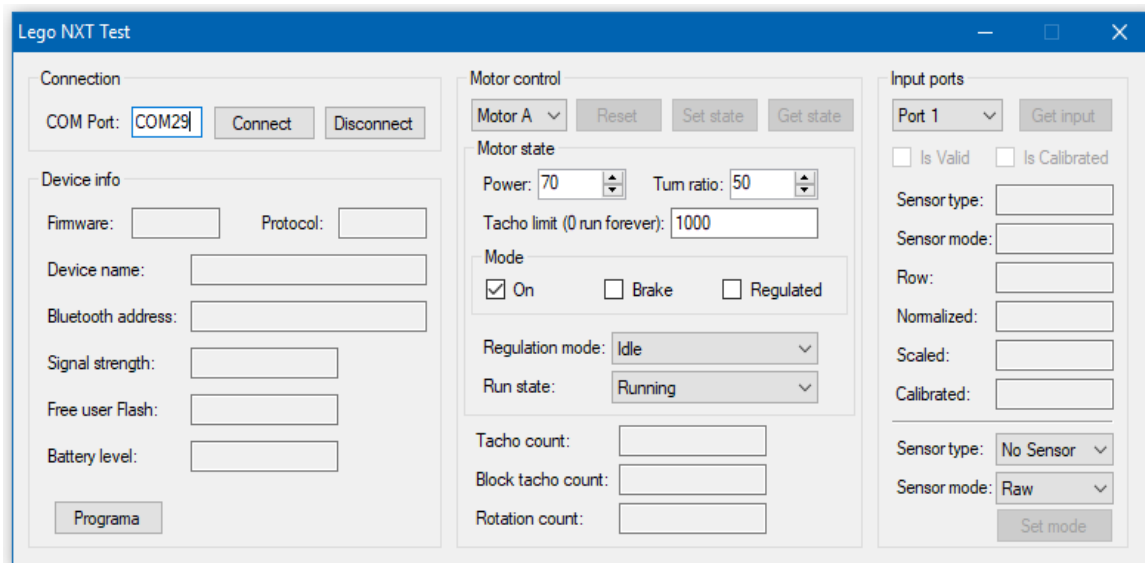


Figura 17 Interfaz inicial para la comunicación Bluetooth con LEGO NXT (Kirillow, 2017).

Esta interfaz ha sido escogida para comenzar a desarrollar la parte software del trabajo, ya que con una comunicación inalámbrica se facilita la escalabilidad para las controladoras NXT desde un mismo PC y además, se trata de un medio de configuración adecuado para cualquier tipo de usuario.

Para concluir el inventario, se dispone de sensores y actuadores del fabricante LEGO Mindstorms. Se trata de una amplia gama de elementos activos:

1. Sensores láser que permiten, por ejemplo, identificar objetos que avanzan sobre un elemento de transporte
2. Sensores de ultrasonidos, capaces de detectar objetos y superficies en diferentes rangos de medida.
3. Sensores de presión y contacto para incluir en maquinaria o elementos móviles.
4. Micrófonos, que permiten recoger voces o ruidos y transformarlos en una respuesta digital.
5. Motores eléctricos con encoders de posición integrados, útiles para crear estaciones de procesado o elementos de transporte, en combinación con la sensorización.

Todos los sensores y actuadores pueden ser conectados fácilmente, a una controladora NXT, mediante cableado como se muestra en el ejemplo de la figura 18.



Figura 18 Elementos activos NXT, sensores y actuadores disponibles.

3 METODOLOGÍA PROPUESTA

En esta sección, se procederá a definir en detalle, cómo será resuelto el sistema de fabricación modular, descomponiéndolo en varios tipos de células de fabricación, que trabajando de forma conjunta contendrán cada elemento necesario para representar fielmente a un proceso industrial automatizado.

El contenido de este capítulo es el siguiente:

1. **Subsección 3.1.1:** Especificaciones que debe cumplir el sistema de fabricación resultante. Cómo se define el sistema y cuáles son sus arquitecturas hardware y software.
2. **Subsección 3.1.2:** Introducción de la norma ISA SP-95, cuáles son sus partes y dónde aplica para obtener este sistema automatizado.
3. **Subsecciones 3.1.3 hasta 3.1.6:** En los sucesivos apartados, se tratan las especificaciones de diseño necesarias, desde el nivel 0 ISA SP-95 (proceso industrial) hasta el nivel 2 ISA SP-95 (Interfaces HMI y SCADA).
4. **Subsección 3.2:** Se concluye describiendo una posible distribución para el sistema completo, mostrando cómo se materializarán las comunicaciones entre los diferentes módulos.

3.1 Especificaciones técnicas y funcionales

3.1.1 Especificaciones para el sistema de fabricación automatizado modular

Para acotar el problema propuesto, hacia un diseño que sea abordable, es necesario definir una serie de requisitos y especificaciones, que podrían ser adecuadas para un sistema automatizado a desarrollar:

- ❖ Se trata de obtener un hardware, formado por módulos o células de fabricación de varios tipos. Dichas células serán, en principio, independientes en cuanto a montaje y programación de sus funciones, según las necesidades de cada tipo de unidad celular.
- ❖ El sistema de fabricación resultante será obtenido con una combinación de varios tipos de células, según convenga para el proceso industrial en cuestión. Véase el esquema representado en la figura 19, donde se encuentra la estructura hardware del sistema basado en células.

- ❖ En cuanto a los requerimientos en el software, todo el sistema será capaz de coordinarse automáticamente para trabajar en conjunto, independientemente del tipo de células escogido y de su disposición dentro del proceso.
- ❖ A nivel de planta, será posible enviar órdenes hacia las células conectadas al sistema, por tanto debe existir una herramienta de control, que permita al usuario la gestión del proceso industrial. Véase la figura 20, donde se encuentra la arquitectura de control esperada.
- ❖ Además, cada célula de fabricación, contará con un programa lógico de bajo nivel, que ejecute sus operaciones elementales, de forma autosuficiente. Estos programas dedicados serán compatibles cuando se conecten o desconecten otras células, de cualquier tipo, al sistema.

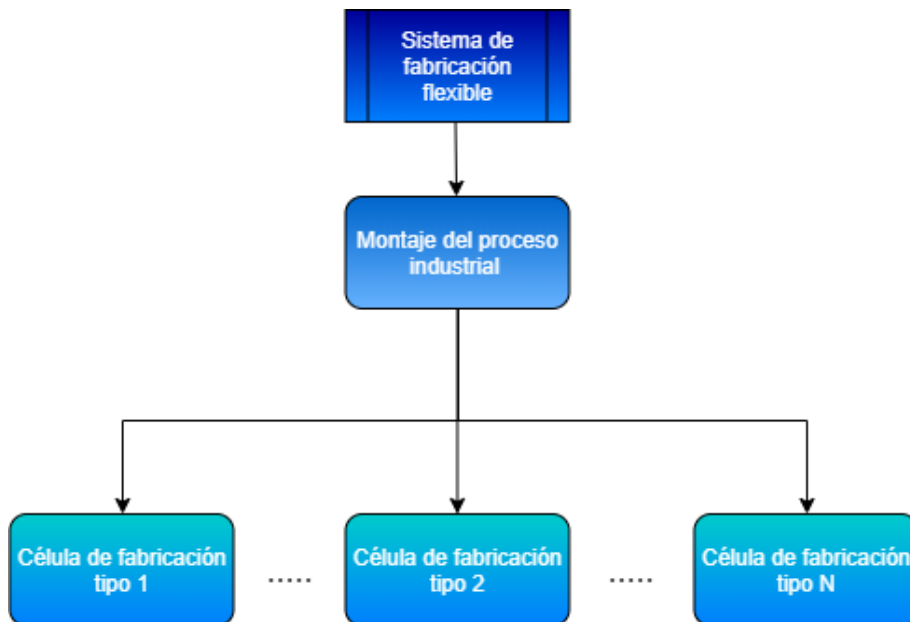


Figura 19 Estructura hardware del sistema de fabricación modular.

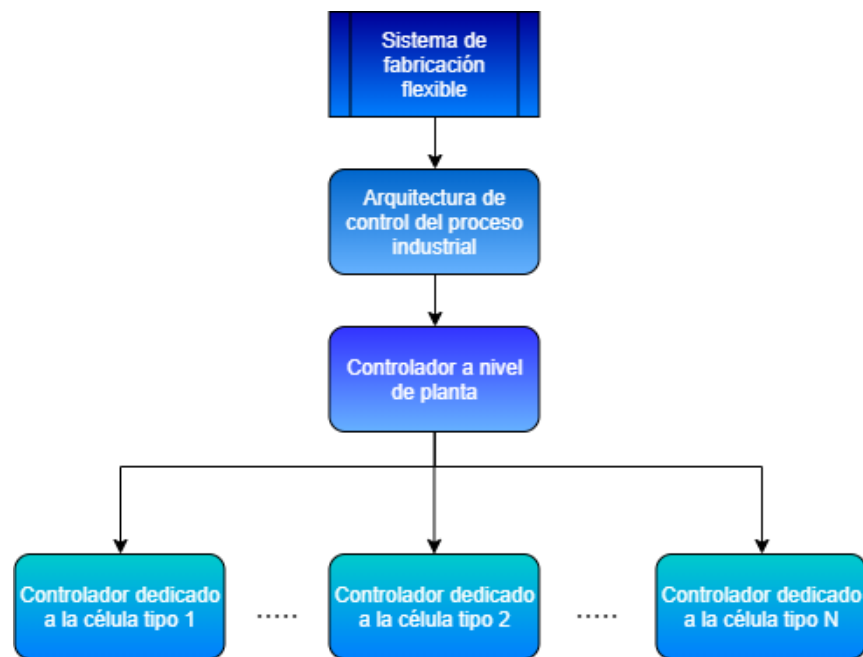


Figura 20 Estructura software del sistema de fabricación modular.

3.1.2 Requisitos para el montaje del proceso industrial. Nivel 0 de la norma SP-95

Las operaciones principales que serán abordadas en este sistema físico planteado, serán:

1. Transporte de material automatizado, entre diferentes estaciones de trabajo.
2. Redirección de productos hacia múltiples destinos posibles.
3. Procesamiento de material en diferentes estaciones, para aumentar el valor añadido de los semielaborados.

Dos tipos de células de fabricación diferenciadas serán las encargadas de ejecutar dichas actividades. Sus requisitos de diseño serán expuestos a continuación.

En primer lugar se describirá un separador de material automático y posteriormente una estación de procesado. Cada uno de estos módulos será diseñado individualmente, tanto en sus aspectos en la parte física como lógica.

Una vez obtenidas las células de fabricación independientes, serán combinadas dentro de un sistema productivo mayor para mostrar sus capacidades para representar multitud de escenarios productivos.

3.1.3 Diseño hardware propuesto para las células de fabricación flexibles. Nivel 1 en SP-95

Célula tipo 1: Separador de material automatizado. Especificaciones de diseño

Dentro del nivel 1, que propone la norma ISA SP-95, se definirá un primer tipo de célula de fabricación, que se denominará “separador de material”. El separador de material será ideado cumpliendo los siguientes criterios de diseño:

- 1 Será un grupo funcional electromecánico, cuyo objetivo es redirigir las piezas/cajas entrantes en la célula hacia la dirección deseada por el usuario. La salida puede efectuarse en dirección longitudinal o transversal a la de alimentación.
- 2 Contará con un sistema de transporte propio automatizado, que será capaz de trasladar material desde un punto inicial considerado hacia otro final. La entrada y salida de cajas dependerá de cada caso particular, por ello deberá ser considerado estructuralmente.
- 3 Se instalarán los sensores necesarios para identificar a los productos y poder procesarlos convenientemente.
- 4 El conjunto contará con elementos activos, capaces de redirigir mercancías, instalados en la célula.
- 5 La célula resultante se debe poder montar y desmontar con facilidad dentro de un sistema más complejo, compuesto por más células del mismo o distinto tipo, funcionando de forma totalmente automática una vez programada.
- 6 Se podrá operar en varios sentidos de giro e igualmente, el montaje debe ser capaz de considerar la función de separar materiales de forma bidireccional. Además, será posible replicar y montar más dispositivos idénticos al diseño final, para poder crear sistemas modulares más complejos.
- 7 Cada célula de este tipo tendrá un control electrónico propio, que permitirá su control individualizado de bajo nivel, así como su integración en un sistema multicélula gestionado por un controlador de más alto nivel.
- 8 También contará con un medio de comunicaciones específico que sea ergonómico e intuitivo, capaz de posibilitar ajustes y configuraciones sobre la célula individual, en tiempo real.

Célula tipo 2: Estación de procesado de piezas. Especificaciones de diseño

El segundo tipo de célula se denominará “estación de procesado”, también incluida en el nivel 1 en ISA SP-95. Representará el funcionamiento de una estación de trabajo genérica, realizando un procesado sobre piezas que se desplazan sobre un sistema de transporte automático. Sus especificaciones para el diseño son:

- 1 Constará de la sensorización necesaria para localizar piezas y posicionarlas convenientemente.
- 2 Un sistema de transporte estará dedicado a trasladar los semielaborados desde otras cintas a una zona de procesado.
- 3 Las piezas llegarán a la zona de procesado donde se realizará un tratamiento durante un tiempo definido, completando así la etapa de fabricación.
- 4 La célula creada deberá ser lo más flexible y escalable posible. Cada proceso industrial condicionará el montaje y funcionamiento de la célula.
- 5 Una software será encargado de gestionar a cada célula de procesado individualmente, de forma que el usuario sea capaz de comunicarse con ella, realizando los ajustes de funcionamiento necesarios.
- 6 Una vez configurada, operará de forma totalmente automática junto a otras células, cuando haya sido montada y conectada, hasta que se desee un nuevo modo de operación.
- 7 El control individualizado de la célula será llevado a cabo por una electrónica propia, que se comunicará con el sistema centralizado de la fábrica, para poder así gestionar el proceso en alto nivel. El controlador de bajo nivel también será capaz de poner en funcionamiento a la célula.
- 8 El módulo finalmente obtenido debe ser lo más compacto posible, evitando posibles desprendimientos de piezas y separación de elementos estructurales durante la manipulación.

3.1.4 Especificaciones lógicas para el controlador a nivel de planta. Nivel 2 en SP-95

Los sistemas de control del proceso se encuentran en el nivel 2 de la norma ISA SP 95. Será necesario idear una herramienta de monitorización del proceso, que además constituya un medio de comunicación entre el sistema de fabricación y el usuario final.

El controlador a nivel de planta se puede considerar como un SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) con alcance hacia todo el proceso creado. Su función será doble, en primer lugar se encargará de iniciar los programas de control individuales para las células consideradas, y además será capaz de realizar algunas acciones de control en alto nivel, como paradas de la producción o testeos. Como sistema de control y monitorización a nivel de fábrica que es, se integrará dentro del nivel 2 en ISA SP-95.

Las especificaciones principales para el sistema centralizado que pondrá en funcionamiento a toda la distribución en planta, son:

- 1 Será una aplicación software adecuada para realizar funciones de interacción con el usuario y comunicación con un posible número elevado de células de fabricación, según cada prueba.
- 2 Se encargará de lanzar las aplicaciones de control específicas de cada célula, según su tipo y montaje (explicación de las especificaciones para la capa software de bajo nivel de cada célula, en el siguiente apartado).
- 3 En tiempo real, el controlador central dispondrá de la capacidad de lanzar órdenes a nivel de fábrica, hacia los programas específicos de cada célula, con la idea de que éstas realicen cambios de estado necesarios. Por ejemplo, ante un error de producción, el usuario o alguna célula determinada puede solicitar una parada de emergencia, que será gestionada hacia las otras células por el control centralizado. En definitiva, se trata de una herramienta que aplica la filosofía de la guía GEMMA, con una serie de estados de funcionamiento definidos.
- 4 El programa de cada célula afectada por un cambio de estado, responderá actuando en bajo nivel, por ejemplo desactivando motores, y notificando al control superior del nuevo estado en el que se encuentra.

3.1.5 Especificaciones lógicas para los controladores de cada célula. Nivel 2 en SP-95

Además del sistema SCADA principal, que monitorizará a todas las células, se contará con controladores específicos asociados a cada célula individualmente, que aparecerán como interfaces HMI (Human Machine Interface), que contendrán el bucle de control en bajo nivel que ejecutará las operaciones necesarias para cada célula individual.

En particular, también permitirán ajustar en tiempo real para cada célula asociada, algunos parámetros de funcionamiento. Las especificaciones principales para cada controlador celular son:

- 1 Contener el bucle de control específico para la célula de fabricación asociada, siendo este software capaz (una vez activado por el usuario) de realizar las operaciones necesarias para ejecutar el proceso en bajo nivel, con órdenes como leer sensores, activar y desactivar motores o recibir peticiones del SCADA centralizado, que se comunica desde un nivel superior en la capa software.
 - 2 Otorgar al usuario la posibilidad de aportar a través de una aplicación, parámetros básicos de funcionamiento, como el sentido de giro de las cintas, la velocidad de avance... antes de que la célula haya sido activada.
 - 3 Una vez cargados los datos anteriores y con la célula activa, se permitirá la modificación de algunos parámetros durante el proceso de fabricación desde el programa ejecutado, en tiempo real.
 - 4 Se dispondrá de una botonera dedicada a realizar operaciones básicas a nivel de célula, como calibrar sensores o probar los motores eléctricos.
- ✓ En resumen, se pretende obtener un sistema de fabricación flexible modular, formulado de forma que sea completamente escalable en número de células activas y que pueda funcionar compartiendo información de forma coherente, entre cada elemento conectado.
 - ✓ Para ello, se usarán variables compartidas entre las células, analizadas por el control centralizado con la finalidad de conocer el estado del sistema y realizar cambios oportunos en los automatismos desde el alto nivel.

El procedimiento que se ha decidido en la etapa de diseño para la programación del sistema en su conjunto viene resumido en el siguiente diagrama de flujo (figura 21).

El control central o SCADA, genera al resto de interfaces HMI (que contienen la configuración y control en bajo nivel de cada célula) y además, permite al usuario monitorizar el estado de funcionamiento de todo el sistema. Desde el SCADA, el usuario puede lanzar órdenes o peticiones a cada célula de fabricación, por ejemplo ante la necesidad de realizar una parada controlada de la producción.

Por su parte, los controladores específicos de cada célula (interfaces HMI), son las encargadas de ejecutar sus operaciones en bajo nivel y por otro lado, notifican al SCADA del estado de la célula, cerrando así el bucle de control.

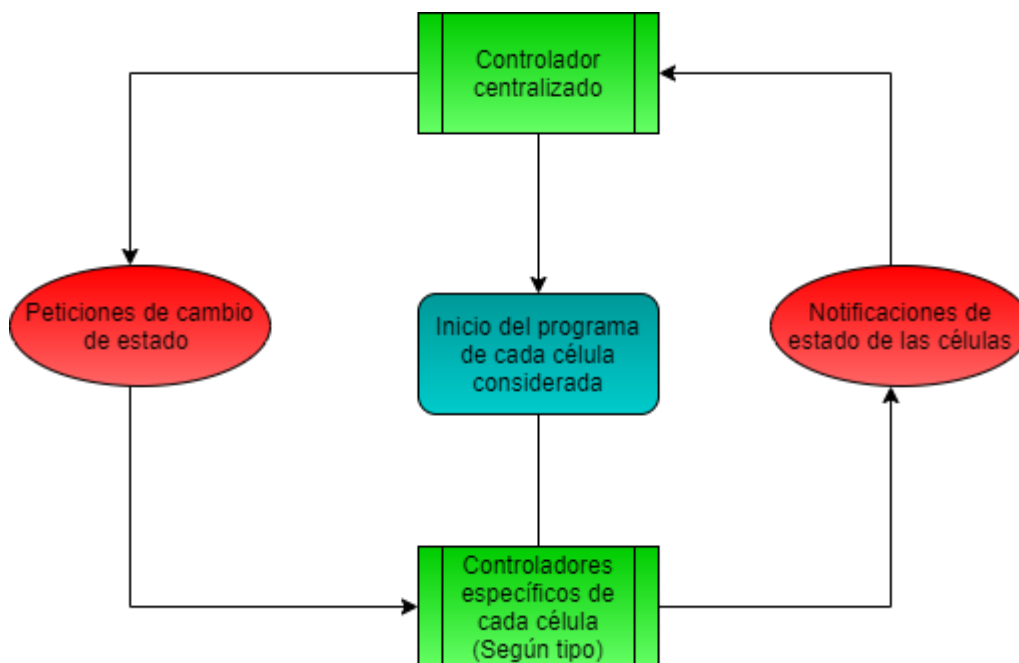


Figura 21 Planteamiento del bucle de control para todo el sistema.

3.2 Arquitectura de control. Distribución de las comunicaciones

Una vez presentadas las ideas de desarrollo y los recursos disponibles, es posible obtener una primera aproximación de la arquitectura esperada para el sistema de fabricación al completo. Sus características y especificaciones principales son:

- Desarrollar una red distribuida de comunicaciones, formada por un ordenador y múltiples células de fabricación flexibles.
- El ordenador funcionará como herramienta de control para las células, de forma inalámbrica, enviando cada orden a ejecutar en tiempo real, mediante protocolo bluetooth. El ordenador central contará con una aplicación diseñada para Visual Studio, conteniendo todas las capas de control (algoritmos a nivel de sistema y a nivel celular).
- Cada célula estará compuesta por una controladora NXT, que actuará como esclavo del ordenador, ejecutando cada petición recibida por bluetooth. La controladora NXT se comunica mediante señales analógicas (cableados) con varios sensores y actuadores instalados.
- Desde el ordenador, el sistema podrá ser configurado y controlado al completo, desde un SCADA para toda la planta industrial o a nivel local sobre las células, desde interfaces HMI.

La siguiente figura muestra, de forma visual, cómo se distribuirán los diferentes componentes del sistema y cómo se compartirá la información. Se trata de un ejemplo formado por un ordenador central y cuatro células de fabricación genéricas.

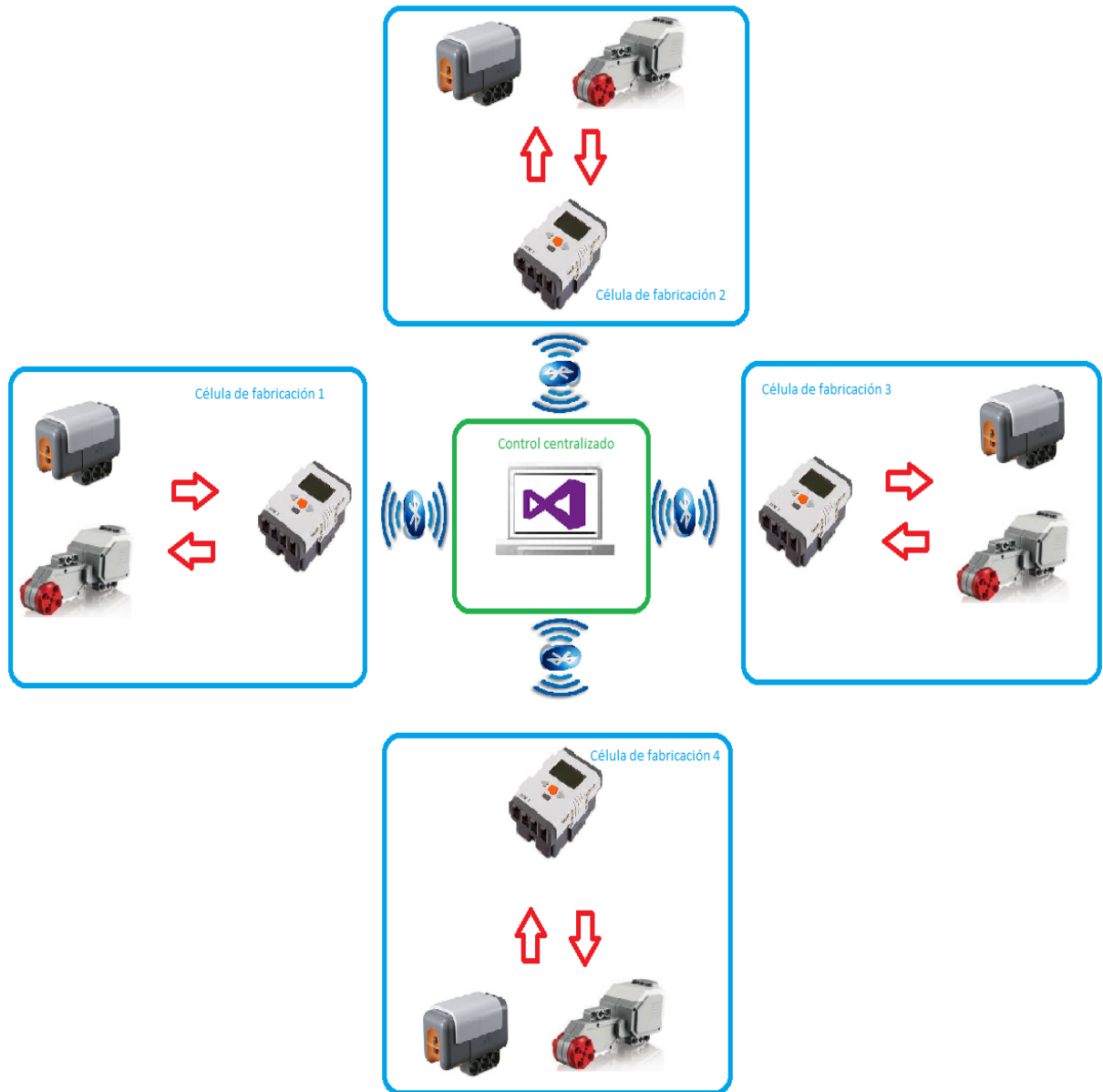


Figura 22 Sistema distribuido de comunicaciones para cuatro células.

4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Las especificaciones de diseño, consideradas en la sección anterior, serán llevadas a la práctica consolidando así el cumplimiento de los objetivos del trabajo: crear una serie de células de fabricación capaces de formar parte de un sistema de fabricación flexible. En esta sección, se explicarán las decisiones y justificaciones tomadas durante la etapa de implementación de los prediseños anteriores, para cada componente físico y lógico que forma parte de las unidades electromecánicas.

El contenido de este capítulo es el siguiente:

1. **Subsección 4.1:** Se comienza con el detalle de las decisiones tomadas para obtener el diseño final de la parte software del proyecto. Dicha parte se divide en dos tipos de herramientas para el usuario, un control tipo SCADA para todo el sistema e interfaces HMI para configurar y operar cada célula independientemente. Se explica cada funcionalidad incorporada para las herramientas de control desarrolladas.
2. **Subsección 4.2:** Para cerrar el capítulo, se muestra cómo se ha materializado el hardware de cada tipo de célula de fabricación desarrollada. Se incluyen justificaciones constructivas y fotografías de los diseños finales.

4.1 Solución para la parte lógica del sistema de fabricación

4.1.1 Diseño resultante para el sistema SCADA

Siguiendo los criterios expuestos en la sección 2.1.5, para el controlador centralizado tipo SCADA, se han obtenido los siguientes resultados como aplicación de la metodología propuesta:

- ✓ Dicho asistente de alto nivel se materializa en una interfaz de usuario, denominada “Control centralizado del sistema de fabricación flexible”. Toda la comunicación se realiza entre un ordenador y las controladoras NXT de cada célula, enviando y recibiendo peticiones de forma inalámbrica, mediante bluetooth. De esta forma se consigue una mayor comodidad y escalabilidad en las células, que si todo estuviera cableado físicamente.
- ✓ Todo el código ha sido desarrollado en C#, siendo éste un lenguaje de programación orientada a objetos, estandarizado por Microsoft como parte de su plataforma .NET.

- ✓ Sus funcionalidades finales son: crear hilos de control en bajo nivel, para un número de células especificado (los hilos se incluyen dentro de las interfaces de cada célula de fabricación generada) y realizar peticiones a dichos hilos de control a nivel de fábrica.
- ✓ La interfaz consta de dos partes principales, la primera (Figura 23) permite generar un número de interfaces definidas por el usuario, para el control individual de cada célula de fabricación (más detalles sobre dichos elementos de control en las siguientes subsecciones). Recordemos que hay dos tipos de célula disponibles, los separadores de material y las estaciones de procesamiento de piezas.

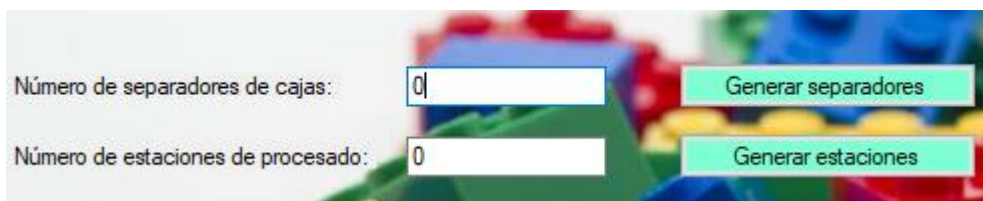


Figura 23 Interfaz general. Subsección de generación de células.

- ✓ Tras introducir la cantidad de células a crear en la programación y pulsar en el botón de generación correspondiente, se dispondrá de un número de ventanas extra igual al número de células especificado. Cada interfaz HMI generada corresponde a un hilo de código independiente para el control en bajo nivel de cada célula.
- ✓ Por otra parte, hay disponible una botonera que permite realizar las peticiones a nivel de fábrica, enviándolas a cualquier célula que se encuentre conectada y esperar a que sean ejecutadas por cada célula implicada. Un botón de marcha, paro, test y rearme componen la botonera. Las funciones de cada botón son:
 - **Botón de marcha:** Permite el inicio de las actividades automatizadas de todas las células que hayan sido activadas. Solamente las células que hayan sido completamente configuradas y activadas, en sus respectivas interfaces, se pondrán en funcionamiento. Este proceso será detallado más abajo, en la descripción de las interfaces específicas de cada célula.



Figura 24 Interfaz general. Botón para la puesta en funcionamiento de las células.

- **Botón de paro:** El software de cada célula es detenido, llevando al sistema a un estado seguro. Dicho estado será mantenido hasta que el usuario teste el sistema y se rearmen las células.

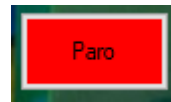


Figura 25 Interfaz general. Botón para realizar un paro controlado en la producción.

- **Botón de test:** Tras un evento de paro, el sistema está configurado para revisar el correcto estado de cada elemento activo de las células (motores, sensores), por lo que este botón realiza de forma ordenada la prueba de los componentes de cada célula. Si todo va bien, se habilitará el botón de “rearme”.



Figura 26 Interfaz general. Botón para el testeado controlado de todas las células.

- **Botón de rearme:** El botón de rearme es el que permite (cuando se activa) que se vuelva a poner en funcionamiento el sistema presionando el botón “marcha” tras un paro. Solamente será posible activarlo cuando el testeado haya sido correcto. Con esto finaliza la aplicación de la guía GEMMA, transportando al sistema entre los diferentes modos de funcionamiento.



Figura 27 Interfaz general. Botón de seguridad para validar el rearme de los equipos.

La apariencia de la interfaz SCADA final para el control en fábrica se encuentra en la figura 28. Dicha interfaz será creada como un primer asistente, tras ejecutar la aplicación ideada para Visual Studio. El detalle de la rutina de código inicial se muestra en la figura 29. Posteriormente, el SCADA se encarga de generar todas las interfaces HMI necesarias (una por célula) y de seguir enviando peticiones a nivel de fábrica cuando el usuario lo demande.

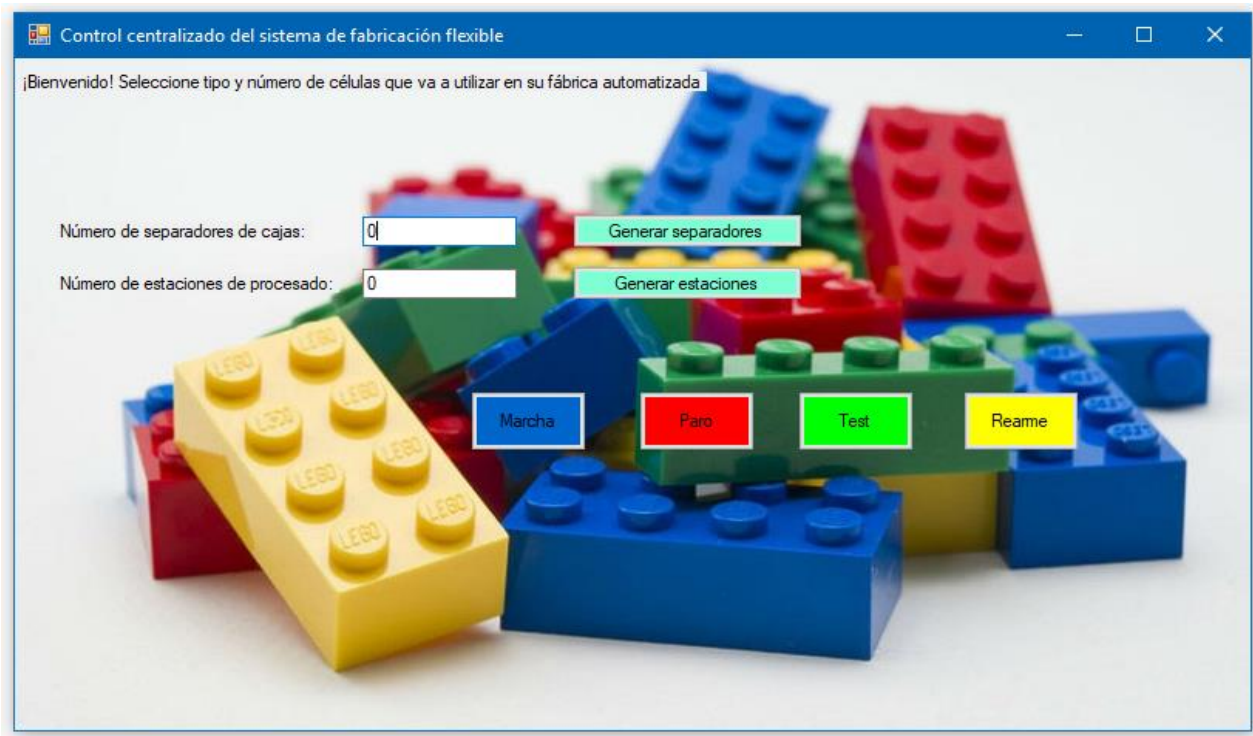


Figura 28 Interfaz SCADA para el control centralizado.

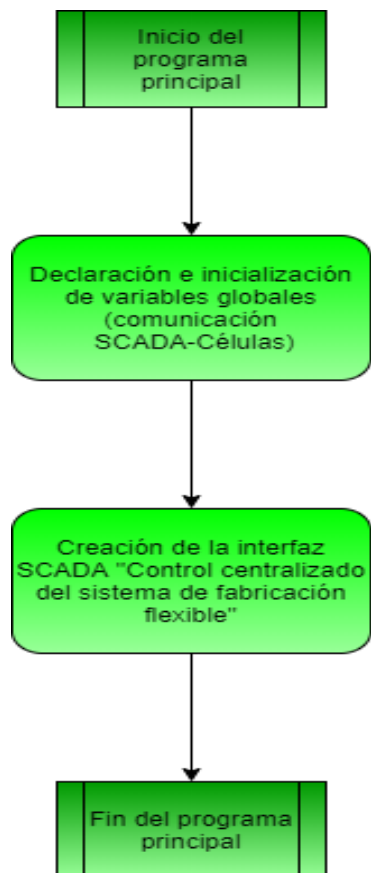


Figura 29 Secuencia para el programa inicial.

4.1.2 Interfaces para las células de fabricación flexibles

Aquí se presentan las propiedades de las interfaces hombre-máquina, para cada tipo de célula considerada en este proyecto. Cada interfaz HMI, permite ejecutar un hilo de control específico para su célula de fabricación asociada. Para cada tipología de célula, se ha diseñado un tipo de interfaz de usuario completada según los requerimientos de control impuestos en el capítulo 2. A continuación, se muestra la explicación detallada para la interfaz de la estación de procesado de piezas y seguidamente para la del separador de material.

4.1.2.1 Interfaz para la estación de procesado

- ✓ El procesamiento de piezas está compuesto por una botonera, que contiene los parámetros básicos de puesta en funcionamiento, ocultando toda la información y parámetros internos secundarios. Configurando los siguientes campos de forma ordenada, la célula estará completamente lista para ser operada por el control central. Los parámetros se encuentran divididos en cuatro bloques principales:
 - **Comunicación bluetooth:** En este módulo se configura la comunicación inalámbrica con la estación indicada en la pestaña “Puerto de comunicaciones”. De este modo, encendiendo la controladora NXT asociada, introduciendo su puerto COM y pulsando “Conectar” se habilita la configuración del equipo. Si se pulsa “Desconectar” la célula dejará de estar operativa para el sistema de control.

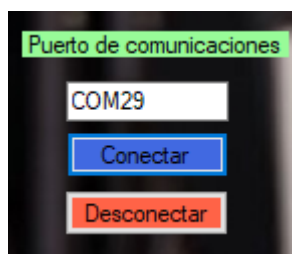


Figura 30 Interfaz HMI para la estación de procesado. Puerto de comunicaciones.

- **Parámetros de funcionamiento:** Tras conectar satisfactoriamente con el terminal, hay disponibles varias casillas que permiten ajustar parámetros de fabricación, como la velocidad de avance o el sentido de giro de la cinta transportadora. Los valores pueden ser ajustados en cualquier momento de la prueba, en tiempo real.

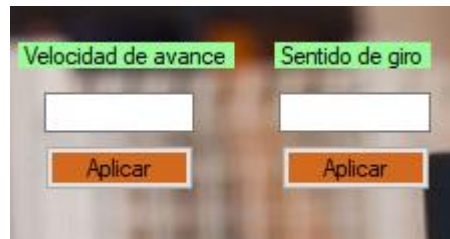


Figura 31 Interfaz HMI para la estación de procesado. Parámetros de usuario.

- **Ajuste de la sensorización:** Para obtener una mejor experiencia usando los sensores instalados en las células, se incluye la posibilidad de realizar un ajuste fino en cada prueba, del umbral de activación para los sensores de presencia. Para realizar un calibrado eficaz de un nuevo sensor instalado, primero se necesita especificar dónde se ha instalado el sensor y de qué tipo es. Posteriormente se puede pulsar el botón “Muestreo del sensor” para comprobar su funcionamiento correcto y finalmente ajustar el valor del umbral introduciéndolo y pulsando “Aplicar umbral”.

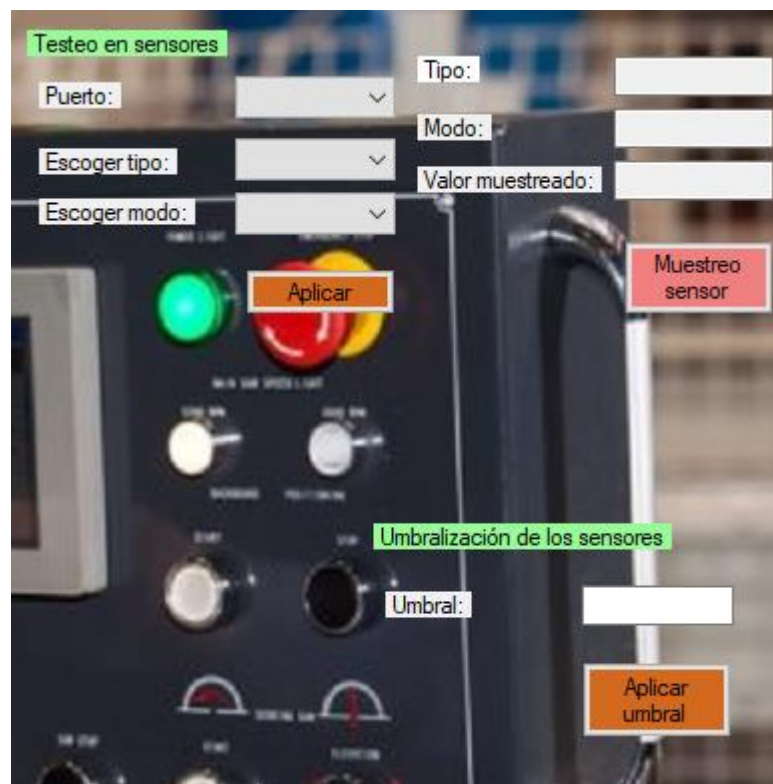


Figura 32 Interfaz HMI para la estación de procesado. Panel de control para los sensores instalados.

- **Control manual:** Para que el usuario pueda realizar ajustes, de forma manual, sobre algún elemento de las células (cinta transportadora, sensor láser...), en la interfaz HMI específica de cada célula creada, se podrá elegir en listas desplegables el estado “Encendido” o “Apagado” de cada periférico, que internamente activa una interrupción que actúa en consecuencia, fijando el nuevo estado deseado. “Encendido” habilita al periférico para la prueba y “Apagado” lo desactiva hasta nueva orden.

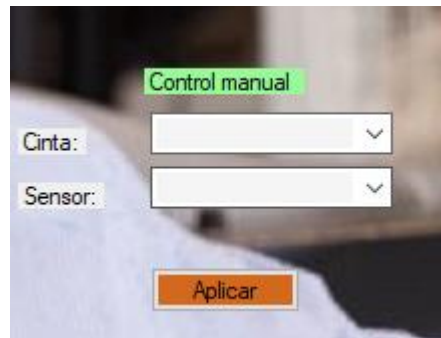


Figura 33 Interfaz HMI para la estación de procesado. Controlador manual de los equipos.

- **Botón “Iniciar estación”:** Una vez que se hayan empleado las secciones de configuración anteriores para preparar la puesta en marcha de la estación, falta pulsar este botón para que el control centralizado considere a esta célula para el control a nivel de fábrica y de este modo, sea integrada en el sistema de fabricación para el resto de la prueba.



Figura 34 Interfaz HMI para la estación de procesado.

Botón de activación de la estación.

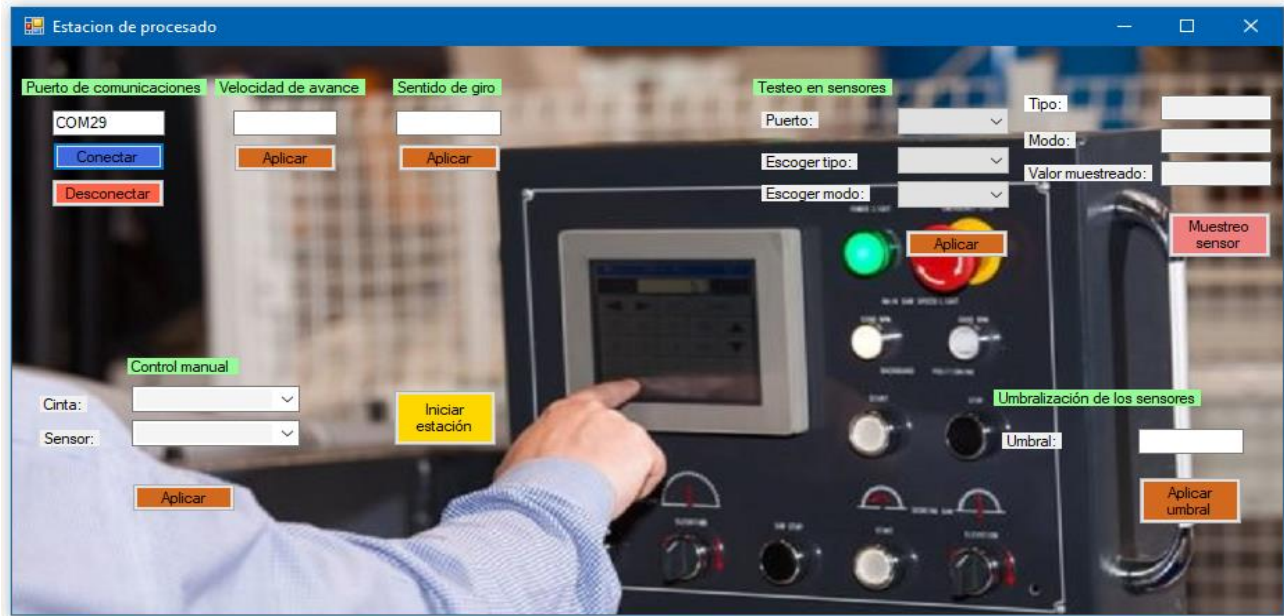


Figura 35 Interfaz hombre-máquina para las estaciones de procesado.

- ✓ Contiene un hilo de control en bajo nivel que ejecuta las operaciones principales de la célula “estación de procesado”. Dicho software individual es configurable por el usuario desde la interfaz HMI asociada a cada célula. El bucle de control ejecuta las siguientes instrucciones:
 1. El hilo de la estación comienza cuando el usuario presiona el botón “Iniciar estación” de la interfaz HMI (Figura 34) y posteriormente el botón “Marcha” en el SCADA (Figura 24).
 2. Se inicializan las variables necesarias para la célula y se escucha un sonido que indica el inicio del bucle de control.
 3. Si no hay activa una condición de parada de emergencia generada por el botón “Paro” (Figura 25), se entra en el modo de funcionamiento normal, cuyo comportamiento es el siguiente:
 - 3.1. Se activa el sistema de transporte de la célula.
 - 3.2. Cuando el sensor de la zona de procesado detecta un objeto, el avance de la cinta es detenido durante un segundo y medio, favoreciendo al procesado de la pieza.
 - 3.3. Se regresa al punto 3, hasta que el sistema sea informado de una situación de paro.
 4. El modo de funcionamiento normal acaba cuando el usuario presiona el botón “Paro” en el SCADA. El estado de paro es notificado a esta célula y los actuadores son mantenidos en un estado seguro.

5. El estado de paro continuará hasta que el usuario pulse el botón “Test” del SCADA (figura 26). En este nuevo estado, los motores realizan un ciclo de funcionamiento de 1,5s para volver hacia un punto de referencia. La secuencia de seguridad requerida para volver a poner en funcionamiento a la estación consiste en pulsar el botón de “Rearme” (Figura 27) y finalmente el botón “Marcha”, ambos en la interfaz SCADA, para llevar a este algoritmo hasta el punto 3.

La primera célula ya dispone de su control individualizado vía software, cuya interfaz completa se muestra en la figura 35 y el bucle de control finalmente implementado para esta célula, se muestra de forma esquemática en la siguiente figura 36.

El algoritmo que ejecutará la célula no se encuentra almacenado en la controladora NXT, sino que se ejecuta en el ordenador central y las órdenes de control se envían por bluetooth. Aún siendo así, el bucle de control para cada célula de fabricación dispone de su hilo independiente de ejecución.

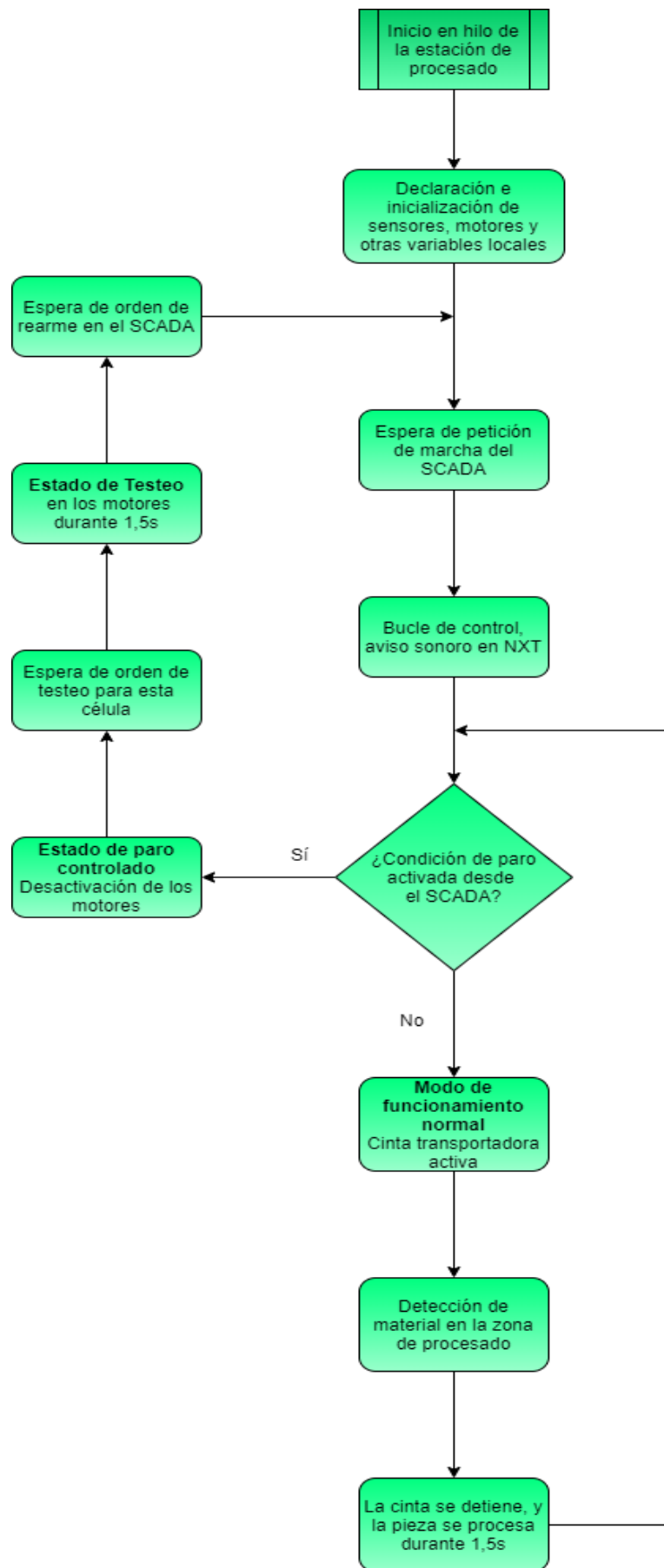


Figura 36 Hilo de control para una estación de procesado.

4.1.2.2 Interfaz dedicada a los separadores de material

- ✓ Dentro de la interfaz para este tipo de célula, se incluyen novedades específicas, necesarias para este automatismo. Los parámetros ajustables por el usuario en la botonera, son:
 - **Clasificación multiproducto:** Se cuenta con la capacidad de separar dos tipos de producto, especificando la secuencia de fabricación que se quiere seguir. En la sección “Número de cajas” (figura 37), si por ejemplo se especifica en la casilla “Tipo 1” un número ‘3’ y en “Tipo 2” un número ‘2’, la secuencia fabricada será de tres cajas consecutivas que pasarán por la cinta (producto 1) y dos cajas consecutivas que serán redirigidas hacia otra cinta secundaria, fuera de la línea principal, por el mecanismo empujador diseñado (producto 2).



Figura 37 Interfaz HMI para el separador de caja. Botonera dedicada a la secuencia de fabricación.

- **Puerto de comunicaciones:** Definiendo el puerto de la controladora NXT, se tiene la capacidad de conectar o desconectar al separador de la red bluetooth.



Figura 38 Interfaz HMI para el separador de cajas. Ajustes para el puerto de comunicaciones.

- **Parámetros de funcionamiento:** Dispone de un ajuste en cuanto a velocidad de avance y sentido de giro deseado, como parámetros útiles durante toda la prueba.



Figura 39 Interfaz HMI para el separador de cajas. Parámetros para el tipo de movimiento.

- **Sensorización:** Tal y como ocurre en la estación de procesado, se pueden medir valores de los sensores y calibrarlos (por ejemplo para aquellos que sean sensibles a los factores ambientales) e incluir nuevos equipos en los puertos de la controladora. Se pueden conectar hasta cuatro sensores en cada controladora.

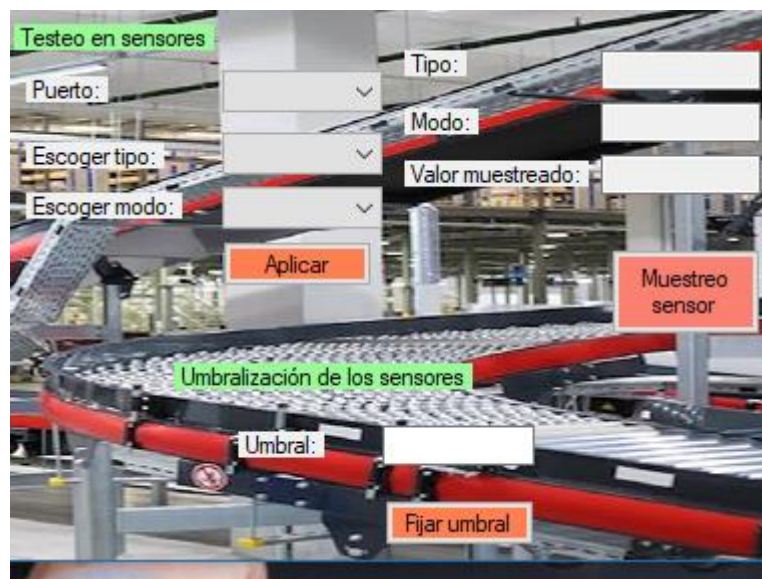


Figura 40 Interfaz HMI para el separador de cajas. Ajustes principales para los sensores utilizados.

- **Control manual:** Se pueden realizar pruebas en cada periférico instalado desde esta sección, seleccionando en los desplegados proporcionados para cada elemento de la célula (cinta, sensor o empujador).



Figura 41 Interfaz HMI para el separador de cajas. Opciones de testeo.

- **Botón “Iniciar separador”**: Presionar este botón una vez configurados al completo los parámetros de funcionamiento anteriores, para hacer visible a la estación para el control general centralizado.



Figura 42 Interfaz HMI para el separador de cajas. Botón de activación para el separador.

La interfaz final de control para el segundo tipo de célula, el clasificador de material automático, tiene el siguiente aspecto (figura 43):



Figura 43 Interfaz HMI para el separador de cajas automático.

- ✓ Incluye un hilo de control en bajo nivel que ejecuta las operaciones principales de la célula “Separador de material”. Dicho software individual puede ser configurado por el usuario desde la interfaz HMI asociada a cada célula.

Dicho software de control (diagrama de flujo en la figura 44), ejecuta las siguientes instrucciones:

1. El hilo del separador comienza cuando se pulsa el botón “Iniciar separador” en la interfaz HMI del separador (Figura 42) y seguidamente el botón “Marcha” en el SCADA (Figura 24).
2. Se configuran las variables necesarias para la célula y se escucha un sonido que indica el inicio del programa.
3. Si la condición de paro generada por el botón “Paro” en el SCADA (Figura 25) no está activa, se entra en el modo de funcionamiento normal, donde el sistema de transporte es activado y en combinación con el sistema empujador final, deja salir longitudinalmente a los materiales tipo 1 por un lado y redirigen a los tipo 2 hacia una cinta secundaria situada transversalmente. La secuencia descrita ante un material tipo 2, es la siguiente:
 - a. Un material tipo 2 en movimiento atraviesa el sensor láser instalado en la zona central.
 - b. Se activa un temporizador en ese instante de detección.
 - c. El temporizador finaliza cuando el objeto alcanza al sistema empujador correspondiente, deteniendo a la cinta transportadora.
 - d. El producto es desplazado hacia el sistema de transporte secundario.
 - e. La cinta transportadora vuelve a activarse con la velocidad de avance inicial.
4. El modo de funcionamiento normal acaba cuando el usuario solicita un paro del sistema desde el SCADA (botón “Paro”, figura 25). El estado de paro mantiene a los actuadores en un estado de inactividad seguro, para los trabajadores y máquinas.
5. El estado de paro es mantenido hasta que el usuario solicita un proceso de “testeo” de los actuadores pulsando el botón “Test” del SCADA (figura 26). En este nuevo estado, los motores realizan un ciclo de funcionamiento de 1,5s para indentificar posibles averías.
6. Los elementos de la célula permanecerán listos y a la espera hasta que se presione el botón de seguridad “Rearme” en la interfaz SCADA (Figura 27) y finalmente el botón “Marcha” para llevar a este algoritmo hasta el punto 2.

De forma resumida, el bucle de control finalmente implementado para esta célula es:

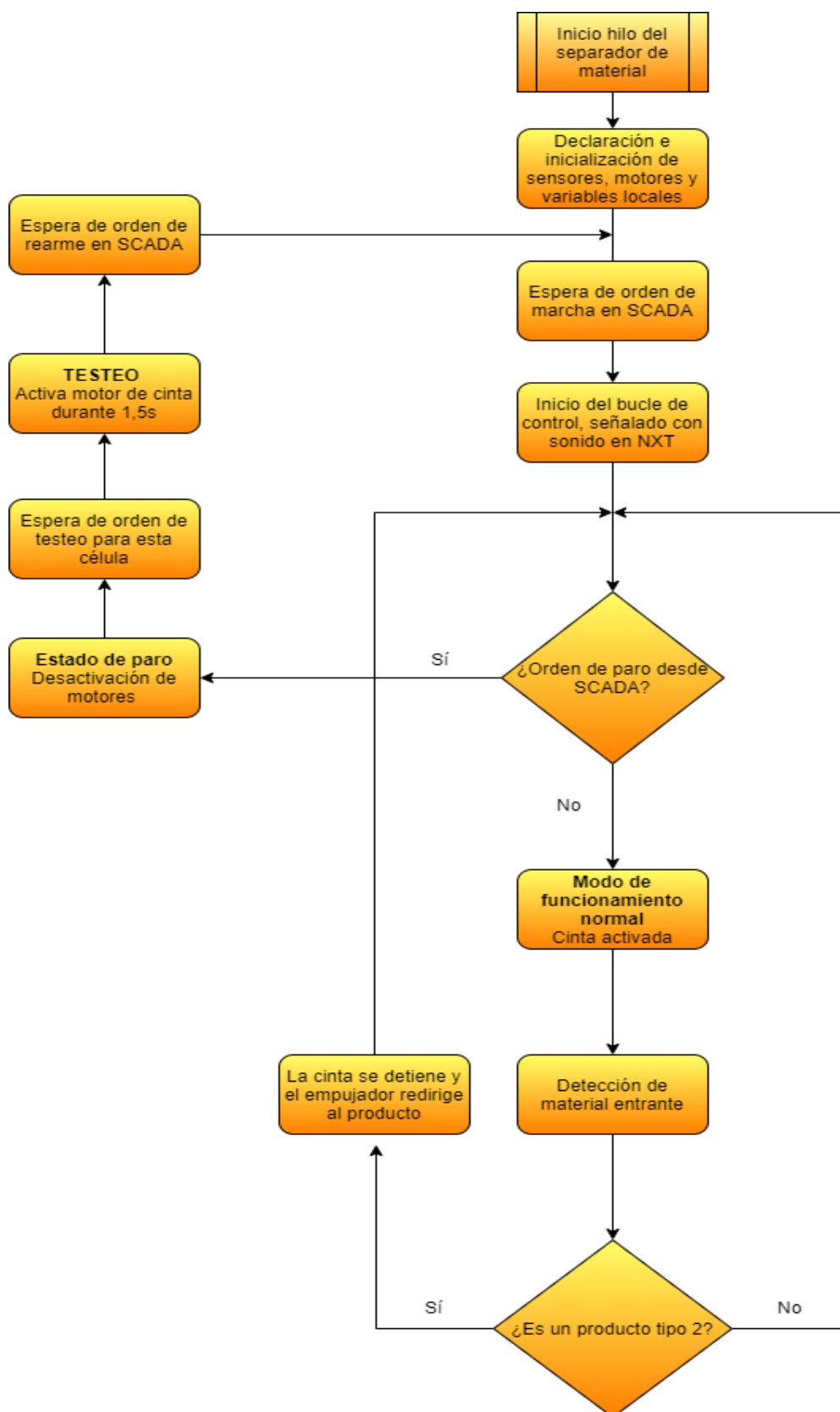


Figura 44 Hilo de control para un separador de material.

4.1.3 Resumen de la solución para el control del sistema de fabricación modular

Para finalizar el desarrollo de la parte software de este trabajo, se muestra un esquema resumen (figura 45) de cómo ha evolucionado el bucle de control definido en la sección 2 de esta memoria (figura 21).

- ✓ El control centralizado, ha sido resuelto como una interfaz tipo SCADA, que asiste al usuario cuando inicia la aplicación. Por una parte, el usuario es capaz de generar un número de células deseado de cada tipo y además es posible lanzar peticiones de alto nivel, a las células conectadas.
- ✓ Los controladores dedicados para cada célula, han sido implementados como unas interfaces hombre-máquina (HMI) independientes, que realizan el control en bajo nivel de cada célula específica, según sus necesidades de funcionamiento.
- ✓ Ante la llegada de una orden del controlador de alto nivel a las células, estas envían su respuesta confirmando las operaciones realizadas, para cerrar el bucle de control.

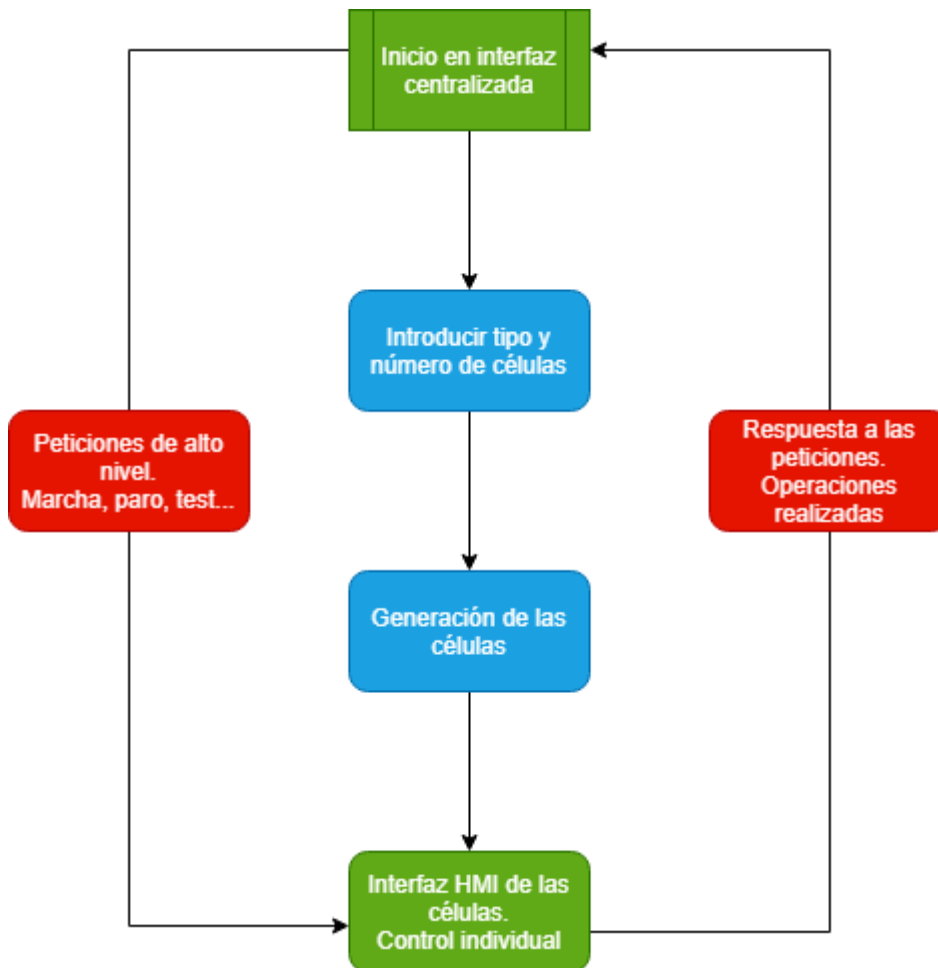


Figura 45 Bucle de control resultante para un sistema de fabricación genérico.

4.2 Soluciones constructivas obtenidas para el sistema de fabricación

Las estructuras y elementos dinámicos, que serán controlados por el software anteriormente presentado, serán estudiados en detalle en esta sección. Para los dos módulos o células objetivo de este trabajo, se van a exponer cada una de las decisiones tomadas para llegar hasta los montajes finales.

4.2.1 Diseño final de la estación de procesado

Uno de los retos encontrados en la creación de los diseños, era conseguir una estructura robusta y rígida, que pudiera ser manipulada con las manos sin riesgos de desprendimientos.

Otro de los desafíos principales ha sido el conseguir un sistema de transporte de piezas que consiguiera desplazar material de forma eficiente, tanto dentro de la célula, como al entrar y salir de otras células.

El montaje y el punto de colocación idóneo de los sensores, así como el número y tipo de sensores necesarios para cada prueba, también han generado múltiples posibilidades.

- ✓ Como solución de compromiso para el sistema de transporte, se ha pensado en ensamblar una cinta transportadora, que con dos ruedas conectadas a motores eléctricos a través de ejes, y a su vez, enlazadas con una superficie lisa de cartulina, logra con efecto del par motor y de la fricción que la cinta produzca un desplazamiento lineal de las piezas.
- ✓ En cuanto a la sensorización, se estimó suficiente el uso de un sensor láser situado en la zona de procesado de piezas, capaz de identificar material entrante con facilidad y poder así realizar los ciclos de fabricación.
- ✓ Para la zona de procesado, se ha consolidado un cerramiento que recrea a una máquina de control numérico genérica, las piezas entrarán y permanecerán fabricándose durante un tiempo determinado.

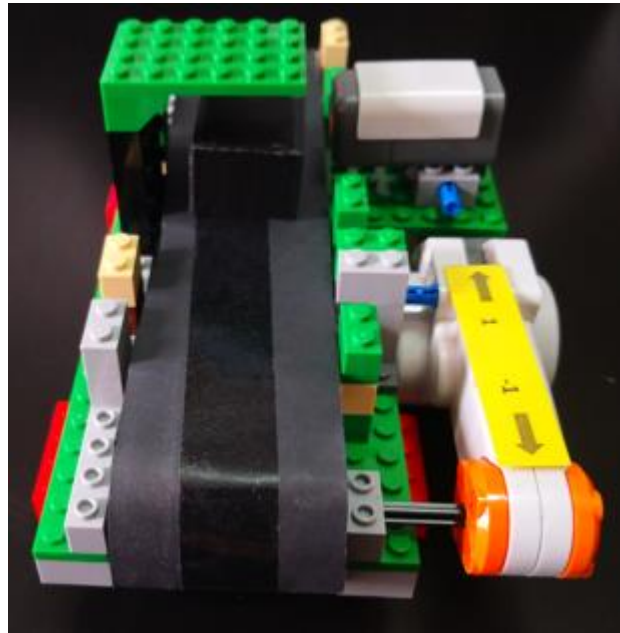


Figura 46 Vista frontal de la estación de procesado.

Se muestra una captura de la estación (Figura 46), donde a la derecha se encuentra el motor eléctrico que impulsa a la cinta transportadora, a la izquierda de éste se encuentra el sensor láser, ubicado junto a la zona de procesado (en verde).

En los raíles laterales a la cinta, se han incorporado elementos estructurales para evitar que el material salga accidentalmente de la zona de trabajo.

4.2.2 Diseño final del separador de material automático

Para el separador de material, se comparten algunos objetivos con la estación de procesado, como el logro de una unidad compacta y rígida o la ubicación idónea de los sensores, pero también se han encontrado algunas peculiaridades, propias de este tipo de célula: Cómo conseguir idear un sistema capaz de redirigir cajas, desde una línea principal de transporte, hacia varios sistemas de transporte alternativos (múltiples células conectadas a la célula de separación).

- ✓ Tras iterar con varios candidatos para el sistema de empuje (más detalle de las pruebas realizadas en la sección 5), se ha decidido llevar a la práctica, como sistema empujador, a un motor eléctrico situado estratégicamente de forma perpendicular a la línea principal de avance de piezas, que con un elemento terminal conectado al eje del motor, consigue empujar material hacia las células conectadas junto al empujador.
- ✓ Para que el sistema funcione igualmente en ambos sentidos de giro de la cinta transportadora, será necesario ensamblar un sistema empujador en cada extremo de la célula de separación (dos en total).

- ✓ Para detectar la presencia de cada producto entrante, de forma bidireccional, se llegó a la conclusión de que con un sensor de tecnología láser instalado en la zona central de la célula es suficiente para obtener un funcionamiento correcto.
- ✓ Con un aprovechamiento de material, actuadores y sensores se ha conseguido obtener un diseño final para un separador de cajas bidireccional de alta precisión, que será ajustado según la subsección 4.2.



Figura 47 Detalle de funcionamiento para el empujador de material.

En la figura 47, se aprecia un motor eléctrico, donde en su eje se aloja un vástago (en negro) que a su vez tiene empotrado en su parte central un elemento terminal en forma de L (en gris), desplaza a las mercancías (cubo en color negro) hacia direcciones perpendiculares a la línea principal de avance, formando el sistema empujador de la célula.

En las figuras 48 y 49, están todos los elementos que componen a esta célula de fabricación. Dos sistemas empujadores situados en los extremos y un sensor láser en la zona central hacen que la célula pueda actuar de forma bidireccional.

El material puede ser reconducido hacia cualquiera de las cuatro direcciones principales, ajustando convenientemente el sentido de giro de la cinta transportadora y seleccionando al empujador a utilizar, que consigue enviar paquetes hacia una cinta que se ubique de forma perpendicular a esta célula central.

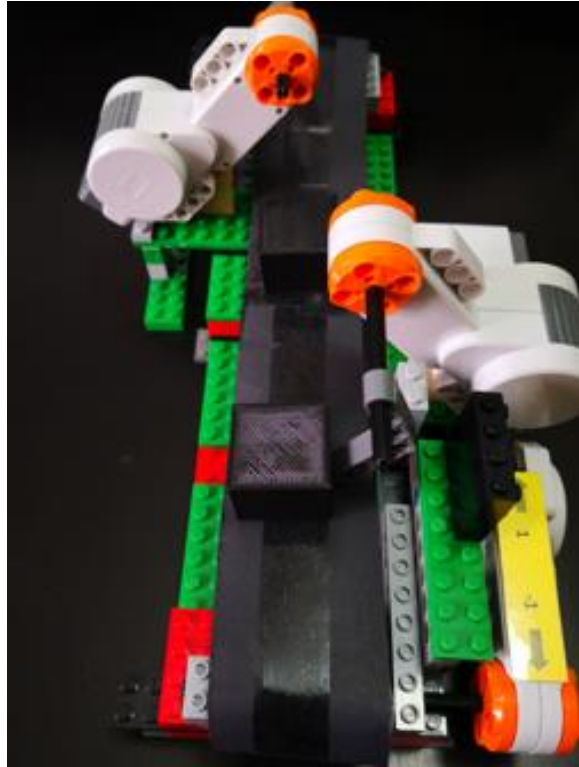


Figura 48 Vista superior del separador de material.

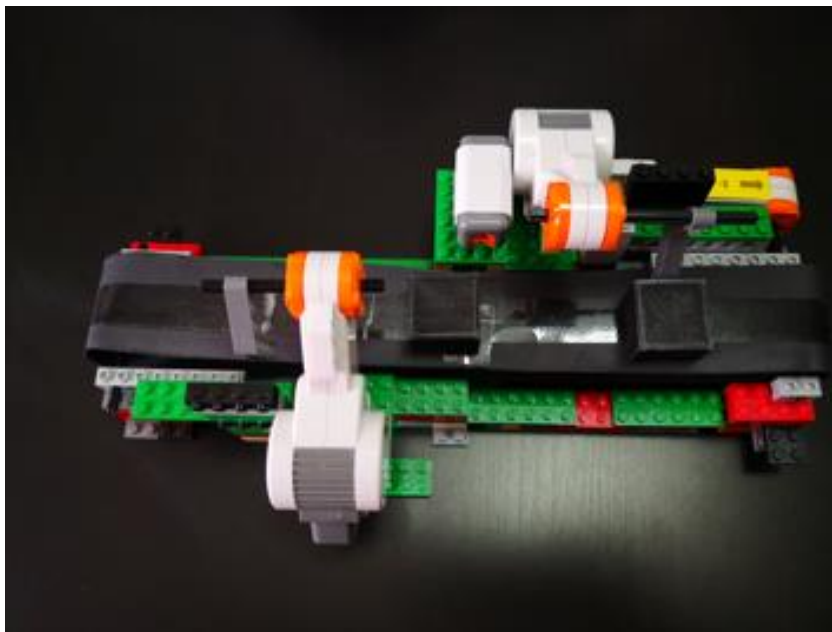


Figura 49 Vista lateral de la célula “separador de material” final.

En resumen, en este capítulo se muestran los resultados finales obtenidos, tanto para la parte lógica, que necesita la electrónica del sistema, como para el montaje físico de los equipos. Se han comentado en detalle cada una de los módulos electromecánicos disponibles, para realizar pruebas interactivas sobre cualquier tipología de planta industrial que se pueda ensamblar modularmente. La filosofía empleada se ha basado principalmente en:

- ✓ Encapsulación del software en módulos, destinados a satisfacer las necesidades de cada tipo de célula de fabricación.
- ✓ Códigos de control en bajo nivel, contenidos en interfaces HMI específicas, fácilmente escalables en número de células que pueden estar operativas durante las pruebas.
- ✓ Código de alto nivel, en una interfaz tipo SCADA que realiza acciones de control a nivel de fábrica, actuando sobre todas las células que hayan sido activadas, desde sus respectivas interfaces particulares.
- ✓ Estructuralmente, los dos tipos de célula han sido obtenidos minimizando los recursos necesarios, tanto en elementos activos (sensores y actuadores) como en elementos constructivos. Se presentan una forma cómoda de ensamblado para cualquier proceso industrial que pueda ser descompuesto en módulos funcionales.

5 PRUEBAS FUNCIONALES REALIZADAS

Con esta sección se pretende mostrar al lector el proceso técnico iterativo, llevado a cabo para obtener la solución final mostrada en el capítulo 4. Al tratarse de un capítulo de pruebas experimentales, se busca ser lo más objetivo posible. Para ello, tanto en la memoria de José Manuel Díaz Cano (2019) como en esta, todo el capítulo se completará de la misma forma, siendo igual en ambos proyectos y evitando así posibles ambigüedades entre uno y otro.

Las pruebas de validación tienen fijados unos objetivos generales y unos específicos, que afectan al desarrollo de la parte software (más en detalle en esta memoria), a los aspectos constructivos y cinemáticos (José Manuel, 2019), o a ambos. Cada montaje realizado será especificado con una lista de componentes y una fotografía y se describirá además el software utilizado en cada prueba. Para finalizar, se añaden unos resultados que muestran los avances conseguidos en cada área técnica.

Los test planteados irán aumentando progresivamente en cuanto a complejidad y nivel de detalle en los montajes, hasta que finalmente se obtenga un sistema de fabricación que pueda corresponder a una planta real, completamente escalable y con células de varios tipos funcionando de forma coordinada.

5.1 Prueba funcional de sensores y actuadores. Elección de los periféricos adecuados

5.1.1 Definición y objetivos de la prueba

El objeto de este test test consiste en probar el funcionamiento varios sensores y actuadores disponibles en el pack LEGO Mindstorm, con la finalidad de escoger los más adecuados para el proyecto. Estos periféricos serán controlados por una sola controladora electrónica LEGO NXT.

5.1.2 Montaje y software empleados

El montaje de la primera prueba consta de las siguientes partes:

- **Elementos constructivos:** En esta prueba de los elementos activos, se usarán dos motores eléctricos, dos tipos de sensores candidatos a reconocer materiales en movimiento y un producto prototipo, representado como una caja negra impresa en 3D. No existe aún un desarrollo estructural base para sustentarlos.

- **Software:** Se empleará la interfaz de usuario HMI disponible para conseguir programar y calibrar varios tipos de sensores, obtener sus valores medidos en varios instantes de tiempo, con presencia de material o sin ella y se testearán varios modos de regulación para los motores eléctricos.

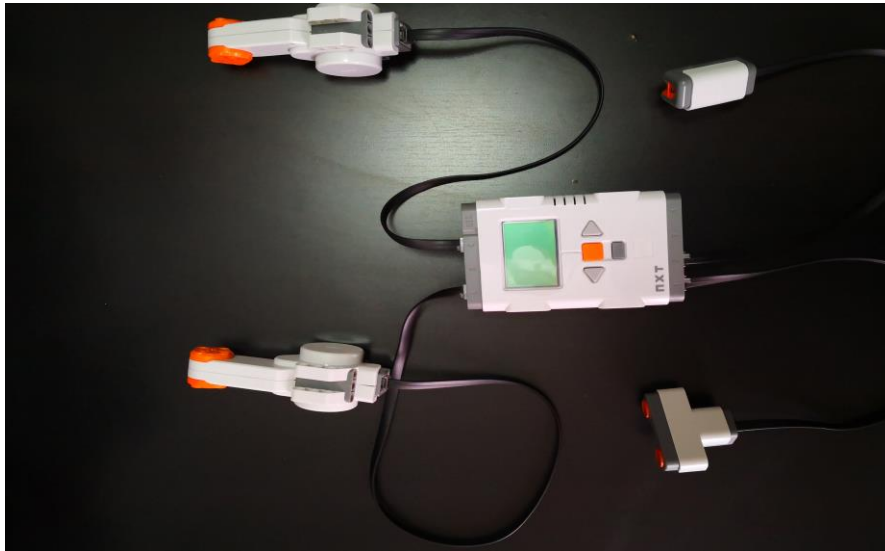


Figura 50 Testeo de sensores y motores.

5.1.3 Resultados y avances obtenidos

- **Comportamiento de los periféricos:**

Sensores: Durante la prueba de los dos tipos de sensor, se ha decidido apostar por el sensor láser para la detección de los materiales, ya que en la práctica otorga un mayor rango de funcionamiento que el de ultrasonidos, un peso reducido y una buena respuesta reconociendo materiales piezas entrantes en movimiento. Se ha notado que el rebote del haz de luz es reconocido con mayor facilidad en piezas con tonos oscuros.

La programación ha sido ajustada para que los sensores hagan de interruptor para el motor eléctrico, cuando se supere un valor definido en la lectura del sensor. Dicha lectura es un valor digital, siendo este mayor cuanto mayor sea la entrada de luz. Para considerar que un objeto se ha detectado, se usa una variable denominada “umbral”.

Existe una limitación en este método. Se ha comprobado que los sensores son bastante sensibles al ruido ocasionado por cambios en la luminosidad de la sala. Como solución, se propone introducir una sección en la interfaz que permita ajustar el valor del umbral antes de cada prueba. En ella se puede comprobar el valor actual leído y, por otra parte, introducir un valor numérico adecuado para el umbral.

Motores: Los motores eléctricos por su parte, pueden ser controlados en posición o en velocidad, rodando indefinidamente o fijando una temporización hasta un cambio de estado, en cada orden enviada.

5.2 Cinta transportadora inicial operando con piezas. Una controladora NXT

5.2.1 Definición y objetivos de la prueba

Se pretende conseguir un primer control de una unidad consolidada estructuralmente, haciendo que ésta transporte material desde su inicio hasta el final. Se trata mayormente de una prueba física (José Manuel, 2019), ya que el movimiento del servomotor será controlado por la interfaz de la prueba anterior, modificando simplemente los valores de velocidad del mismo. Se tendrá en cuenta la estabilidad y la elección del material de la cinta.

5.2.2 Montaje y software empleados

- **Elementos constructivos:** Se realiza el montaje de una cinta transportadora inicial con un motor eléctrico asociado, cableado hacia una controladora NXT.
- **Control software:** Se manipulará la entrada del motor eléctrico cuando sea necesario, desde la interfaz de usuario HMI.

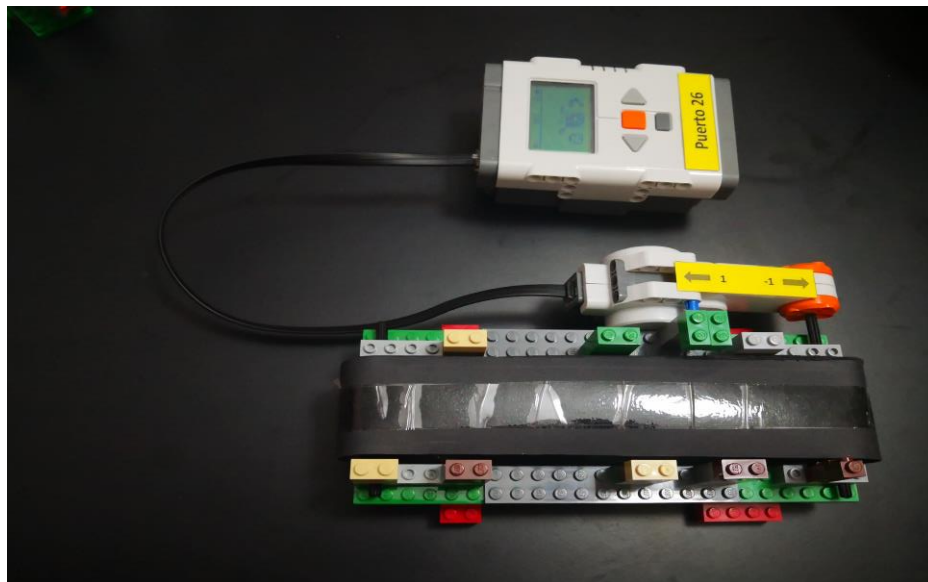


Figura 51 Cinta transportadora inicial con conexiones.

5.2.3 Resultados y avances obtenidos

Tras la realización de la prueba se concluye lo siguiente:

- **Estabilidad:** El sistema se ha comportado correctamente frente al movimiento del motor. La estructura ha sido capaz de soportar el comportamiento cinemático del sistema sin ningún problema.
- **Cinta transportadora:** La elección del material ha sido la adecuada. La rigidez y rugosidad del material ha asegurado una correcta sujeción de los elementos que transportaba.

5.3 Dos cintas transportadoras operando con buffer de piezas. Una controladora NXT

5.3.1 Definición y objetivos de la prueba

Se busca emparejar dos cintas usando un único programa de control hacia una controladora. Se pretende que, cuando la segunda cinta contenga más de un número de piezas máximo definido, la cinta uno se detenga hasta que dicho límite no sea superado. Se ha realizado una unión rígida entre las dos cintas, utilizando un trozo de plástico como intermediario para evitar el atoramiento de material.

Los objetivos individuales de esta prueba son los siguientes:

- **Físicos y cinemáticos (parte electro-mecánica):** Se pretende comprobar la estabilidad del sistema utilizando más de una unidad a transportar, además de comprobar que el material pasa correctamente de una a otra a través del trozo de plástico que se le ha incluido.
- **Software (parte lógica y de control):** Se pretende conseguir el control del buffer de piezas mediante un único programa, siendo este el primer código realizado desde cero. Se requiere detectar y contabilizar piezas en movimiento y accionar los motores de las cintas convenientemente cuando el límite de cajas máximo se rebase.

5.3.2 Montaje y software empleados

- **Elementos constructivos:** Se realiza la unión de dos cintas transportadoras, agregándole una sujeción extra a cada una para la colocación de sensores láser. Además, se coloca un elemento de unión para el correcto paso de material. Los sensores y motores se conectan a la misma NXT.
- **Control software:** En un bucle de control único, se inicializa la controladora NXT y los periféricos usados. Aún no hay forma de conseguir vía software que cada célula sea operada independientemente desde diferentes interfaces HMI. Será tarea de las siguientes pruebas. Desde un mismo hilo se programa el comportamiento necesario para implementar un buffer de piezas.

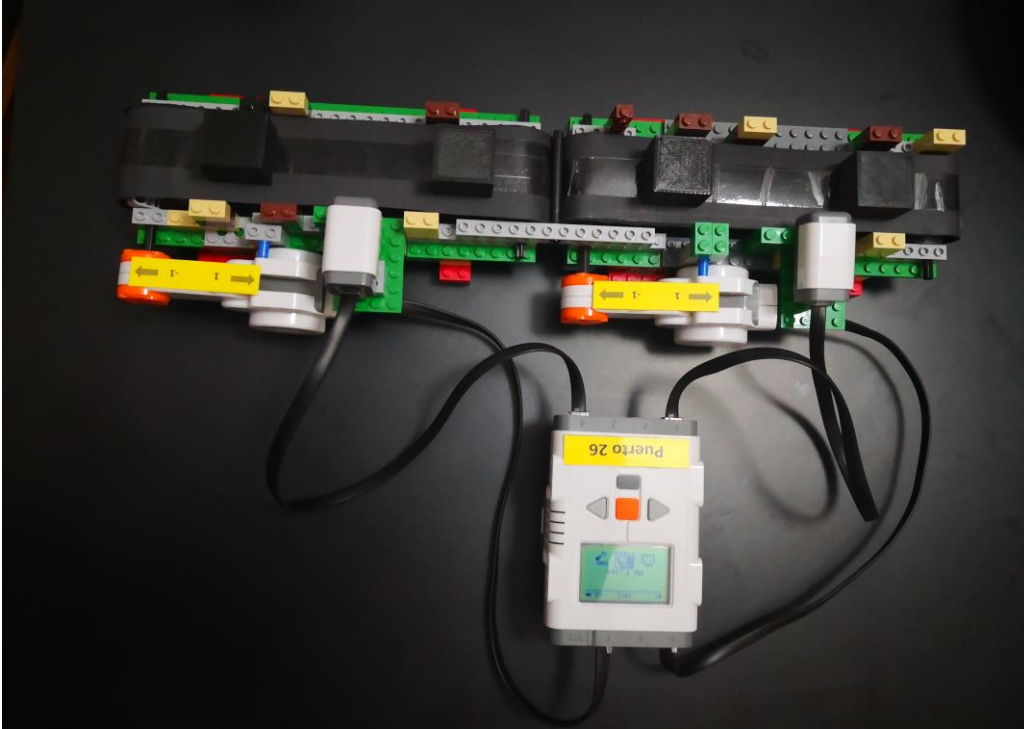


Figura 52 Dos cintas transportadoras con sensores, conectadas entre sí.

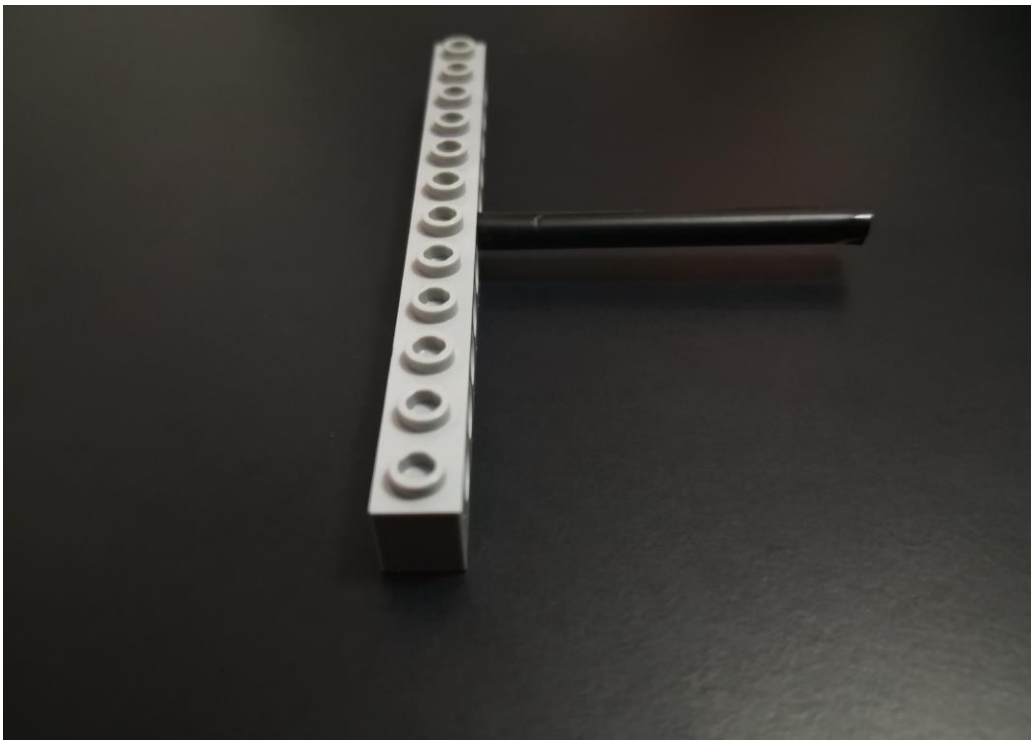


Figura 53 Enlace entre unidades.

5.3.3 Resultados y avances obtenidos

Para esta prueba se han incluido avances tanto en la parte de programación como en el diseño:

- **Estabilidad (parte electro-mecánica):** Las cintas siguen comportándose correctamente, aunque se añada mas carga de material.
- **Elemento de unión (parte electro-mecánica):** El sistema propuesto para unir las distintas unidades funcionó correctamente. Se ha evitado el atoramiento en las uniones. Se encontrado así una solución de unión que se utilizará para todas las conexiones del proyecto.
- **Control (parte lógica y de control):** El sistema se ha comportado tal y como se deseaba. Se ha conseguido de esta forma controlar por primera vez los elementos con un solo programa propio. Se han conseguido reconocer piezas en movimiento, utilizando flancos de subida y bajada en las lecturas de los sensores, conseguir sus calibraciones satisfactorias y lograr que los motores conmuten correctamente en el sistema.

5.4 Cinta junto a estación de procesado. Una controladora NXT

5.4.1 Definición y objetivos de la prueba

Se pretende probar el funcionamiento de la estación de procesado en el sistema. La cinta debe detenerse durante un tiempo determinado en la zona designada para el procesado, simulándose así un ciclo de fabricación.

Los objetivos individuales de esta prueba son los siguientes:

- **Físico y cinemático (parte electro-mecánica):** Se pretende lograr una buena estabilidad en la ejecución, además de evitar atoramientos en la zona de procesado. El movimiento es el mismo que el de una cinta transportadora básica. La unión se realizará de la misma forma que en la prueba 5.3.
- **Software (parte lógica y de control):** Se pretende comprobar el correcto funcionamiento del código desarrollado para esta unidad, para cada ciclo de fabricación de piezas, tanto en las órdenes de control del proceso a bajo nivel como en la configuración de la estación desde la interfaz HMI.

5.4.2 Montaje y software empleados

- **Elementos constructivos:** Se realiza una unión entre la cinta transportadora y la estación de procesado mediante un elemento de unión. Los sensores y motores eléctricos se conectan a la misma NXT.
- **Control vía software:** Se pretende definir un proceso iterativo para el control en bajo nivel de la estación de procesado, que contenga las órdenes y temporizaciones adecuadas para el proceso, en los sensores y motores de las cintas.

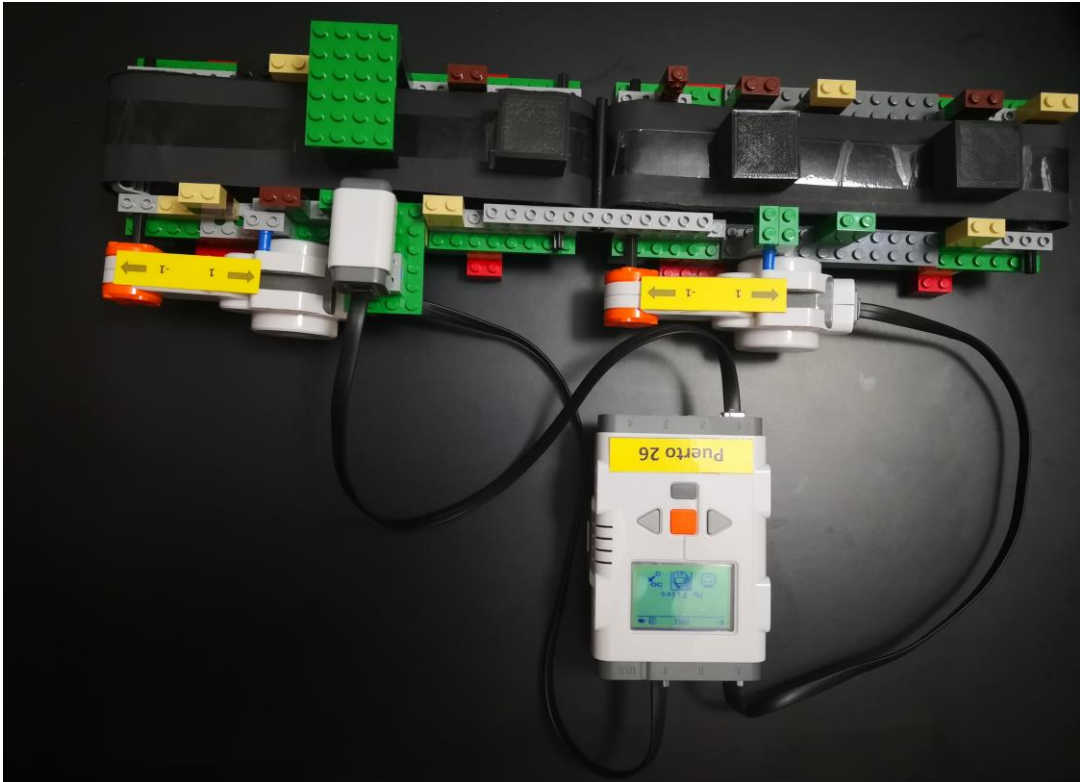


Figura 54 Una estación de procesado conectada a una cinta transportadora.

5.4.3 Resultados y avances obtenidos

Comportamiento de la estación:

- **Estabilidad (parte electro-mecánica):** La estación de procesado se comporta correctamente a nivel estructural, aguantando bien la carga de trabajo. No se produce atoramiento en ninguna zona del sistema.
- **Control (parte lógica y de control):** Se consigue el comportamiento deseado. Las piezas pasan de una cinta a otra, el sensor de la zona de procesado detecta a las piezas entrantes y éstas se detienen durante un tiempo determinado en la estación de trabajo definida. Tras ese tiempo el sistema de transporte automático reanuda la marcha hasta que llegue una nueva unidad de material.

5.5 Cinta trabajando junto a un separador de material. Una controladora NXT

5.5.1 Definición y objetivos de la prueba

En esta prueba se realizará una unión entre una cinta transportadora base y el diseño final del empujador, realizando un cambio de dirección en el sistema.

Se pretende probar el correcto funcionamiento del sistema empujador. La cinta debe detenerse cuando el material se encuentre en la posición del empujador, para realizar una translación a 90°, es decir, en dirección transversal al flujo principal, siempre y cuando el material deba ser empujado (en algunas ocasiones se busca que los elementos salgan por el final de la línea principal sin que se active el empujador).

Los objetivos individuales son los siguientes:

- **Físico y cinemático (parte electro-mecánica):** Se pretende conseguir una buena estabilidad del sistema. Además, la colocación del empujador debe ser correcta para evitar que se atore con la cinta. La unión con la otra cinta se realiza de forma diferente a las que hasta ahora se han visto, por lo que se probará a dejar espacio lateral a la salida del empujador para introducir la otra unidad.
- **Lógico (parte lógica y de control):** Como objetivos para la programación, se pretende consolidar un algoritmo capaz de controlar en bajo nivel a la célula del separador, incluyendo la secuencia necesaria para efectuar los ciclos de separación de material.

5.5.2 Montaje y software empleados

- **Elementos constructivos:** Se realiza una unión entre la cinta transportadora y el separador, conectando uno de los empujadores, los dos motores eléctricos de las cintas y los dos sensores a una misma NXT.
- **Control software:** Se tendrá en cuenta la secuencia automatizada que debe realizar el motor eléctrico en un ciclo de empuje. Por otra parte, se incluirá la capacidad del sistema para fabricar series de varios tipos de piezas. En esta prueba la pieza tipo 1 saldrá por dirección longitudinal a la primera cinta y el segundo tipo será empujado hacia una cinta transversal. El usuario podrá fijar la secuencia de fabricación desde la interfaz HMI de la célula.

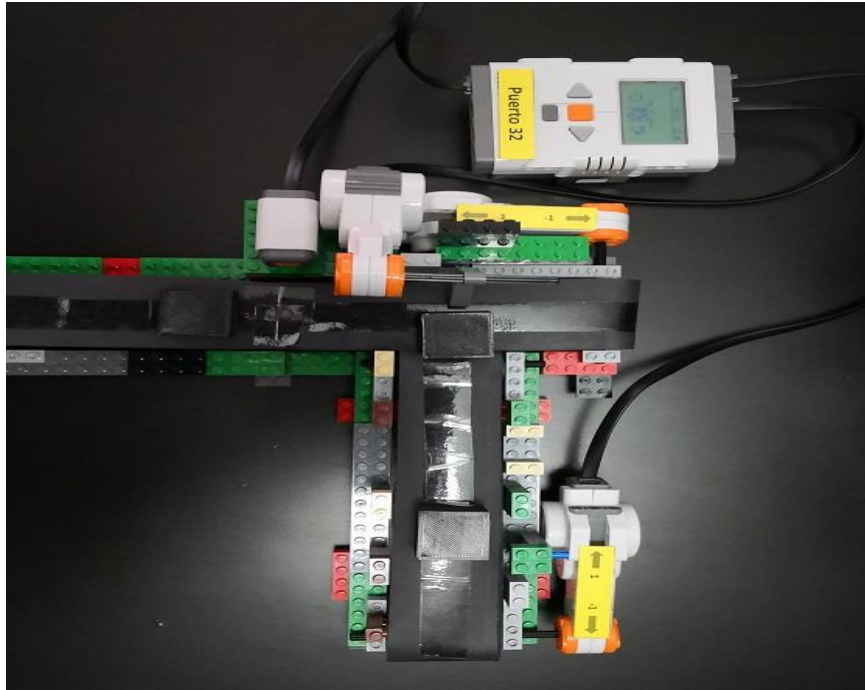


Figura 55 Un separador unidireccional frente a una cinta transportadora.

5.5.3 Resultados y avances obtenidos

Tras la realización de la prueba se concluye lo siguiente:

- **Estabilidad (parte electro-mecánica):** La estructura soporta bastante bien el trabajo del sistema. Sin embargo, al tratarse de una unidad con mayor longitud, la carga de material produce un pequeño desnivel en la cinta. Además, no crea una sensación de rigidez al tacto tan alta como las otras unidades, al poseer más peso en los extremos. Esto último podría ser una futura mejora a estudiar.
- **Unión perpendicular (parte electro-mecánica):** La unión entre cintas ha sido correcta. El material pasa sin problemas y la unión se mantiene bastante rígida.
- **Control (parte lógica y de control):** Se consigue un buen comportamiento, aunque mejorable. El material pasa por el sensor y el empujador se activa cuando debe, aunque al no encontrarse el sensor en la misma posición que el empujador, el tiempo que se debe esperar para efectuar el paro de la cinta varía con la velocidad fijada en la misma, y no de forma lineal. Se debe buscar una relación mediante ensayo entre estas dos unidades para solventar el problema.

5.6 Prueba de ajuste entre el tiempo de parada y la velocidad de avance, en la cinta del separador

5.6.1 Definición y objetivos de la prueba

Se pretende solventar el comportamiento del empujador dentro de la célula del separador, cuando la velocidad de la cinta transportadora varíe.

Los objetivos individuales de esta prueba son los siguientes:

- **Físico y cinemático (parte electro-mecánica):** Esta prueba busca una caracterización física y cinemática. Se pretende obtener una ecuación que recoja el comportamiento del tiempo necesario hasta alcanzar el empujador, frente a la velocidad de la cinta.
- **Control (parte lógica y de control):** Se pretende añadir al programa un temporizador en el código que incluya una expresión matemática que calcule, en cada ciclo, el tiempo de espera necesario hasta realizar los empujes de piezas.

El procedimiento seguido para la obtención de dicha función se ha basado en el cálculo de tiempos por ensayo y error, ya que se comprobó anteriormente que el sistema no sigue un comportamiento lineal.

1. Se realiza el mismo proceso modificando el valor de velocidad de la cinta, obteniendo distintas relaciones de tiempo.
2. Buscamos la ecuación que mejor se corresponda a ese desarrollo de puntos.

Avance de la cinta (%)	Tiempo hasta la detención (ms)
70	1010
75	700
80	450
85	250
90	120

Figura 56 Comportamiento experimental de la cinta transportadora.

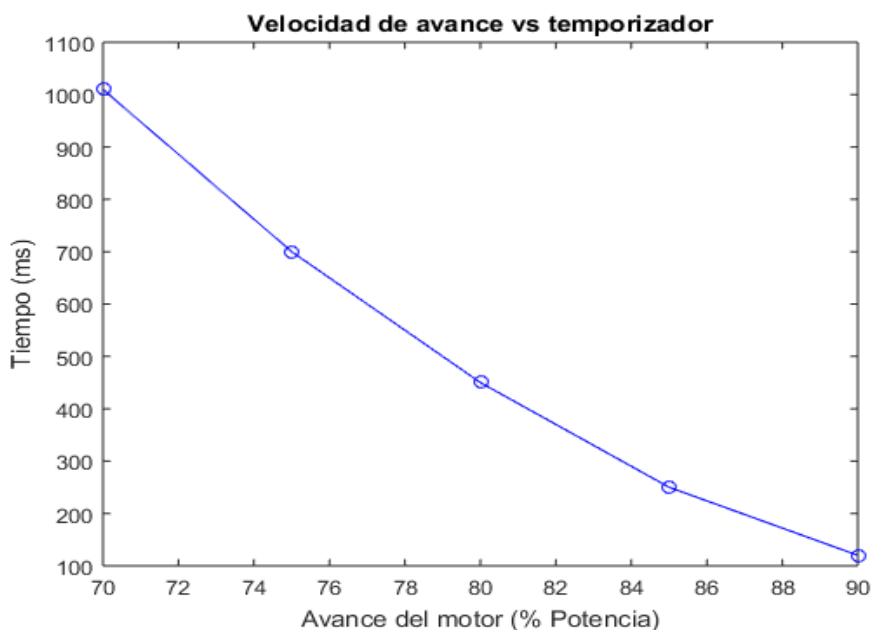


Figura 57 Tiempo de respuesta necesario según la potencia de la cinta.

El resultado del ajuste paramétrico de la gráfica de la figura 57 es un polinomio con ecuación:

$$T = 1,1714 P^2 - 232,03 P + 11513$$

Donde **T** es el tiempo necesario hasta detener la cinta (llegando así la caja al elemento empujador) y **P** es la velocidad de avance definida por el usuario en la interfaz de la célula de fabricación, en porcentaje de potencia del motor eléctrico.

Observe que para un 70 % de potencia en el motor el tiempo de parada es de alrededor de un segundo, mientras que para un 80 % de carga el tiempo de reacción baja a unos 200 ms. Por tanto se deduce así que existe una fuerte dependencia entre el avance de la cinta transportadora y el tiempo de parada al llegar al sistema de empuje.

5.6.2 Resultados y avances obtenidos

Tras la realización de la prueba se concluye lo siguiente:

Se valida el diseño presentado para esta prueba, de forma sencilla y eficaz se consigue empujar mercancía perpendicularmente entre cintas, solo se necesita un motor y un mecanismo terminal conectado al eje de rotación, por cada sistema empujador.

Su programación también ha sido resuelta con un cálculo temporal en el control de los movimientos en función del avance definido en la cinta principal.

Para futuras versiones, se buscará mejorar el diseño para conseguir un comportamiento bidireccional del separador de piezas, según el sentido de giro escogido.

5.7 Test para múltiples controladoras NXT, comunicación bluetooth

5.7.1 Definición y objetivos de la prueba

Es el momento de pasar a escalar los desarrollos realizados en los pasos anteriores, para ello toca resolver la comunicación simultánea e independiente entre un ordenador y varias controladoras NXT, mediante bluetooth, en el entorno de Visual Studio.

5.7.2 Montaje y software empleados

Para esta prueba es suficiente con dos células de fabricación, por tanto, se elegirán dos estaciones de procesado, cada una con su controladora NXT independiente.

La labor durante esta prueba es prácticamente en la parte lógica, desarrollando un software capaz de extrapolar la programación en bajo nivel en un ambiente multicelular.

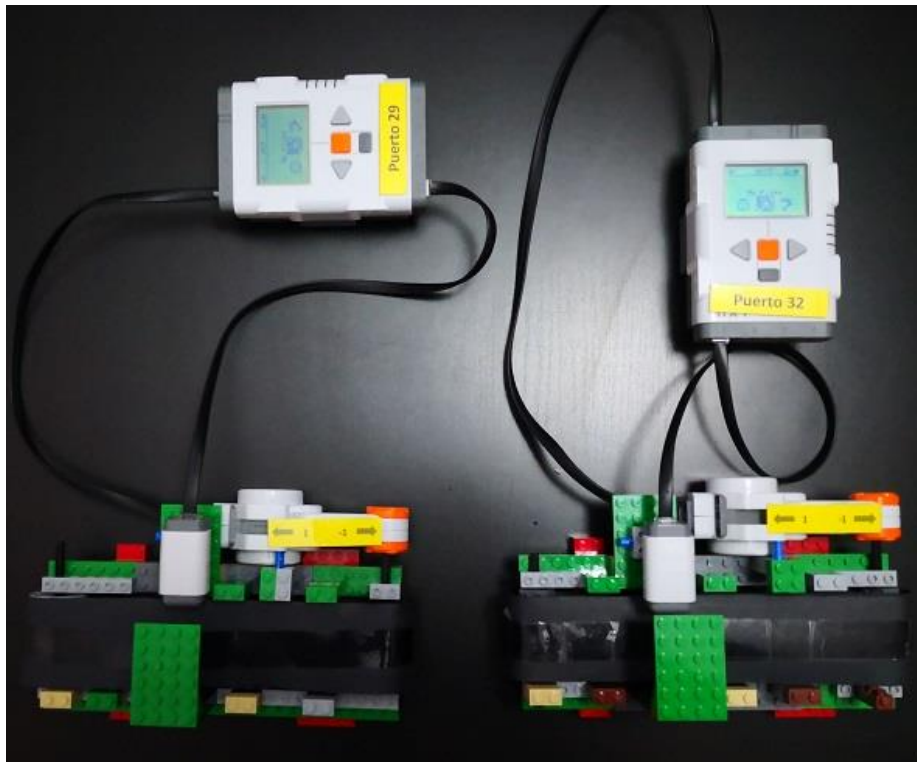


Figura 58 Dos estaciones de procesado independientes.

5.7.3 Resultados y avances obtenidos

Se han encontrado dos posibilidades de desarrollar el código:

- **Opción 1:** Crear estructuras para cada controladora NXT y realizar una programación centralizada (un único bloque de código para todas las células) haciendo uso de los objetos creados.

La solución presentaría una gran interfaz común donde se mostrarían todos los parámetros y el resto de información de cada célula instalada, compartiendo toda la información.

- **Opción 2:** Mediante el **uso de hilos (threads)** se encapsula la información y **se comparte a nivel de sistema únicamente las variables que realmente sean útiles para el control a nivel de fábrica.**

En este caso se contaría con múltiples interfaces hombre-máquina (una HMI por célula), para configurar y controlar independientemente a cada célula considerada, y una interfaz dedicada al controlador centralizado (SCADA). Esta última herramienta se dedicará a generar todo el sistema celular y a proporcionar al usuario la capacidad de realizar peticiones a las células desde alto nivel.

- ❖ **Conclusión:** Para llevar a la práctica con mayor facilidad a **un sistema completamente escalable, que sea intuitivo para los usuarios y permita un control descentralizado, se ha preferido implementar la segunda opción comentada,** como metodología de diseño.

5.8 Integración final de varias células para formar un sistema automatizado

Se han completado todas las etapas anteriores, donde recordemos que se han conseguido cerrar dos diseños de células de fabricación, con múltiples sensores y actuadores conectados y dos controladoras funcionando en paralelo de forma independiente desde un mismo ordenador. Como ejemplo ilustrativo del potencial de este método, se pretende consolidar un sistema multicelular controlado en alto nivel.

5.8.1 Definición y objetivo de la prueba

Como prueba final, se busca hacer funcionar un sistema miniturizado de una posible planta real, formado por un clasificador de productos y tres estaciones de procesado. Cada una de las células debe funcionar al mismo tiempo, de forma totalmente automatizada y obedecer órdenes de un sistema centralizado que lanzará peticiones a nivel de fábrica.

5.8.2 Montaje y software empleados

- **Elementos constructivos:** El sistema estará compuesto por tres estaciones de procesado y un separador, cada una de estas unidades asociadas a una NXT. Las conexiones entre las células de fabricación se realizarán a través de un elemento de unión.
- **Control software:** Las células mostradas en la fotografía, un separador de material bidireccional en la zona central y tres estaciones de procesado (cuatro células en total), cuentan con un programa local específico de cada interfaz HMI, para sus funciones en bajo nivel. Por otro lado, se lleva la gestión de todo el proceso desde la interfaz SCADA, pudiendo lanzar órdenes de alto nivel, como paradas de emergencia, rearme de máquinas y puestas en funcionamiento generales.

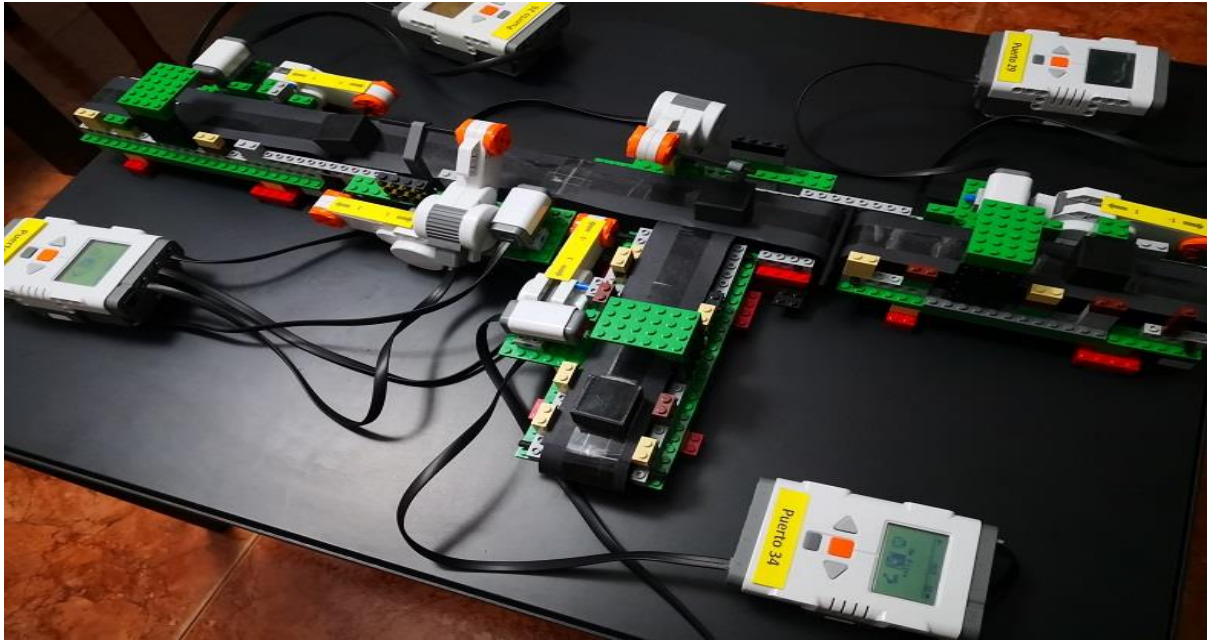


Figura 59 Detalle del sistema de fabricación flexible final.

5.8.3 Resultados y avances obtenidos

La prueba final otorga las siguientes conclusiones:

- **Estabilidad del conjunto (parte electro-mecánica):** La rigidez, peso y estabilidad del sistema es la adecuada para su finalidad. El material se puede desplazar firmemente en el conjunto sin dificultad.
- **Uniones (parte electro-mecánica):** Las uniones son adecuadas para permitir el paso de material de forma fácil.
- **Control (parte lógica y de control):** Cada una de las células cumple su función en el control de bajo nivel y además responden de forma coordinada ante las peticiones recibidas del SCADA. Además, cada célula puede ser reconfigurada individualmente por el usuario, ajustando los parámetros principales en las interfaces HMI en tiempo real.
- **Modos de funcionamiento (parte lógica y de control):** La transacción entre los distintos modos de funcionamiento es correcta, completando así un ejemplo propuesto por la Guía GEMMA. Se puede realizar una parada de emergencia que afecte a todo el sistema a la vez, seguida de un testeo y la consiguiente puesta en marcha. Además cada célula puede ser operada de forma manual.
- ❖ Se ha conseguido cerrar la puerta a punto de un posible candidato real de una planta industrial, creado de forma modular. Con esto, se valida el potencial del método propuesto, que pretende representar de forma cercana a la realidad a un proceso industrial propuesto, a muy bajo coste y en un plazo de tiempo reducido

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En su conjunto, los capítulos anteriores han mostrado una metodología completa, que parte de la idea principal de conseguir representar de forma rápida, a bajo coste, de forma visual y funcional, el comportamiento de un proceso industrial objetivo. De esta manera, resulta más fácil poder mostrar a potenciales clientes, inversores o personal en formación, qué elementos formarán parte de la distribución en planta, cómo funcionará cada uno de los componentes del sistema y cuál será el recorrido seguido, durante la fabricación de cada producto.

El capítulo 2, estado del arte, ha introducido la motivación que ha llevado a realizar este proyecto, con ejemplos reales que muestran la importancia de una buena gestión del personal y de las máquinas en el sector industrial, así como las principales tendencias tecnológicas que ya son una realidad, gracias a los nuevos dispositivos digitales interconectados. Seguidamente, se detalló cuál es el problema propuesto, cuáles son los objetivos y los medios disponibles para cumplirlos.

Continuando con la metodología de diseño propuesta y su posterior implementación, respectivamente en detalle sobre los capítulos 3 y 4, el texto se centró en cómo se ha abordado el problema de diseño de la planta industrial, dividiendo al sistema en células de fabricación automatizadas y en una interfaz de usuario tipo SCADA. Cada componente del sistema es fruto de la unión de una parte física, que tiene como resultado un hardware específico y otra lógica, que conforma la parte software de cada módulo.

Para finalizar, el capítulo 5, titulado como pruebas funcionales realizadas, recoge todas las casuísticas que han sido validadas experimentalmente, desde las primeras pruebas básicas de testeo, hasta las pruebas finales donde se ha logrado ensamblar un posible sistema de fabricación real, formado por cuatro células automáticas funcionando de forma simultánea y coordinada por el usuario, desde un control centralizado tipo SCADA, con múltiples modos de funcionamiento disponibles.

Como propuestas de mejora para este proyecto, se sugiere aprovechar la flexibilidad y escalabilidad del sistema para recrear más escenarios reales de la industria, por ejemplo, combinando los dos tipos de célula actuales con otras nuevas, que incluyan tipos de actuadores o sensores más allá de los proporcionados por los paquetes LEGO, empleados aquí. Almacenes automatizados o elementos de carga y descarga de material, pueden ser elementos útiles, que representen en mayor medida el concepto de industria 4.0.

Como una segunda idea de desarrollo, se propone añadir a las interfaces HMI de las células, de una herramienta que permita recopilar y archivar datos relevantes de las pruebas realizadas (lecturas de los sensores, velocidades de avance en cada instante, tiempos de procesado, número de piezas detectadas...) para conseguir optimizar en mayor detalle, la producción de cualquier proceso que sea estudiado. La información útil podría ser mostrada en tiempo real en la herramienta de control tipo SCADA.

También sería útil que cada célula tenga disponible desde su interfaz específica, de una serie de programas de control útiles, que puedan ser escogidos por el usuario en cada instante. Podrían ser útiles para mostrar rápidamente diferentes estrategias de producción sobre un mismo montaje.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. M. D. Cano, Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO, Sevilla, 2019.
- [2] «Real Academia Española,» [En línea]. Available: <https://www.rae.es>.
- [3] L. Barja, «La revolución industrial: Causas, desarrollo y consecuencias.,» *SobreHistoria*, 17 Mayo 2019.
- [4] G. Gómez, R. López y J. Quintana, «La Cuarta Revolución Industrial, ¿llegará al sector público Argentino?,» *Difusión universal de conocimientos, experiencias y práctica*, 2019.
- [5] Transgesa, «Logística 4.0 para la Industria 4.0,» 13 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.transgesa.com/blog/logistica-4-0-para-la-industria-4-0/>.
- [6] NSF- National Safe Foundation, «Cyber-Physical Systems (CPS),» n° NSF 16-549, 2014.
- [7] J. L. d. Val, «Industria 4.0: La transformación digital de la industria,» *Revista ingeniería Universidad de Deusto*, 2016.
- [8] S. Randstad España, «Los Avances de ingeniería más importantes,» 13 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.randstad.es/tendencias360/los-avances-en-ingenieria-mas-importantes-del-s-xx/>.
- [9] J. Camós, «100 años de Ford en cadena,» 12 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.motorpasion.com/industria/100-anos-de-ford-en-cadena-o-cuando-ford-reinvento-la-industria>. [Último acceso: 16 08 2019].
- [10] SEAT, Informe anual, Cegeglobal, 2017.
- [11] D. Heidecker, Interviewee, *Cobots, la exitosa colaboración entre el hombre y el robot*. [Entrevista]. 23 07 2019.
- [12] J. A. Morán y C. Monzo, «Cinco aspectos en los que el 5G cambiará nuestra vida,» *ElPeriódico*, 27 8 2019.

- [13] Aldakin , *Industria 4.0. Qué es, ventajas e inconvenientes*, 2017.
- [14] V. Pérez, «PRL y las TICs,» *Escuela Técnica Superior de ingeniería, Sevilla*, 2019.
- [15] A. Díaz, «Tecnología y privacidad: ya nunca conoceremos el anonimato,» 2017 07 2017. [En línea]. Available: <https://empresas.blogthinkbig.com/tecnologia-y-privacidad/>. [Último acceso: 02 09 2019].
- [16] J. F. Frank Chen and Everett E. Adam, «The Impact of Flexible Manufacturing Systems on Productivity and Quality,» *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 38, nº 1, pp. 33-45, 1991.
- [17] L. Rey, «Grupos tecnológicos y manufactura flexible,» 18 11 2004. [En línea]. Available: <https://www.gestiopolis.com/grupos-tecnologicos-y-manufactura-flexible/>. [Último acceso: 20 09 2019].
- [18] D. Dolcemascolo, «Types of Lean Manufacturing Cells,» *EMS Consulting Group*, 2004.
- [19] D. Henao, X. Jaramillo y S. L. Villegas , «Trabajo final Administración de la producción: Células de manufactura,» 20 11 2013. [En línea]. Available: <http://celdemanufactura.blogspot.com/>. [Último acceso: 10 09 2109].
- [20] A. F. Salazar y C. Vargas, «Propuesta de distribución en planta bietapa en ambientes de manufactura flexible mediante el proceso analítico jerárquico,» *Revista EIA*, vol. 7, nº 14, 2010.
- [21] D. Krambeck, «An Introduction to SCADA Systems,» 31 08 2015. [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-scada-systems/>. [Último acceso: 15 09 2019].
- [22] P. Zhang, *Advanced industrial control technology*, William Andrew, 2010.
- [23] J. Devia, *Norma ISA SP-95*, Departamento de Ingeniería de Sistemas, Universidad de Oriente, 2015.
- [24] J. L. Palenzuela, *Los 10 problemas más comunes en la gestión del almacén para las pymes*, 2017.
- [25] P. Ponsa y R. Vilanova, «Gemma guide approach for the introduction of the human operator into the automation cycle,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, nº 6, pp. 285-290, 2006.
- [26] L. Rodríguez, «GEMMA Una Herramienta Universal para la Automatización de Procesos,» *Ingenium*, vol. 12, pp. 80-96, 20141.

[27] A. Kirillow, «AForge.net,» 2017. [En línea]. Available:
<http://www.aforgenet.com/framework/samples/robotics.html>.