

Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Diseño de un sistema de producción modular  
mediante LEGO. Aspectos electromecánicos.

Autor: José Manuel Díaz Cano

Tutor: José Manuel Framiñan Torres

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

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Máster  
Universitario en Ingeniería Industrial

**Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO. Aspectos  
electromecánicos.**

Autor:

José Manuel Díaz Cano

Tutor:

José Manuel Framiñan Torres

Dep. 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 electromecánicos.

Autor: José Manuel Díaz Cano

Tutor: José Manuel Framiñan 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



*El mayor enemigo del conocimiento no es la ignorancia, sino la falsa creencia de poseer el conocimiento.*

*(Stephen William Hawking)*





# Agradecimientos

---

*Resulta difícil nombrar en este apartado a todas y cada una de las personas que me han ayudado en el camino durante todos estos años. De ellos siempre he aprendido innumerables lecciones de vida, tanto en el ámbito laboral o universitario como en el personal.*

*Gracias a toda mi familia por el apoyo incondicional. A mi padre, madre y hermana, por hacer que todo el camino sea más fácil, apoyándome en mis derrotas y celebrando mis victorias, y que por todo lo pasado se sientan orgullosos de mí.*

*Gracias a mis amigos, de esos que se cuentan con los dedos de una mano, pero de los que sé que siempre estarán ahí, en lo bueno y en lo malo.*

*Gracias a mi compañero en este trabajo, Miguel, 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.*

*Gracias a todos los profesores que me ha llevado hasta aquí. A mi maestra Lola del colegio y mi profesor Santiago de matemáticas, a quienes estaré siempre agradecido por ser estrictos y cariñosos a la vez y a los que considero culpables de mucho de lo que soy en el ámbito universitario. A todos los profesores de la ETSI, por hacernos ver el mundo de otra forma, en especial a José Manuel Framiñan, mi tutor, quien ha incentivado en mí la motivación por avanzar.*

*Gracias a todos he logrado llegar hasta aquí. Es el trabajo de todos.*



# Resumen

---

En los últimos años, el desarrollo de la automatización en la industria ha supuesto un aumento considerable en los beneficios económicos de las empresas, debido a que los tiempos de fabricación han disminuido enormemente. Es difícil imaginarse una empresa industrial sin maquinaria automatizada a día de hoy. Sin embargo, el desembolso económico inicial del empresario para crear un sistema totalmente fiable y automatizado es alto. Por ello se busca minimizar los riesgos realizando un buen estudio inicial del problema

El objetivo principal del trabajo se centrará en el desarrollo de una nueva metodología, basada en el desarrollo de células de fabricación programables a escala reducida, que, combinadas, sean capaz de ayudar al proyectista a presentar sus ideas de una forma intuitiva y visual, ayudando así a convencer a los inversores mostrándoles directamente el aspecto, a modo de prototipo, que tendrá la futura fábrica, todo ello a un coste reducido. Además, se busca que la metodología desarrollada pueda ser utilizada en otros campos, como por ejemplo en la enseñanza.

Se iniciará el proyecto desde cero, tanto en el ámbito físico como en el lógico, siendo este último punto desarrollado en mayor parte por Miguel Navas Alcántara, en un proyecto titulado “Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO. Aspectos de control y automatización” (2019), el cual se ha desarrollado paralelamente para lograr un objetivo común. Durante su desarrollo, se realizará un pequeño estudio de los modelos de fabricación más utilizados, tomando uno de ellos como referencia, trasladando sus bases en un modelo a pequeña escala totalmente funcional.



# Abstract

---

In recent years, the development of automation in the industry has meant a considerable increase in the economic benefits of companies, because manufacturing times have greatly decreased. It is difficult to imagine an industrial company without automated machinery today. However, the initial economic outlay of the entrepreneur to create a fully reliable and automated system is high. Therefore, we seek to minimize risks by conducting a good initial study of the problem

The main objective of the work will focus on the development of a new methodology, based on the development of small-scale programmable manufacturing cells, which, combined, are able to help the designer present their ideas in an intuitive and visual way, helping thus to convince investors by showing them directly the appearance, as a prototype, that the future factory will have, all at a reduced cost. In addition, it is sought that the methodology developed can be used in other fields, such as in teaching.

The project will start from scratch, both physically and logically, the latter being developed mostly by Miguel Navas Alcántara, in a project entitled “Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO. Aspectos de control y automatización” (2019), which has been developed in parallel to achieve a common objective. During its development, a small study of the most used manufacturing models will be carried out, taking one of them as a reference, moving its bases into a fully functional small-scale model.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Índice</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Objeto del proyecto</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objeto del proyecto</i>	1
1.2 <i>Sumario</i>	1
<b>2 Estado del Arte</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Industrialización, un breve vistazo a la historia</i>	3
2.2 <i>Industria 4.0. Cuarta revolución industrial</i>	5
2.3 <i>Ejemplos de industrias altamente automatizadas</i>	6
2.4 <i>Sistema de fabricación flexible</i>	7
2.5 <i>Celulas de fabricación</i>	9
2.6 <i>Niveles ISA SP-95</i>	9
2.7 <i>Guía GEMMA</i>	10
2.8 <i>Diseño de plantas Industriales</i>	11
2.9 <i>Técnicas presentación de proyectos</i>	12
2.10 <i>Problema propuesto</i>	14
<b>3 Materiales necesarios</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Elementos estructurales. Nivel 0 ISA SP-95</i>	17
3.2 <i>Actuadores, sensores y CPU. Nivel 1 ISA SP-95</i>	18
3.3 <i>Interfaz y lenguaje de programación. Nivel 2 ISA SP-95</i>	20
3.4 <i>Elementos auxiliares</i>	21
<b>4 Propuesta de proyecto</b>	<b>23</b>
4.1 <i>Monitorización. Arquitectura de control (nivel 2 de ISA SP-95)</i>	23
4.2 <i>Elementos de control. Sensores, actuadores y CPU (nivel 1 de ISA SP-95)</i>	24
4.3 <i>Implementación en el sistema. Estructura y tipos de célula (nivel 0 de ISA SP-95)</i>	24
4.4 <i>Conclusiones y limitaciones</i>	25
<b>5 Aplicación del método</b>	<b>27</b>
5.1 <i>Conexión Bluetooth entre la controladora y el ordenador</i>	27
5.2 <i>Elección del sensor</i>	28
5.3 <i>Desarrollo de una cinta transportadora</i>	29
5.4 <i>Desarrollo de la estación de procesado</i>	31
5.4.1 <i>Construcción</i>	31

5.4.2	Programación	32
5.4.3	HMI estación de procesado	34
5.5	<i>Desarrollo del separador</i>	35
5.5.1	Construcción	35
5.5.2	Programación	38
5.5.3	HMI separador	41
5.6	<i>Unión multicelula</i>	42
5.6.1	Manejo de varias NXT	43
5.6.2	Uniones físicas	43
5.6.3	Realización de la interfaz general tipo SCADA	45
<b>6</b>	<b>Pruebas funcionales realizadas</b>	<b>47</b>
6.1	<i>Prueba funcional de sensores y actuadores. Elección de los periféricos adecuados</i>	47
6.1.1	Definición y objetivos de la prueba	47
6.1.2	Montaje y software empleados	48
6.1.3	Resultados y avances obtenidos	48
6.2	<i>Cinta transportadora inicial operando con piezas. Una controladora NXT</i>	49
6.2.1	Definición y objetivos de la prueba	49
6.2.2	Montaje y software empleados	49
6.2.3	Resultados y avances obtenidos	50
6.3	<i>Dos cintas transportadoras operando con buffer de piezas. Una controladora NXT</i>	50
6.3.1	Definición y objetivos de la prueba	50
6.3.2	Montaje y software empleados	51
6.3.3	Resultados y avances obtenidos	52
6.4	<i>Cinta junto a estación de procesado. Una controladora NXT</i>	52
6.4.1	Definición y objetivos de la prueba	52
6.4.2	Montaje y software empleados	53
6.4.3	Resultados y avances obtenidos	54
6.5	<i>Cinta trabajando junto a un separador de material. Una controladora NXT</i>	54
6.5.1	Definición y objetivos de la prueba	54
6.5.2	Montaje y software empleados	54
6.5.3	Resultados y avances obtenidos	55
6.6	<i>Prueba de ajuste entre el tiempo de parada y la velocidad de avance, en la cinta del separador</i>	56
6.6.1	Definición y objetivos de la prueba	56
6.6.2	Resultados y avances obtenidos	57
6.7	<i>Test para múltiples controladoras NXT, comunicación bluetooth</i>	58
6.7.1	Definición y objetivos de la prueba	58
6.7.2	Montaje y software empleados	58
6.7.3	Resultados y avances obtenidos	59
6.8	<i>Integración final de varias células para formar un sistema automatizado</i>	59
6.8.1	Definición y objetivo de la prueba	59
6.8.2	Montaje y software empleados	59
6.8.3	Resultados y avances obtenidos	60
<b>7</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>63</b>
7.1	<i>Trabajo realizado</i>	63
7.2	<i>Trabajo futuro</i>	64
7.3	<i>Conclusión</i>	65
<b>8</b>	<b>ANEXO I: Lógica de programación.</b>	<b>67</b>
8.1	<i>Búcle de control general del sistema</i>	67
8.2	<i>Búcle de control de estación de procesado</i>	68
8.3	<i>Búcle de control de separador</i>	69
	<b>Referencias</b>	<b>71</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>







# Índice de Figuras

---

Figura 1. Uno de los talleres propiedad de la Riotinto Company Limited. (1)	4
Figura 2. Ejemplo de automatización en la industria alimenticia. (2)	4
Figura 3. Las cuatro revoluciones industriales. (3)	5
Figura 4. Cadena de montaje de una fábrica de automóviles. (4)	6
Figura 5. Diagrama de evolución de volumen de producción frente a variedad. (5)	7
Figura 6. Familia de piezas. (6)	8
Figura 7. Ejemplo de distribución en forma de U de una célula de fabricación. (7)	9
Figura 8. Niveles de jerarquía de los procesos industriales. (8)	10
Figura 9. Diferentes modos de funcionamiento de un automatismo (Guía GEMMA) (9)	11
Figura 10. Exposición al público de datos mediante gráficas (10)	13
Figura 11. Modelo 3D en ordenador de una fábrica (11)	13
Figura 12. Maqueta 3D de una fábrica (12)	14
Figura 13. Piezas estructurales pertenecientes a LEGO Mindstorm. (13)	18
Figura 14. Distintos sensores de LEGO Mindstorm. (14)	19
Figura 15. Detalle de un servomotor LEGO Mindstorm. (15)	19
Figura 16. Controladora Lego NXT. (16)	20
Figura 17. Pantalla principal de Visual Studio	21
Figura 18. Material a procesar realizado por impresión 3D	21
Figura 19. Estructura propuesta de monitorización.	24
Figura 20. Interfaz inicial para probar la conexión bluetooth	28
Figura 21. Sensor de luz lego mindstorm. (17)	29
Figura 22. Cinta transportadora inicial, vista 1.	30
Figura 23. Cinta transportadora inicial, vista 2.	30
Figura 24. Diseño de la estación de procesado, vista 1.	31
Figura 25. Diseño de la estación de procesado, vista 2.	32
Figura 26. Fragmento del código de control de la estación de procesado.	33

Figura 27. Interfaz hombre-máquina de la estación de procesado.	34
Figura 28. Detalle de sistema de empuje para separador.	35
Figura 29. Detalle de sistema de orientación para separador.	36
Figura 30. Diseño del primer separador	36
Figura 31. Diseño final del separador, vista 1.	37
Figura 32. Diseño final del separador, vista 2.	37
Figura 33. Diseño final del separador, detalle del empujador.	38
Figura 34. Fragmento de código de control del separador, flanco de subida	39
Figura 35. Fragmento de código de control del separador, empujador.	40
Figura 36. Interfaz hombre-máquina del separador	41
Figura 37. Células desarrolladas durante el proyecto	42
Figura 38. Fragmento de código, inicialización de los hilos	43
Figura 39. Fragmento de código, librería para la utilización de hilos	43
Figura 40. Atoramiento de material en la intersección de cintas	44
Figura 41. Solución en la unión de las células.	44
Figura 42. Infrfaz de inicio de programa	45
Figura 43. Interfaz de inicio de programa incluyendo los modos de funcionamiento	46
Figura 44. Testeo de sensores y motores.	48
Figura 45. Cinta transportadora inicial con conexiones.	50
Figura 46. Dos cintas transportadoras con sensores conectadas.	51
Figura 47. Enlace entre unidades.	52
Figura 48. Una estación de procesado conectada a una cinta transportadora.	53
Figura 49. Un separador unidireccional frente a una cinta transportadora.	55
Figura 50. Comportamiento experimental de la cinta transportadora.	56
Figura 51. Tiempo de respuesta necesario según la potencia de la cinta.	57
Figura 52. Dos estaciones de procesado independientes.	58
Figura 53. Detalle del sistema de fabricación flexible final.	60





# 1 OBJETO DEL PROYECTO

---

## 1.1 Objeto del proyecto

El objetivo principal de este proyecto será la implementación de un sistema que represente fielmente una serie de procesos industriales a pequeña escala, con la finalidad de ser útiles como herramientas de diseño y presentación, tanto a nivel de proyecto como educativo y formativo. Para ello, se van a diseñar un conjunto de células de fabricación flexibles a escala reducida, es decir, un conjunto de unidades interconectadas entre sí a través de un sistema de transporte autónomo, que puedan simular distintos procesos industriales. Los elementos funcionales se construirán a partir de la tecnología robótica de Lego Mindstorm, ofreciendo la posibilidad de ensamblar partes y de programarlas con cierta facilidad.

Este proyecto se centrará en el planteamiento y ejecución de la parte física requerida para lograr el objetivo común, incluyendo la elección de los materiales necesarios, la construcción estructural de las unidades, el estudio de la estabilidad de las mismas, la adecuación cinemática, las uniones y el estudio y aplicación de distintos modos de funcionamiento, todo ello seguido de una puesta en funcionamiento general.

También se muestra el desarrollo de la parte lógica para facilitar el entendimiento al lector, la cual ha sido necesaria para validar el trabajo físico del proyecto, además de complementarlo para lograr el objetivo del mismo. La validación de esta parte se muestra en mayor detalle en el Trabajo de Fin de Máster de Miguel Navas Alcántara (2019), titulado “Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO. Aspectos de control y automatización” el cual se ha realizado de forma paralela.

## 1.2 Sumario

El proyecto se divide en 5 capítulos bien diferenciados:

- Estado del arte: El primer capítulo pretende poner en contexto al lector con el entorno industrial. En él

aparecerán de forma teórica y sistemática todos los conocimientos necesarios para entender el proyecto a la perfección, desarrollándolos desde un plano general a otro más específico. El capítulo comienza con una pequeña introducción a la industria, desde sus inicios a la actualidad, dónde se encuentra dominada por la automatización. A continuación, se desarrollarán las distintas estructuras de fabricación, seguidas del estándar ISA-95 (relaciona empresas con su sistema de control) y los modos de funcionamiento necesarios en todo sistema automatizado. Por último, se comentarán técnicas de presentación de proyectos, enfatizando su importancia y desembocando así en el problema a abordar.

- Materiales necesarios: En este segundo capítulo comenzará el estudio práctico del proyecto. Se justificará la elección de los materiales y programas empleados
- Propuesta de proyecto: Se realizará un breve estudio inicial que servirá de guía para la realización práctica, teniendo en cuenta las necesidades que se demandan.
- Aplicación del método: Tras especificar una metodología a seguir, se iniciará el desarrollo práctico del proyecto. En él se mostrará paso por paso la evolución del trabajo, desde la creación de pequeñas unidades iniciales hasta la consolidación de un sistema final totalmente funcional.
- Pruebas funcionales realizadas: En este apartado se describirán las pruebas necesarias durante el desarrollo del proyecto. En todas ellas se describirá el objetivo general de la prueba, los objetivos individuales tanto de Miguel Navas (parte lógica y de control) como míos (parte electro-mecánica) y los resultados obtenidos en la prueba.
- Conclusiones y trabajo futuro: En este último capítulo se desarrollará las ideas derivadas de la realización de todo el proyecto. “¿Se han logrado los objetivos?” o “¿Qué se puede mejorar en el futuro?” son algunas de las preguntas que se evaluarán en este punto.

Finalmente se incluirá un apartado de referencias utilizadas durante la realización de la memoria, tanto referencias informativas como de imágenes.



## 2 ESTADO DEL ARTE

---

Con el objetivo de facilitar la comprensión del documento, es indispensable realizar una revisión histórica y teórica de los pilares sobre los que se sustenta el proyecto. Para entrar en materia, se realiza una pequeña introducción a la industrialización, desde sus inicios hasta la forma actual de entenderla. Continuaremos con una base teórica que aporte significado al proyecto, tratando puntos como la fabricación flexible, las células de fabricación, los niveles ISA de automatización y los modos de funcionamiento recogidos en la Guía GEMMA. Finalmente, se desarrollará la importancia de exponer los proyectos adecuadamente, introduciendo el sistema como una nueva solución eficaz.

### 2.1 Industrialización, un breve vistazo a la historia

Industria, como sentido amplio de la palabra, se refiere a toda actividad realizada para obtener un producto, a partir de cierta materia prima y energía (RAE, 2019)<sup>1</sup>. Atendiendo a dicha definición, desde su origen, el hombre ha tenido la necesidad de transformar los elementos con los que contaba en la naturaleza para poder utilizarlos a su favor, aunque no fue hasta el siglo XIX dónde se acuñó el significado actual a esta palabra, tras la conocida revolución industrial. Esta revolución supuso la disminución drástica del tiempo requerido para la realización de productos acabados, a través de un modelo capitalista, dónde la producción tenía como objetivo la obtención de beneficios económicos. Este cambio hizo que, hasta mediados del siglo XX, la industria fuera el motor económico más importante, además del que mayor empleo ocupaba (Arango, 2016)<sup>2</sup>.

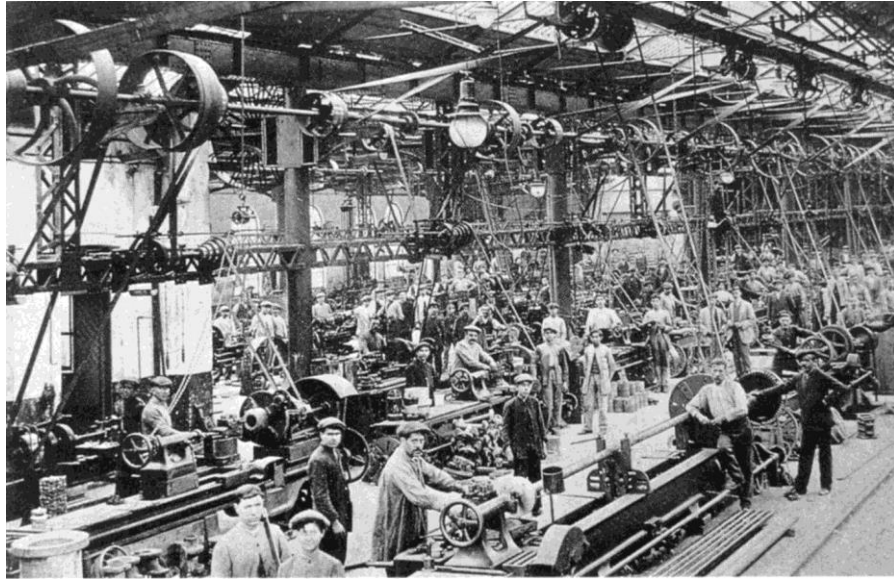


Figura 1. Uno de los talleres propiedad de la Riotinto Company Limited. (1)

Con el paso de los años, el sector industrial ha disminuido su importancia en la economía mundial, aunque sigue siendo uno de los pilares principales de la misma. Durante este tiempo, la industria ha vivido gran cantidad de cambios, destacando entre ellos la tremenda evolución en las máquinas y la automatización. Tal ha sido este cambio que, a día de hoy, parece impensable hablar de industria sin pensar en procesos automatizados. De hecho, la evolución de las máquinas se mantiene a día de hoy con la industria 4.0 (introducida en el siguiente punto), la cual aprovecha el desarrollo de internet como una ventaja competitiva.

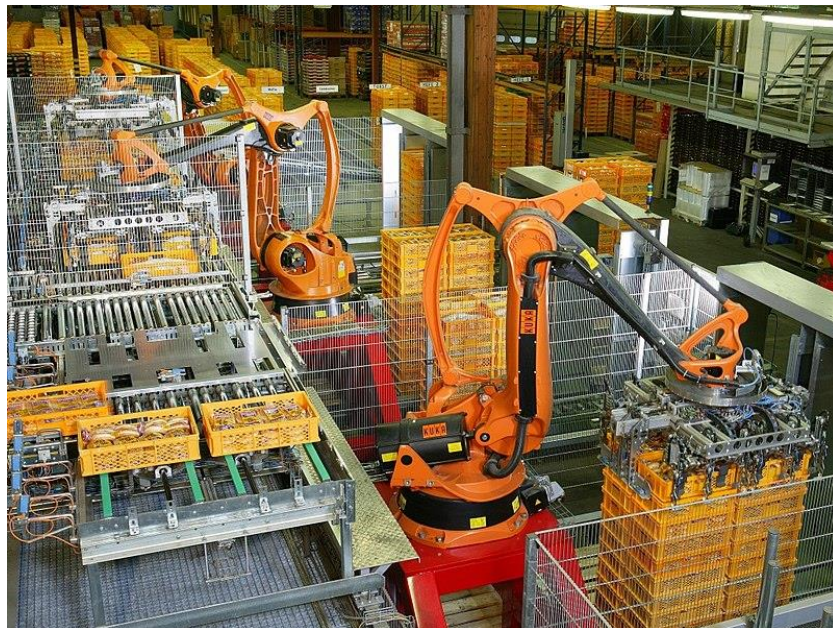


Figura 2. Ejemplo de automatización en la industria alimenticia. (2)

## 2.2 Industria 4.0. Cuarta revolución industrial

En pleno siglo XXI, se está experimentando una cuarta revolución industrial, continuando así grandes hitos de la historia, como la invención de la máquina de vapor, la electricidad o la automatización básica. Actualmente, no solo existen sistemas automatizados trabajando junto a personas, sino que, a su vez, se produce un intercambio de información entre ellos, creando una red de sistemas conectados conocido como “el internet de las cosas”. Algunas de las características de este nuevo tipo de industria son:

- La Industria 4.0 se puede definir como “la integración de lo digital y lo físico” (Transgesa, 2018)<sup>3</sup>.
- Cambiar rápidamente el modo de producción.
- Busca tener la capacidad de conocer el estado de la fabricación de los productos en tiempo real para que las máquinas puedan trabajar en el momento de forma óptima.
- Recopilar grandes de cantidades de datos para después procesarlos y darles utilidad en la práctica, conocido como big data.
- Solicitar ayuda, facilitar los mantenimientos de las máquinas y mecanismos.

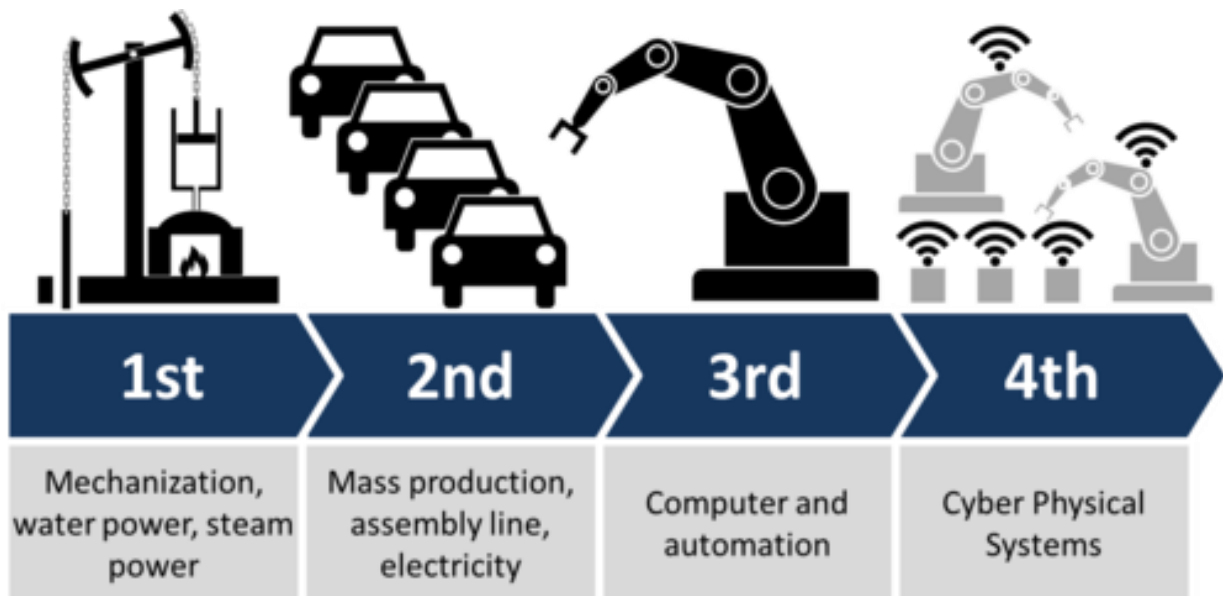


Figura 3. Las cuatro revoluciones industriales. (3)

### 2.3 Ejemplos de industrias altamente automatizadas

Una de las principales industrias que se viene a la mente al hablar de automatización sería la industria automovilística. Las empresas utilizan grandes cadenas de montaje, donde los elementos automatizados realizan trabajos consecutivos, aportando valor añadido al producto final (Aldakin, 2017)<sup>4</sup>. El montaje, soldadura y pintura de las distintas piezas de un coche se compone de actividades repetitivas y precisas, cualidades ideales para un sistema autónomo de producción. Los operarios ya no se dedican a trabajar directamente sobre la cadena de montaje. Su misión ahora consiste en supervisar el trabajo que realiza los equipos inteligentes, además de realizar un seguimiento y mantenimiento cada cierto tiempo.

Aunque las cadenas de producción de coches son el ejemplo más clásico, existen muchos otros sectores involucrados, como por ejemplo la industria farmacéutica o alimenticia. En ellas es necesaria la manipulación de gran cantidad de unidades por minuto y cumplir altos estándares de fiabilidad.



Figura 4. Cadena de montaje de una fábrica de automóviles. (4)

## 2.4 Sistema de fabricación flexible

Este trabajo se va a centrar en el desarrollo e interconexión de células de fabricación flexibles a pequeña escala, para formar un modelo de sistema de fabricación flexible completo. Por ello es necesario conocer de antemano en que se basan este tipo de sistemas.

Un sistema de fabricación flexible o FMS (Flexible Manufacturing System) se compone de un grupo de estaciones interconectadas entre si mediante un medio de transporte de materiales automatizado. La flexibilidad que posee el sistema le permite reaccionar frente a cambios, ya sea imprevistos o pronosticados. Tanto la manipulación de estos materiales en cada una de las estaciones como el transporte entre ellas debe ser controlado por ordenador. Por tanto, los FMS están compuestos por (Escuela Técnica Superior de Bilbao, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2013)<sup>5</sup>:

- Una máquina de trabajo y manipulación de materiales.
- Un sistema de unión entre las mismas.
- Un ordenador central a partir del cual se controla el sistema.

Los sistemas de fabricación flexibles se utilizan como nivel intermedio entre un sistema de producción de gran cantidad de unidades a gran velocidad, pero con poca variedad (como por ejemplo las líneas de producción) y sistemas de producción casi unitario con gran capacidad de variación (como por ejemplo máquinas individuales de CNC de fabricación de piezas).

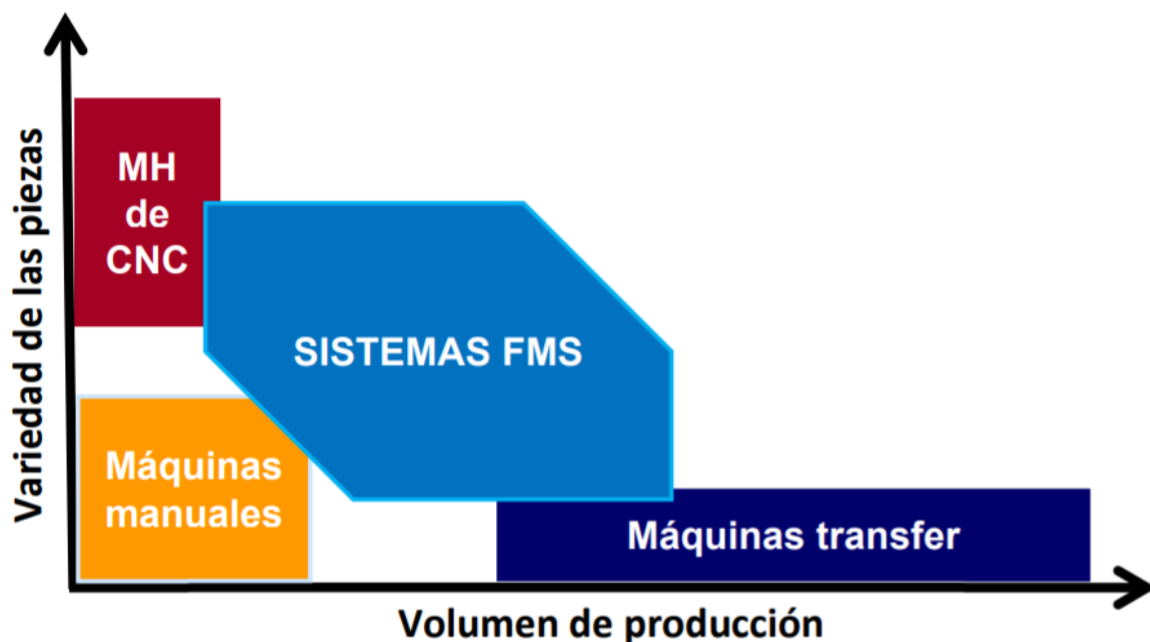


Figura 5. Diagrama de evolución de volumen de producción frente a variedad. (5)

Algunas de las ventajas de los sistemas FMS son (Escuela Técnica Superior de Bilbao, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2013)<sup>5</sup>:

- Se reduce el coste de fabricación al realizar una automatización eficaz.
- Menor coste de cada unidad producida.
- Mejora la gestión de la producción, es decir solo se fabrica lo necesario.
- Aumenta la velocidad de producción y, por tanto, se reducen los plazos de entrega.
- Tiene una buena adaptabilidad de cambios, al estar todo controlado mediante un ordenador central y utilizar maquinaria flexible.

Sin embargo, algunas de las desventajas que presenta son:

- Se necesita una inversión inicial bastante alta.
- La mano de obra debe estar cualificada para manejar equipos automatizados.
- El mantenimiento necesita tiempo debido a la dificultad que suele suponer.
- La producción debe realizarse por familias de piezas para que se pueda flexibilizar (no se pueden realizar dos piezas totalmente distintas en una misma cadena de producción).

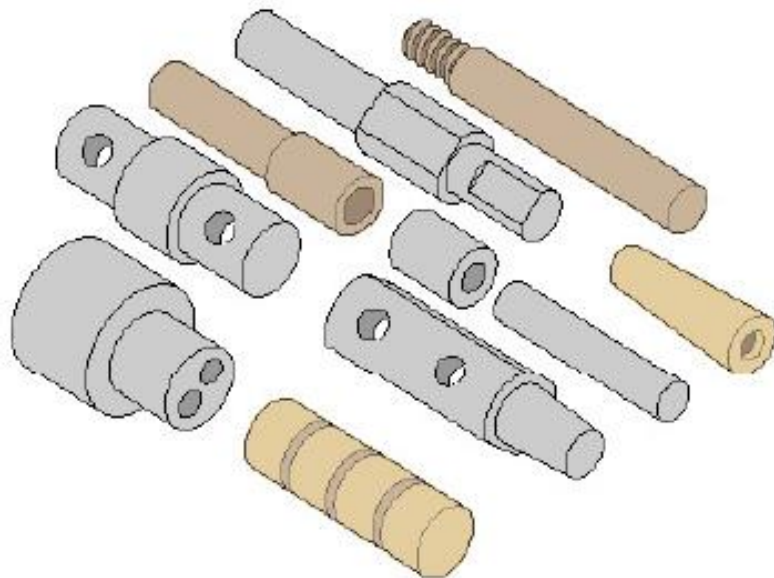


Figura 6. Familia de piezas. (6)

## 2.5 Celulas de fabricación

Como comentamos en el punto anterior, el sistema de fabricación flexible que se busca es el resultado de la conexión entre células de fabricación flexibles.

Una célula de fabricación está compuesta por un grupo de máquinas y herramientas semiautomatizada capaz de realizar funciones de ensamblaje o procesamiento de productos. Las piezas son transportadas por toda la célula, a la vez que se realizan distintos procesos sobre ella. Pueden estar organizadas de distinta manera, aunque es usual una distribución en “U” (Navarro, 2012)<sup>6</sup>.

Una célula de fabricación podría estar formada, por ejemplo, de varias máquinas de control numérico, programadas cada una para hacer una función específica, y entrelazadas entre sí mediante cintas de transporte.

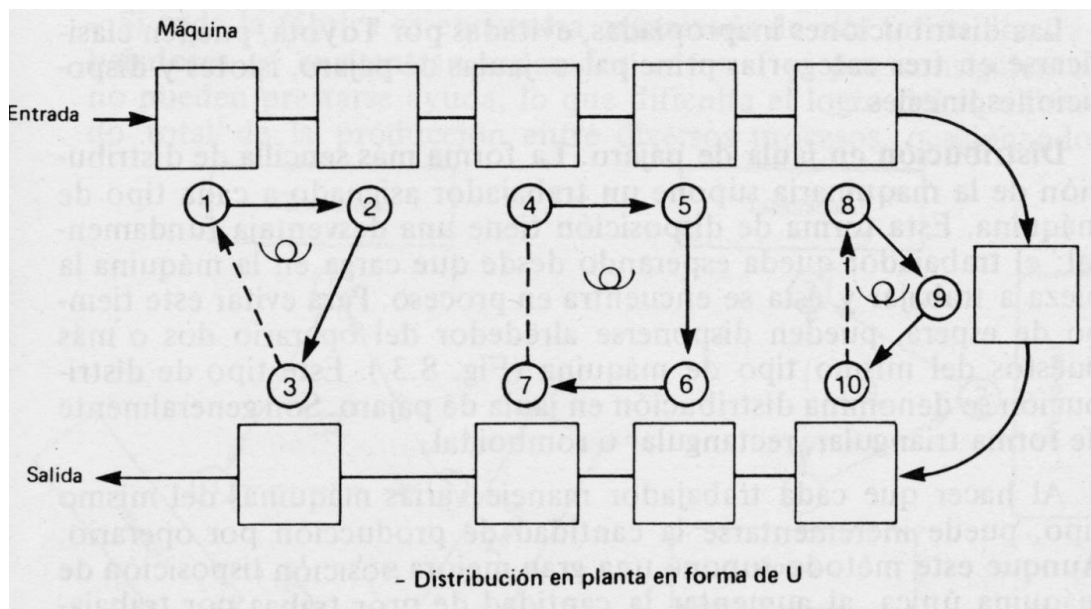


Figura 7. Ejemplo de distribución en forma de U de una célula de fabricación. (7)

## 2.6 Niveles ISA SP-95

Como base para afianzar una coherencia entre los elementos de este proyecto de automatización, durante el desarrollo del mismo, se va a aplicar la norma ISA SP-95, diseñada con el objetivo de crear un estándar utilizado como método de relación entre las empresas y su sistema de control.

La norma SP-95 divide a las actividades desarrolladas en una empresa en distintos niveles. Incluye 5 niveles, los cuales se describen a continuación (Drouiz, 2014)<sup>7</sup>:

- Nivel 0: Este nivel está formado por el proceso industrial en sí mismo, máquinas, personas... se trata de toda la parte física del sistema.
- Nivel 1: Se trata de la parte eléctrica y de control de la industria, es decir, aquella que interacciona con

la parte física a través de PLCs, sensores y actuadores.

- Nivel 2: Se compone de los elementos de interacción entre el sistema y los trabajadores. Entre ellos se encuentran los sistemas HMI, los cuales muestran información del sistema y posibilitan el control de partes del proceso, y los sistemas SCADA, aplicaciones computacionales a través de las cuales se puede observar el desarrollo del sistema en su totalidad, además de poder monitorizarlo. Los monitores HMI suelen estar asignados a máquinas concretas, mientras que el sistema SCADA suele encontrarse en salas de control general.
- Nivel 3: Se compone de una base de datos ofrecidos por los niveles anteriores (sensores, producción...), además de incluir un sistema de unión entre el marketing y contabilidad y la misma empresa, denominado MES. A través de esta unión se puede controlar la producción a partir de la demanda del mercado.
- Nivel 4: Es un nivel puramente centrado en el marketing y en el sistema económico de la empresa.



Figura 8. Niveles de jerarquía de los procesos industriales. (8)

## 2.7 Guía GEMMA

En un proceso de producción automatizado realista, el sistema no se encuentra en un funcionamiento automático continuo. También ocurren averías o paradas programadas para asegurar su correcto funcionamiento. El sistema a desarrollar requiere el mayor parecido posible con el verdadero funcionamiento, por lo que necesitamos que se cumplan estos criterios.

Para definir los distintos estados en los que puede encontrarse un sistema aparece la denominada guía GEMMA (“Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts” en francés, que significa “Guía de estudio de los modos de



marchas y paradas”). La guía GEMMA busca ser una forma gráfica y sencilla de mostrar los diferentes estados de marcha de una instalación, así como las condiciones para pasar de un estado a otro (Oriol Boix, 2015)<sup>8</sup>.

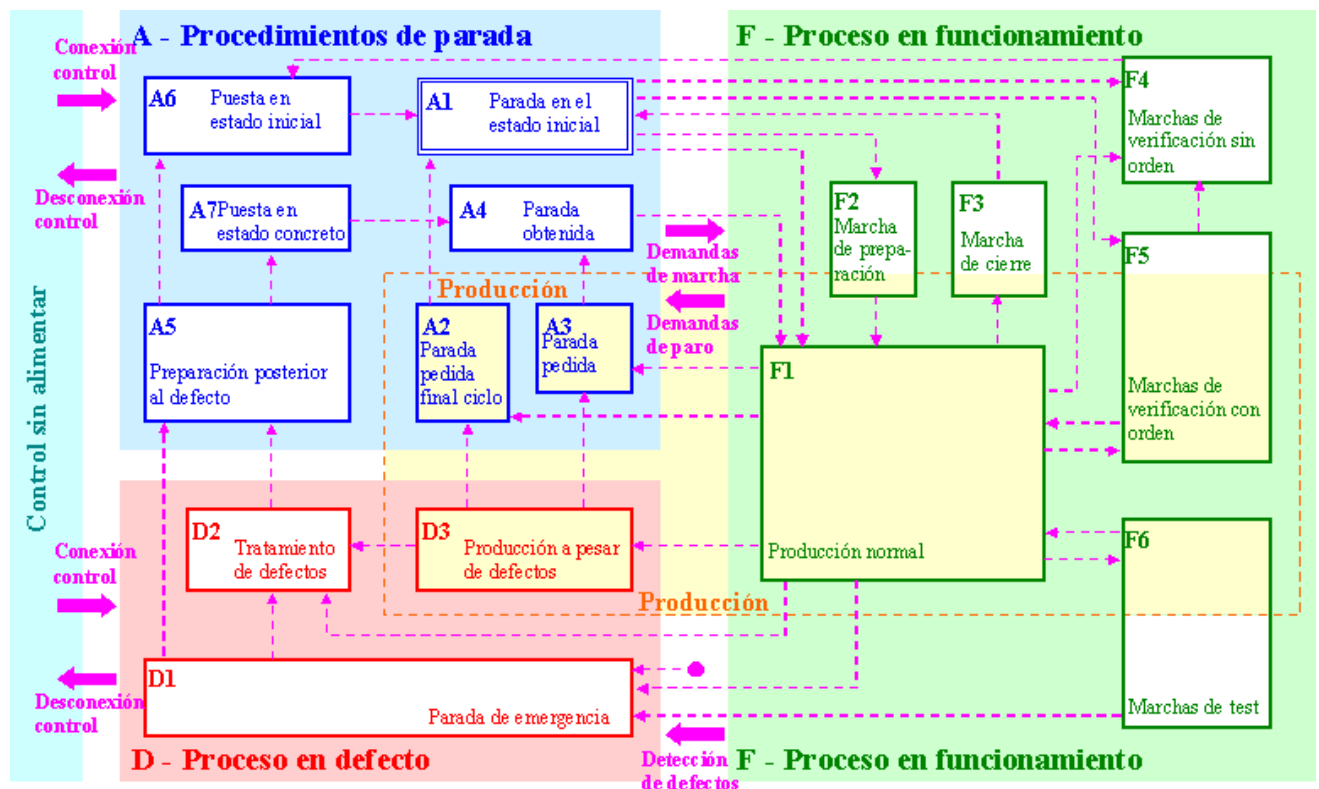


Figura 9. Diferentes modos de funcionamiento de un automatismo (Guía GEMMA) (9)

El diseñador estudiará los estados necesarios para cada sistema a desarrollar, además de la transición entre uno y otro.

## 2.8 Diseño de plantas Industriales

El desarrollo de la automatización en la industria, se ha visto acompañado de un aumento en la competitividad empresarial, al ser más accesible para todo el mundo. Actualmente vivimos en un mercado económico internacionalizado, lejos de la competencia local de hace algo más de un siglo. Esta rivalidad hace preciso un estudio previo eficaz en el diseño de la fabricación, con el objetivo de hacer frente a los competidores y aumentar los beneficios. Es así como nace la necesidad de diseñar previamente los modelos de fabricación e industrias.

El diseño de la industria es el proceso de pensamiento y desarrollo previo a la construcción o aceptación de la idea industrial (OBS Business School, 2015)<sup>9</sup>. Es decir, necesitamos prever en la manera de lo posible la evolución que tendrá la industria en el mercado, además de definir su funcionamiento y necesidades. El conjunto de todas las características económicas y técnicas se recoge en el proyecto industrial.

En esencia, los proyectos industriales son aquellos que reúnen todos los recursos necesarios para la transformación de una idea inicial en una industria. Se caracterizan por ser multidisciplinarios, integrales y complejos, y se compone de las siguientes partes (OBS Business School, 2015)<sup>9</sup>:

- Anteproyecto: Recoge los planteamientos iniciales y justifica las decisiones tomadas. Es un marco global del proyecto.
- Memoria del proyecto: Aquí encontramos la descripción principal de lo comentado anteriormente en el anteproyecto. Es la parte más gruesa del proyecto, donde se incluyen cálculos, descripción de actividades a seguir, planificación y programación...
- Planos: Deben ser completos, concisos y seguir siempre el mismo formato para evitar confusiones.
- Pliego de condiciones: Muestra cómo debe realizarse el proyecto. Las condiciones pueden ser materiales, económicas, legales...
- Presupuesto: Muestra el desembolso económico ideal u orientativo necesario para llevar a cabo el proyecto.

Esta última parte del proyecto tiene una importancia algo más orientada a la contratación y venta. El desarrollador expone a los distintos inversores la descripción del proyecto. Cuanto menor sea el desembolso que necesitan realizar para llevar a cabo la idea, más atractiva resultará para ellos. La disminución de los costes viene acompañada de un buen estudio y desarrollo. Cuanto mayor sea la implicación en el proyecto, mayor será la capacidad para reducir costes.

Sin embargo, aunque el concepto económico es algo necesario para la venta del proyecto, también es necesario ganarse la confianza de los compradores. Para ello se suelen utilizar distintas técnicas de exposición de proyectos, tanto numéricas como visuales.

## **2.9 Técnicas presentación de proyectos**

Como se viene comentando, a la hora de exponer un proyecto a los inversores, es necesario crear en ellos un buen impacto emocional y visual. Para ello, se suelen utilizar distintos tipos de técnicas, las cuales se desarrollan a continuación:

- Gráficas sobre datos simbólicos: Beneficios, costes económicos, programación de tiempos... Esta técnica hace que la exposición de simples datos o números sea mucho más visual, captando la atención de los compradores.



Figura 10. Exposición al público de datos mediante gráficas (10)

- Modelos tridimensionales: Con el desarrollo de las nuevas tecnologías, es posible utilizar herramientas de diseño tridimensional para apoyar los proyectos. Es mucho más sencillo, rápido y visual mostrar la futura idea mediante una de estas representaciones. Se puede realizar un modelo tridimensional basados en los planos del proyecto para ver de forma más detallada todo lo que contendría la futura fábrica. Existen gran cantidad de herramientas de diseño tridimensional en el mercado, como por ejemplo Fusion 360 o Catia.

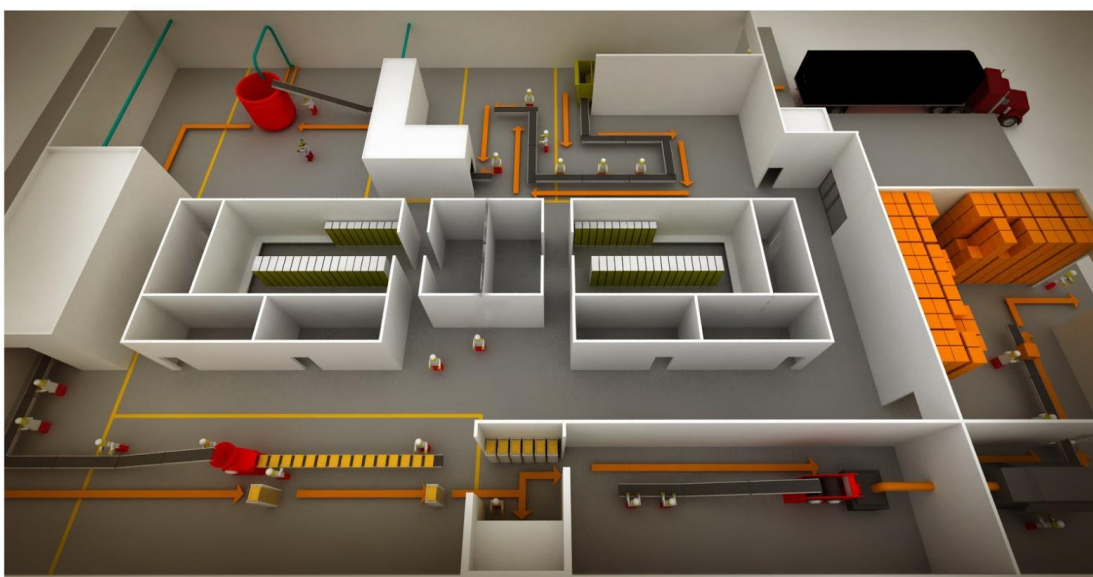


Figura 11. Modelo 3D en ordenador de una fábrica (11)

- Modelos físicos: La representación física y palpable de un proyecto es una buena forma de mostrar distintos detalles de estructuración de la futura fábrica. Por ejemplo, el uso de maquetas a escala hace posible una visualización más real de lo que se intenta proyectar, suponiendo un mayor atractivo al cliente. Las nuevas tecnologías han incluido en esta técnica la utilización de maquetas de impresión 3D, debido al bajo coste que estas suponen, al poco tiempo que se consume para realizarlas y al buen nivel de detalle que se puede obtener.

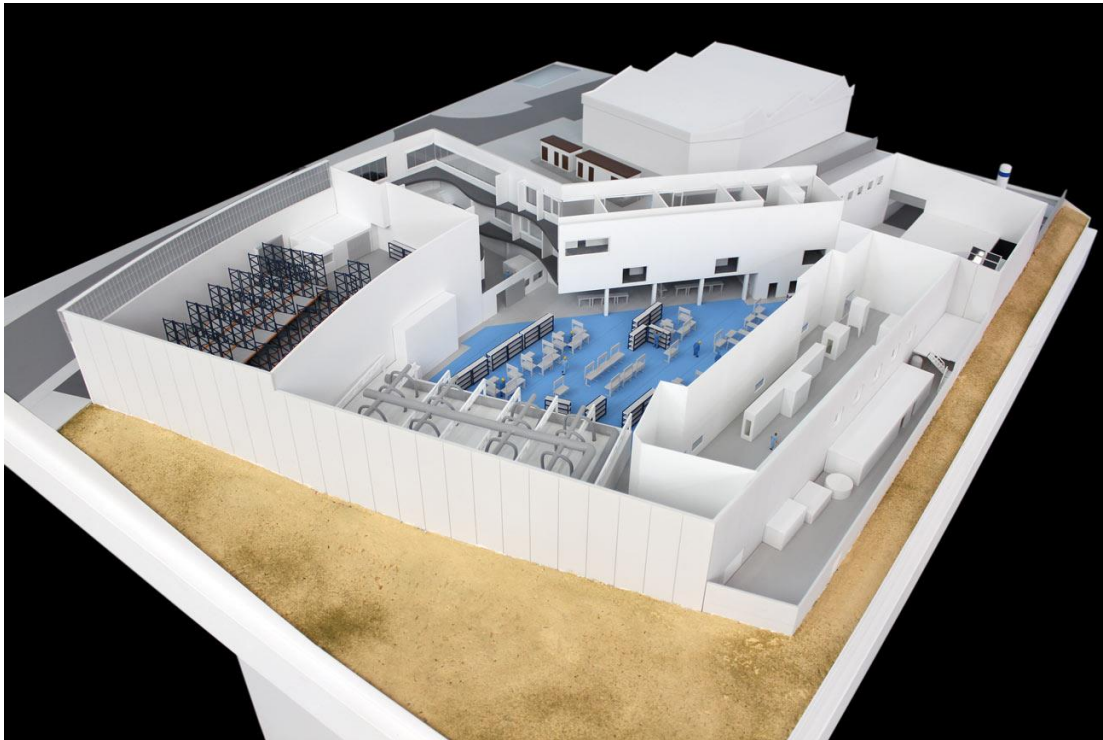


Figura 12. Maqueta 3D de una fábrica (12)

La exposición visual del proyecto produce una sensación de seguridad extra al inversor, debido a la capacidad de poder visualizar mediante las técnicas descritas la futura fábrica, los problemas que pueden surgir, la evolución gráfica de beneficios...

## 2.10 Problema propuesto

Aunque los tipos de exposición que se han comentado anteriormente suponen una mejor forma de visualización del proyecto, existen ciertas limitaciones en estas técnicas de presentación. Por ejemplo, en una maqueta se puede mostrar la disposición final de la fábrica de manera física, pero no es posible ver el funcionamiento y los movimientos de la misma en tiempo real. Por el contrario, en un diseño y simulación informática, podemos mostrar con facilidad como se desarrollarían las tareas en tiempo real en la fábrica, movimiento de las máquinas, personas... Pero no podemos ver una disposición física, evitando posibles problemas futuros de espacio, colocación...

Aquí es dónde se encuentra el problema a solucionar y de donde parte el proyecto, la necesidad de unir lo mejor de ambas exposiciones para así aumentar lo máximo posible la confianza del inversor.

El objetivo del proyecto será realizar pequeñas células de fabricación que, interconectas, formen un sistema de fabricación flexible. De esta forma, y con una automatización independiente para cada una de ellas, se puede mostrar de forma intuitiva el desarrollo de una futura fábrica.

Las características que serán necesarias para lograr los objetivos se muestran a continuación:

- Flexibilidad: Se necesita que el sistema sea lo más flexible posible, entendiendo por flexibilidad a la capacidad de adaptarse sin dificultades a distintas configuraciones. Es decir, el prototipo debe ser capaz de replicar a pequeña escala el mayor número de modelos productivos posibles.
- Independencia entre células: La independencia de funcionamiento entre células está directamente ligada a la característica anterior (flexibilidad). Al tener unidades autónomas, pueden trabajar sin necesidad de un orden sistemático entre ellas. De esta forma, se pueden utilizar el número de unidades que se desee sin cambio alguno, además de modificar el orden de colocación.
- Capacidad de interconexión entre ellas: Aunque sean independientes, para poder lograr un conjunto se necesitará que las células de fabricación sean complementarias entre sí. Es decir, una unidad debe ser capaz de compartir información tanto física como lógica con otra de ellas.
- Bajo coste: Al tratarse de un modelo pensado únicamente para la exposición, el coste del mismo no debe ser elevado.
- Bajo peso: Debe ser un sistema formado por materiales ligeros, ya que deberá ser capaz de transportarse con facilidad para realizar exposiciones en distintos lugares.
- Modos de funcionamiento: Al tratar de asemejar el sistema modelo a un sistema de fabricación flexible real, este deberá ser capaz de replicar los distintos estados en los que puede encontrarse un sistema productivo (los cuales se describieron anteriormente en la introducción a la Guía GEMMMA).
- Sencillo de utilizar por todo el mundo a través de una interfaz: Debe de ser posible el control del sistema por personas ajenas a su desarrollo. Para ello se hará uso de interfaces de usuario, a través de la cual se podrá controlar el sistema de forma sencilla.



## 3 MATERIALES NECESARIOS

---

**E**n este capítulo, se describirán los materiales que se utilizarán en el desarrollo del proyecto. Se aclarará a nivel físico y computacional todo lo necesario y utilizado en el mismo. La combinación de las dos características anteriores hace posible el desarrollo de células de fabricación autónomas, siendo visuales físicamente y a nivel operacional. Se buscará realizar una pequeña fábrica con materiales del pack LEGO Mindstorm, el cual incluye tanto las piezas como una CPU y sensores. Todo ello será controlado mediante una interfaz de usuario realizada en Visual Studio, recreando así el funcionamiento de una zona de producción real.

En este capítulo se desarrollará todo lo empleado en el proyecto y su porqué. El desarrollo tendrá lugar sistemáticamente a través de los niveles 0, 1 y 2 del sistema ISA SP-95.

### 3.1 Elementos estructurales. Nivel 0 ISA SP-95

La parte estructural de cualquier proyecto es la que necesita un mayor desembolso inicial. Para mostrar un buen funcionamiento cinemático, se necesita un diseño estructural capaz de sustentar el sistema. Sin embargo, al tratarse del desarrollo de un prototipo únicamente orientado a la visualización, es necesario que el coste estructural sea bajo. Como solución a este problema, se ha optado por la utilización de piezas del pack LEGO Mindstorm. Su utilización ofrece una gran flexibilidad en el diseño. Algunas de las características que posee y por las que se ha decidido utilizar son:

- Gran diversidad de piezas
- Peso bastante reducido, haciendo el sistema ligero y transportable, características necesarias para realizar presentaciones en distintos lugares.
- Sencillez de utilización.
- Precio reducido por unidad.

- Accesible para todo el mundo.



Figura 13. Piezas estructurales pertenecientes a LEGO Mindstorm. (13)

Es correcto resaltar que, además de la utilización de elementos de LEGO Mindstorm, se han usado en pequeños lugares otros elementos de apoyo accesibles a todo el mundo, como puede ser cartulina para las cintas, cinta aislante...

### 3.2 Actuadores, sensores y CPU. Nivel 1 ISA SP-95

Para permitir la transferencia de datos desde el plano físico al computacional, se necesitan sensores y actuadores. Los sensores facilitarán información sobre el estado actual del sistema, la cual se procesará y será enviada a los actuadores para que desarrollen una u otra función.

El paquete de LEGO Mindstorm incluye gran cantidad de componentes para estas funciones. Existe gran variedad de sensores, dependiendo del uso que se necesite (luz, ultrasonido, contacto y sonido) y varios servomotores para dar respuesta al sistema.



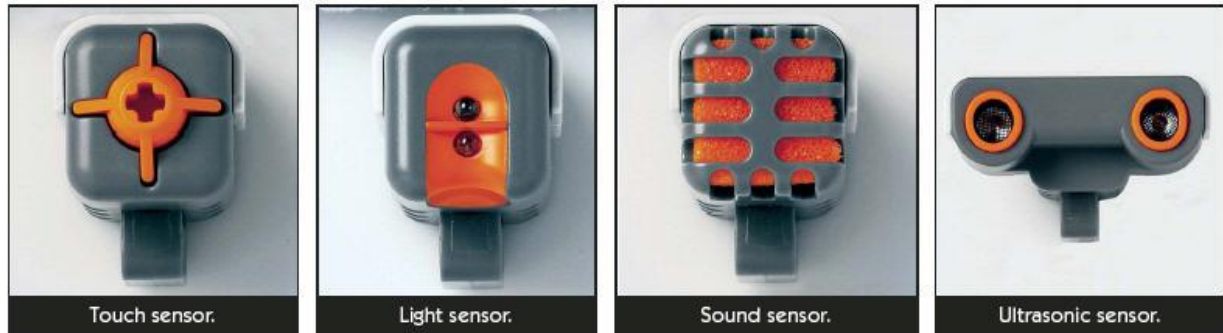


Figura 14. Distintos sensores de LEGO Mindstorm. (14)



Figura 15. Detalle de un servomotor LEGO Mindstorm. (15)

Una vez comentados los elementos de las células, se pasará a comentar la forma en la que se realizará el control. Necesitamos un sistema intermedio a través del cual recibir información en la computadora principal y a la vez lanzar respuestas hacia el sistema. Además, como en todo el proyecto, se está buscando minimizar el coste, tamaño y peso.

La solución propuesta será utilizar el kit de controladoras pertenecientes a LEGO Mindstorm NXT. Se trata de una CPU elaborada por la misma industria LEGO para controlar pequeñas unidades fabricadas, con capacidad para ejecutar programas de diferente complejidad. Cuenta con un microprocesador Atmel ARM7 de 32 bits a 48 MHz, bastante utilizado en electrónica de consumo. Además, cuenta con un coprocesador Atmel AVR de 8 bits, una memoria Flash de 256 kb y una memoria RAM de 64 KB (Isidoro Calvo, 2010)<sup>10</sup>.



Figura 16. Controladora Lego NXT. (16)

Como se observa en la figura 16, cuenta con 4 entradas para sensores y 3 salidas para actuadores, ambos del tipo RJ12, un pequeño altavoz y una pantalla LCD donde se puede navegar a través de varios menús. Los programas pueden ser cargados en su firmware haciendo uso del software del fabricante o puede recibir órdenes en tiempo real usando la red inalámbrica Bluetooth y un software propio de código abierto. Para este proyecto se ha utilizado la segunda opción, al querer utilizar una interfaz de control en tiempo real para dirigir al sistema, todo ello desde un ordenador principal y utilizando la controladora NXT como RTU (unidad de terminal remota), obteniendo las señales de usuarios y enviándolas remotamente.

### 3.3 Interfaz y lenguaje de programación. Nivel 2 ISA SP-95

Además de todo lo anterior, necesitamos un espacio donde realizar el código de funcionamiento de las distintas células de fabricación, el cual, junto con los datos de entrada, realizará una orden de salida para los servomotores.

El desarrollo del código principal se realizará en Visual Studio (basado en el lenguaje de programación C#, orientado a objetos), plataforma que utilizaremos para la creación del código en su versión de 2017. Además de poder desarrollar la codificación, Visual Studio nos ofrece la posibilidad de realizar interfaces gráficas con las que el usuario puede interactuar sin necesidad de modificar el código. Esta cualidad cumple uno de los grandes objetivos del proyecto, siendo accesible y manipulable para todo el mundo, sin necesidad de entender cómo opera el sistema a nivel lógico. En la figura 17 se muestra las distintas partes que utilizaremos en el programa.

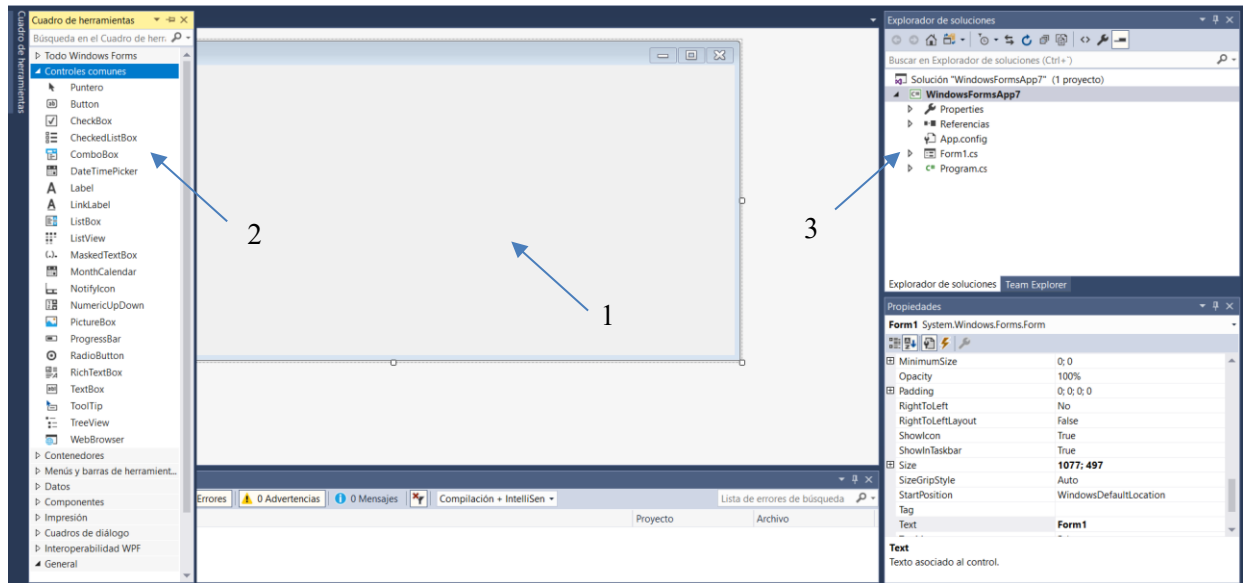


Figura 17. Pantalla principal de Visual Studio

En la zona señalada por “1” es donde se realizará la interfaz gráfica. Visual Studio cuenta con una forma fácil de añadir distintas funcionalidades en la interfaz, tales como botones, introducción de texto o selectores de opciones. Este menú se encuentra señalado por el número “2”. Cada vez que colocamos una funcionalidad en la interfaz de usuario, se crea su semejante en el código de dicha interfaz. Así, se relacionará las variables introducidas en el código con las acciones realizadas en la botonera. Para poder pasar a visualizar el programa principal y las distintas interfaces existe un menú de exploración, señalado en la imagen con el número “3”. El desarrollo principal se realizará en un apartado distinto al código de las interfaces, el cual se centrará en llamar y generar datos del programa principal.

### 3.4 Elementos auxiliares

Cabe destacar que, para simular el material que circularía por el sistema de producción, se han utilizado pequeños cubos impresos en 3D. Se ha decidido utilizar este material al ser bastante ligero y barato.

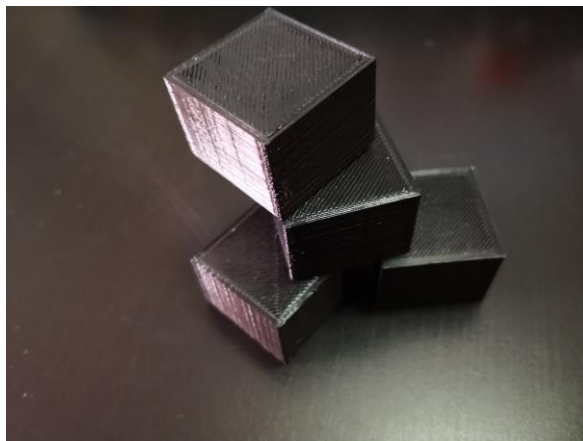


Figura 18. Material a procesar realizado por impresión 3D



## 4 PROPUESTA DE PROYECTO

---

El proyecto, como se ha comentado, constará de la fabricación de varias células flexibles independientes, con la capacidad de compartir información entre ellas, además de ser posible su conexión. En este subapartado se justificará el diseño inicial de las distintas células de fabricación, cuales necesitamos y el planteamiento general del proyecto. Para ello, se iniciará con la arquitectura de control que deseamos, siguiendo con los elementos utilizados para ese control y como lo implementarlos en un sistema físico y dinámico, siguiendo de esta forma el nivel 2, 1 y 0 del estándar ISA SP-95 respectivamente.

### 4.1 Monitorización. Arquitectura de control (nivel 2 de ISA SP-95)

Para el control total, será necesario idear un sistema de comunicación y monitorización sencillo e intuitivo para el operador. Este desarrollo se propone en dos partes, una basada en una interfaz general tipo SCADA que controle el sistema completo y otras interfaces de monitorización individuales para cada célula de fabricación del tipo HMI. Tanto una como otra se ha desarrollado en su totalidad en Visual Studio 2017.

- Interfaz para el control centralizado del sistema (tipo SCADA): Se basará en una interfaz inicial de bienvenida al operador a la monitorización. En ella se especificarán características generales del sistema, tales como el número de unidades a utilizar, y devolverá una interfaz HMI para cada una de las células demandadas. Además, dispondrá de la capacidad de realizar en tiempo real un control en los modos de funcionamiento descritos por la Guía GEMMA, afectando a todas las unidades (paradas, rearme, testeo...). El proceso descrito se puede observar gráficamente en la figura 19.
- Interfaces asociadas a cada célula (tipo HMI): Para aumentar la versatilidad entre unidades, se crearán interfaces de introducción de datos para cada una de las unidades de forma individual. Como se ha comentado, la visualización de estas será lanzada por el sistema SCADA descrito anteriormente. En ellas se podrán ajustar parámetros básicos para cada una de las unidades, tales como velocidad de cinta, sentido de giro... Algunos de estos parámetros podrán modificarse en tiempo real.

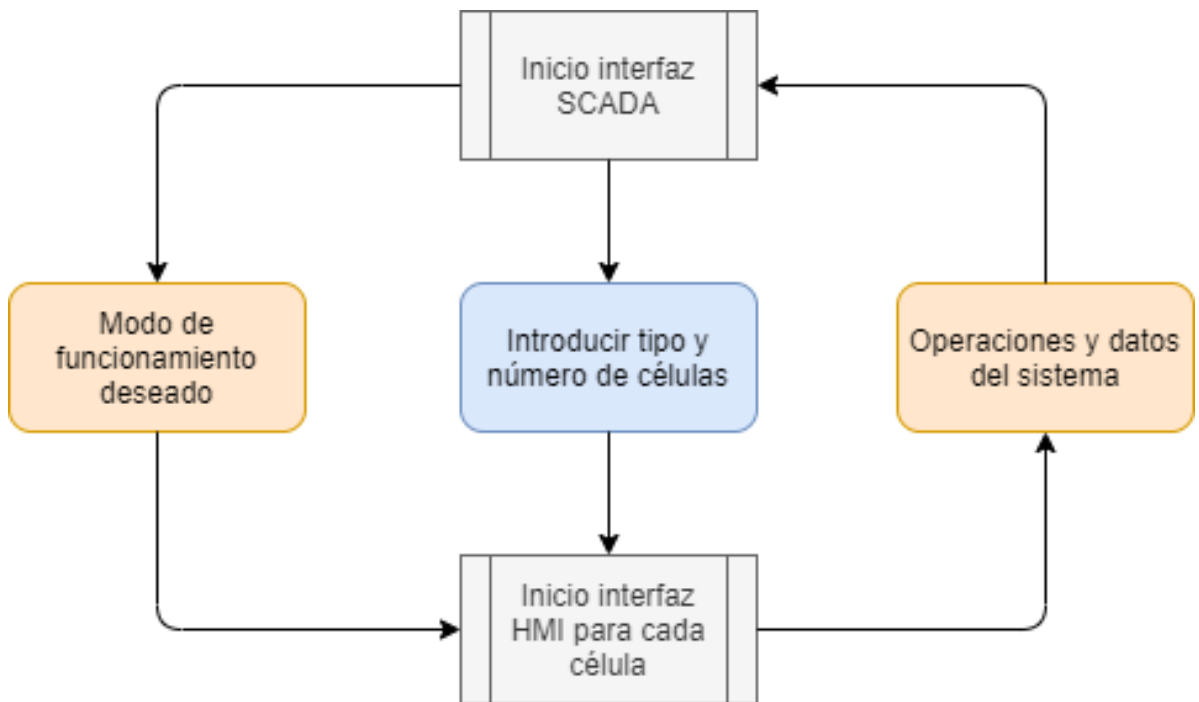


Figura 19. Estructura propuesta de monitorización.

#### 4.2 Elementos de control. Sensores, actuadores y CPU (nivel 1 de ISA SP-95)

Como se habló anteriormente, el sistema estará formado por elementos de control contenidos en el pack LEGO Minstorm. La controladora NXT servirá a modo de RTU como lazo de unión Bluetooth entre el sistema y la monitorización del mismo en el ordenador. Para otorgar movimiento al sistema se utilizarán los servomotores del mismo pack, siendo estos bastante versátiles en cuanto a colocación.

Finalmente, la elección del tipo de sensor decidirá más adelante, cuando se realicen las pruebas oportunas para elegirlo correctamente.

#### 4.3 Implementación en el sistema. Estructura y tipos de célula (nivel 0 de ISA SP-95)

Conforme a la definición descrita en el punto 2.5, una célula de fabricación basa su funcionamiento en el transporte del material a través de distintas zonas de proceso donde se realizan cambios en el producto. Por tanto, de la propia definición se obtiene que una célula de fabricación debe contener un medio de transporte interno y zonas de aplicación de procesos.

El primer diseño, por tanto, debería ser una pequeña cinta transportadora con una zona designada para el procesado en ella. Esta primera unidad recibirá el nombre de “estación de procesado”. Los elementos de control necesarios para esta unidad son los siguientes:

- Un sensor para detectar cuando el material se encuentra en el lugar designado para realizar la operación.

- Un servomotor para realizar el movimiento de la cinta.

Este diseño cumple con las funciones principales del modelo de fabricación. Sin embargo, posee una limitación en cuanto a cambio en la dirección de transporte. Únicamente se podrían unir células de fabricación lineales creando una cadena en una única dirección. Para solventar este problema, se introduce el segundo tipo de célula, de carácter únicamente transportador (no existe simulación de procesado en ella). En este caso, existirán dos salidas, una en línea recta y otra perpendicular a la cinta, a la cual se tendrá acceso a través de un empujador perteneciente a la misma cinta.

Por tanto, la célula de fabricación a desarrollar será de este tipo, la cual se nombrará a partir de ahora como célula del tipo “separador”. Los elementos de control necesarios para esta unidad son los siguientes:

- Un sensor de luz para detectar cuando el material se encuentra en el lugar designado para accionar el empujador.
- Un servomotor para realizar el movimiento de la cinta.
- Un servomotor que actúe como empujador, mandando el material en otra dirección.

Algunas de las características que deben tener las unidades de fabricación son:

- Deben ser compactas para no ocupar espacio innecesario.
- Deben tener un peso reducido.
- Las entradas y salidas de las cintas deben ser admisibles entre sí, es decir, se debe poder colocar cualquiera de las dos unidades a la salida o entrada de otra. Es una condición bastante importante, ya que con ella se aumenta en gran medida la flexibilidad del sistema frente a presentaciones de distintas empresas o fábricas.

#### **4.4 Conclusiones y limitaciones**

Como resultado del desarrollo de la idea se tiene lo siguiente:

- Realización de dos tipos de células de fabricación, una para producir un cambio en la dirección de transporte y otra para simular un proceso, ambas con capacidad de interconexión entre sí.
- Utilización de sensores de luz y servomotores en dichas unidades.
- Cada célula será controlada por una unidad de control propia.
- La interfaz debe ser sencilla, capaz de ser utilizada por todo el mundo.

El objetivo final del proyecto es cumplir con todas las características antes descritas. Sin embargo, al tratarse de un proyecto de diseño y construcción, y al ser este de carácter académico, tendremos ciertas limitaciones en este campo que restringirán el número de células de fabricación. Por ejemplo, aunque contamos con piezas de construcción suficientes, las unidades de controladoras NXT y de sensores de luz son limitadas. En concreto, contamos únicamente con 4 sensores y 4 controladoras. Debido a la necesidad de cumplir la característica de flexibilidad de las unidades (solo usar una controladora por célula) y a la utilización de al menos un sensor en cada una de ellas, el número de estaciones se limita a 4.

Al tratarse de un proyecto de carácter visual, se ha decidido realizar 3 unidades de estaciones de procesado y 1 unidad de separación. Esta limitación será solo a nivel físico. La programación estará orientada al control de un número indefinido de unidades, siendo lo más escalable posible.

Cabe destacar que los procesos de las estaciones de procesado serán simulados al carecer de inversión económica, aunque la programación estará orientada a la utilización de máquinas reales. Por tanto, tras varios ajustes, se podrían sustituir por trabajos de procesos reales.

En el apartado siguiente se dará lugar a la descripción completa del proyecto, mostrando la evolución que ha seguido el mismo durante su desarrollo.



## 5 APLICACIÓN DEL MÉTODO

---

Una vez se ha introducido el problema al que nos enfrentamos y el desarrollo de la idea para solucionar dicho problema, pasamos a la explicación paso a paso del proyecto. En este apartado se desarrollará exhaustivamente todo lo realizado en el proyecto, además de las distintas iteraciones que se han llevado a cabo, concluyendo con el sistema final a presentar, todo ello respaldado por imágenes tomadas durante el desarrollo. Cada una de las decisiones que se han tomado estarán respaldadas por distintas pruebas descritas en el sexto capítulo.

### 5.1 Conexión Bluetooth entre la controladora y el ordenador

Uno de los pasos más importantes en la elaboración del proyecto era conseguir establecer un vínculo vía Bluetooth con las controladoras. Tras varias investigaciones sobre su funcionamiento, se comenzó a realizar las primeras funcionalidades Bluetooth utilizando como base un software creado por <http://www.aforgenet.com/framework/samples/robotics.html>, el cual facilitaba una interfaz de Visual Studio con la cual se podía probar el funcionamiento de distintos sensores y servomotores.

Este primer software contiene las bases lógicas utilizadas en el funcionamiento Bluetooth de las controladoras. Cabe decir que, a estas alturas de proyecto, solo se utiliza una única controladora. El escalado y control de más controladoras se desarrollará más adelante, en el apartado 5.6.

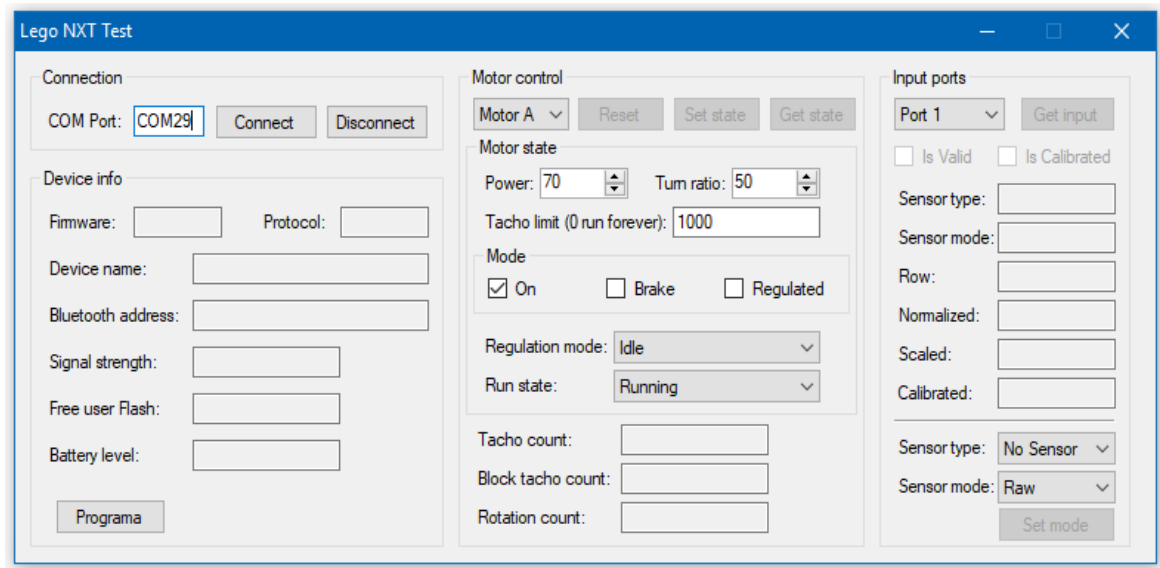


Figura 20. Interfaz inicial para probar la conexión bluetooth

En el apartado de “Connection” de la figura 20 se introduciría el puerto Bluetooth del ordenador al que se ha conectado la controladora NXT. El botón “Connect” contiene toda la codificación y librerías necesarias para realizar esta función. Una vez comunicada con el sistema, mediante el apartado de “Motor control” se puede realizar distintas pruebas en el giro del motor, variando la potencia y el sentido, mientras que en el apartado “input ports” se introduciría el tipo de sensor a utilizar, devolviendo los valores de dicho sensor. Con esta interfaz únicamente se podía realizar pruebas aisladas, sin relacionar directamente el motor con el sensor.

## 5.2 Elección del sensor

Tras unas primeras pruebas de toma de contacto con la interfaz anterior (prueba 6.1) se concluyó que el sensor más indicado para el proyecto es el sensor tipo láser del pack LEGO Mindstorm. En esa misma prueba se estipula la necesidad de introducir un umbral para controlar el sensor, añadiéndolo desde la interfaz de usuario y evitando así problemas con la luminosidad ambiente.



Figura 21. Sensor de luz lego mindstorm. (17)

Una vez controlada la conexión entre sensores y actuadores, se pasará al desarrollo físico y estructural de las unidades, creando un sistema dónde puedan suceder las funciones productivas de la forma más estable posible.

### **5.3 Desarrollo de una cinta transportadora**

Como se ha venido viendo, ambas células comparten entre sí un sistema de transporte basado en cintas, el cual permitirá realizar el desplazamiento del material a través de la unidad. Por tanto, en primer lugar, hay que centrarse en el diseño de una cinta general.

La cinta transportadora propuesta quedaría de la siguiente forma:

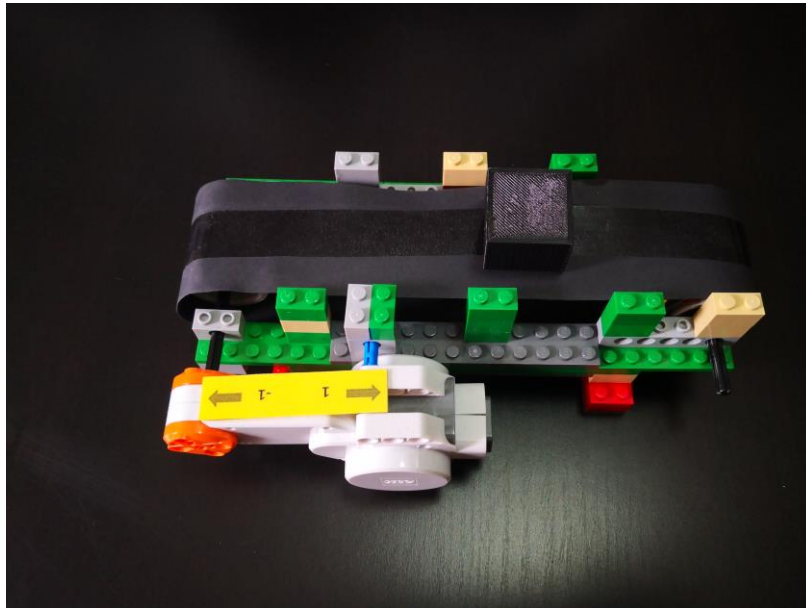


Figura 22. Cinta transportadora inicial, vista 1.

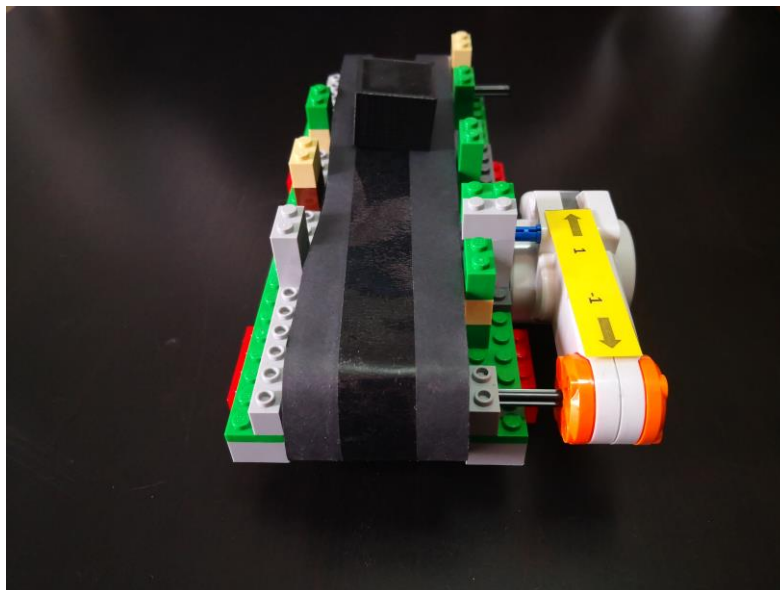


Figura 23. Cinta transportadora inicial, vista 2.

Al contar con material suficiente en la construcción, se pudo desarrollar sin contratiempos.

Para realizar la cinta en sí, se probaron diferentes materiales, aunque el que mejor se adaptó fue la cartulina, al tener una rugosidad y estabilidad suficientes para soportar el movimiento del motor y el peso del material a procesar. El motor que accionará la cinta se colocará en uno de los extremos de la misma. El desarrollo de las pruebas de validación seguidas en el diseño de la cinta se describe de mejor forma en la prueba 6.2.

Esta primera cinta transportadora servirá como estructura base para la realización de los dos tipos de célula propuestas, añadiendo distintas modificaciones para cada una de ellas.

## 5.4 Desarrollo de la estación de procesado

### 5.4.1 Construcción

En primer lugar, se realizaron las modificaciones oportunas para crear estaciones de procesado. Partiendo de la cinta transportadora inicial, únicamente habría que añadir un sensor en la unidad. En la figura 24 y 25 se muestra el resultado final de la unidad, añadiendo una zona que simulará el procesamiento de la pieza.

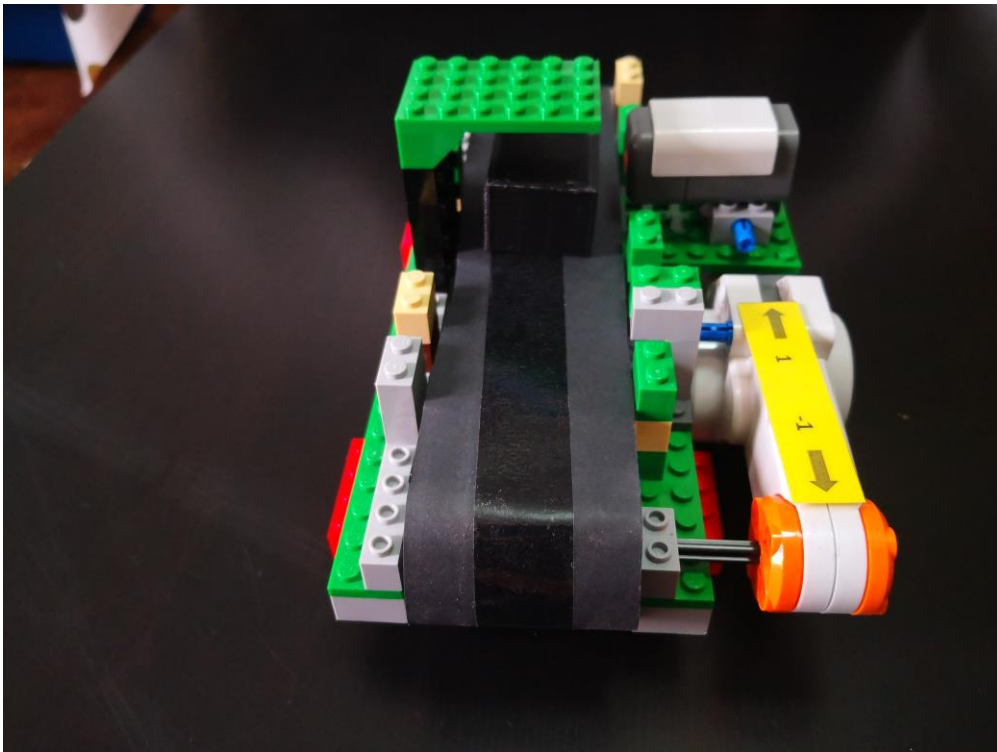


Figura 24. Diseño de la estación de procesado, vista 1.

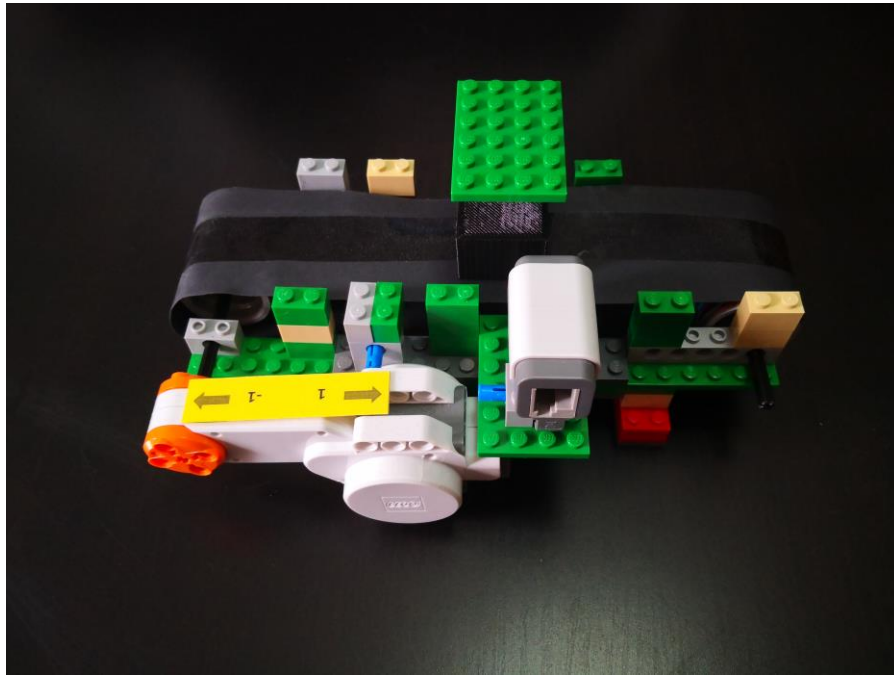


Figura 25. Diseño de la estación de procesado, vista 2.

Cabe destacar que la estación debe ser capaz de incorporar en ambos extremos a otras unidades.

#### 5.4.2 Programación

La estación de procesado trabajará acorde a las siguientes características:

- La cinta debe estar activada en todo momento, solo se detendrá en el momento que detecte un objeto en la zona de procesado.
- El objeto debe detenerse cierto tiempo en la zona de procesado, simulando así de una forma más fiel el proceso.
- Debe ser funcional en ambos sentidos, es decir, independientemente del sentido en el que conectemos la unidad, debe funcionar de la misma manera.
- Algunas variables deben poder ser introducidas y modificadas sin necesidad de acceder al código, como, por ejemplo, el sentido de giro o la velocidad de la cinta.

La forma de aplicar en este caso es diferente. Si utilizáramos el sensor de la misma forma, al detectar el material detendría el sistema, y tras el tiempo de procesado, al ponerse en marcha el sensor seguiría teniendo un valor superior al umbral, por lo que volvería a detener la cinta. Como solución se ha utilizado un flanco de subida. Creando una variable que tome el valor anterior del sensor al estudiado en ese instante, se puede realizar la siguiente premisa:

“El sensor solo detendrá la cinta en el caso que devuelva un valor superior al umbral y, a su vez, el valor anterior de estudio sea inferior al umbral”.

De esta forma solo se detendrá una vez, volviendo al inicio cuando el objeto abandone la zona de procesado. En la figura 26 se muestra la parte del código que realizará esta acción, dónde en “1” se realiza la condición de parada con lo explicado anteriormente, en “2” se produce el paro de la cinta, en “3” el sistema cuenta el tiempo que debe parar, en “4” se vuelve a poner en funcionamiento la cinta y en “5” se actualiza el valor de la variable “valor anterior del sensor”.

```

if (nxt_estacion1.GetSensorValue(SensorEscogido(), out Valorsensor1_estacion1)
    && Valorsensor1_estacion1.Scaled > Globales.umbral_fijado_estacion1 ← 1
    && Valorsensor1_ant_estacion1 < Globales.umbral_fijado_estacion1)
{
    System.Threading.Thread.Sleep(10); //espera de 0,5s

    // Paramos la Cinta
    EstadomotorA_estacion1.Power = 0; ← 2
    EstadomotorA_estacion1.TurnRatio = 0;

    EstadomotorA_estacion1.Mode = NXTBrick.MotorMode.On;
    EstadomotorA_estacion1.Regulation = NXTBrick.MotorRegulationMode.Idle;
    EstadomotorA_estacion1.RunState = NXTBrick.MotorRunState.Running;

    if (nxt_estacion1.SetMotorState(NXTBrick.Motor.A, EstadomotorA_estacion1, false) != true)
    {
        System.Diagnostics.Debug.WriteLine("Failed setting motor state");
    }

    System.Threading.Thread.Sleep(3500); ← 3
    // Espera de un segundo y medio antes de poner en marcha

    // Ponemos la cinta en marcha
    EstadomotorA_estacion1.Power = potencia_cinta2; ← 4
    EstadomotorA_estacion1.TurnRatio = potencia_cinta2;

    EstadomotorA_estacion1.Mode = NXTBrick.MotorMode.On;
    EstadomotorA_estacion1.Regulation = NXTBrick.MotorRegulationMode.Idle;
    EstadomotorA_estacion1.RunState = NXTBrick.MotorRunState.Running;

    if (nxt_estacion1.SetMotorState(NXTBrick.Motor.A, EstadomotorA_estacion1, false) != true)
    {
        System.Diagnostics.Debug.WriteLine("Failed setting motor state");
    }
}

Valorsensor1_ant_estacion1 = Valorsensor1_estacion1.Scaled; ← 5
//Se actualiza el valor anterior al instante actual

```

Figura 26. Fragmento del código de control de la estación de procesado.

El funcionamiento principal de la cinta de procesado se basa en dicha función. Las pruebas realizadas tanto en el ámbito físico como en el control se describen de forma más extensa en la prueba 6.4.

### 5.4.3 HMI estación de procesado

Para permitir al usuario interactuar con el sistema, se ha creado una interfaz de fácil utilización para la estación de procesado. Dicha interfaz se muestra en la figura 27.

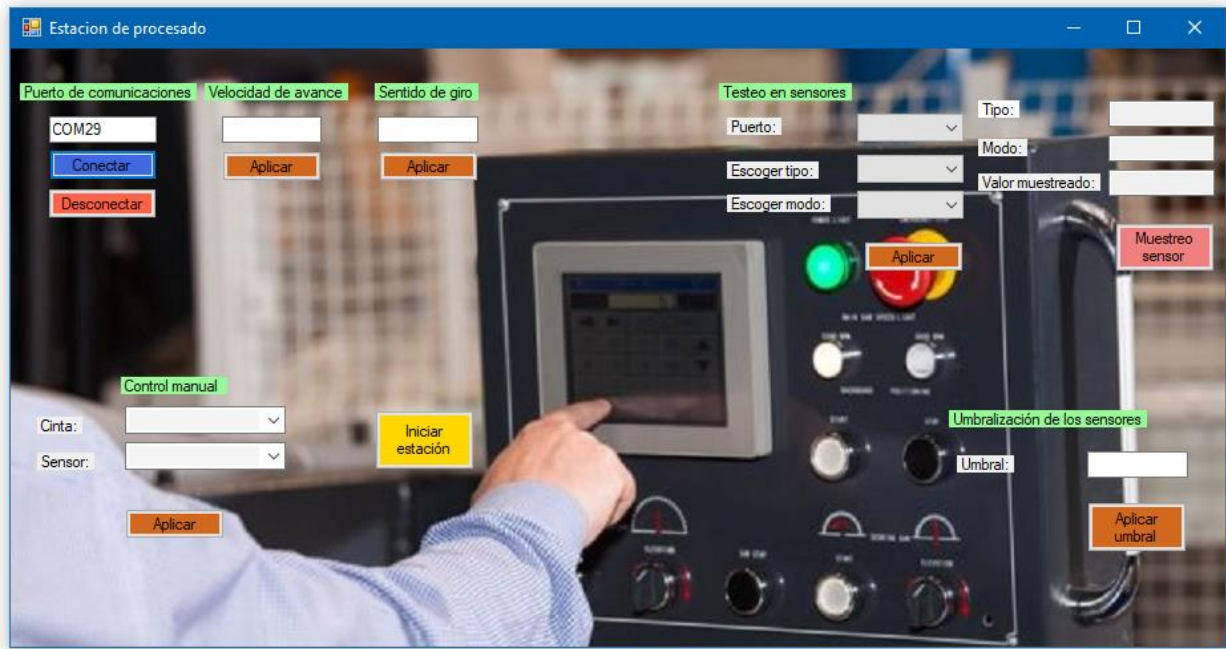


Figura 27. Interfaz hombre-máquina de la estación de procesado.

Los datos a introducir son los siguientes:

- Puerto de comunicaciones: Puerto Bluetooth a través del cual el ordenador se conecta con la controladora.
- Velocidad de avance: Velocidad que llevará la cinta. Se recomiendan valores comprendidos entre 75 y 100.
- Sentido de giro: Sentido de giro de la cinta. Introduciendo “-1” girará hacia un lado y con “1” hacia el otro.
- Control manual: Ofrece la capacidad de encender y apagar los sensores y cintas para probar de antemano si su funcionamiento es correcto.
- Testeo de sensores: Se escogerá el puerto en el que tenemos conectado el sensor, el tipo de sensor y el modo de medida. Tras esto, mediante el botón de “muestreo sensor” se muestra el valor que envía el sensor en ese instante (puede variar dependiendo de la luminosidad de la sala, como ya se comentó anteriormente).
- Umbral: Una vez que se conoce el valor del sensor en la sala, se introduce un valor de umbral



correspondiente a este. Este valor de umbral será el límite a partir del cual el sensor considerará que un material está atravesando su zona.

- Iniciar estación: Finalmente, al introducir todos los valores y presionar “iniciar estación” se cargan todos en la controladora, quedando la estación lista para su funcionamiento.

## 5.5 Desarrollo del separador

### 5.5.1 Construcción

De la misma forma que con las estaciones de procesado, se partió de la cinta transportadora inicial. En este caso, además de añadir un sensor de luz a la unidad, habría que añadir un servomotor extra que se ocupe de modificar la dirección de los materiales.

El separador se puede realizar de dos formas:

- Mediante un sistema de empuje, el cual desplace el material en dirección perpendicular al desplazamiento que lleve la cinta en ese momento.

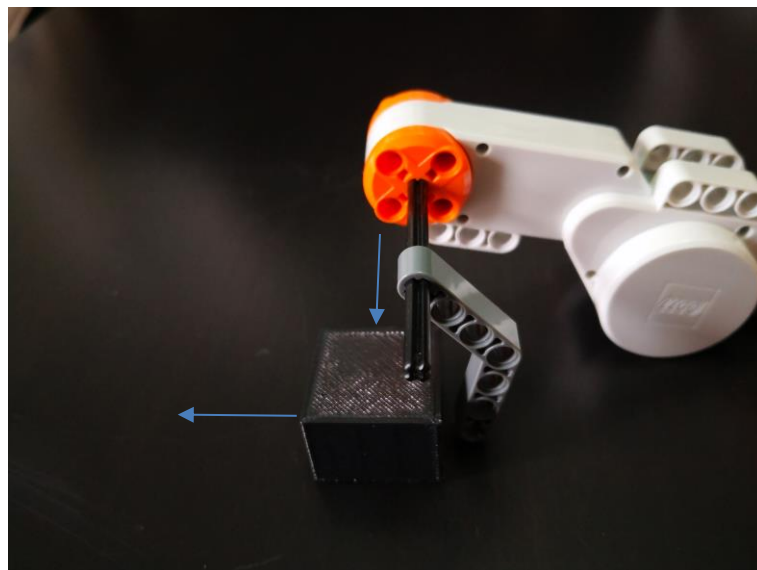


Figura 28. Detalle de sistema de empuje para separador.

- Mediante un sistema de orientación, el cual, sin detener la cinta en la que se encuentre el material, variará la dirección en el que este se desplaza con cierto ángulo, hasta que se introduzca en la nueva cinta.

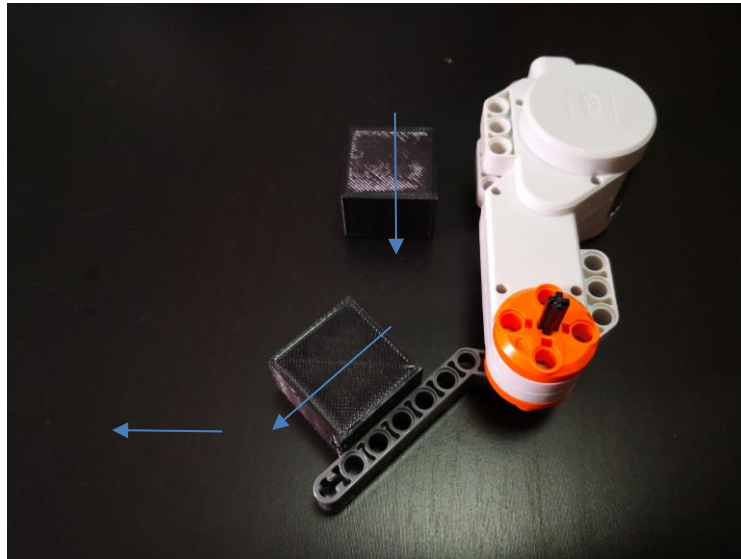


Figura 29. Detalle de sistema de orientación para separador.

En este proyecto se decidió elegir el sistema de empuje como actividad del separador, ya que, al ser su colocación vertical, el espacio que necesita es menor, pudiendo realizar una cinta más compacta. En la figura 30 se muestra el diseño inicial de separador.

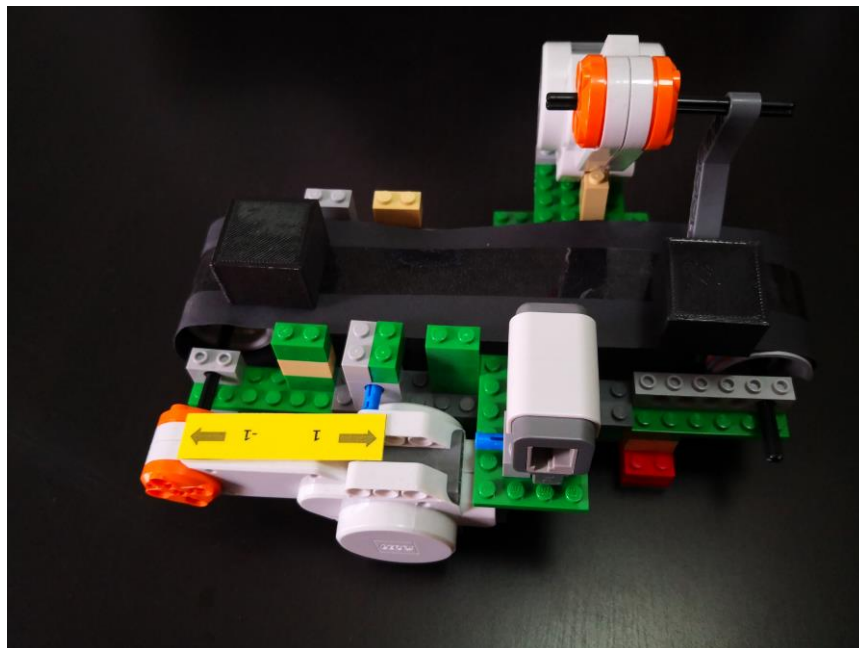


Figura 30. Diseño del primer separador

Aunque este primer diseño cumplía con las necesidades que cabrían esperar del separador, su desempeño era únicamente realizado en un sentido de giro, al colocar el sensor en un punto distinto que el mismo separador. Como solución a este problema se propone realizar una simetría en la cinta respecto al sensor, controlando dos separadores, aunque esto suponga la creación de una unidad de mayor longitud.

Cabe destacar que en esta unidad existen 4 salidas (en la estación de procesado solo existen 2 salidas). Habrá que ajustar la zona en la que se produce el empuje para ser capaz de incorporar nuevas unidades en esta zona. El diseño final del separador se muestra en la figura 31 y 32.

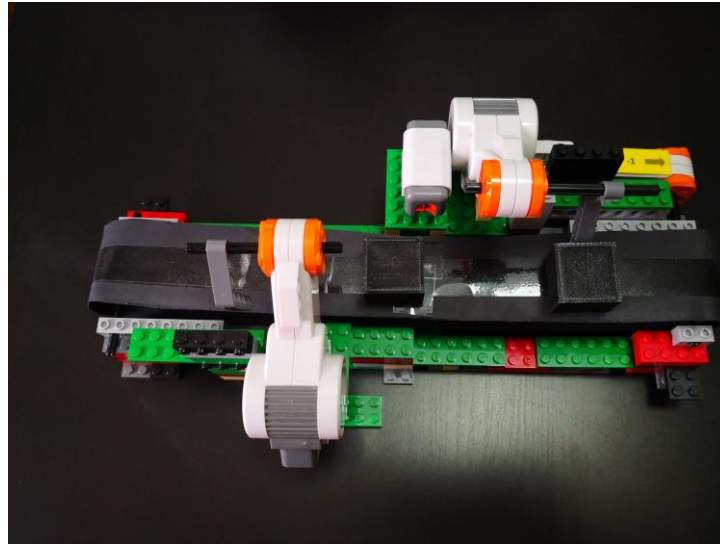


Figura 31. Diseño final del separador, vista 1.

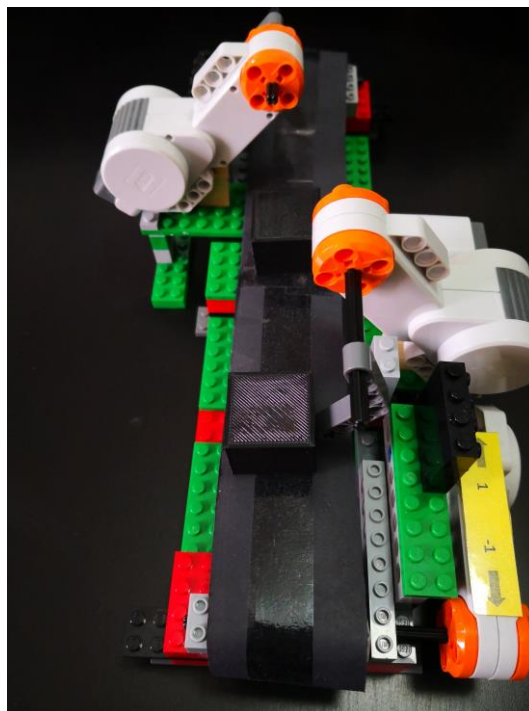


Figura 32. Diseño final del separador, vista 2.



Figura 33. Diseño final del separador, detalle del empujador.

### 5.5.2 Programación

El separador trabaja acorde a las siguientes características:

- La cinta debe estar en funcionamiento en todo momento.
- Si es necesario cambiar de dirección a un objeto que transporte, el sensor detectará cuando el objeto se encuentre en una posición determinada y, dependiendo de la velocidad, la cinta se detendrá un tiempo u otro después de la detección (cuando el material se encuentre en el empujador).
- El objeto debe detenerse cierto tiempo en la zona de separación mientras el empujador realiza su función.
- Debe funcionar en ambos sentidos, conociendo el sistema en qué dirección está trabajando para activar uno u otro empujador en cada caso.
- Algunas variables deben poder ser introducidas y modificadas sin necesidad de acceder al código, como por ejemplo el sentido de giro o la velocidad de la cinta. Más adelante se verá la introducción de las mismas en la interfaz de la unidad.

De la misma forma que ocurría en la estación de procesado, se utilizará un umbral que active un flanco de subida

para detectar que la pieza está en ese momento atravesando el sensor. Sin embargo, en este caso surge un problema extra: la cinta debe detenerse cuando el objeto se encuentre frente al empujador, el cual coincide con la posición del sensor. Para solventarlo, se debe añadir un tiempo de espera desde la detección hasta que se detenga la cinta. Este tiempo, será variable dependiendo de la velocidad a la que se esté desplazando la cinta transportadora, cuyo valor es una variable a introducir por el usuario. Para evitar modificaciones de código por parte del usuario, se va a introducir esta variable de tiempo como una función dependiente de la velocidad. El procedimiento seguido para la obtención de una ecuación que relacione estos dos términos se encuentra descrito en la prueba 6.6, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$y = 1,1714x^2 - 232,03x + 11513$$

Dónde “x” corresponderá a valores de velocidad y “y” de tiempo de espera.

Otro factor a tener en cuenta será el sentido de la cinta. De igual forma que con la interfaz de procesado, el usuario será el que decida el sentido de la misma. Sin embargo, en este caso, el actuador que debe trabajar como empujar dependerá de dicho valor. Para solucionarlo, el sistema ejecutará un motor u otro tomando el valor de giro de las variables globales.

Finalmente, cabe destacar que no todos los materiales que pasen por el sensor deberán ser empujados. Algunos de ellos abandonarán la cinta en el extremo de la misma. Se ha decidido introducir una variable de usuario basada en el número de piezas que deben ir hacia cada lado. De esta forma, el trabajador introducirá este valor en la interfaz dependiendo de la producción que desde en cada momento.

```

if (nxt_separador.GetSensorValue(SensorEscogido(), out Valorsensor1)
    && Valorsensor1.Scaled < Globales.umbral_fijado_separador ← 1
    && Valorsensor1_ant > Globales.umbral_fijado_separador)
{
    numero_cajas_cinta = numero_cajas_cinta + 1; ← 2

    if (numero_cajas_cinta > numero_piezas1
        && numero_cajas_cinta <= numero_piezas2 + numero_piezas1) ← 3
    {
        Globales.tiempo_separador1 =
            Convert.ToInt32((1.1714*(Globales.avance)*(Globales.avance)-(232.03 *
                Globales.avance) + 11513)); ← 4

        System.Threading.Thread.Sleep(Globales.tiempo_separador1);

        EstadomotorA.Power = 0;

        EstadomotorA.Mode = NXTBrick.MotorMode.On;

        if (nxt_separador.SetMotorState(NXTBrick.Motor.A, EstadomotorA, false) != true)
        {
            System.Diagnostics.Debug.WriteLine("Failed setting motor state");
        }
    }
}

```

Figura 34. Fragmento de código de control del separador, flanco de subida

Como se ha comentado, el sistema realiza el mismo flanco de subida que en el caso de la estación en “1”. Sin

embargo, el resultado del flanco es aumentar en 1 el número de cajas que han pasado hasta el momento por la célula, como se muestra en “2”. Cuando el número de piezas que han atravesado la unidad sin ser empujadas supera al número de piezas que el usuario estipuló que debían pasar sin ser empujadas (“3”), el sistema calcula el tiempo que de esperar hasta detener la cinta (“4”), deteniéndola una vez que concluye dicho tiempo.

```

if (Globales.sentido_giro == 1) ← 1
{
    EstadomotorB.Power = -55; ← 2
    EstadomotorB.Mode = NXTBrick.MotorMode.On;

    if (nxt_separador.SetMotorState(NXTBrick.Motor.B, EstadomotorB, false) != true)
    {
        System.Diagnostics.Debug.WriteLine("Failed setting motor state");
    }
    System.Threading.Thread.Sleep(700);

    EstadomotorB.Power = 60; ← 3
    EstadomotorB.Mode = NXTBrick.MotorMode.On;

    if (nxt_separador.SetMotorState(NXTBrick.Motor.B, EstadomotorB, false) != true)
    {
        System.Diagnostics.Debug.WriteLine("Failed setting motor state");
    }

    System.Threading.Thread.Sleep(1000);

    EstadomotorB.Power = 0; ← 4
    EstadomotorB.Mode = NXTBrick.MotorMode.On;

    if (nxt_separador.SetMotorState(NXTBrick.Motor.B, EstadomotorB, false) != true)
    {
        System.Diagnostics.Debug.WriteLine("Failed setting motor state");
    }
}

```

Figura 35. Fragmento de código de control del separador, empujador.

Una vez se para la cinta el sistema detecta si la cinta se está moviendo en una dirección u en otra (“1”). El trabajo del empujador es el siguiente:

1. En primer lugar, se produce un giro en un sentido del servomotor para desplazar la pieza en otra dirección (“2”).
2. Luego se cambia el sentido de giro para volver a la misma posición inicial (“3”).
3. Finalmente se para el motor (“4”).

El código en caso de que la cinta se desplace en el otro sentido es exactamente el mismo, solo que referido al otro motor. Las pruebas realizadas tanto en el ámbito físico como en el control se describen de forma más extensa en la prueba 6.5.

### 5.5.3 HMI separador

De igual forma que la estación de procesado, el separador contará con una interfaz con la que el usuario podrá interactuar de forma rápida y sencilla, la cual se muestra en la figura 36.



Figura 36. Interfaz hombre-máquina del separador

Los datos a introducir son los siguientes:

- Puerto de comunicaciones: Puerto de conexión Bluetooth a partir del cual se conectará el ordenador a la controladora NXT.
- Velocidad de avance: Velocidad a la que trabajará la cinta. Se recomiendan valores comprendidos entre 75 y 100.
- Sentido de giro: Sentido de giro de la cinta. Introduciendo “-1” girará hacia un lado y con “1” hacia el otro.
- Control manual: Ofrece la capacidad de encender y apagar el sensor, la cinta y los empujadores para probar de antemano si su funcionamiento es correcto.
- Número de cajas: Se introducirá el número de unidades que se quiere que abandonen la célula por el final de esta y por el empujador (tipo 1 y tipo 2 respectivamente).
- Testeo de sensores: Se escogerá el puerto en el que está conectado el sensor, el tipo de sensor y el modo de medida. Tras esto, mediante el botón de “muestreo sensor” se muestra el valor que envía el sensor en ese instante (puede variar dependiendo de la luminosidad de la sala, como ya se comentó anteriormente).

- Umbral: Una vez que se conoce el valor del sensor en la sala, se introduce un valor de umbral correspondiente a este. Este valor de umbral será el limite a partir del cual el sensor considerará que un material está atravesando su zona.
- Iniciar estación: Finalmente, al introducir todos los valores y presionar “iniciar estación” se cargan todos en la controladora, quedando la estación lista para su funcionamiento.

## 5.6 Unión multicelula

Una vez se han desarrollado por completo cada una de las células descritas, el resultado es el siguiente:

- Una célula tipo separador.
- Tres células tipo estación de procesado.



Figura 37. Células desarrolladas durante el proyecto

El siguiente paso será unificar el sistema. Hasta el momento únicamente hemos manejado las células de fabricación de forma individual, conectando solo una NXT a la vez al ordenador. Para conseguir manejar el sistema completo necesitamos un control de todas las unidades a la vez, utilizando para ello un único ordenador, ya que de esta forma es bastante más práctico, cómodo y escalable.



### 5.6.1 Manejo de varias NXT

En un principio, y tras comprobar que podíamos conectar varias NXT a la vez vía Bluetooth al ordenador, el funcionamiento consistió en introducir el código de operación de todas las unidades en el sistema principal. De esta forma, lográbamos que todas las unidades funcionaran al mismo tiempo. Sin embargo, cuando se realizaba una acción dirigida por una interrupción, el resto de unidades no estaban siendo controladas. Como solución, se ideó una forma de control más individualizada mediante la utilización de hilos.

En programación, un hilo se define como una secuencia de tareas pequeñas encadenadas, ejecutadas simultáneamente por un mismo sistema operativo. Un ejemplo de esto son las aplicaciones en segundo plano de los teléfonos móviles actuales, ya que se ejecutan varias a la vez. Así, cada programa de control de las distintas células de fabricación se ejecutaba a la vez que todos los demás, eliminando el problema anterior.

```
Globales.separador1 = new Thread(separador);  
Globales.estacion1 = new Thread(estacion1);  
Globales.estacion2 = new Thread(estacion2);  
Globales.estacion3 = new Thread(estacion3);
```

Figura 38. Fragmento de código, inicialización de los hilos

```
using System.Threading;
```

Figura 39. Fragmento de código, librería para la utilización de hilos

El programa de cada célula se registrará dentro de cada uno de sus hilos, ejecutándose de forma independiente unos con otros. Las decisiones adoptadas en la configuración multicelular se encuentran respaldadas por la prueba 6.7.

### 5.6.2 Uniones físicas

Una vez se ha conseguido controlar varias NXT a la vez con un mismo ordenador, pasamos a realizar uniones entre las distintas células para crear un sistema.

El problema que surge en este caso, es el paso físico del material entre una unidad y otra, ya que, debido a su geometría, algunas piezas se atoraban en la zona intermedia, como se puede observar en la figura 40.

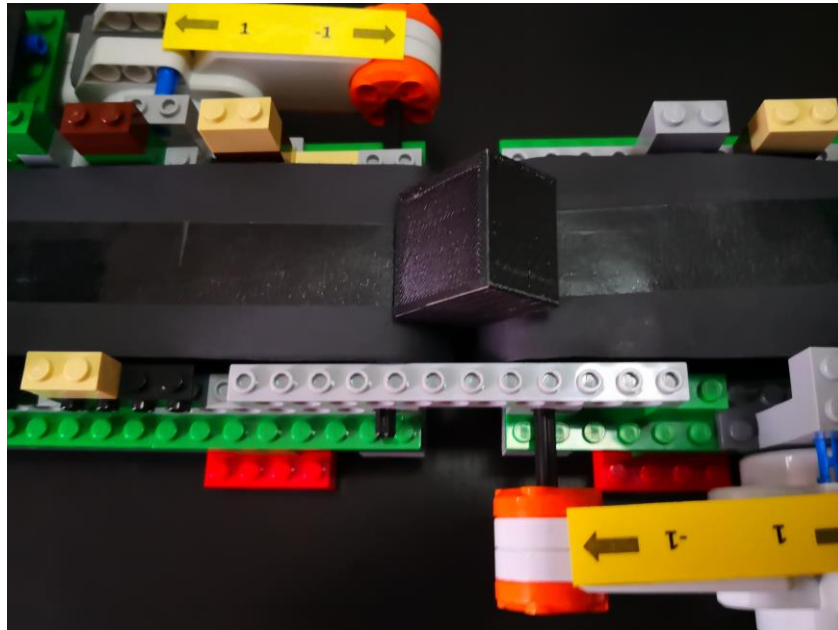


Figura 40. Atoramiento de material en la intersección de cintas

Se intento realizar distintos tipos de uniones intercaladas utilizando piezas estructurales, aunque ninguna de ellas con éxito. La primera solución sería la de utilizar la altura para evitar este problema, haciendo que algunas unidades fueran más altas que otras. Sin embargo, esta solución proporciona un plano poco flexible, ya que obliga al sistema a tener un orden de unidades.

Finalmente, mediante la utilización de plástico se consiguió dar cierta continuidad al sistema de unión, evitando así el atoramiento del material en la unión, tal y como se describe en la prueba 6.3. Esta solución se puede observar en la figura 41.

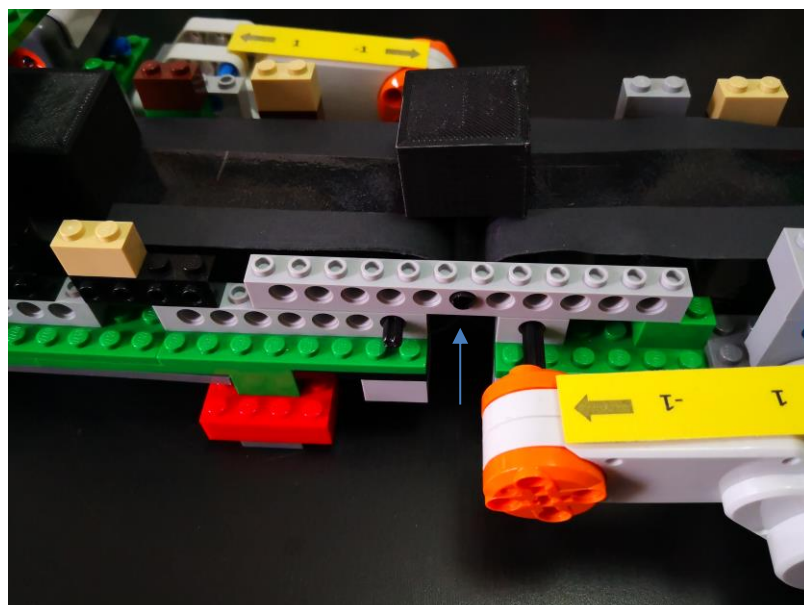


Figura 41. Solución en la unión de las células.

### 5.6.3 Realización de la interfaz general tipo SCADA

En este punto del proyecto, se ha realizado un control HMI para cada una de las células de fabricación. Sin embargo, aún no se ha construido una interfaz general de sistema, sino que se utiliza una individual directamente para cada célula.

Se propone realizar una interfaz inicial de programa tipo SACADA, la cual haga preguntar al usuario el número de unidades de cada tipo que se van a utilizar en el sistema. Así aparecerá una interfaz para cada unidad. Dicha interfaz inicial se muestra a continuación en la figura 42.



Figura 42. Interfaz de inicio de programa

De esta forma, si existieran más unidades, no habría que modificar la interfaz principal, simplemente introducir un número superior de unidades, haciendo la interfaz escalable.

Además, se añadirá el control de los distintos modos de funcionamiento descritos por la Guía GEMMA. El usuario podrá controlar el estado del sistema en su totalidad, sin necesidad de realizar paradas o revisiones individuales de cada una de las células.

Se describen distintos estados en los que funcionará el sistema:

- **Marcha:** Una vez el sistema se encuentre configurado y en capacidad de trabajar, se iniciará la producción del mismo.
- **Paro:** Si el sistema sufre un fallo o necesita ser revisado como consecuencia del mantenimiento, se detendrán todas las unidades.
- **Test:** El sistema comprobará tras el paro si todos sus integrantes funcionan correctamente, aplicando un

ciclo de funcionamiento de cada una de las unidades durante un corto período de tiempo.

- **Rearme:** Una vez realizado el test y comprobado que todo funciona correctamente, utilizando la acción rearme, se indica al sistema que puede volver a inicializar su funcionamiento normal al volver a utilizar la acción marcha. No se trata de una acción física, si no de un aviso al sistema de que puede trabajar de nuevo sin preocupación.

La interfaz final para la monitorización del sistema se muestra en la figura 43.



Figura 43. Interfaz de inicio de programa incluyendo los modos de funcionamiento

## 6 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 5.

Al tratarse de un capítulo de pruebas experimentales, se busca ser lo más objetivo posible. Para ello, tanto en la memoria de Miguel Navas (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 (Miguel Navas, 2019), a los aspectos constructivos y cinemáticos (más en detalle en esta memoria), 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.

### 6.1 Prueba funcional de sensores y actuadores. Elección de los periféricos adecuados

#### 6.1.1 Definición y objetivos de la prueba

El objeto de este 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.

### 6.1.2 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.

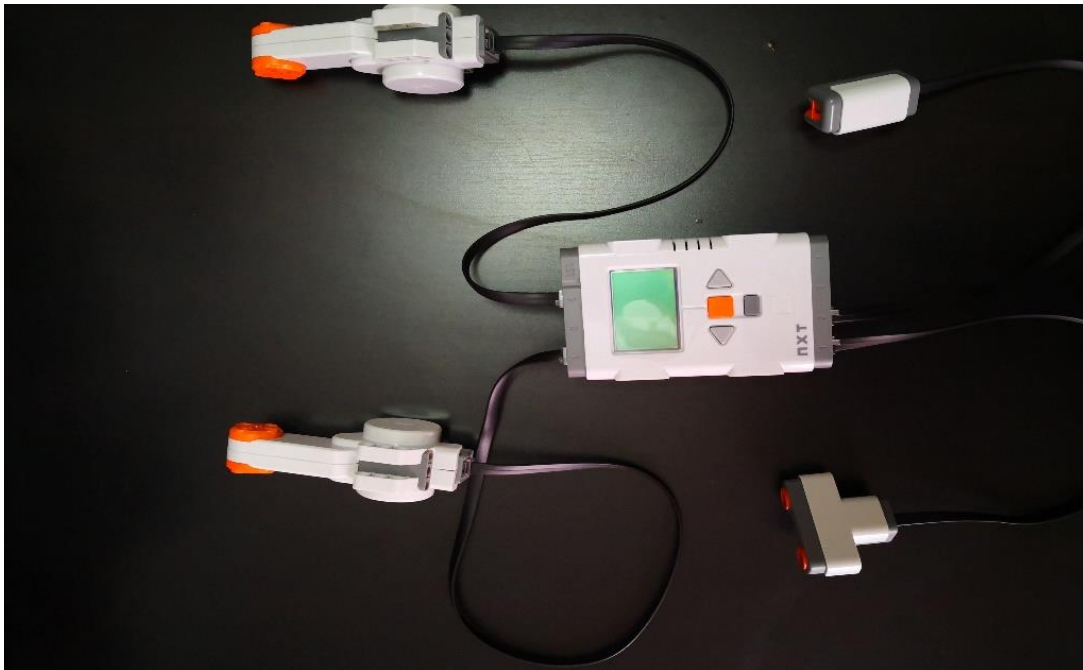


Figura 44. Testeo de sensores y motores.

### 6.1.3 Resultados y avances obtenidos

- 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.

## **6.2 Cinta transportadora inicial operando con piezas. Una controladora NXT**

### **6.2.1 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.

### **6.2.2 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.

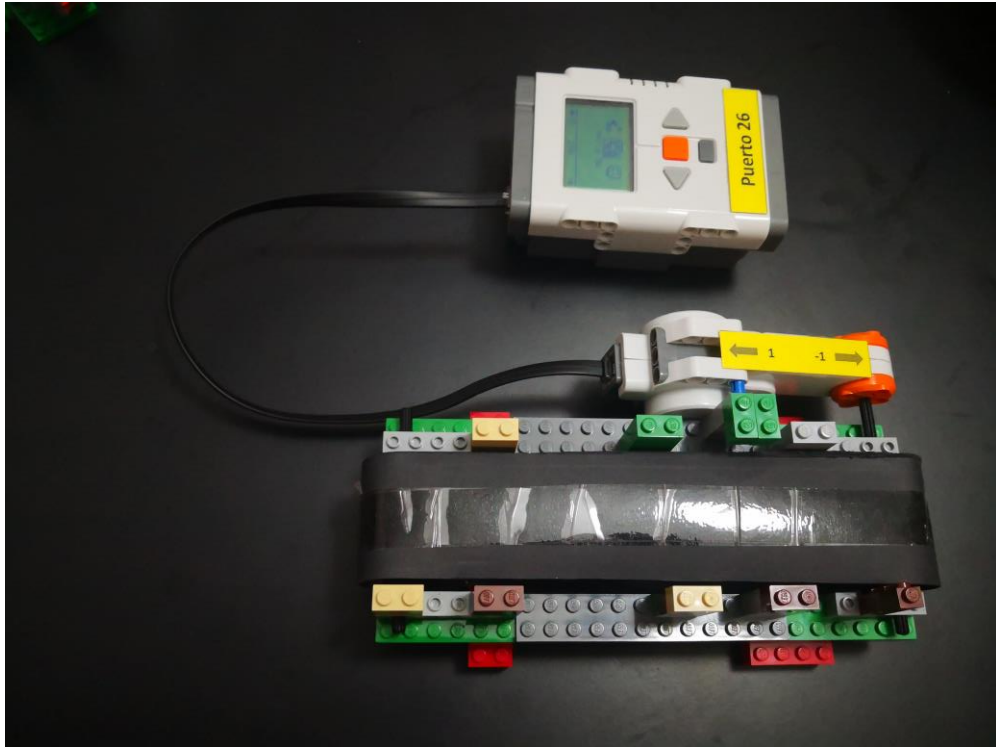


Figura 45. Cinta transportadora inicial con conexiones.

### 6.2.3 Resultados y avances obtenidos

Tras la realización de la prueba se concluye lo siguiente:

- Estabilidad (parte electro-mecánica): 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 (parte lógica y de control): La elección del material ha sido la adecuada. La rigidez y rugosidad del material ha asegurado una correcta sujeción de los elementos que transportaba.

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

### 6.3.1 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.
- Lógico (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.

### 6.3.2 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.

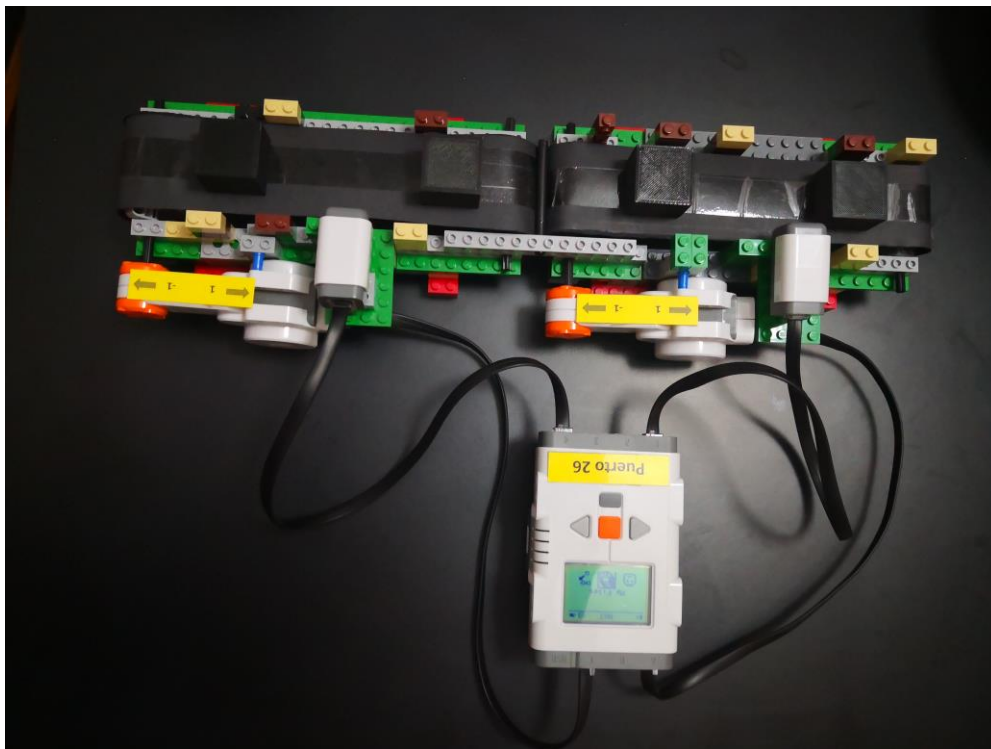


Figura 46. Dos cintas transportadoras con sensores conectadas.

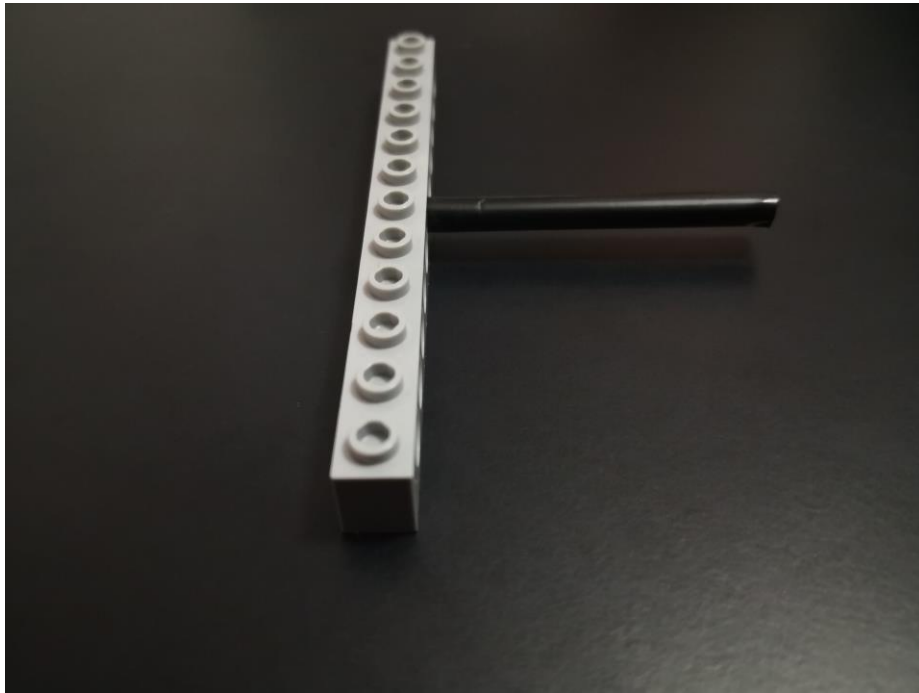


Figura 47. Enlace entre unidades.

### 6.3.3 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 más 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.

## 6.4 Cinta junto a estación de procesado. Una controladora NXT

### 6.4.1 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 6.3.
- Lógico (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.

#### 6.4.2 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 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.

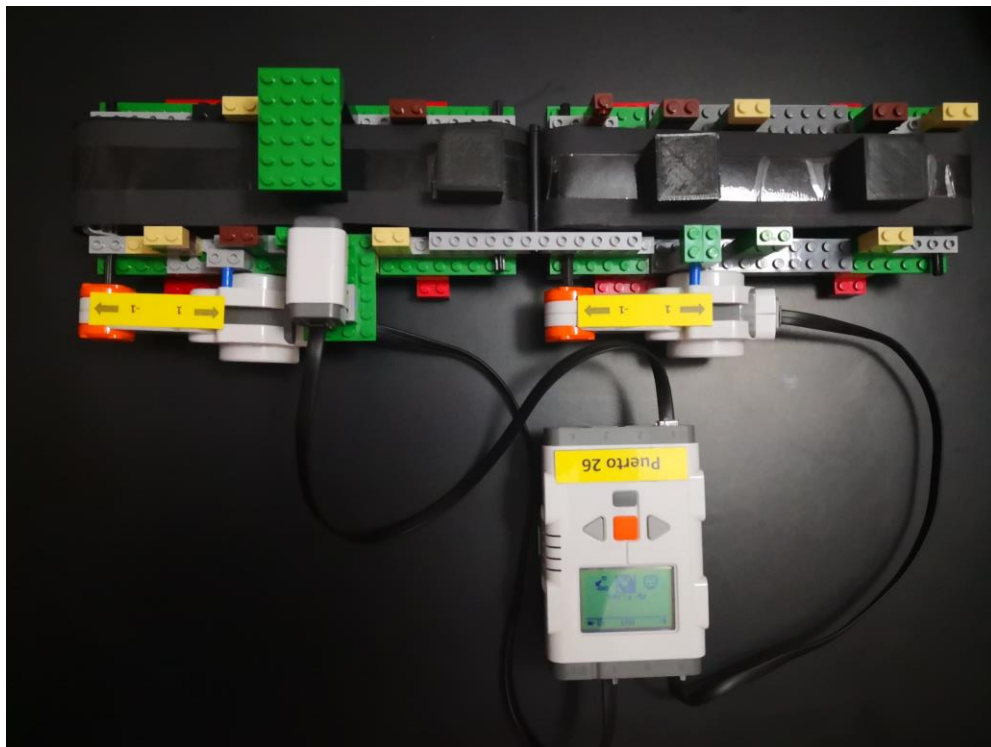


Figura 48. Una estación de procesado conectada a una cinta transportadora.

### 6.4.3 Resultados y avances obtenidos

- 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.

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

### 6.5.1 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.

### 6.5.2 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.

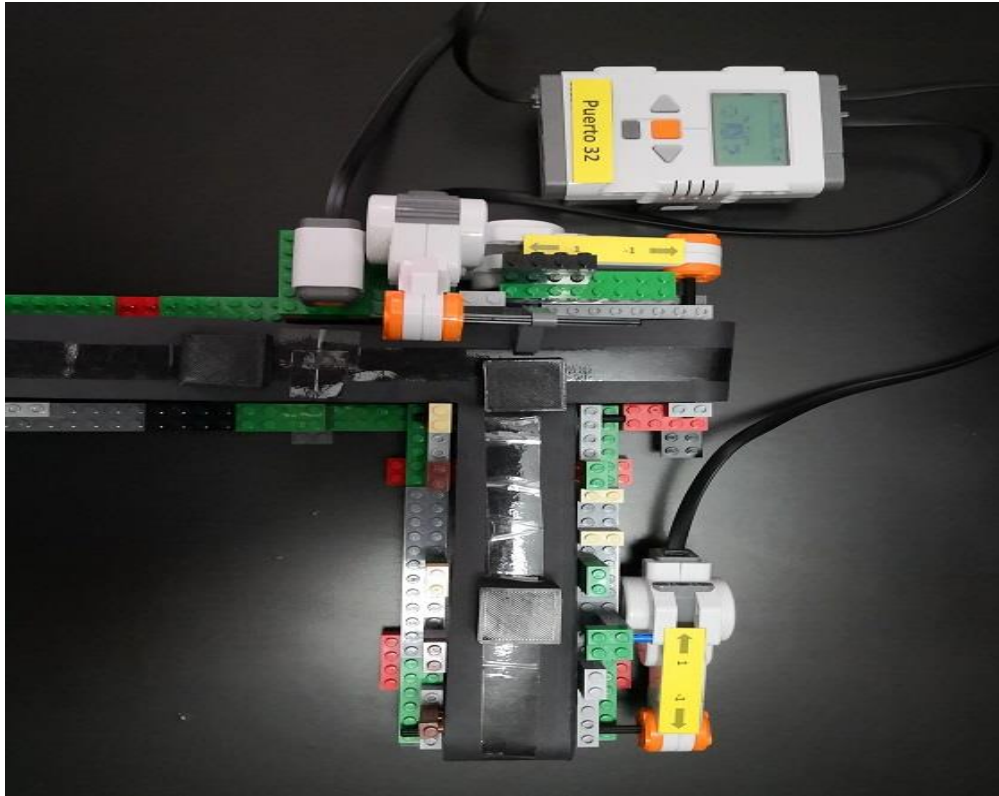


Figura 49. Un separador unidireccional frente a una cinta transportadora.

### 6.5.3 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.

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

### 6.6.1 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 50. Comportamiento experimental de la cinta transportadora.

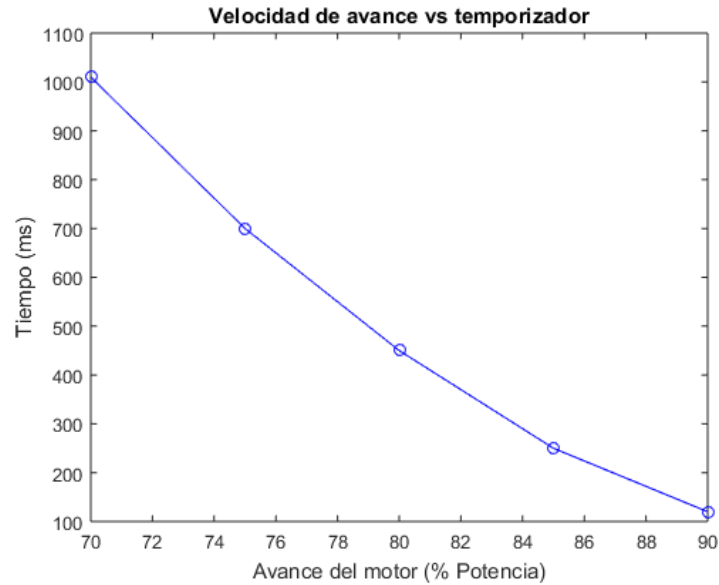


Figura 51. Tiempo de respuesta necesario según la potencia de la cinta.

El resultado del ajuste paramétrico de la gráfica de la figura 41 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.

Nótese 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.

### 6.6.2 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.

## 6.7 Test para múltiples controladoras NXT, comunicación bluetooth

### 6.7.1 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.

### 6.7.2 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.

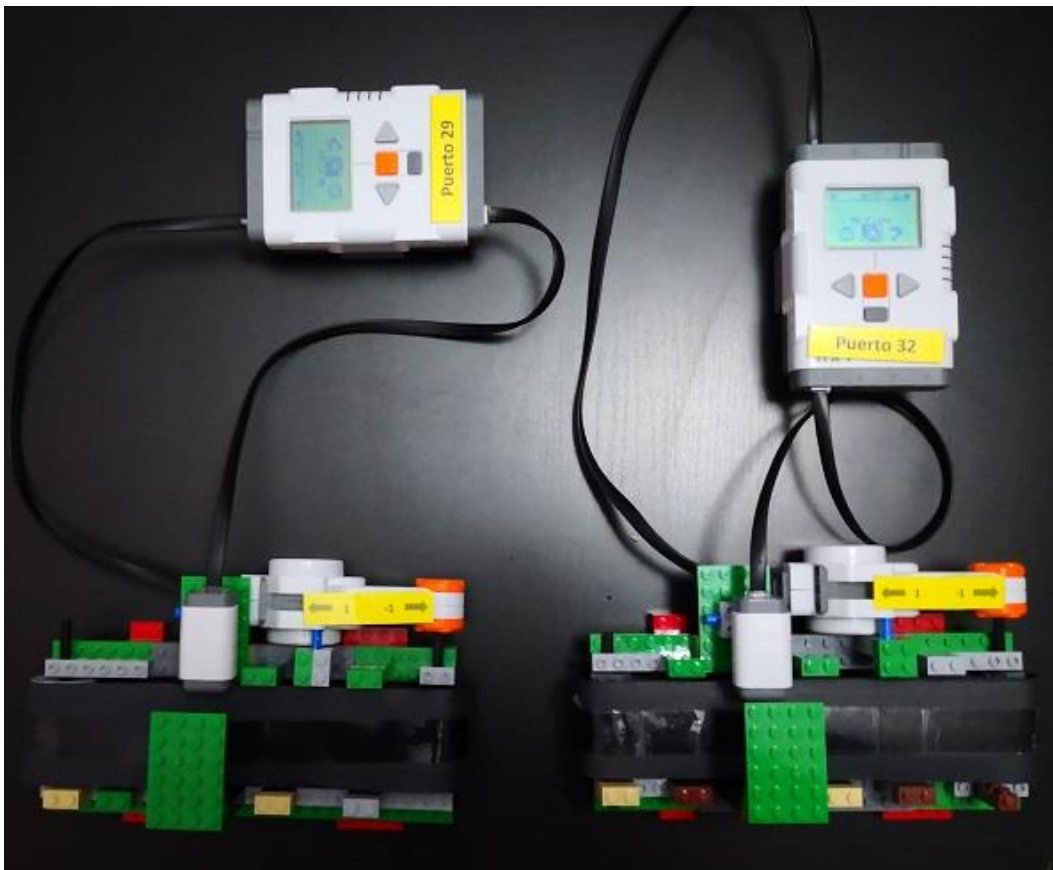


Figura 52. Dos estaciones de procesado independientes.



### 6.7.3 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.

## 6.8 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.

### 6.8.1 Definición y objetivo de la prueba

Como prueba final, se busca hacer funcionar un sistema miniaturizado 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.

### 6.8.2 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 procesamiento (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.

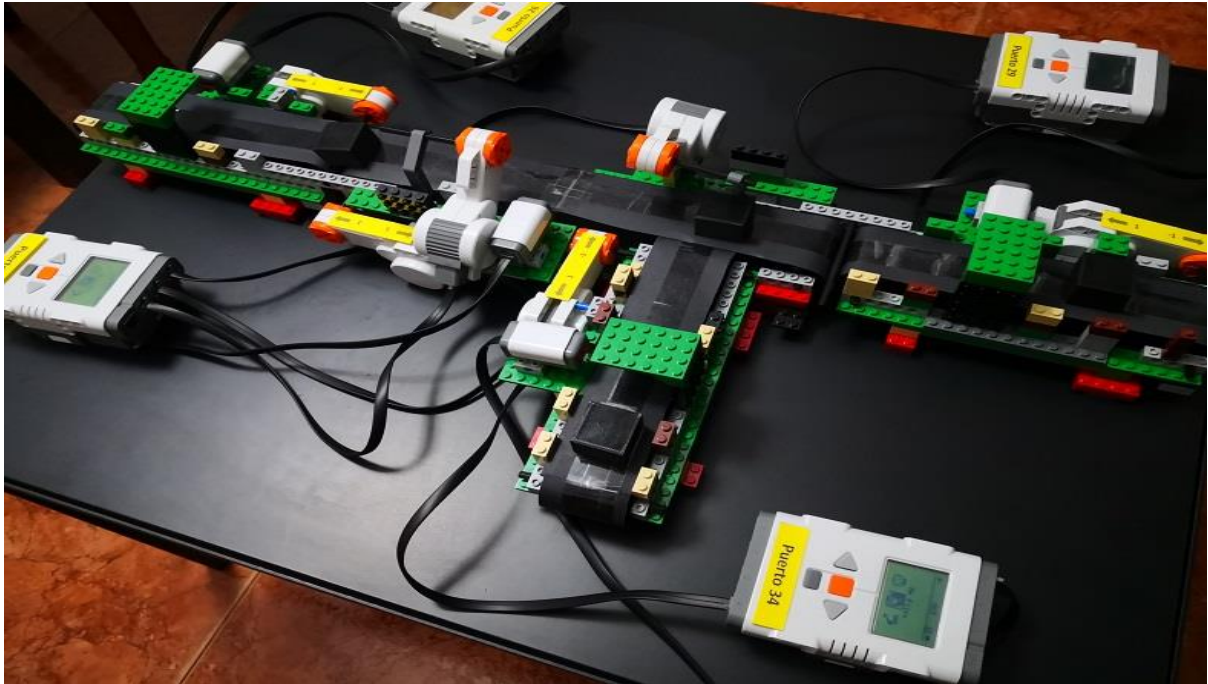


Figura 53. Detalle del sistema de fabricación flexible final.

### 6.8.3 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 puesta 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.



## 7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Como ya se ha mencionado, el proyecto busca una forma de representar fielmente una serie de procesos industriales a pequeña escala, con la finalidad de ser útiles como herramientas de diseño y presentación, tanto a nivel de proyecto como educativo y formativo. En este capítulo se hará un balance del trabajo realizado, además de aplicaciones o mejoras que se han quedado fuera del proyecto, pero que podrían realizarse en una futura ampliación.

### 7.1 Trabajo realizado

Volviendo a las características objetivo que se comentaron en el punto 2.10 de este ensayo, se va a desarrollar las conclusiones obtenidas para cada una de ellas:

- Flexibilidad: Uno de los objetivos claves de este proyecto era la flexibilidad del mismo. El modelo necesitaba poder ser utilizado para gran variedad de proyectos industriales, siendo esencial, además, la escalabilidad del sistema. A raíz de esta necesidad nació el estudio de los tipos de células necesarias en toda fabricación flexible, además de cumplir como característica la interconexión entre ellas en cualquier sentido y el correcto funcionamiento en ambos sentidos. En cuanto a la escalabilidad, el proyecto se ha desarrollado de tal forma que con pequeños cambios y añadiendo unidades idénticas estructuralmente, se puede realizar un sistema de mayor dimensión.
- Independencia entre células: Se necesitaba que cada célula trabajase por si sola, siendo independiente los códigos de unas con la otras, aunque pudiendo compartir información a través de variables globales. Por ello, se realizó en primer lugar la evaluación y configuración de cada una de las células y en segundo lugar la unión entre ellas.
- Capacidad de interconexión entre ellas: En el apartado 6.7 se comentó el proceso de control y construcción de las uniones de las células de fabricación. El resultado fue el correcto funcionamiento de las células creando un sistema completo de producción. Además, se le añadieron distintos modos de

funcionamiento pertenecientes a la Guía GEMMA, mediante los cuales el usuario podía detener el sistema, testarlo y reanudar sus operaciones.

- Sencillo de utilizar por todo el mundo a través de una interfaz gráfica: Durante todo el desarrollo del proyecto se han ido mostrando las distintas interfaces gráficas desarrolladas en Visual Studio, en concreto de tres tipos, para las unidades de procesados, para los separadores y una general donde se indicaría en número de unidades por tipos y los comandos de modos de funcionamiento, siendo esta la principal interfaz de usuario. Además, se tiene la posibilidad de cambiar en tiempo real los valores de las variables a introducir en cada unidad, tales como la velocidad de giro, el umbral del sensor o el sentido de giro.

Tras ello, se muestra que los objetivos principales del proyecto se han cumplido de manera satisfactoria de la mejor forma posible. Se ha desarrollado así un sistema para mostrar al público de forma visual la producción de una futura fábrica, evitando de este modo los posibles problemas físicos que no se detectarían con simulaciones por ordenador.

## 7.2 Trabajo futuro

Aunque se hayan cumplido los objetivos principales del proyecto, es posible aplicarle distintas mejoras al sistema, que por falta de presupuesto, tiempo o material no se ha podido realizar.

- Entrada y salida de material al sistema de forma automática: En primer lugar, uno de los posibles sistemas a mejorar sería la entrada y salida de material en las unidades. Actualmente esta acción se realiza manualmente. Al cambiar el sistema de alimentación y retirada y automatizarlo, mejoraría el sistema en cuanto a visualización y complejidad. Una posible solución podría ser una tolva de entrada de material con un temporizador y compuertas, que haga que el material entre cada cierto tiempo y una cinta conectada a todas las salidas, que transporte todos los materiales acabados a un almacén.
- Aplicación de fallos en el sistema con aleatoriedad: Otra posible mejora podría ser la de aplicar fallos aleatorios en el sistema, es decir, simulando de alguna forma posibles fallos que se den en el sistema durante su funcionamiento, interviniendo automáticamente y parándose en su totalidad si ocurre. Este procedimiento ofrecería al sistema un extra en realismo, al producirse fallos aleatorios en el modelo, tal y como ocurre en las máquinas reales.
- Incluir otros tipos de célula: Aunque las células de fabricación realizadas cubren gran cantidad de opciones, para algunos tipos de industria se necesitarían maquinaria que no puede asemejarse a lo que actualmente se ha desarrollado en el proyecto. Para ello podría pensarse otros tipos de células de fabricación, añadiéndolas así al sistema.

### **7.3 Conclusión**

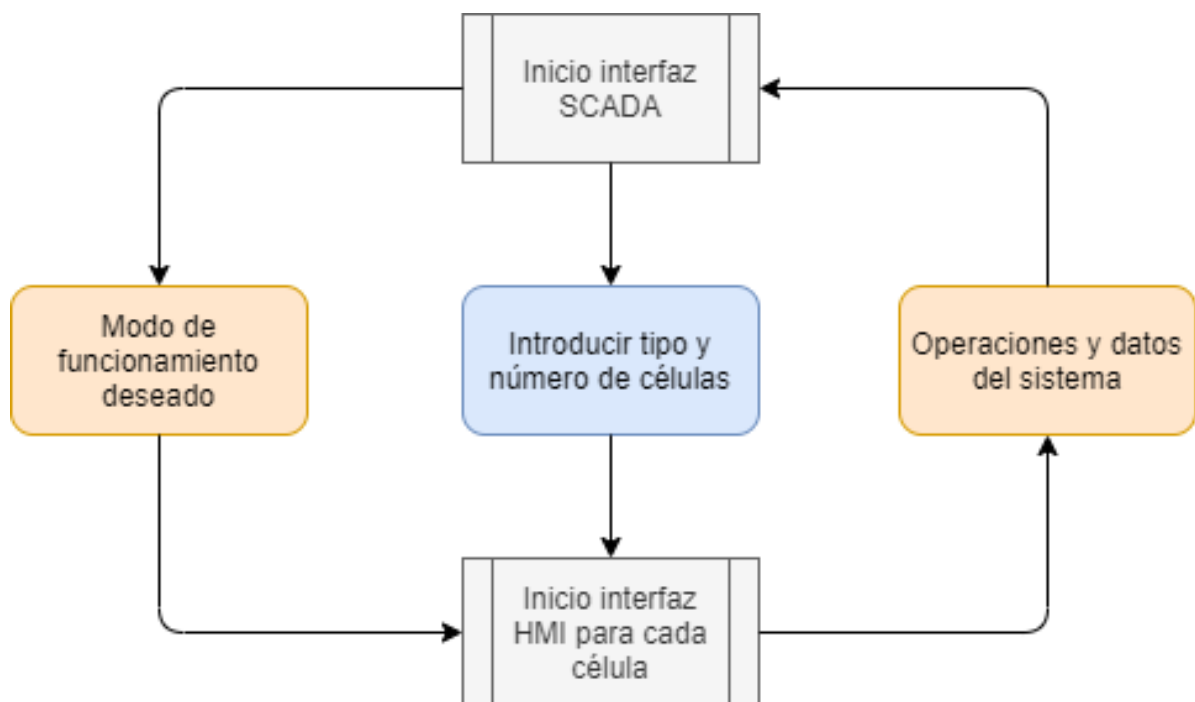
Tras la finalización, creemos que se ha desarrollado un buen método de exposición de proyectos, de una forma más trivial. Se han cumplido los objetivos y se ha presentado una línea a seguir para desarrollar con mayor nivel el sistema. Mejorar en cuanto al nivel de exposición puede llegar a traer mayor atracción por parte de los inversionistas, lo que se traduce en un mayor éxito laboral en este sentido.



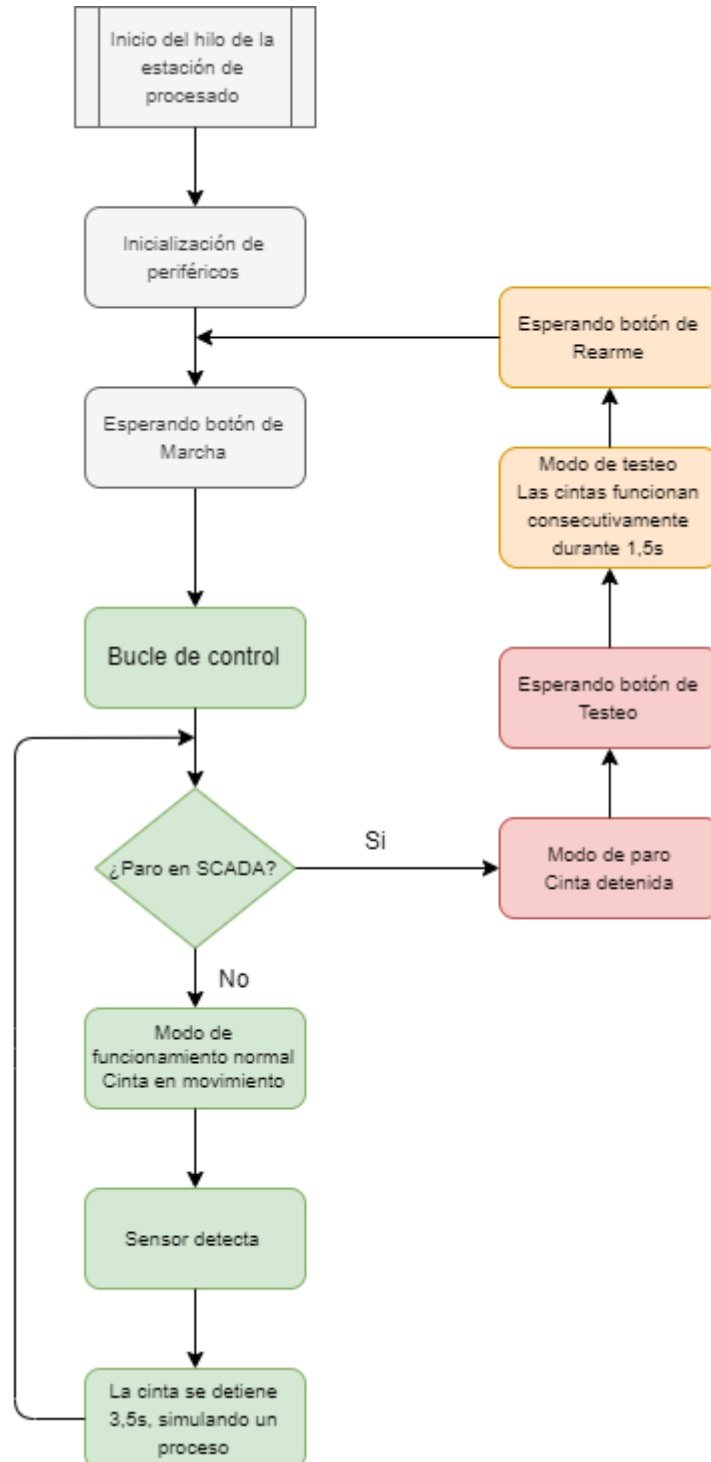


## 8 ANEXO I: LÓGICA DE PROGRAMACIÓN.

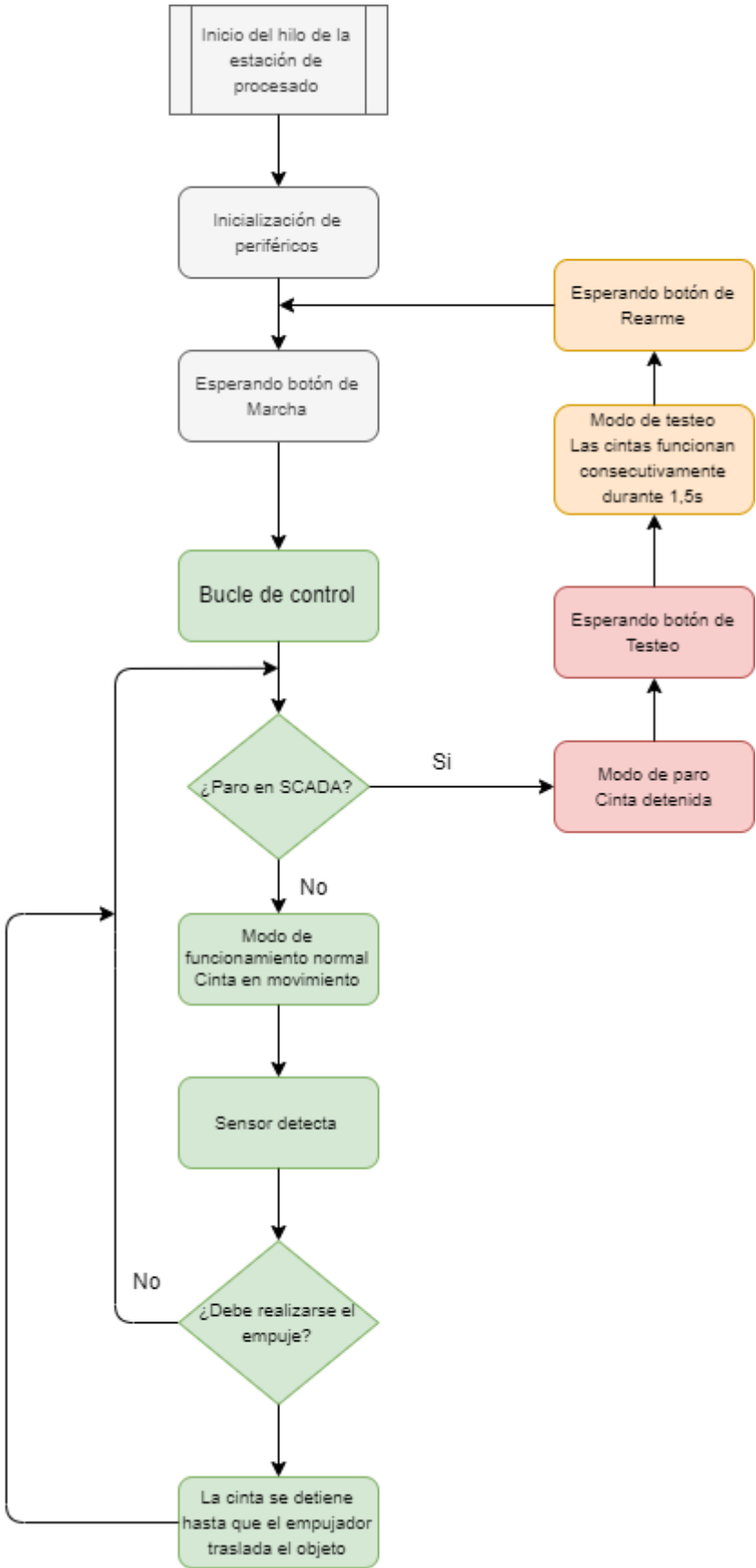
### 8.1 Búcle de control general del sistema



## 8.2 Búcle de control de estación de procesado



8.3 Búcle de control de separador





---

## REFERENCIAS

---

1. RAE, 2019, Real Academia Española.  
<https://dle.rae.es/?id=LRwJlBQ> [Último acceso: Septiembre 2019]
2. Daniel Arango Ángel, 2016. “Los tiempos modernos de la productividad”  
[http://acuerdosrevista.mincit.gov.co/images/Ed\\_4/pdf/a1.pdf](http://acuerdosrevista.mincit.gov.co/images/Ed_4/pdf/a1.pdf) [Último acceso: Septiembre 2019]
3. Transgesa, 2018. “Logística 4.0 para la industria 4.0”  
<https://www.transgesa.com/blog/logistica-4-0-para-la-industria-4-0/> [Último acceso: Septiembre 2019]
4. Aldakin, 2017. “Automatización Industrial y robótica. Qué es y sus claves de éxito”  
<http://www.aldakin.com/automatizacion-industrial-robotica-claves-exito/> [Último acceso: Septiembre 2019]
5. Escuela Técnica Superior de Bilbao, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2013. “Sistemas de fabricación flexible”  
[http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/66\\_ca.pdf](http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/66_ca.pdf) [Último acceso: Septiembre 2019]
6. Miguel Ángel Navarro, 2012. “Lean Manufacturing: Células de fabricación flexible”  
<http://www.aimme.es/informacion/informativo/ficha.asp?id=2627> [Último acceso: Septiembre 2019]
7. Drouiz, 2014. “Niveles ISA-95”  
<https://www.drouiz.com/blog/2014/12/04/niveles-isa-95-niveles/> [Último acceso: Septiembre 2019]
8. Oriol Boix, 2015. “Modos de marcha y parada”  
<https://recursos.citcea.upc.edu/grafcet/gemma/> [Último acceso: Septiembre 2019]
9. OBS Business School, 2015. “Fases para elaborar un proyecto de ingeniería industrial”  
<https://www.obs-edu.com/es/blog-project-management/ingenieria/fases-para-elaborar-un-proyecto-de-ingenieria-industrial> [Último acceso: Septiembre 2019]

10. Isidoro Calvo, 2010.

[https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Bloque-NXT-sensores-y-actuadores-El-controlador-bloque-NXT-o-brick-contiene\\_fig7\\_49599136](https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Bloque-NXT-sensores-y-actuadores-El-controlador-bloque-NXT-o-brick-contiene_fig7_49599136) [Último acceso: Septiembre 2019]

## Referencias de imágenes

- (1) Figura 1. Uno de los talleres propiedad de la Riotinto Company Limited.  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Taller~1.jpg>
- (2) Figura 2. Ejemplo de automatización en la industria alimenticia.  
[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Factory\\_Automation\\_Robotics\\_Palettizing\\_Bread.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Factory_Automation_Robotics_Palettizing_Bread.jpg)
- (3) Figura 3. Las cuatro revoluciones industriales.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Revoluci%C3%B3n\\_industrial\\_etapa\\_cuatro](https://es.wikipedia.org/wiki/Revoluci%C3%B3n_industrial_etapa_cuatro)
- (4) Figura 4. Cadena de montaje de una fábrica de automóviles.  
[https://www.diariodenavarra.es/noticias/mas\\_actualidad/economia/2014/06/10/el\\_coche\\_segunda\\_ma\\_no\\_pierde\\_fuelle\\_frente\\_nuevo\\_162888\\_1033.html](https://www.diariodenavarra.es/noticias/mas_actualidad/economia/2014/06/10/el_coche_segunda_ma_no_pierde_fuelle_frente_nuevo_162888_1033.html)
- (5) Figura 5. Diagrama de evolución de volumen de producción frente a variedad.  
[http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/66\\_ca.pdf](http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/66_ca.pdf)
- (6) Figura 6. Familia de piezas.  
<http://procesos2sergiocamilobrian.blogspot.com/2016/04/tecnologia-de-grupos-y-fabricacion.html>
- (7) Figura 7. Ejemplo de distribución en forma de U de una célula de fabricación.  
<http://curso-jit.blogspot.com/>
- (8) Figura 8. Niveles de jerarquía de los procesos industriales.  
<https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2017/09/26/estandar-isa-95-integracion-de-los-sistemas-de-control-empresarial/>
- (9) Figura 9. Diferentes modos de funcionamiento de un automatismo (Guía GEMMA)  
<https://recursos.citcea.upc.edu/grafcet/gemma/descrip.html>
- (10) Figura 10. Exposición al público de datos mediante gráficas.  
[https://www.freepik.es/foto-gratis/hombre-negocios-presentando-grafico-reunion\\_1128216.htm](https://www.freepik.es/foto-gratis/hombre-negocios-presentando-grafico-reunion_1128216.htm)
- (11) Figura 11. Modelo 3D en ordenador de una fábrica.  
<http://byr-arq-portafolio.blogspot.com/2013/06/3d-fabrica.html>
- (12) Figura 12. Maqueta 3D de una fábrica.  
<http://maquetasatrium.blogspot.com/2012/11/maqueta-de-fabrica-de-tecnologia-led.html>

- (13) Figura 13. Piezas estructurales pertenecientes a LEGO Mindstorm.  
<https://lego.heureka.cz/lego-mindstorms-9695-souprava-doplnekovych-dilu/>
- (14) Figura 14. Distintos sensores de LEGO Mindstorm.  
<http://tecno4merced1213.blogspot.com/2013/03/robot-mindstorms-nxt-20-alvaro-y-victor.html>
- (15) Figura 15. Detalle de un servomotor LEGO Mindstorm. [https://articulo.mercadolibre.com.uy/MLU-456132003-servomotor-lego-mindstorms-nxt-\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.uy/MLU-456132003-servomotor-lego-mindstorms-nxt-_JM?quantity=1)
- (16) Figura 16. Controladora Lego NXT.  
<https://codigo21.educacion.navarra.es/recursos/configuracion-para-lego-nxt-con-enchanting/>
- (17) Figura 21. Sensor de luz lego mindstorm.  
<http://rbtntxt.blogspot.com/2009/06/el-sensor-de-luz.html>





## BIBLIOGRAFÍA

---

1. Miguel Navas Alcántara, 2019. “Diseño de un sistema de producción modular mediante LEGO. Aspectos de control y automatización”.





