



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER INTEGRACIÓN Y USO DE ROBOTS COLABORATIVOS EN LA MINIFÁBRICA DE ICAI

Autor: Marina Beatriz Lettieri Palencia

Director: José Antonio Rodríguez Mondéjar

Madrid

2022/2023

Firma del autor

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Integración y uso de robots colaborativos en la minifábrica de ICAI

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico **2022/23** es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Marina Beatriz Lettieri Palencia

Fecha: 24 / 07 / 2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Antonio Rodríguez Mondéjar

Fecha://



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER INTEGRACIÓN Y USO DE ROBOTS COLABORATIVOS EN LA MINIFÁBRICA DE ICAI

Autor: Marina Beatriz Lettieri Palencia

Director: José Antonio Rodríguez Mondéjar

Madrid

2022/2023

Firma del autor

Agradecimientos

A José Antonio Rodríguez Mondéjar, por darme la oportunidad de realizar este proyecto haciendo uso de las instalaciones completas de la Minifábrica de ICAI. También me gustaría agradecer la confianza para volver a dirigir un trabajo de estas características, después de haber colaborado juntos en el Trabajo de Fin de Grado.

A Gonzalo Dorao Sánchez-Campos, por proporcionarme un diseño base de la Minifábrica de ICAI muy robusto y fiable, así como por estar siempre disponible y dispuesto a resolver todos los inconvenientes que me pudieran surgir.

A Lionel Güitta López, por estar dispuesto a facilitarme todos los conocimientos sobre el laboratorio y RobotStudio que adquirió en su Trabajo de Fin de Grado.

A Andrés María Miguélez Tato, a Jaime Díez-Cascón Martínez, a José Gil Fernández, a Juan Pérez Vilanova y a Lucía Gómez del Río, por apoyarme y compartir muchas horas de desarrollo de este proyecto en nuestra experiencia de Prácticas Internacionales en Luxemburgo.

INTEGRACIÓN Y USO DE ROBOTS COLABORATIVOS EN LA MINIFÁBRICA DE ICAI

Autor: Lettieri Palencia, Marina Beatriz.

Director: Rodríguez Mondéjar, José Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo de Fin de Máster surge de la necesidad de proporcionar al alumno una herramienta completamente virtual y remota para poder diseñar y programar una fábrica desde el punto de vista de la automatización industrial. Además, también se empleará la plataforma desarrollada para complementar el aprendizaje y mejorar la comprensión de las prácticas en el laboratorio.

Para ello, se realizó una simulación de la planta completa de la Minifábrica de ICAI en la herramienta de programación y simulación *offline* para aplicaciones robóticas, *RobotStudio* [1]. El sistema cuenta con cuatro robots colaborativos; *GoFa CRB 15000* [2] y *SWIFTI CRB 1100*. El usuario tendrá la capacidad de modificar los módulos para definir el funcionamiento de los autómatas reprogramables, así como del conjunto de actuadores y sensores que conforman el laboratorio. Además, gracias a la programación sistemática y adaptable que se ha desarrollado, se puede escalar este proyecto a cualquier otro entorno.

Palabras clave: Robots Colaborativos, *GoFa CRB 15000*, *SWIFTI CRB 1100*, *RobotStudio* y Simulación.

1. Introducción

En la actualidad, la incorporación de robots industriales y la digitalización ha transformado diversos sectores industriales, optimizando la gestión de procesos y reorganizando los puestos de trabajo. Estos robots buscan aumentar la eficacia, precisión y productividad, al tiempo que protegen a los trabajadores en ambientes peligrosos. Sin embargo, se enfrentan a desafíos como altos costes y preocupaciones de seguridad y privacidad.

En la Universidad Pontificia Comillas, la Minifábrica de ICAI ha incorporado los avanzados *Cobots* de *ABB*, brindando a los estudiantes la oportunidad de trabajar con estas máquinas y desarrollar habilidades en el campo de la Automatización Industrial. El proyecto se enfoca en integrar de manera didáctica estos *Cobots* en la universidad, profundizando en sus sistemas y aplicaciones con el fin de lograr un control preciso mediante la herramienta *RobotStudio*.

2. Definición del proyecto

Este proyecto se enfoca en tres objetivos principales. El primero busca mejorar la integración física de los nuevos *Cobots* en el laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas. Se realizaron varios diseños y pruebas de las pinzas para el *Cobot GoFa CRB 15000* con el software de diseño asistido por computadora *Solid Edge* y se imprimieron con una impresora 3D.

El segundo objetivo se centra en realizar una simulación completa de la Minifábrica utilizando el software de simulación y programación *offline* de *ABB*, *RobotStudio*. Se tuvo en cuenta la precisión y productividad del laboratorio, realizando medidas de las estaciones reales y analizando los sensores y actuadores para lograr un funcionamiento efectivo.

El tercer objetivo se relaciona con el estudio de protocolos y niveles de seguridad de cada robot. Se implementaron medidas de seguridad simuladas en la planta para asegurar el correcto funcionamiento del proyecto.

Todos los objetivos se desarrollaron siguiendo una metodología iterativa, que involucraba procesos de investigación, diseño, implementación, programación y pruebas para avanzar hacia el siguiente objetivo. Los objetivos que definen el proyecto se adjuntan en la *Figura 1*.



Figura 1: Objetivos del proyecto

3. Descripción de la herramienta

Como se ha mencionado anteriormente, el proyecto se centra en diseñar una simulación virtual completa de la Minifábrica de ICAI para fortalecer el aprendizaje en automatización industrial. Una vez abierto el proyecto en *RobotStudio* y verificados los estados de los controladores, la simulación se ejecuta seleccionando previamente el estado deseado, lo que desencadena la configuración inicial de los actuadores y sensores.

En la simulación se muestra cómo la planta interactúa con los diferentes mecanismos en las estaciones de montaje y desmontaje de los robots *GoFa CRB 15000* y *SWIFTI CRB 1100*.

Además, la Estación 1 cuenta con una implementación de seguridad, y se describen los botones para activar, ralentizar y detener el movimiento del robot.

4. Resultados

Respecto a los resultados obtenidos, se pueden apreciar todos los diseños y lógicas programadas a lo largo del proyecto en el modelo completo adjunto en la *Ilustración 1*.



Ilustración 1: Vista resumen Minifábrica

5. Conclusiones

Los objetivos del proyecto se han alcanzado con excelentes resultados, permitiendo que la Minifábrica de ICAI sea accesible para los alumnos de manera remota con una gran similitud a la realidad del laboratorio. Se enfocó en crear una herramienta modular para una mayor escalabilidad en futuras configuraciones de otros *Cobots* o proyectos. Además, se sugiere como trabajo futuro la incorporación de nuevos elementos, como un almacén o un robot móvil en plataforma, y avanzar hacia un gemelo digital completo del laboratorio para obtener ventajas en precisión, control y seguridad. Por último, se espera implementar de manera más robusta los protocolos de seguridad, como el *Virtual SafeMove*, a medida que las prestaciones de *RobotStudio* se actualicen y mejoren.

6. Referencias

- [1] ABB, «RobotStudio Suite,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robotstudio>. [Último acceso: 2023].
- [2] ABB, «GoFa CRB 15000,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-15000>. [Último acceso: 2023].
- [3] ABB, «SWIFTI,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/swifti>. [Último acceso: 2023].

COLLABORATIVE ROBOTS INTEGRATION AND OPERATION IN ICAI'S MINI-FACTORY

Author: Lettieri Palencia, Marina Beatriz.

Supervisor: Rodríguez Mondéjar, José Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

This Master's Thesis arises from the need to provide the student with a completely virtual and remote tool to design and program a factory from the point of view of industrial automation. In addition, the developed platform will also be used to complement the learning and improve the understanding of the practices in the laboratory.

For this purpose, a simulation of the complete plant of the ICAI Mini-factory was performed in the offline programming and simulation tool for robotic applications, *RobotStudio* [1]. The system has four collaborative robots; *GoFa CRB 15000* [2] and *SWIFTI CRB 1100* [3]. The user will have the ability to modify the modules to define the operation of the reprogrammable automatons, as well as the set of actuators and sensors that make up the laboratory. In addition, thanks to the systematic and adaptable programming that has been developed, this project can be scaled to any other environment.

Keywords: Collaborative Robots, *GoFa CRB 15000*, *SWIFTI CRB 1100*, *RobotStudio* and Simulation.

1. Introduction

Today, the adoption of industrial robots and digitalization has transformed various industrial sectors, optimizing process management and reorganizing workplaces. These robots seek to increase efficiency, precision and productivity, while protecting workers in harmful environments. However, they face challenges such as high costs and security and privacy concerns.

At Universidad Pontificia Comillas, the ICAI Mini-Factory has incorporated *ABB's* advanced *Cobots*, giving students the opportunity to work with these machines and develop skills in the field of Industrial Automation. The project focuses on didactically integrating these *Cobots* in the university, deepening their systems and applications in order to achieve precise control through the *RobotStudio* tool.

2. Project definition

This project focuses on three main objectives. The first one aims to improve the physical integration of the new *Cobots* in the laboratory of Universidad Pontificia Comillas. Several designs and tests of the grippers for the *GoFa CRB 15000 Cobot* were performed with the Solid Edge computer-aided design software and printed with a 3D printer.

The second objective focuses on performing a complete simulation of the Mini-factory using ABB's offline simulation and programming software, *RobotStudio*. The accuracy and productivity of the lab was taken into account, performing measurements of the actual stations and analyzing the sensors and actuators for effective operation.

The third objective is related to the study of protocols and safety levels of each robot. Simulated safety measures were implemented in the plant to ensure the correct operation of the project.

All objectives were developed following an iterative methodology, involving research, design, implementation, programming and testing processes to move towards the next objective. The objectives defining the project are attached in *Figura 2*.

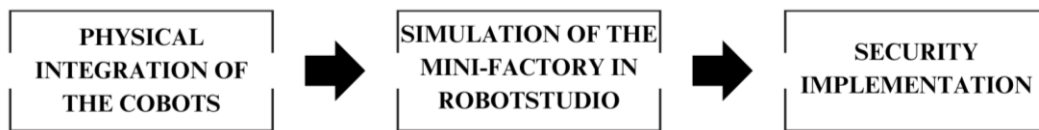


Figura 2: Project objectives

3. Description of the tool

As mentioned above, the project focuses on designing a complete virtual simulation of the ICAI Mini-factory to strengthen learning in industrial automation. Once the project is opened in *RobotStudio* and the controller states are verified, the simulation is run once the desired state is selected, which triggers the initial configuration of the actuators and sensors.

The simulation shows how the plant interacts with the different mechanisms in the assembly and removal stations of the *GoFa CRB 15000* and *SWIFTI CRB 1100* robots.

In addition, Station 1 has a safety implementation, and the buttons for activating, slowing down and stopping the robot motion are described.

4. Results

Regarding the results obtained, all the designs and logics programmed throughout the project can be seen in the complete model shown in *Ilustración 2*.

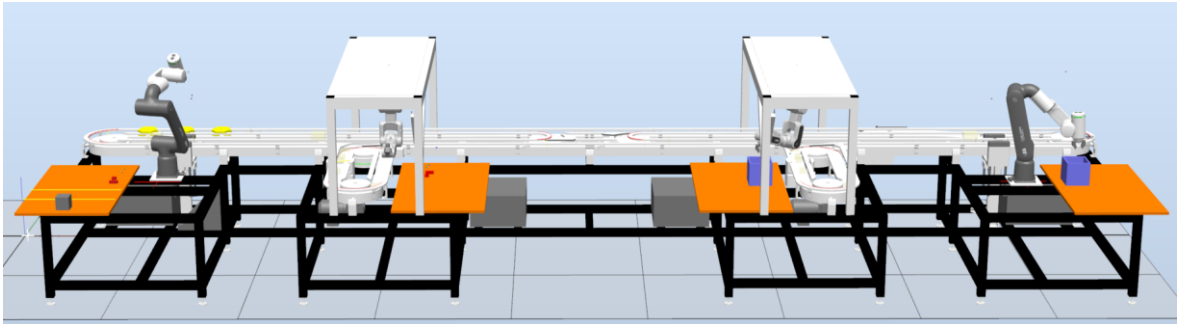


Ilustración 2: Minifactory summary view

5. Conclusions

The objectives of the project have been achieved with excellent results, allowing the ICAI Mini-factory to be accessible to students remotely with a great similarity to the reality of the laboratory. The focus was on creating a modular tool for greater scalability in future configurations of other *Cobots* or projects. In addition, it is suggested as future work the incorporation of new elements, such as a warehouse or a mobile robot on a platform, and move towards a complete digital twin of the laboratory to obtain advantages in precision, control and safety. Finally, safety protocols, such as *Virtual SafeMove*, are expected to be implemented more robustly as *RobotStudio's* features are updated and improved.

6. Bibliography

- [1] ABB, «RobotStudio Suite,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robotstudio>. [Último acceso: 2023].
- [2] ABB, «GoFa CRB 15000,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-15000>. [Último acceso: 2023].
- [3] ABB, «SWIFTI,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/swifti>. [Último acceso: 2023].

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto.....	9
1.2 Objetivos del proyecto.....	11
1.3 Funcionamiento	15
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	20
Capítulo 3. Descripción de las Tecnologías.....	26
3.1 Robots Colaborativos de la Minifábrica de ICAI.....	26
3.1.1 GoFa CRB 15000	27
3.1.2 SWIFTI CRB 1100.....	29
3.2 Tecnologías y software.....	31
3.2.1 Solid Edge.....	31
3.2.2 UltiMaker Cura	34
3.2.3 RobotStudio	36
Capítulo 4. Configuración y Desarrollo del proyecto en RobotStudio	39
4.1 Diseño de las pinzas del Cobot GoFa CRB 15000	39
4.2 Diseño del cargador de la Estación 2 y Estación 3.....	43
4.3 Minifábrica 3D	44
4.4 Programación de los Robots.....	49
4.5 Configuración de la simulación.....	54
4.6 Exportación de archivos RobotStudio a otros dispositivos.....	62
4.7 Problemas destacables	63
Capítulo 5. Protocolo de Seguridad	65
Capítulo 6. Presupuesto.....	69
Capítulo 7. Análisis de Resultados, Conclusiones y Trabajos Futuros.....	70
Capítulo 8. Bibliografía.....	72

<i>ANEXO I: Estado de la cuestión de la Minifábrica física</i>	<i>78</i>
<i>ANEXO II: Planos de la Minifábrica</i>	<i>82</i>
<i>ANEXO III: Planos pinzas GoFa CRB 15000</i>	<i>86</i>
<i>ANEXO IV: Estaciones Minifábrica en RobotStudio</i>	<i>89</i>
<i>ANEXO V: Códigos de Rapid</i>	<i>93</i>
<i>ANEXO VI: Alineación con los ODS</i>	<i>110</i>

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Vista resumen Minifábrica	10
Ilustración 2: Minifactory summary view	14
Ilustración 3: GoFa CRB 15000 [7]	8
Ilustración 4: SWIFTI CRB 1100 [8]	8
Ilustración 5: Vista general del diseño final de la pinza para el Cobot GoFa CRB 15000 .	12
Ilustración 6: Vista general del modelo 3D de la Minifábrica	13
Ilustración 7: Vista general del protocolo de seguridad implementado en la Estación 1 de la planta	14
Ilustración 8: Pestaña de RobotStudio "Estado de controlador"	16
Ilustración 9: Estado de la simulación del proyecto en la pestaña "Control de simulación"	16
Ilustración 10: Diseño 3D completo de la Minifábrica parte delantera.....	17
Ilustración 11: Diseño 3D completo de la Minifábrica parte trasera.....	18
Ilustración 12: Pestaña “Entrega: Ver1” de la implementación de seguridad en la Estación 1	18
Ilustración 13: Pestaña "Señales de estación" de la implementación de seguridad en la Estación 1	19
Ilustración 14: General Motor en Nueva Jersey [12]	20
Ilustración 15: Unimate 001, el primer robot industrial [12]	20
Ilustración 16: Cobot UR5, el primero de la historia [18].....	22
Ilustración 17: Estado del arte antes de comenzar el proyecto de la Estación 1 con el robot IRB 120	23
Ilustración 18: Estado de la cuestión Estación 1 física.....	24
Ilustración 19: Estado de la cuestión Estación 2 física.....	24
Ilustración 20: Estado de la cuestión Estación 3 física.....	25
Ilustración 21: Estado de la cuestión Estación 4 física.....	25
Ilustración 22: Especificaciones técnicas generales GoFa CRB 15000 [22].....	28
Ilustración 23: Especificaciones técnicas generales SWIFTI CRB 1100 [8]	30

Ilustración 24: Licencia Solid Edge	32
Ilustración 25: Interfaz Solid Edge con la pinza del GoFa CRB 15000.....	32
Ilustración 26: Interfaz Solid Edge con el cargador de la Estación 2 y Estación 3	33
Ilustración 27: Versión UltiMaker Cura	35
Ilustración 28: Interfaz UltiMaker Cura con la pinza del GoFa CRB 15000	35
Ilustración 29: Licencias RobotStudio	37
Ilustración 30: Interfaz RobotStudio nueva estación.....	38
Ilustración 31: Vista lateral diseño en Solid Edge pinza GoFa CRB 15000	40
Ilustración 32: Vista frontal diseño en Solid Edge pinza GoFa CRB 15000	40
Ilustración 33: Vista diagonal diseño en Solid Edge pinza GoFa CRB 15000	40
Ilustración 34: Pinzas GoFa CRB 15000 cerradas	41
Ilustración 35: Pinzas GoFa CRB 15000 abiertas	42
Ilustración 36: Pinzas GoFa CRB 15000 con base de trabajo	42
Ilustración 37: Vista frontal cargador.....	43
Ilustración 38: Vista diagonal cargador.....	44
Ilustración 39: Estructura general Minifábrica.....	45
Ilustración 40: Ventana "Controlador" de RobotStudio	46
Ilustración 41: Palés de la Minifábrica en RobotStudio.....	47
Ilustración 42: Piezas de lego y caja de la Minifábrica en RobotStudio	47
Ilustración 43: Cargador de la Minifábrica en RobotStudio	48
Ilustración 44: Caja de almacenamiento de la Minifábrica en RobotStudio	48
Ilustración 45: Ascensor de la Minifábrica en RobotStudio	49
Ilustración 46: Organización de las estaciones de la Minifábrica [28].....	50
Ilustración 47: Señales Estación 1 y Estación 2 [28].....	50
Ilustración 48: Señales Estación 3 y Estación 4 [28].....	51
Ilustración 49: Lógica de estación general	55
Ilustración 50: Bloques de sensores de piezas lego	57
Ilustración 51: Bloque "Piezas Lego"	58
Ilustración 52: Bloque "Piezas Lego S2"	59
Ilustración 53: Bloque "Piezas Lego S3"	60

Ilustración 54: Bloque "Piezas Lego S4"	61
Ilustración 55: Pack and Go y Unpack and Work RobotStudio	63
Ilustración 56: Ventana Señales de estación para protocolo de seguridad	67
Ilustración 57: Bloque "SpeedLimiter"	68
Ilustración 58: Estación 1 Minifábrica física.....	78
Ilustración 59: Estación 2 Minifábrica física.....	79
Ilustración 60: Estación 3 Minifábrica física.....	80
Ilustración 61: Estación 4 Minifábrica física.....	81
Ilustración 62: Planta plano AutoCad Minifábrica.....	82
Ilustración 63: Alzado plano AutoCad Minifábrica	83
Ilustración 64: Perfil plano AutoCad Minifábrica.....	84
Ilustración 65: Vista completa plano AutoCad Minifábrica.....	85
Ilustración 66: Plano pieza oficial de sujección GoFa CRB 15000	86
Ilustración 67: Plano pinza oficial GoFa CRB 15000	87
Ilustración 68: Vistas tridimensionales pinza oficial GoFa CRB 15000 [34]	88
Ilustración 69: Estación 1 Minifábrica RobotStudio	89
Ilustración 70: Estación 2 Minifábrica RobotStudio	90
Ilustración 71: Estación 3 Minifábrica RobotStudio	91
Ilustración 72: Estación 4 Minifábrica RobotStudio	92

Índice de figuras

Figura 1: Objetivos del proyecto	9
Figura 2: Project objectives	13
Figura 3: Esquema metodología iterativa	14
Figura 4: Esquema programación robots	54

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la introducción de los robots industriales y, en términos generales, la digitalización y todas sus correspondientes tecnologías, han revolucionado la mayoría de sectores industriales, la gestión de procesos y la organización de los diferentes puestos de trabajo.

Principalmente, el objetivo de la incorporación de dichos robots en la industria se centra en la búsqueda de la mayor eficacia, en términos de precisión y repetitividad, de la optimización de la productividad y de la sustitución del ser humano en los entornos más peligrosos, así como aquellos en los que se incluyen cargas de objetos pesados.

Cabe destacar que, al igual que toda innovación, los robots mencionados también tienen ciertos inconvenientes en términos de coste y seguridad. Por un lado, su alto costo de adquisición y mantenimiento puede representar una inversión significativa para las empresas, especialmente problemático para las más pequeñas o aquellas con márgenes de beneficio ajustados. Sin embargo, a medida que la tecnología de los robots avanza, es probable que estos se vuelvan más accesibles [1]. Además, es una realidad que cada país ha incluido en su Plan de Recuperación el apoyo a las PYMES (Pequeñas y Medianas Empresas) industriales mediante la difusión y adopción de nuevas tecnologías digitales. Por otro lado, los robots industriales no sólo pueden interferir en la seguridad física de los empleados, si no que en muchas ocasiones generan brechas en términos de privacidad y confidencialidad de datos sensibles para la industria [2].

Hoy en día, se considera una realidad la incorporación de los robots en la mayoría de industrias logísticas y automovilísticas [3]. Generalmente, los almacenes y las fábricas se encuentran totalmente automatizados para fabricar, manipular o controlar las mercancías.

La conexión más directa entre la robotización de la industria y el aprendizaje recibido sobre este sector en la Universidad Pontificia Comillas se encuentra en la Minifábrica de ICAI. Durante este último año 2022, el laboratorio se ha renovado con los nuevos *Cobots* de ABB [4]; el *GoFa CRB 15000* [5] y el *SWIFTI CRB 1100* [6].



Ilustración 3: GoFa CRB 15000 [7]



Ilustración 4: SWIFTI CRB 1100 [8]

Este avance permite al estudiante trabajar en contacto con algunos de los robots industriales más punteros, así como profundizar en sus sistemas de movimiento, programación y seguridad. Por lo que, el objetivo original de la integración de esta innovación en la escuela, y más concretamente en las asignaturas de Automatización Industrial, es didáctico y está enfocado a desarrollar las habilidades del alumno en dicho sector.

En conclusión, este proyecto va a desarrollar numerosos aspectos relevantes para la integración física de los *Cobots* mencionados anteriormente en la universidad, así como un análisis y una implementación detallada del propio laboratorio, para un correcto control y una precisa simulación en la herramienta *RobotStudio* [9].

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación principal para diseñar este proyecto radica en la idea distorsionada que la sociedad posee sobre la implementación de los robots industriales. Es evidente que esta innovación acarrea muchos pensamientos encontrados a la hora de valorar las ventajas y desventajas que pueden suponer en el desarrollo actual y futuro de la sociedad.

Con este proyecto se quieren centrar los focos en la utilidad de esta tecnología para desarrollar el bien intrínseco de la ingeniería. Cabe mencionar que los ingenieros somos los responsables de promover las mejoras sociales a través de medios técnicos, lograr avances en la vida gracias a la implicación de la tecnología y, sobre todo, promover el bienestar de la humanidad.

El principal problema puesto sobre la mesa en este proyecto se centra en la disminución de contrataciones de empleados en aquellos puestos que puede asumir un robot industrial. Sin ninguna duda, este es un asunto polémico que este proyecto pretende erradicar, ya que, en términos generales, se deja llevar por la ignorancia del contexto actual.

Para ser más precisos, el objetivo principal de la introducción de esta tecnología en la industria radica en la sustitución del hombre en entornos peligrosos, así como en la obtención de repetitividad y precisión de la mano del aumento de la productividad. Es innegable la facilidad para intercambiar información con otros sistemas que poseen los robots industriales, en comparación con un ser humano y los posibles errores manuales que este pueda conllevar. Por último, la reprogramación de los robots industriales es una característica que eleva exponencialmente el valor de su utilización en la industria en términos de tiempo y coste, así como su relación con la calidad de las tareas rutinarias de los empleados.

Como se puede observar, los dos principales motivos que promueven la integración de los robots están claramente ligados con la calidad y seguridad del trabajador, y se enfocan en mejorarlos. Por lo tanto, el objetivo no reside en reducir el número de trabajadores por el simple hecho de disminuir los costes que estos suponen, sino llevar a cabo y fomentar, de una manera menos agresiva, la mejora de la calidad y cualificación de sus trabajos. De todos modos, es evidente que el pensamiento crítico del ser humano es indispensable para evolucionar, por lo que siempre es crucial valorar todas las consecuencias con la información verídica necesaria.

Además, cabe destacar que, otro objetivo primordial para llevar a cabo este proyecto se encuentra en favorecer y fortalecer la colaboración entre los empleados y los manipuladores programables. Gracias al desarrollo de una herramienta totalmente virtual y remota, se reducen muchas de las limitaciones que se encuentran a la hora de realizar y experimentar desarrollos en el sector de la robotización en la industria. Es evidente que la creación de una simulación como la expuesta en este proyecto supone un coste en tiempo y recursos, pero no es comparable a la inversión e infraestructura necesaria para poder manipular e interactuar presencialmente con un robot en un laboratorio real.

El último motivo con más impacto académico que ha movido el desarrollo de este trabajo ha sido la posibilidad de hacer accesible un modelo virtual de la Minifábrica de ICAI para todos los alumnos de manera remota. La idea es conseguir un entorno alineado con la realidad de una fábrica para así poder explotarlo en todos sus aspectos. Los principales usos de esta aplicación se centrarán en el desarrollo de prácticas de laboratorio, pruebas de nuevos conceptos, simulaciones previas a una implementación física, estudio y comprensión de conocimientos de una manera remota, aprendizaje en profundidad de la programación en *RobotStudio*...

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Respecto a los objetivos de este proyecto, se considera conveniente mencionar que, estos se pueden dividir en tres ramas diferenciadas.

El primer objetivo a abordar se centró en la mejora de la integración física de los nuevos *Cobots* en el laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas. El problema residía en las pinzas del *Cobot GoFa CRB 15000*, ya que estas no estaban diseñadas en función de las necesidades de las piezas con las que tenía que trabajar el robot. Por esta razón, se realizaron numerosos diseños de las mismas para mejorar su productividad y reducir su nivel de error e imprecisión. Todas estas pruebas mencionadas se llevaron a cabo con *Solid Edge* [10], un programa parametrizado de diseño asistido por computadora de piezas tridimensionales 3D. Finalmente, una vez obtenido el prototipo efectivo para la manipulación de objetos requerida, se procedió a optimizar su diseño para evitar el desperdicio de material y perfeccionar su estética (redondeos, imperfecciones...). Cabe mencionar que, las pinzas diseñadas se imprimieron en el laboratorio de fabricación de la Universidad Pontificia Comillas, con la impresora 3D: *HP Jet Fusion 4200* [11].

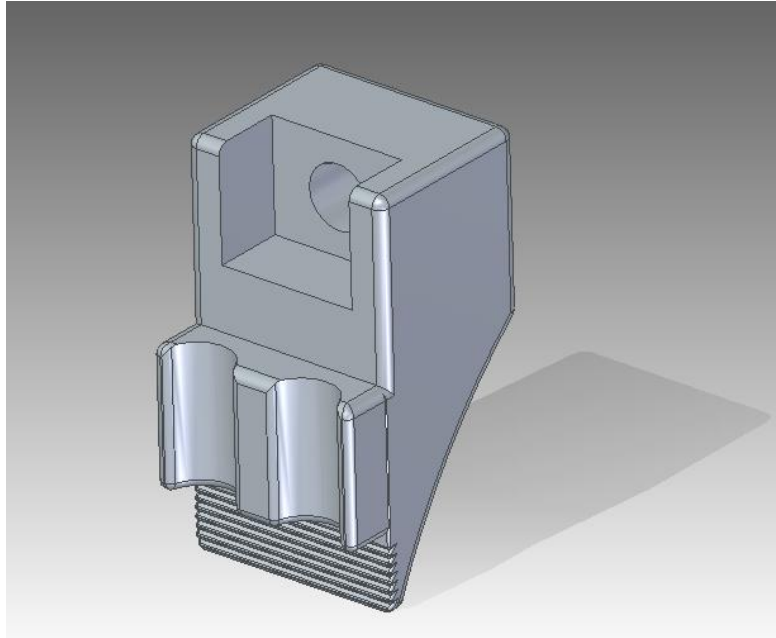


Ilustración 5: Vista general del diseño final de la pinza para el Cobot GoFa CRB 15000

En segundo lugar, el principal resultado a obtener al finalizar este trabajo reside en la ejecución de una simulación completa de la Minifábrica de la Universidad Pontificia Comillas. Este punto se va a realizar con el software de simulación y programación *offline* de ABB, *RobotStudio* [9].

En concreto, la simulación tiene como condición primordial cumplir con la precisión y productividad propia del laboratorio de la universidad, para lo que se requirieron numerosas medidas de las estaciones reales, así como un análisis exhaustivo de los sensores, actuadores y diferentes señales que permitieran un efectivo funcionamiento de la secuencia de ejecución al completo.

Cabe mencionar que, el laboratorio cuenta con cargadores transversales a la estructura fija de las estaciones, los cuales también se introdujeron en la simulación para dotar al proyecto del mayor realismo y fiabilidad posible.

Además, para conseguir una simulación con la flexibilidad necesaria para hacer uso de todas las funcionalidades propias de este laboratorio, se programaron algunos robots de la simulación como montadores y otros como desmontadores. También se combinaron las opciones físicas y geométricas para la interacción de algunos mecanismos del conjunto con el entorno virtual, como se detallará más adelante.

Todas las decisiones implementadas se llevaron a cabo buscando aportar la mayor robustez al proyecto, para así reducir la componente de inconvenientes aleatorios. En la *Ilustración 6* se muestra el modelo 3D de la planta completa implementado en *RobotStudio*.

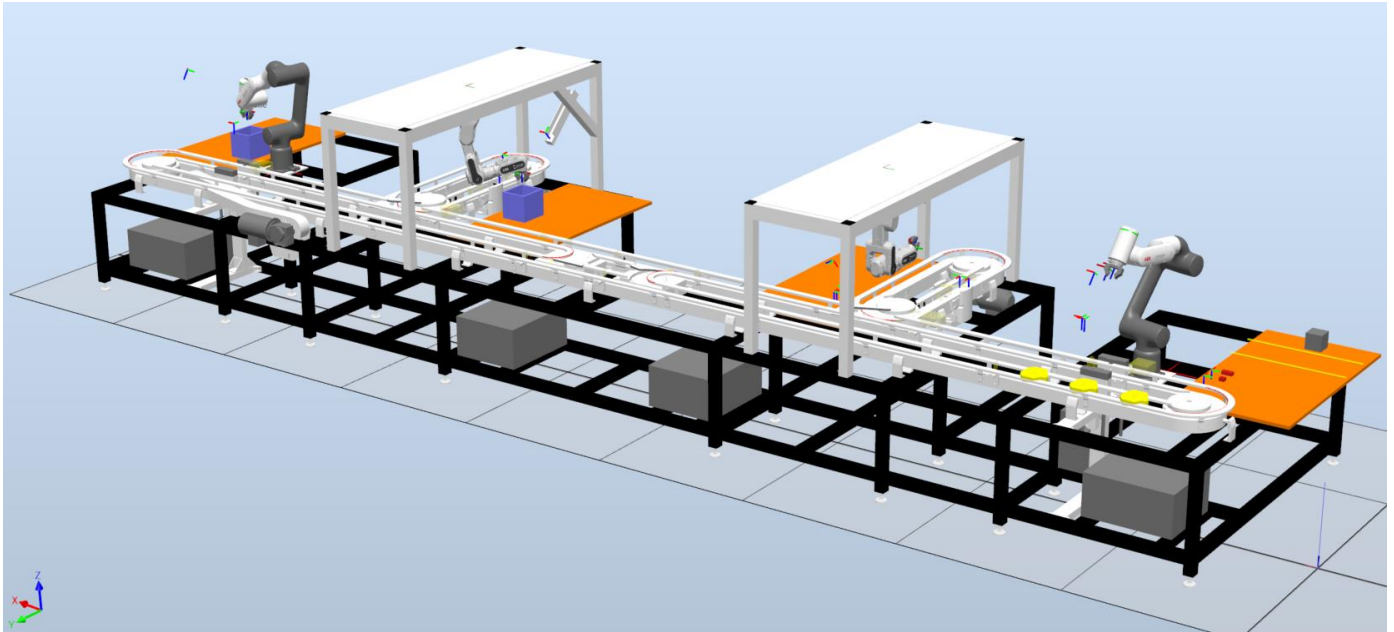


Ilustración 6: Vista general del modelo 3D de la Minifábrica

El estudio de los protocolos y niveles de seguridad de cada robot conformó el último objetivo importante para asegurar el buen funcionamiento del proyecto. Esta sección cuenta con una gran componente de investigación, así como su correspondiente implementación simulada en el proyecto, como se mencionará a lo largo de este documento. Se adjunta en la *Ilustración 7* la parte de la planta dedicada a la simulación del laboratorio a nivel de seguridad.

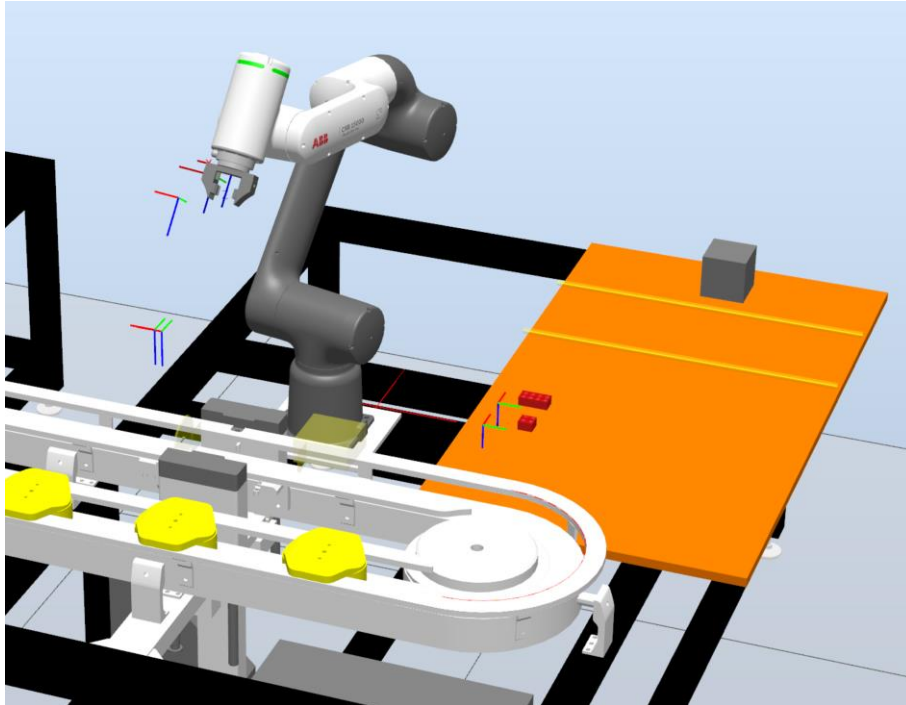


Ilustración 7: Vista general del protocolo de seguridad implementado en la Estación 1 de la planta

Por último, cabe mencionar que el desarrollo de los objetivos se ha basado en una metodología iterativa [12]. Esto se debe a que en cada uno de los objetivos y en sus correspondientes tareas, se realizaron procesos de investigación, adquisición de información, de diseño, de implementación, de programación y finalmente, se llevaron a cabo las pruebas necesarias para comprobar su correcto funcionamiento y así poder continuar con el siguiente objetivo. Este proceso se puede observar en la *Figura 3*.

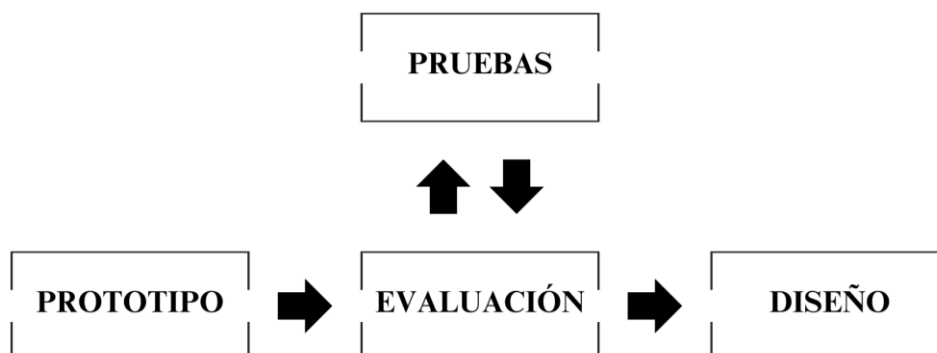


Figura 3: Esquema metodología iterativa

1.3 FUNCIONAMIENTO

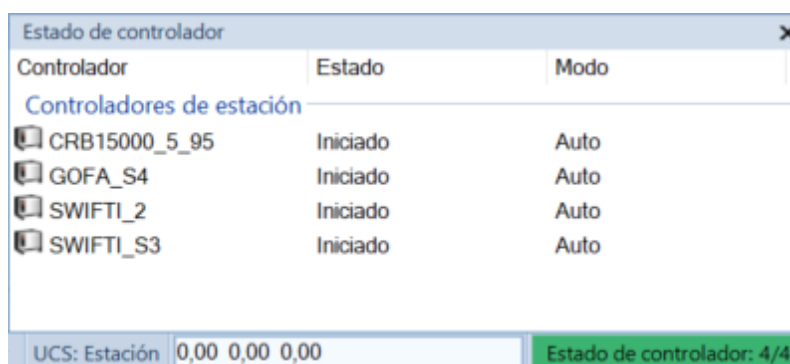
Esta sección busca cubrir una guía rápida para comprender y poder aplicar el uso de la herramienta de simulación diseñada del laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas. Por esta razón, se van a desarrollar los principales puntos a conocer para ser capaz de ejecutar el programa de *RobotStudio* e identificar las principales funcionalidades y reflexiones sobre la planta implementada en el proyecto.

El funcionamiento principal de este Proyecto de Fin de Máster consiste en el diseño y desarrollo de una simulación virtual completa de la Minifábrica de ICAI para fortalecer y reforzar el aprendizaje del alumno en todos los ámbitos relacionados con la automatización industrial.

En concreto, este trabajo agrupa todas las tecnologías y programaciones relevantes de los robots: *GoFa CRB 15000* y *SWIFTI CRB 1100*. Este proyecto será capaz de mejorar las capacidades de adquisición de contenidos del alumno fuera del laboratorio físico de la universidad. Es importante mencionar que, en algunas ocasiones, la simulación ayudará al alumno a practicar con las tecnologías de la Minifábrica de una manera independiente al desarrollo convencional en el laboratorio, aunque en otras ocasiones las actividades se desenvolverán de una manera complementaria.

Antes de comenzar a explicar el funcionamiento de la simulación desarrollada, cabe destacar que todas las especificaciones técnicas sobre el software de simulación y programación empleado, *RobotStudio*, se encuentran en el apartado 3.2.3. *RobotStudio*. Por lo que se recomienda acudir a esta sección de la memoria en caso de duda o confusión con algún término o ejecución del programa.

El primer paso para realizar una correcta simulación es abrir el proyecto correspondiente y dejar que el programa inicie de la manera adecuada todos los controladores de la planta. A continuación, en la *Ilustración 8*, se puede observar la pantalla del estado de los controladores iniciados. Además, se puede visualizar en verde en la parte inferior derecha como se indica el número de controladores iniciados de la manera correcta.



Controlador	Estado	Modo
Controladores de estación		
CRB15000_5_95	Iniciado	Auto
GOFA_S4	Iniciado	Auto
SWIFTI_2	Iniciado	Auto
SWIFTI_S3	Iniciado	Auto

UCS: Estación 0,00 0,00 0,00 Estado de controlador: 4/4

Ilustración 8: Pestaña de RobotStudio "Estado de controlador"

Una vez comprobado que todos los controladores se han iniciado en modo automático, se puede proceder a elegir el estado de la simulación. Este se introduce en el software al elegir el proyecto, por lo que simplemente se debe seleccionar "TFM_MarinaLettieriPalencia" de la pestaña correspondiente del "Control de simulación". Para mayor claridad, se adjunta en la *Ilustración 9* la visualización que se debe de seleccionar.



Ilustración 9: Estado de la simulación del proyecto en la pestaña "Control de simulación"

A continuación, una vez seleccionado el estado, se colocarán todos los actuadores, sensores y piezas en los estados y posiciones iniciales correspondientes para que la simulación comience en el punto indicado según la programación realizada. Este es un paso determinante para que todo el proyecto funcione de la manera correcta, ya que hay que establecer un fotograma de referencia para que todos los sistemas funcionen coordinados.

El siguiente paso a realizar se corresponde con la ejecución de la simulación. Al pulsar en el botón “Reproducir” en la pestaña “Control de simulación”, se puede observar cómo toda la planta comienza a trabajar como si de un gemelo digital simulado se tratase.

En términos generales, se puede visualizar todo el diseño 3D de la Minifábrica interactuando con los diferentes mecanismos introducidos. Cabe mencionar que las estaciones del proyecto se dividen de la siguiente forma:

- Estación 1: robot *GoFa CRB 15000* montador.
- Estación 2: robot *SWIFTI CRB 1100* montador.
- Estación 3: robot *SWIFTI CRB 1100* desmontador.
- Estación 4: robot *GoFa CRB 15000* desmontador.

En la *Ilustración 10* y en la *Ilustración 11* se encuentra representado el diseño completo de la planta 3D de la Minifábrica.

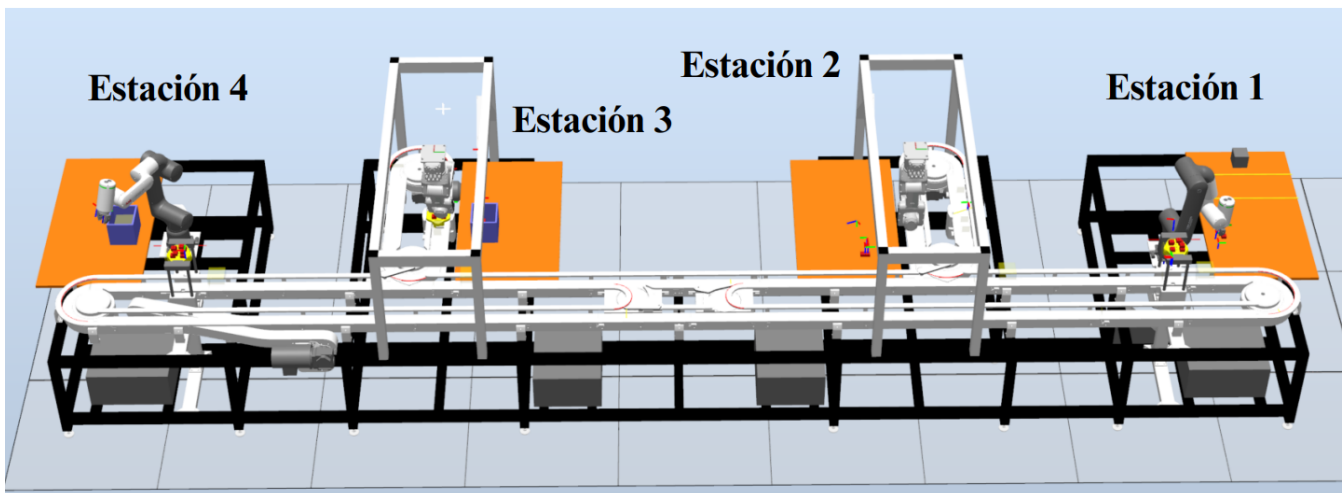


Ilustración 10: Diseño 3D completo de la Minifábrica parte delantera

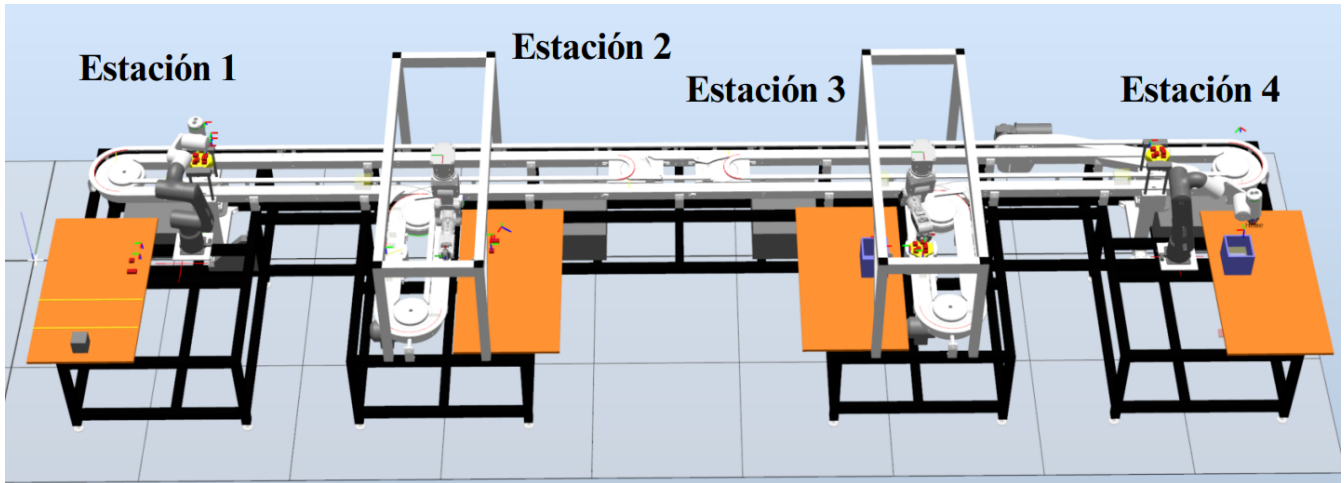


Ilustración 11: Diseño 3D completo de la Minifábrica parte trasera

Cabe destacar que, la Estación 1 cuenta con la implementación de seguridad propia de un *Cobot* de estas características. Como se mencionará más adelante, después de una gran labor de investigación, se decidió simplificar la componente práctica de este objetivo del proyecto. Esta seguridad se diseñó con una caja, simulando al operario de una industria, y dos sensores de seguridad, como son las líneas amarillas que se pueden apreciar en la *Ilustración 12*.

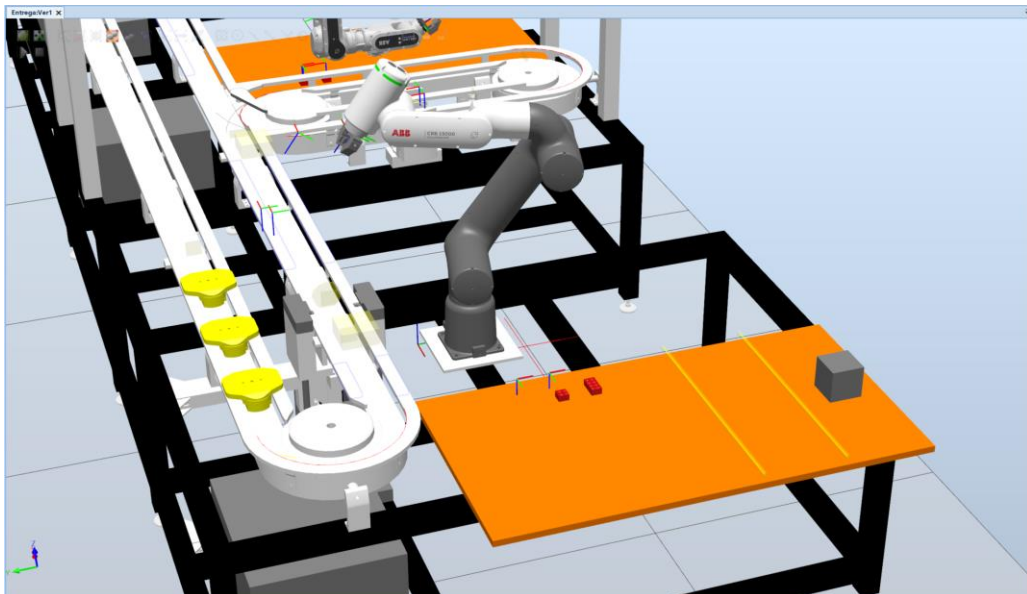


Ilustración 12: Pestaña “Entrega: Ver1” de la implementación de seguridad en la Estación 1

En concreto, el funcionamiento de la seguridad en esta estación se puede comprobar con los botones adjuntos en la *Ilustración 13*. Para activar el movimiento de la caja se debe pulsar el botón de entrada “iMoverCaja”. Se podrá apreciar cómo se reduce la velocidad del robot a un 30% una vez dicho operador simulado cruce el primer sensor amarillo. Al alcanzar la segunda barrera de seguridad, el robot se parará para evitar ningún daño o lesión al humano. Finalmente, para poder posicionar la caja en su lugar de salida, se debe resetear esta con el botón de entrada “iResetCaja”.

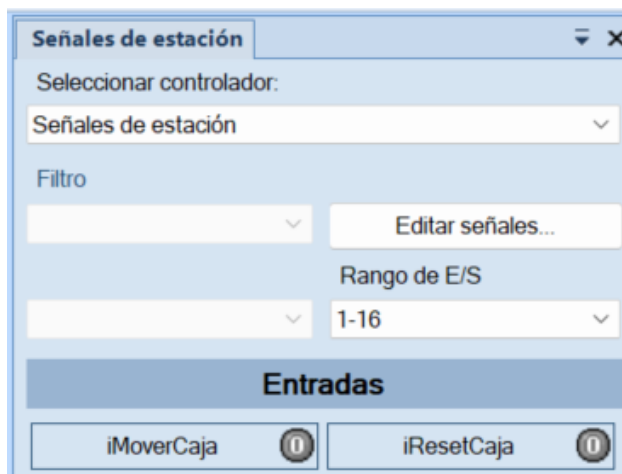


Ilustración 13: Pestaña "Señales de estación" de la implementación de seguridad en la Estación 1

Por último, como se ha mencionado anteriormente, esta sección del proyecto no cumplía más que la función de proporcionar una guía rápida para la interacción del usuario con la simulación. Para obtener una mayor profundidad del desarrollo de todas las funcionalidades mencionadas o de la programación que se encuentra detrás de la interfaz presentada, se debe acudir al *Capítulo 4. Configuración y Desarrollo del proyecto en RobotStudio*.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La gran mayoría de la sociedad cree firmemente que la automatización de procesos con robots industriales es una invención de la última época. Sin embargo, el origen de la robotización industrial se remonta a mediados del siglo pasado. El comienzo se sitúa en Estados Unidos, en la fábrica de *General Motors* en Nueva Jersey [13]. Esta se puede ver representada en la *Ilustración 14*.

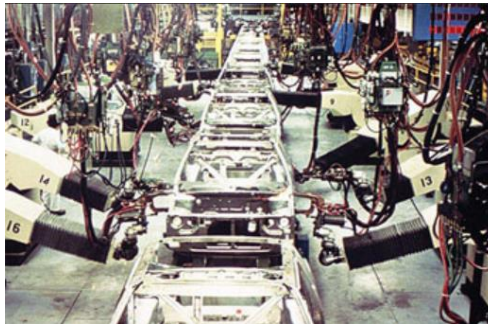


Ilustración 14: General Motor en Nueva Jersey [12]

El primer robot industrial, llamado *Unimate 001* [14], era un brazo automatizado encargado de realizar exclusivamente una tarea de colocación y apilamiento de piezas de metal fundido, adjunto en la *Ilustración 15*. La evolución resultó ser exponencial, ya que en tan solo unos años, la planta implementó más de medio millar de robots diseñados por *Joseph Engelberger* y *George Devol*.



Ilustración 15: Unimate 001, el primer robot industrial [12]

En las últimas décadas, la sociedad y por lo tanto, la industria, ha ido evolucionando. El aumento de nuevas empresas y de la escalabilidad de las líneas de producción conllevó la aparición de nuevas necesidades y expectativas a cubrir por los consumidores. Los principales inconvenientes que acarreaban los robots industriales se consiguieron mitigar con la invención de los robots colaborativos, coloquialmente conocidos como *Cobots* [15]. Estos fueron inventados por *J. Edward Colgate* y *Michael Peshkin*, profesores de la Universidad del Noroeste, en 1996 [16]. Por un lado, estos nuevos robots consiguieron aumentar la seguridad para que el trabajo entre la persona y el automatismo se pudiese realizar en un entorno más cercano y flexible. Por lo general, los *Cobots* se podían instalar en el mismo entorno en el que trabajaban los empleados, lo que antes era impensable debido a la normativa que se encontraba vigente. Además, gracias a la posible interacción con el *Cobot*, la instalación del mismo se podía realizar por el personal de la empresa, sin necesidad de contratar programadores externos debido a su simple e intuitiva programación. También resulta importante señalar que su huella en la planta es muy reducida, debido a la reducción de vallas o sensores de proximidad.

Por otro lado, el segundo problema mitigado estuvo relacionado con el coste de adquisición y puesta en marcha. Con la aparición de los robots colaborativos se abrió un camino hacia un nuevo mercado, ya que estaban específicamente dirigidos a fabricantes de pequeño y mediano tamaño que percibían la robótica como algo demasiado complejo y costoso. Su flexibilidad para moverse a lo largo de la instalación y adecuarse a las distintas cargas de trabajo también hizo cambiar el punto de vista de muchos consumidores.

Cabe mencionar que, haciendo referencia a una empresa puntera en esta tecnología en el sector, el primer *Cobot* de la historia se instaló en 2008 en los establecimientos de *Linatex* [17], proveedor de plásticos y caucho para aplicaciones industriales de origen danés. Este lo lanzó el proveedor más grande de robots, *Universal Robots*, y recibió el nombre de *Cobot UR5 (Ilustración 16)*. Actualmente, al igual que se realiza en la mayoría de industrias, este fabricante cuenta con más de 8400 *Cobots* instalados en 55 países de todo el mundo.



Ilustración 16: Cobot UR5, el primero de la historia [18]

Para concluir la componente histórica de los robots en la industria, es crucial señalar que estos fueron desarrollados en su origen para cubrir tareas repetitivas y peligrosas, desde un punto de vista efectivo y óptimo. Sin embargo, en los últimos años, se han empezado a encontrar dichos automatismos en los sectores educativos, alimenticios y médicos, ya que estos robots evolucionados albergan una gran ventaja en cuanto a higiene en los procesos y flexibilidad [19].

Además, se considera importante hacer referencia al estado del arte del diseño 3D y la simulación de la planta de la Minifábrica de ICAI cuando se comenzó este trabajo. Cabe destacar que, este proyecto no es exactamente una continuación del Trabajo de Fin de Grado de Gonzalo Dorao Sánchez-Campos, aunque reutiliza diseños y técnicas implementadas en el mismo.

En términos generales, este último trabajo mencionado consistía en la simulación de uno de los robots antiguos de la Minifábrica de la universidad, el robot *IRB 120* [20]. Como se puede ver representado en la *Ilustración 17*.

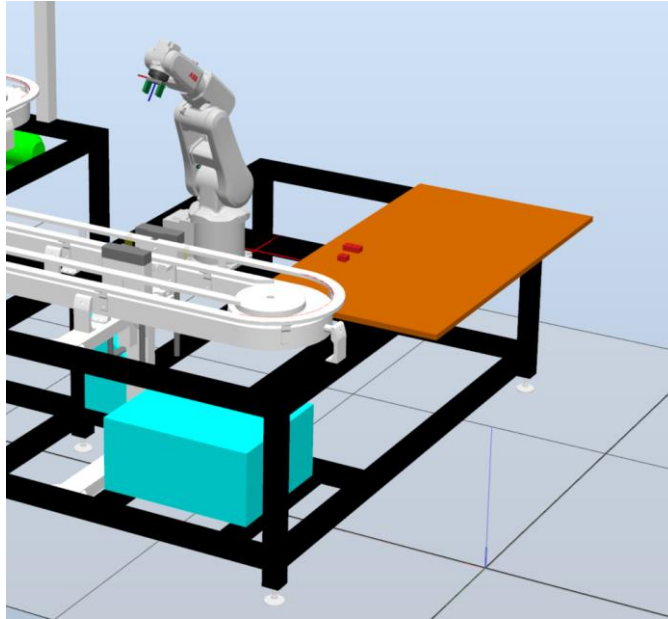


Ilustración 17: Estado del arte antes de comenzar el proyecto de la Estación 1 con el robot IRB 120

Sin embargo, para desarrollar este proyecto se emplearon como punto de partida exclusivamente los diseños 3D de la planta completa y la programación de movimientos de palés y piezas, así como la interacción entre los diferentes componentes de la planta, como son los actuadores y sensores. Cabe mencionar que, en algunos casos, todos estos comportamientos estaban diseñados para interactuar exclusivamente en la Estación 1 con el robot *IRB 120*, por lo que se tuvieron que reprogramar para que funcionasen de la manera apropiada con los robots *GoFa CRB 15000* y *SWIFTI CRB 1100* empleados en este proyecto. Además, es importante señalar que los diseños tridimensionales de la planta también se modificaron y actualizaron para adaptarse a las circunstancias en las que se encontraba el laboratorio en ese momento.

Por lo que, la idea principal consistió en convertir un diseño algo tedioso en un sistema modular, con una programación sencilla y con la flexibilidad necesaria para escalar el proyecto a otras circunstancias según las necesidades del laboratorio y del aprendizaje de los alumnos. Todo ello, implementando los nuevos *Cobots* que se habían incorporado en la Minifábrica y consiguiendo la coordinación y sincronismo propio de un laboratorio con cuatro estaciones funcionando en tiempo real.

Finalmente, se ha considerado apropiado adjuntar fotografías en las que se puede apreciar el estado del laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas en el momento de la realización de este proyecto. En estas se pueden visualizar las estaciones mencionadas, así como los diferentes automatismos, actuadores, sensores... En concreto, en la *Ilustración 18* y en la *Ilustración 19* se pueden observar las primeras dos estaciones del laboratorio; robot *GoFa CRB 15000* montador y robot *SWIFTI CRB 1100* montador, respectivamente.



*Ilustración 18: Estado de la cuestión Estación 1
física*



*Ilustración 19: Estado de la cuestión Estación 2
física*

A continuación, se adjunta el robot *SWIFTI CRB 1100* desmontador en la *Ilustración 20* y el robot *GoFa CRB 15000* desmontador en la *Ilustración 21*.



*Ilustración 20: Estado de la cuestión Estación 3
física*



*Ilustración 21: Estado de la cuestión Estación 4
física*

Cabe mencionar que todas las especificaciones técnicas de los dos robots implementados en la simulación se encuentran en el capítulo 3.1. *Robots Colaborativos de la Minifábrica de ICAI*. Además, en el *ANEXO I: Estado de la cuestión de la Minifábrica física* se encuentran dichas ilustraciones ampliadas para una correcta visualización de las estaciones reales.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En esta sección se van a incluir todas las especificaciones técnicas y recursos empleados para el desarrollo de este proyecto. Se van a concretar todos los detalles necesarios para poder ser capaz de replicar todo el proceso desde comienzo a fin.

3.1 ROBOTS COLABORATIVOS DE LA MINIFÁBRICA DE ICAI

En primer lugar, se van a desarrollar todas las características específicas de los *Cobots* empleados en este proyecto.

Sin embargo, antes de comenzar a desarrollar cada *Cobot* por separado, se considera importante incluir algunas características comunes a todos los robots colaborativos.

- Capacidad de Carga y Alcance: Los *Cobots*, incluido el *ABB GoFa CRB 15000* y el *SWIFTI CRB 1100*, generalmente tienen una capacidad de carga útil más baja en comparación con los robots industriales tradicionales. Pueden manejar cargas más ligeras, típicamente hasta varios kilogramos, y su alcance también suele ser más reducido, lo que los hace ideales para tareas más cercanas al operador humano.
- Sistema de Visión, Detección Avanzado y Seguridad: Los *Cobots* están equipados con un sistema de visión y con sensores avanzados que les permiten interactuar de forma segura con su entorno. Gracias a la aplicación de sistemas como la visión artificial pueden detectar objetos y personas cercanas, lo que facilita su colaboración con trabajadores humanos sin poner en peligro su seguridad.
- Programación Fácil e Intuitiva: Los *Cobots* están diseñados para ser programados de manera sencilla y rápida, lo que facilita su implementación y mejora la eficiencia operativa en diferentes aplicaciones. A menudo, presentan interfaces de usuario amigables que permiten a los operadores enseñar tareas de forma intuitiva.

- Diseño compacto y Ergonómico: Su diseño compacto y ergonómico permite que el robot ocupe menos espacio y sea fácil de integrar en diferentes entornos de trabajo, lo que brinda mayor flexibilidad en la disposición del área de trabajo.
- Aplicaciones Versátiles: Estos robots colaborativos son adecuados para una amplia gama de aplicaciones industriales, desde tareas de ensamblaje y manipulación de materiales hasta inspecciones y control de calidad.
- Colaboración Hombre-Máquina: La principal característica distintiva de los *Cobots* es su capacidad para colaborar directamente con los trabajadores humanos en el mismo espacio de trabajo. Esto permite una mayor flexibilidad en la producción y mejora la eficiencia en ciertas tareas.

3.1.1 GoFa CRB 15000

El *Cobot GoFa CRB 15000* es el primer robot colaborativo implementado en la simulación de la planta de la Minifábrica de la universidad. Como se ha mencionado anteriormente, este está diseñado para trabajar con humanos en tareas repetitivas y peligrosas. Estos *Cobots* presentan una innovadora solución en la industria, al proporcionar una combinación única de seguridad, flexibilidad y eficiencia en los procesos de fabricación y otras áreas industriales [21]. Con capacidades de aprendizaje automático y sensores avanzados, los *Cobots* pueden trabajar de manera segura al lado de los trabajadores y ajustar su comportamiento en tiempo real. Además, su facilidad de programación y bajo coste hacen que los *Cobots* sean una solución atractiva para empresas de todos los tamaños.

A continuación, se adjunta en la *Ilustración 22* un resumen de las especificaciones técnicas generales del *Cobot GoFa CRB 15000*.

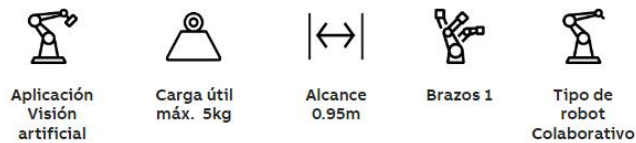


Ilustración 22: Especificaciones técnicas generales GoFa CRB 15000 [22]

Por último, se quiere concluir el desarrollo de las características de este robot con las anotaciones técnicas proporcionadas en la página web oficial del proveedor, ABB [22]:

- Limitación de potencia y fuerza con sensores integrados que incluyen el par de fuerza.
- Velocidad del TCP de hasta 2,2 m/s, lo que hace que se posicione como el robot más rápido entre los de su clase.
- Un 12% más de alcance que otros Cobots comparables de 5kg y 905mm.
- Proceso de guiado sencillo y eficaz en modo automático.
- Interacción mejorada con la interfaz del lado del brazo.
- Sencillo pero potente asistente de fácil programación.
- Certificación de seguridad completa.
- IP54.

3.1.2 SWIFTI CRB 1100

El *Cobot SWIFTI CRB 1100* es el segundo robot colaborativo implementado en la simulación de la planta de la Minifábrica de la universidad. Como se ha mencionado anteriormente, el *ABB SWIFTI CRB 1100* es un robot colaborativo altamente avanzado que representa la convergencia perfecta entre la eficiencia robótica y la seguridad colaborativa. Diseñado para trabajar codo a codo con los operarios humanos en entornos industriales, este *Cobot* ha sido concebido para mejorar la productividad y optimizar las operaciones en una amplia gama de aplicaciones.

Con su capacidad de carga, alcance y precisión excepcionales, el *SWIFTI CRB 1100* ofrece una solución versátil y flexible que impulsa la colaboración hombre-máquina hacia nuevos niveles de eficiencia y confiabilidad. En este párrafo introductorio, se destacan sus atributos fundamentales y la capacidad para operar de manera segura en un entorno compartido con los trabajadores, lo que le convierte en una herramienta valiosa para mejorar los procesos industriales y la automatización de tareas.

A continuación, se adjunta en la *Ilustración 23* un resumen de las especificaciones técnicas generales del *Cobot SWIFTI CRB 1100*.



Ilustración 23: Especificaciones técnicas generales SWIFTI CRB 1100 [8]

Por último, se quiere concluir el desarrollo de las características de este robot con las anotaciones técnicas proporcionadas en la página web oficial del proveedor, *ABB* [8]:

- Velocidad TCP de más de 5 m/s, es 5 veces más rápido que otros *Cobots* de su clase.
- Hasta 10 veces mayor repetibilidad de posición.
- Luz de estado de interacción.
- Incluye *SafeMove* + escáner láser *SICK*.
- Programación sencilla pero potente con asistente *Wizard*.
- Cuatro suministros de aire integrados para permitir el agarre con vacío.
- Calidad y confiabilidad de robot industrial.
- IP40.
- Certificación completa de seguridad.

3.2 TECNOLOGÍAS Y SOFTWARE

En esta sección se van a introducir todos los programas empleados, así como las versiones y paquetes concretos de cada uno de ellos.

3.2.1 SOLID EDGE

A continuación, se van a concretar las técnicas y versiones utilizadas para el diseño 3D de la pinza del *Cobot GoFa CRB 15000* y de los cargadores de la Estación 2 y de la Estación 3.

Solid Edge es un programa de diseño asistido por computadora (CAD) en 3D creado por *Siemens Digital Industries Software* [23]. Este incorpora modelado sólido, modelado de ensamblajes y funcionalidad de vistas ortográficas en 2D para diseñadores mecánicos. Además, puede vincularse a tecnologías de Gestión del Ciclo de Vida del Producto (PLM) como *Teamcenter*. Este software incluye colaboración en la nube, diseño en 3D, diseño eléctrico, simulación, gestión de datos, fabricación asistida por computadora (CAM), impresión en 3D y publicación técnica. En cuanto a la fabricación, *Solid Edge* incluye técnicas de vanguardia que ofrecen precisión y eficiencia en la producción de productos de alta calidad. *Solid Edge* define y ejecuta mecanizado CNC, anidado, corte, plegado, moldeo, soldadura, ensamblaje y fabricación aditiva. Por lo que, este programa es una buena solución a problemas de ingeniería desafiantes y con una gran escalabilidad.

Cabe destacar que, la descarga de *Solid Edge* [24] no es gratuita, pero el alumno obtuvo la licencia gracias a las facilidades que le concedió la Universidad Pontificia Comillas. Además, este programa se puede descargar exclusivamente en un sistema operativo *Windows*, lo que puede provocar alguna limitación adicional. En la *Ilustración 24* se puede observar la licencia empleada en el software de diseño.

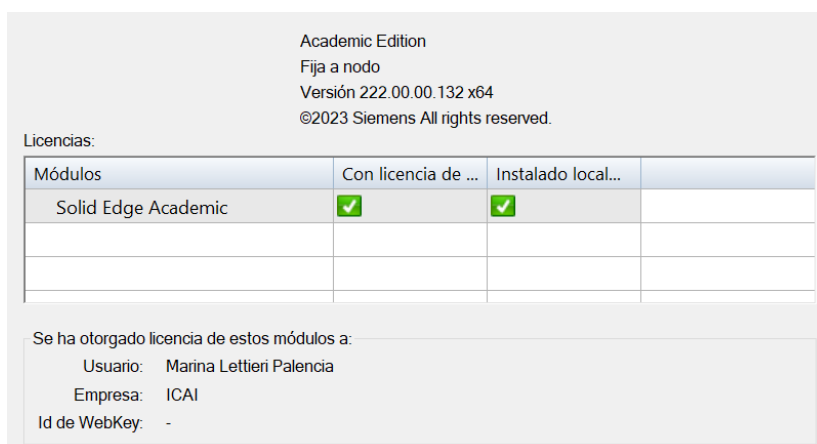


Ilustración 24: Licencia Solid Edge

La interfaz del software *Solid Edge* se puede encontrar representada en la *Ilustración 25* y en la *Ilustración 26*, con la pinza y el cargador diseñado respectivamente.

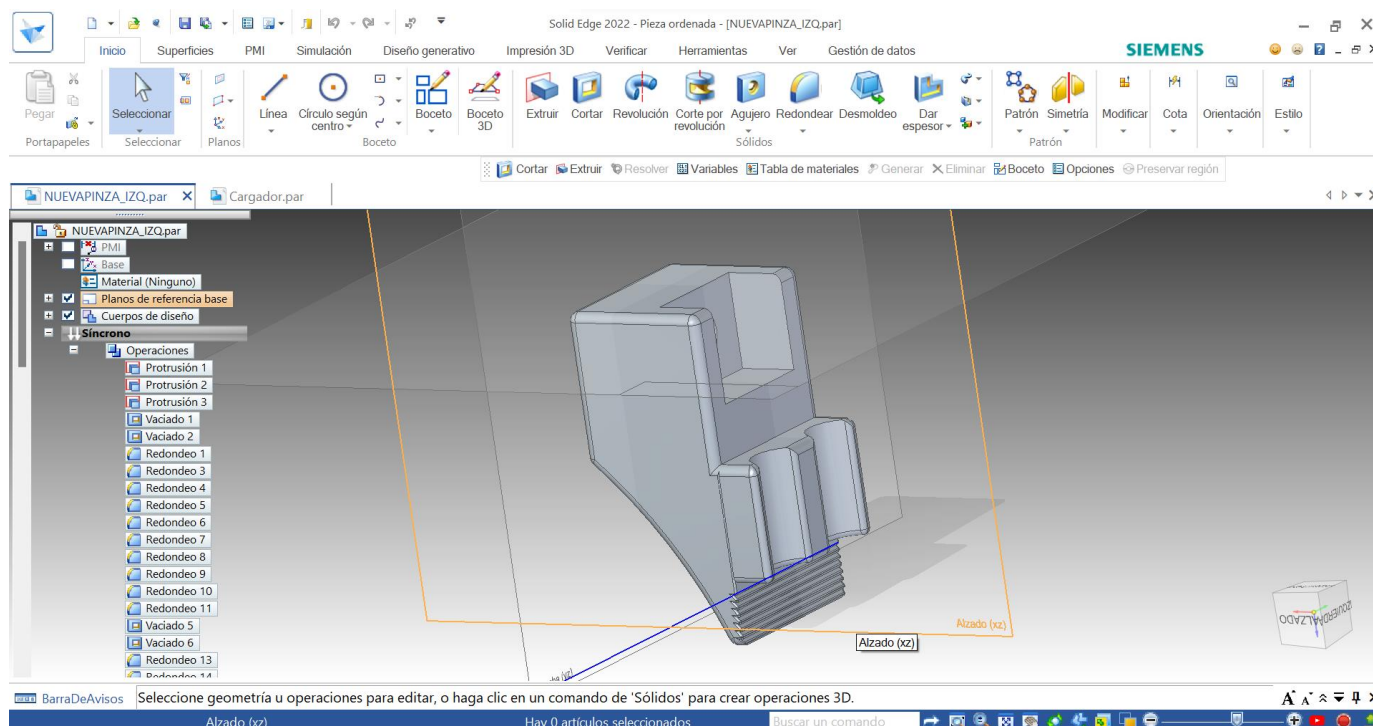


Ilustración 25: Interfaz Solid Edge con la pinza del GoFa CRB 15000

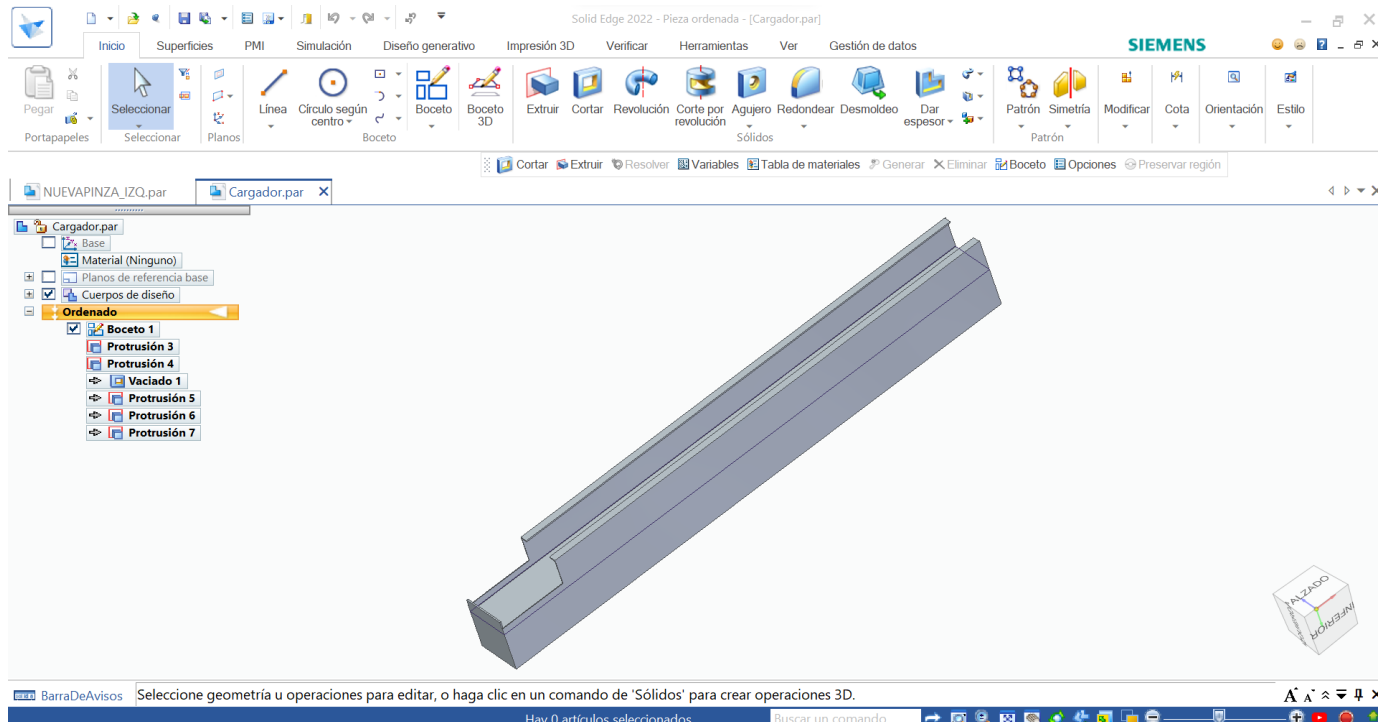


Ilustración 26: Interfaz Solid Edge con el cargador de la Estación 2 y Estación 3

Como se ha podido apreciar, este programa cuenta con múltiples oportunidades para desarrollar los diseños 3D de este proyecto y muchos otros. Además, cabe destacar que algunos de los componente de la planta de la simulación también se diseñaron en *Solid Edge*, aunque finalmente se concluyó su implementación con la opción de diseño geométrico de *RobotStudio*, como se indicará más adelante.

3.2.2 ULTIMAKER CURA

En primer lugar, cabe mencionar que la aplicación diseñada para impresoras 3D, *UltiMaker Cura*, se empleó en este proyecto para el diseño paramétrico e impresión de las pinzas del *Cobot GoFa CRB 15000*. Por lo que, este contribuyó a la mejora de la integración física de estos robots en la Minifábrica de ICAI.

Proporcionando algo de contexto, *Ultimaker Cura* es un potente y versátil software de impresión 3D desarrollado por *Ultimaker*, una destacada empresa en la industria de la fabricación aditiva. Este programa se ha consolidado como una herramienta fundamental para usuarios y profesionales de la impresión 3D debido a su facilidad de uso, funcionalidad y amplia compatibilidad con diferentes impresoras 3D. Con una interfaz intuitiva y amigable, *Ultimaker Cura* ofrece un enfoque de código abierto que permite a los usuarios personalizar sus configuraciones y optimizar la calidad de impresión. Desde aficionados hasta ingenieros y diseñadores experimentados, *Ultimaker Cura* se ha convertido en una solución esencial para llevar a cabo proyectos de impresión 3D con eficiencia y precisión. Cabe destacar la relevancia y el impacto que *Ultimaker Cura* ha tenido en la comunidad de impresión 3D, al ser una herramienta accesible y poderosa para impulsar la innovación y la creatividad en el mundo de la fabricación aditiva.

Por todas estas razones, se decidió emplear este programa para la impresión de las pinzas mencionadas. Además, cabe destacar que el programa es completamente gratuito [25], lo que facilita en gran medida la utilización por el alumno en el desarrollo de este proyecto. Sin embargo, este solo está disponible para *Windows*. En concreto, en este proyecto se empleó la versión *UltiMaker Cura 5.4*, adjunta en la *Ilustración 27*, aunque las versiones anteriores cuentan con prácticamente las mismas prestaciones y podrían preparar los diseños para su posterior impresión con un control y calidad similar.

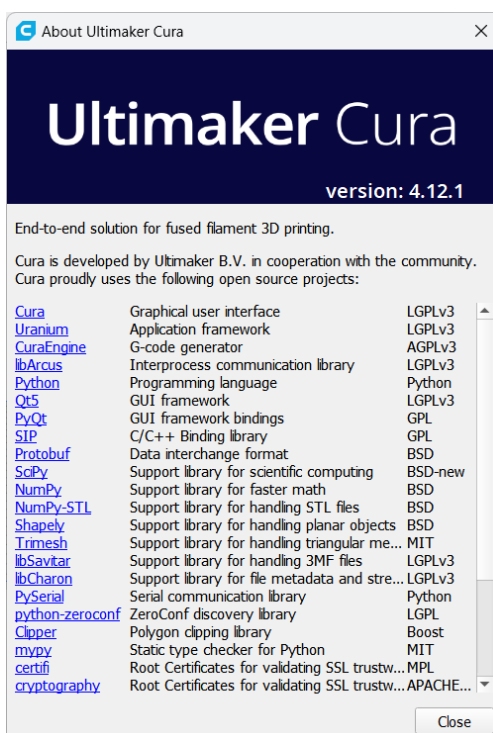


Ilustración 27: Versión UltiMaker Cura

A continuación, se considera oportuno incluir una visualización de la interfaz del software con la pinza en la *Ilustración 28*.

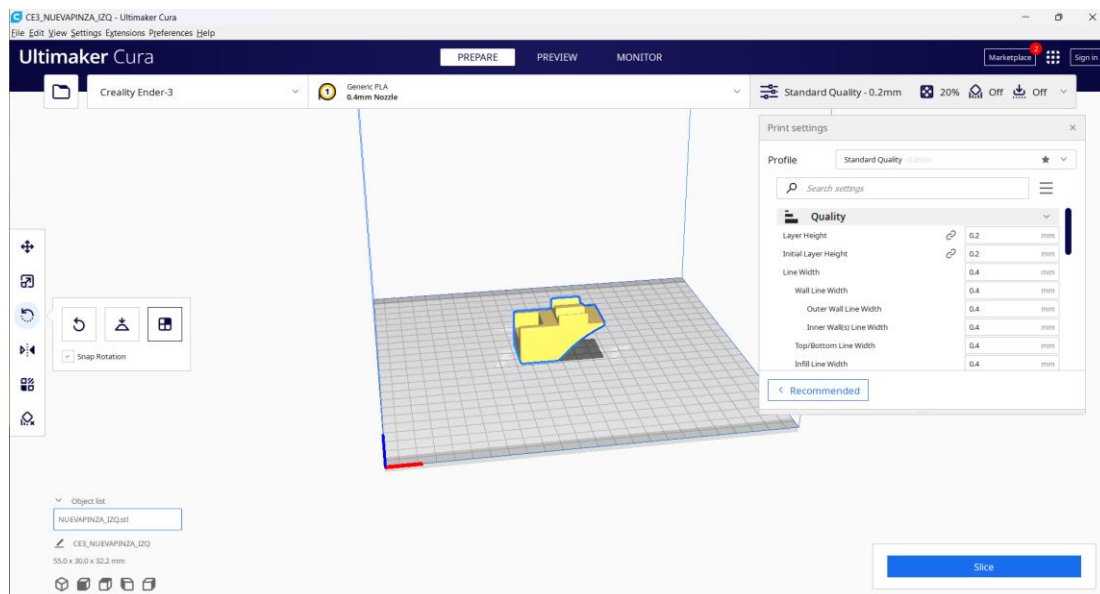


Ilustración 28: Interfaz UltiMaker Cura con la pinza del GoFa CRB 15000

En términos generales, el proceso para la preparación de la impresión se puede resumir en los siguientes puntos:

- Importar el archivo 3D: comprobar que el archivo se encuentra en un formato compatible, como *.STL* o *.OBJ*.
- Orientar la figura: emplear las herramientas de rotación y escalado.
- Ajustar la configuración de impresión: la calidad de impresión, la densidad de relleno, la velocidad de impresión, el tipo de material utilizado, la creación de soportes...
- Generar el código *G-Code*: obtener el archivo necesario para proporcionarle a la impresora las instrucciones que debe de seguir para que le extrusor sea capaz de dibujar las capas correctas.

Desde luego, a pesar de la recomendación dada en este documento, actualmente existen en el mercado otros muchos software de preparación de impresión 3D disponibles para su utilización.

3.2.3 ROBOTSTUDIO

En esta sección se va a proceder a explicar el software más importante de este proyecto, *RobotStudio*. Esta herramienta de programación y simulación *offline* se emplea principalmente para aplicaciones robóticas.

En términos generales, la programación sin conexión es una estrategia altamente rentable para maximizar la eficiencia de los sistemas robotizados. Con el software de simulación y programación sin conexión de *ABB*, *RobotStudio*, se pueden programar robots sin interrumpir la producción real de la fábrica [26].

Además, otra característica crucial para la utilización de *RobotStudio* en este proyecto resultó ser la similitud entre este software y el que impulsa los robots en un entorno de producción real. Es decir, esta herramienta se basa en el controlador virtual de *ABB*, lo que permite realizar simulaciones extremadamente realistas, utilizando programas de robots reales y archivos de configuración idénticos a los que se utilizan en un taller o en el laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas. Como resultado, puedes obtener una representación precisa y confiable del comportamiento del robot antes de implementar cualquier cambio en el entorno de producción real, lo que conlleva una minimización de riesgos, costes asociados a errores y tiempo de inactividad.

Cabe mencionar que, el software *RobotStudio* no se puede descargar de manera gratuita. En este proyecto se pudo emplear gracias a las licencias concedidas por la Universidad Pontificia Comillas. Respecto a las licencias necesarias para el desarrollo de este proyecto, se pueden observar en la *Ilustración 29*.

Licencias instaladas					
	Característica	Tipo	Caduca	Estado	Clave de activación
☐	RobotStudio Premium	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	3D Printing PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	ArcWeld PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Cutting PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Dispensing PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Machine Tending PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Machine Tending PowerPac II	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Machining PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Painting PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Palletizing PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Picking PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	PickMaster PowerPac	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	
	Remote Laser Welding Power...	Red (retirada)	28/08/2023	Válido	

Ilustración 29: Licencias RobotStudio

Finalmente, se adjunta en la *Ilustración 30* una visualización de la interfaz del software para tener una idea general de la disposición de todas las herramientas del programa.

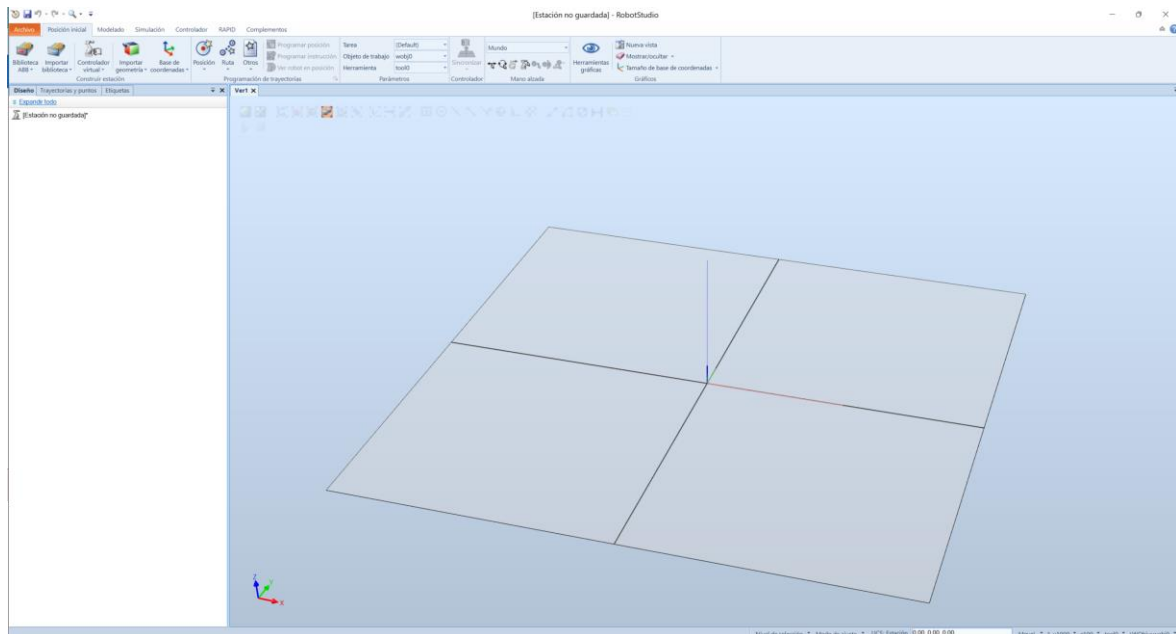


Ilustración 30: Interfaz RobotStudio nueva estación

Capítulo 4. CONFIGURACIÓN Y DESARROLLO DEL PROYECTO EN ROBOTSTUDIO

En este capítulo se van a desarrollar en profundidad todas las técnicas y procesos que se han llevado a cabo en *RobotStudio* para la integración completa de la simulación 3D de la planta de la Minifábrica de ICAI.

4.1 DISEÑO DE LAS PINZAS DEL *COBOT GoFa CRB 15000*

Como se ha comentado en capítulos anteriores, la primera tarea a desarrollar consistió en el diseño de una pinza más adecuada para el *GoFa CRB 15000*. El problema principal residía en la capacidad de la pinza antigua para agarrar las piezas de lego del laboratorio. Esto ocasionaba problemas en las numerosas sesiones de laboratorio y en los proyectos de investigación que se llevaban a cabo con este *Cobot*, por lo que el primer objetivo de este Proyecto de Fin de Máster consistió en poner a punto la integración física de los manipuladores reprogramables del laboratorio.

En concreto, antes de abordar la integración física, la pinza no era capaz de coger de la manera adecuada las piezas situadas en la mesa del *Cobot GoFa CRB 15000*. De una manera aproximada, se podría estimar que fallaba en más de la mitad de los intentos que se realizaban. Por un lado, el problema residía en la capacidad mecánica de abrir y cerrar ambas pinzas para poder atrapar la pieza en cuestión. Por otro lado, el material utilizado anteriormente, y su correspondiente relieve, no cumplía con las medidas y características adecuadas para adherir la pieza de lego.

A continuación, se puede ver representado el diseño de la pinza final en *Solid Edge* en su vista lateral en la *Ilustración 31* y en su vista frontal en la *Ilustración 32*. Además, se ha considerado oportuno adjuntar la *Ilustración 33* con una vista diagonal del diseño.

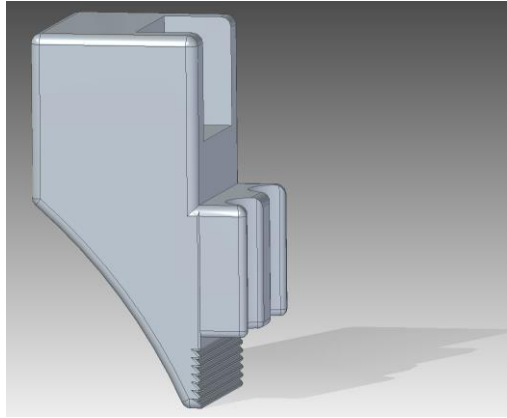


Ilustración 31: Vista lateral diseño en Solid Edge pinza GoFa CRB 15000

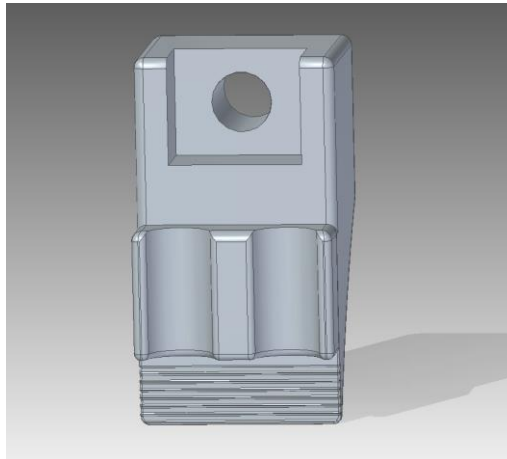


Ilustración 32: Vista frontal diseño en Solid Edge pinza GoFa CRB 15000

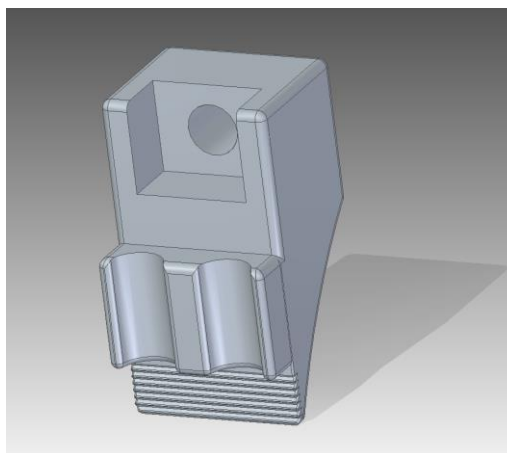


Ilustración 33: Vista diagonal diseño en Solid Edge pinza GoFa CRB 15000

En primer lugar, se puede apreciar cómo se han tenido en cuenta las dimensiones de las piezas concretas de lego del laboratorio para realizar las correspondientes sujeciones. Después de numerosas pruebas, el diseño final cuenta con dos semicírculos que se ajustan perfectamente a los solapes con los que cuentan las piezas. Además, se decidió realizar un acabado en escalera en la parte final de la pinza para, de esta manera, conseguir mejorar el agarre. Por último, se pueden observar numerosos redondeos y curvaturas, las cuales tenían como función principal el ahorro de material y la reducción de peso del componente.

Cabe mencionar que, en el *ANEXO III: Planos pinzas GoFa CRB 15000* se pueden encontrar todos los planos con las medidas necesarias para recrear los diseños expuestos en este apartado.

Por último, se adjunta en la *Ilustración 34*, en la *Ilustración 35* y en la *Ilustración 36* las imágenes reales de las pinzas impresas e implementadas en uno de los robots *GoFa CRB 15000* del laboratorio.



Ilustración 34: Pinzas GoFa CRB 15000 cerradas



Ilustración 35: Pinzas GoFa CRB 15000 abiertas

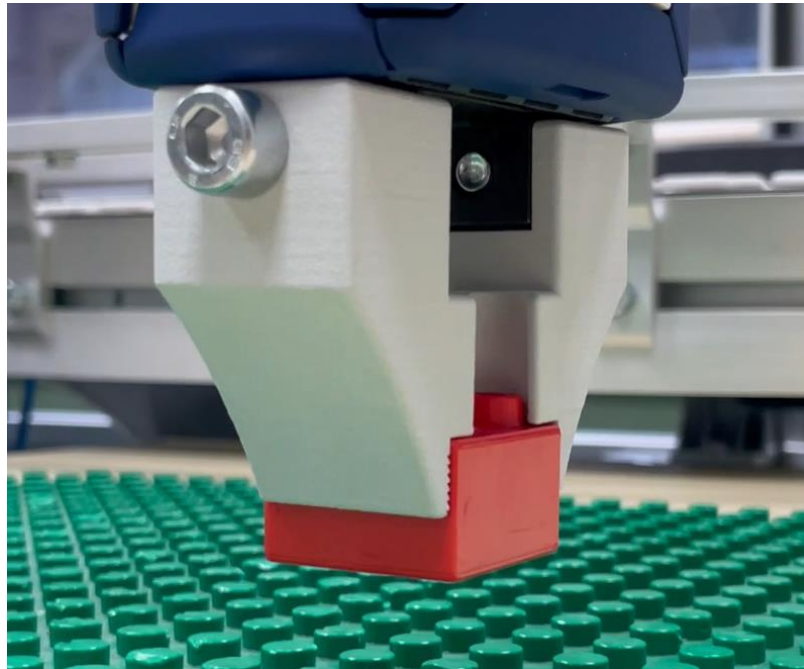


Ilustración 36: Pinzas GoFa CRB 15000 con base de trabajo

4.2 DISEÑO DEL CARGADOR DE LA ESTACIÓN 2 Y ESTACIÓN 3

Esta sección tiene como propósito general desarrollar el diseño 3D de los cargadores introducidos en la Estación 2 y en la Estación 3 de la planta. Estos componentes se introdujeron en el laboratorio de la universidad recientemente, por lo que no se encontraban implementados en la planta heredada de otros proyectos.

Es conveniente mencionar que, debido a la gran componente real que conlleva el desarrollo de este proyecto, se tuvieron que tomar numerosas medidas para el correcto diseño de los cargadores.

Además, como se mencionará más adelante, el problema más relevante surgió al tener que introducir los diseños realizados en *Solid Edge* en el software de aplicaciones robóticas utilizado para el proyecto, *RobotStudio*.

En términos generales, después de conseguir una réplica exacta de los cargadores reales en un entorno de diseño tridimensional, se tuvieron que implementar en el modelo completo de la planta en la posición adecuada con la orientación precisa. Estos cargadores se pueden ver representados en la *Ilustración 37* y en la *Ilustración 38*.

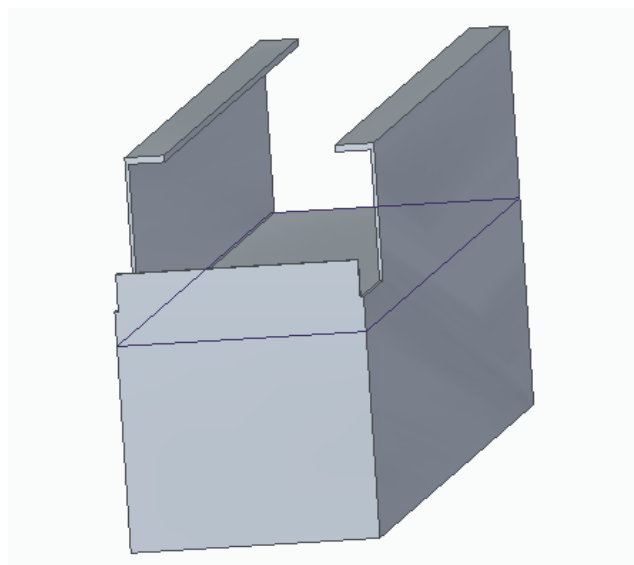


Ilustración 37: Vista frontal cargador

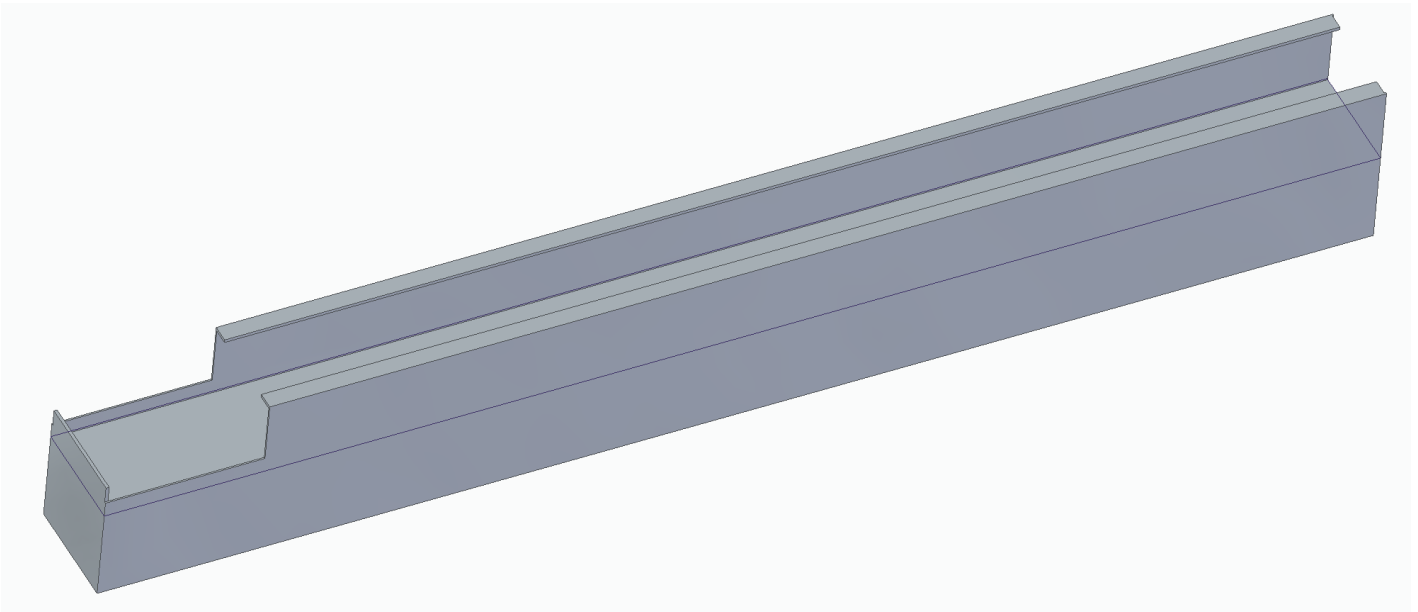


Ilustración 38: Vista diagonal cargador

Finalmente, se quiere remarcar que se realizaron muchos otros prototipos de componentes que formarían parte del diseño 3D completo de la planta. Sin embargo, debido a las dificultades de importación que se encontraron posteriormente, en muchas ocasiones se decidió descartar estos modelos e introducir las geometrías directamente con las herramientas que proporciona el propio software *RobotStudio*.

En la próxima sección se podrán visualizar estos cargadores integrados en el diseño conjunto del laboratorio.

4.3 MINIFÁBRICA 3D

Se ha considerado introducir esta sección en la que se presenta el diseño 3D final de la planta completa de la Minifábrica de ICAI.

Como se ha comentado anteriormente, para conseguir desarrollar el modelo completo de la planta se tuvieron que introducir los diferentes componentes que la conforman de una manera progresiva y ordenada. A continuación, se van a desarrollar las diferentes secciones que componen el modelo:

- Estructura general: esta está formada por todos los soportes e infraestructura que forma el conjunto de la planta. También se pueden encontrar ascensores y railes móviles que hacen que la fábrica se convierta en un sistema dinámico entre los diferentes *Cobots* que trabajan en la misma. Cabe mencionar que la mayor parte de la estructura se extrajo de un proyecto anterior, por lo que solo fue necesaria la modificación de algún carril o ciertas vigas que no se habían importado de la manera adecuada en *RobotStudio*. La estructura general se puede observar en la *Ilustración 39*. Además, en el *ANEXO II: Planos de la Minifábrica* se pueden encontrar todos los planos extraídos de *AutoCad*.

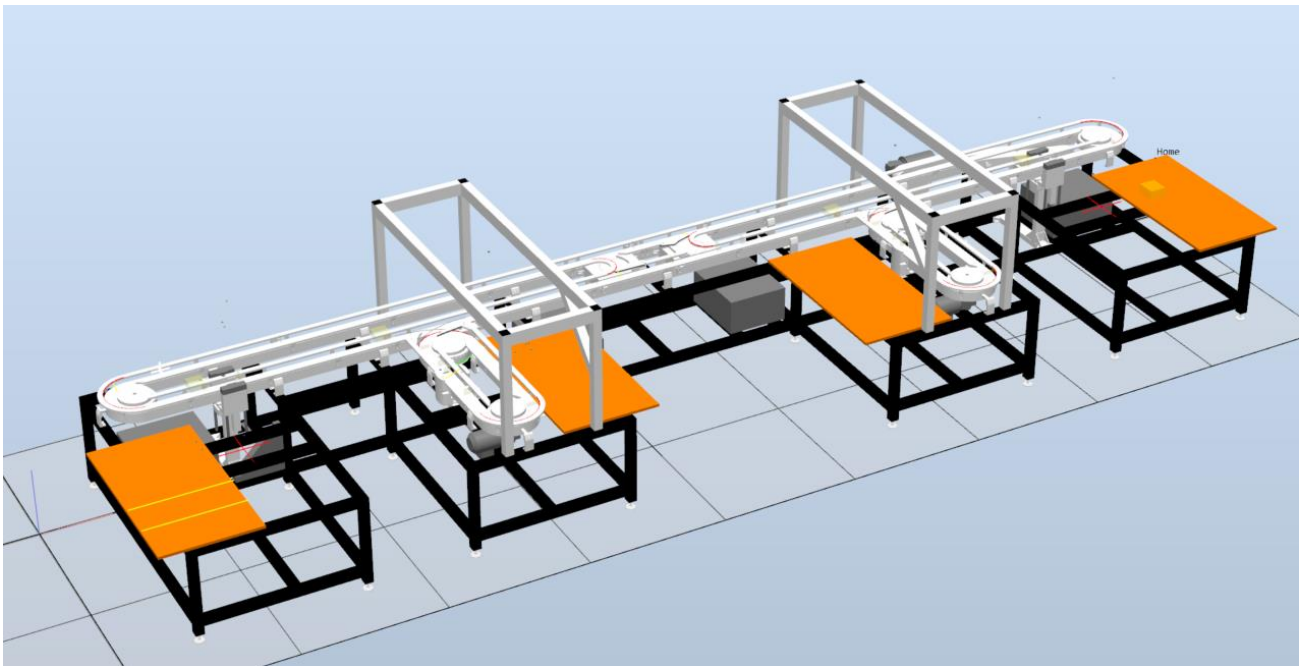


Ilustración 39: Estructura general Minifábrica

- Cobots: el factor más importante de este modelo son los cuatro *Cobots* que se encuentran en cada una de las estaciones. Es importante destacar que cada uno de ellos cuenta con su propio controlador, como se explicará más adelante en la programación de las estaciones. Los *Cobots* y sus controladores se pueden observar en la *Ilustración 40*.

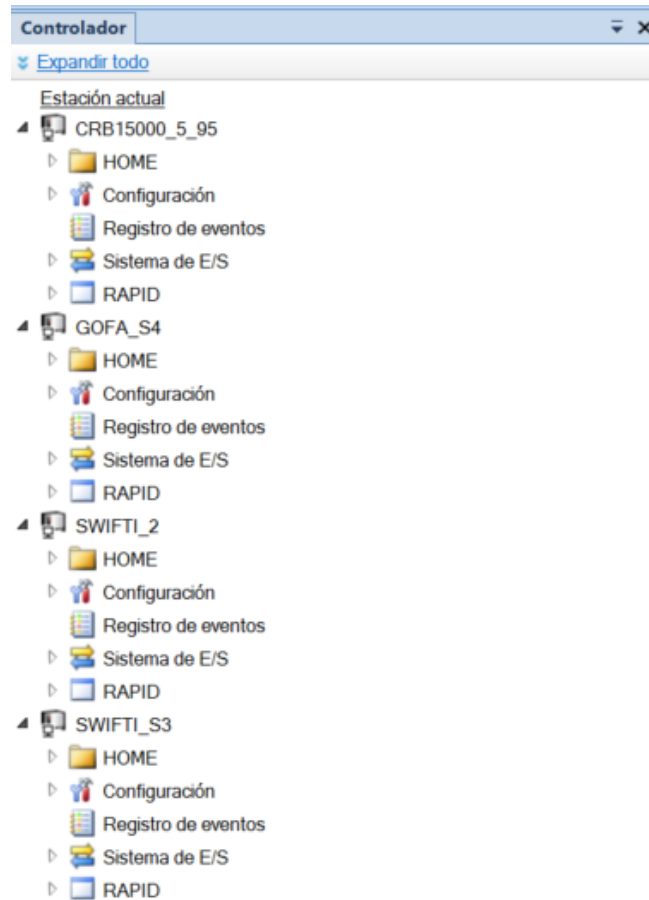


Ilustración 40: Ventana "Controlador" de RobotStudio

- Estaciones de los robots: el laboratorio cuenta con cuatro estaciones para los robots que se encuentran instalados. Cada una de ellas tiene una mesa de trabajo para que el manipulador reprogramable que se encuentra en dicha celda pueda trabajar e interactuar con más elementos de la planta. Además, también se puede observar cómo cada robot cuenta con una base o techo que lo sustenta. Estas estaciones se pueden encontrar representadas en el *ANEXO IV: Estaciones Minifábrica en RobotStudio*.

- Otros componentes o elementos: en el modelo final se pueden encontrar palés, cajas, piezas de lego, cargadores, ascensores... todos ellos implementados con las características propias de su función y programados de la manera adecuada para interactuar con el medio. Algunos de estos componentes se pueden observar en la *Ilustración 41*, en la *Ilustración 42*, en la *Ilustración 43*, en la *Ilustración 44* y en la *Ilustración 45*.

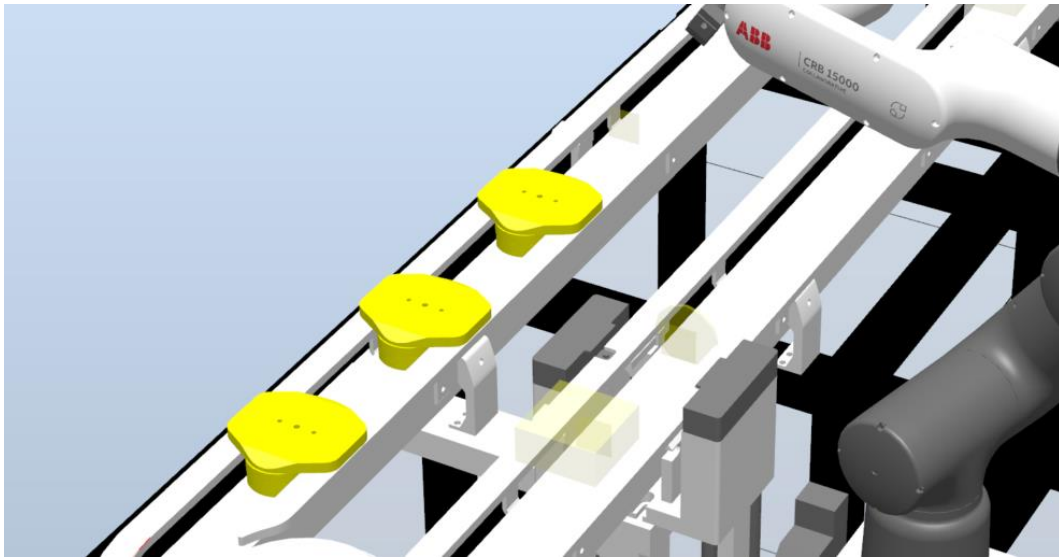


Ilustración 41: Palés de la Minifábrica en RobotStudio

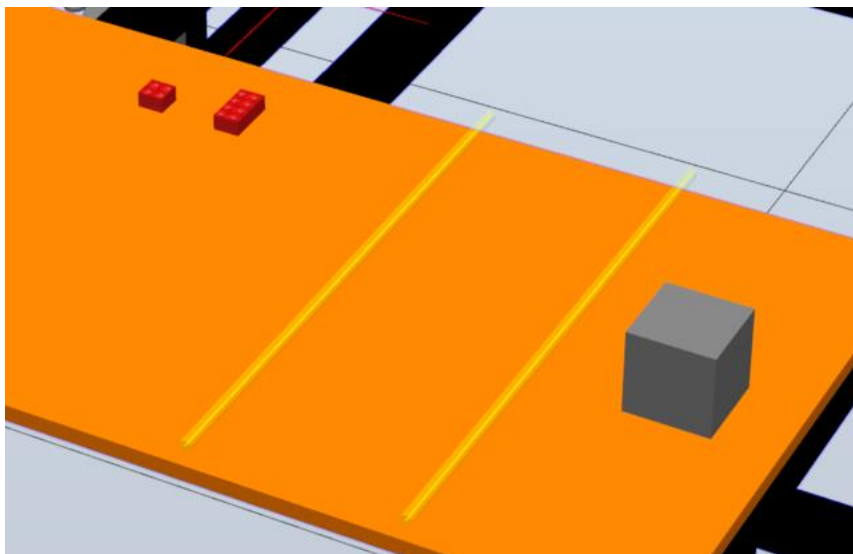


Ilustración 42: Piezas de lego y caja de la Minifábrica en RobotStudio

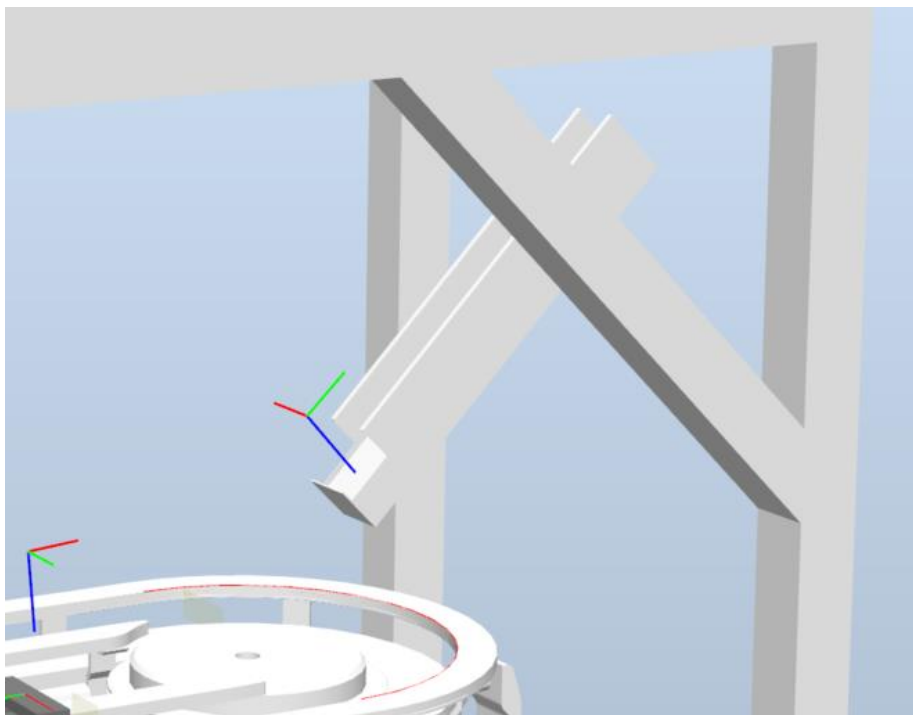


Ilustración 43: Cargador de la Minifábrica en RobotStudio

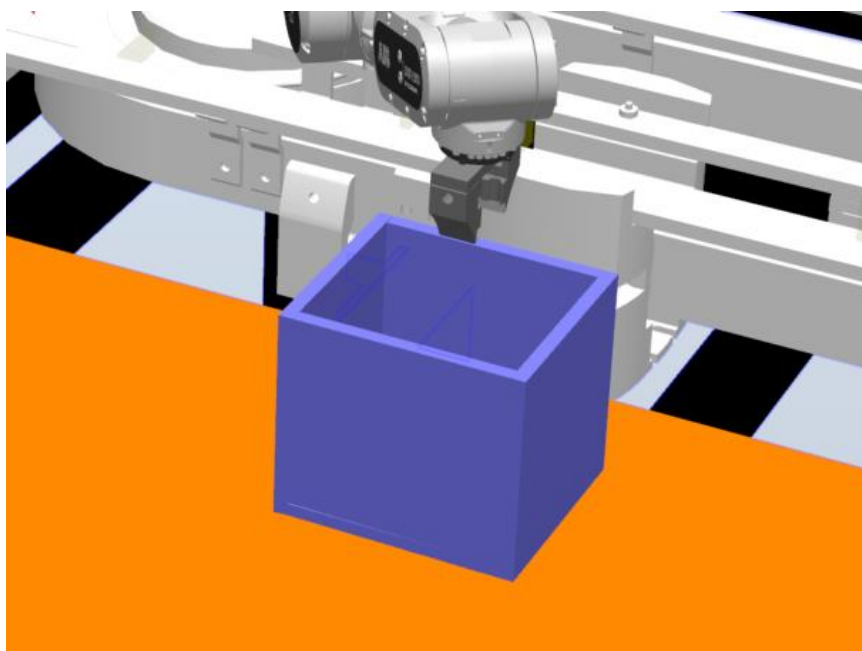


Ilustración 44: Caja de almacenamiento de la Minifábrica en RobotStudio

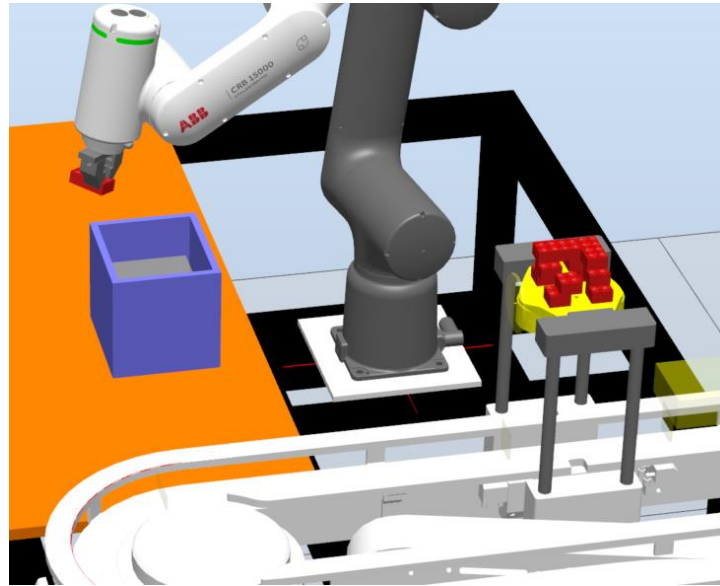


Ilustración 45: Ascensor de la Minifábrica en RobotStudio

Finalmente, se quiere recordar que la visualización completa del diseño 3D de la Minifábrica de ICAI se encuentra en la *Ilustración 6*.

4.4 PROGRAMACIÓN DE LOS ROBOTS

En esta sección se va a proceder a explicar de manera detallada la programación sucesiva de cada una de las estaciones que conforman el laboratorio.

Cabe destacar que, en primer lugar se realizó toda la investigación, diseño e implementación de una de ellas, para así poder escalar el modelo al resto de las celdas. Por esta razón, se podrá observar como el desarrollo de la Estación 1 es mucho más extenso que el del resto, ya que se detalla en más profundidad todos los códigos programados y la lógica implementada.

Sin embargo, como se comentará más adelante, este proceso de imitación de comportamientos no se pudo realizar de la manera esperada, ya que cada robot contaba con unas características únicas de fabricación e implementación física en la propia Minifábrica.

Antes de comenzar a desarrollar la programación, se considera importante adjuntar la leyenda correspondiente a los actuadores y sensores que conforman la Minifábrica. Por esta razón, se introducen los siguientes mapas en la *Ilustración 46*, *Ilustración 47* e *Ilustración 48*.

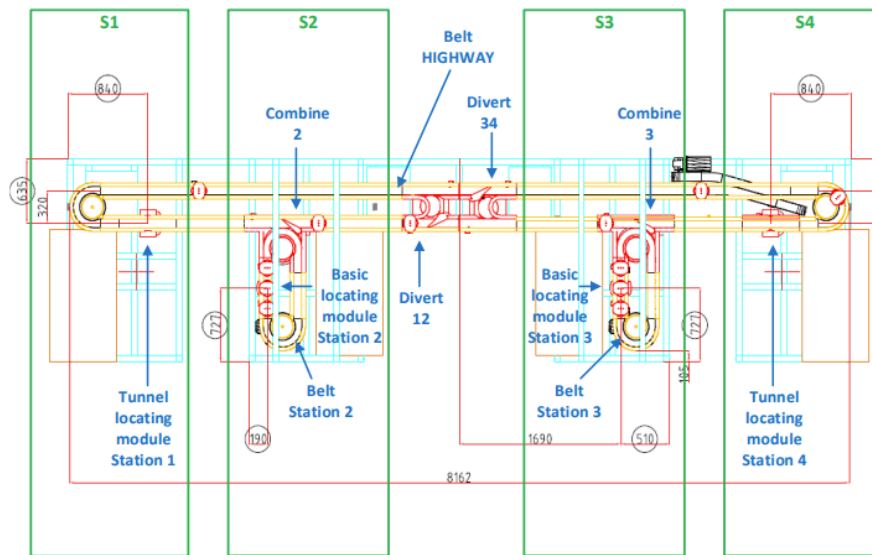


Ilustración 46: Organización de las estaciones de la Minifábrica [28]

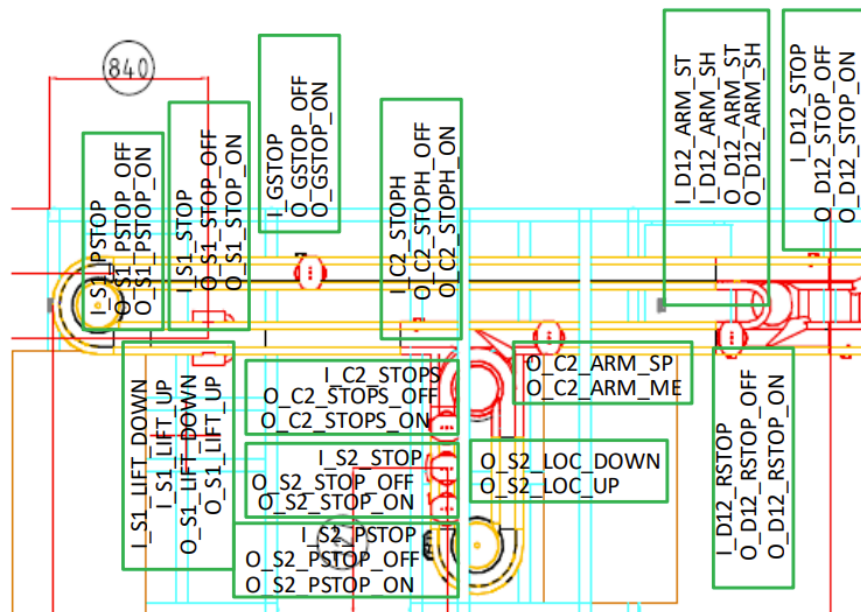


Ilustración 47: Señales Estación 1 y Estación 2 [28]

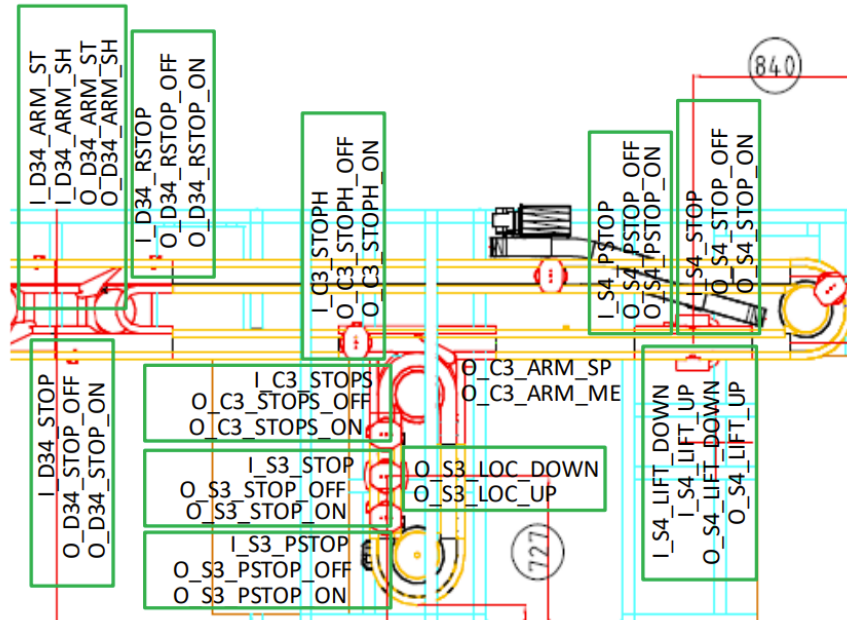


Ilustración 48: Señales Estación 3 y Estación 4 [28]

A continuación, se van a proceder a explicar todas las funciones principales que componen los códigos de *Rapid* [27] desarrollados en *RobotStudio*. Además, todos los códigos completos se encuentran adjuntos en el ANEXO V: *Códigos de Rapid*.

- *main()*: esta es la función más básica que se encuentra en los programas de las estaciones. En términos generales, esta se encarga de llamar al resto de funciones para desarrollar el flujo del programa completo de la manera correcta, desde el inicio y configuración de la simulación hasta la operación más sencilla existente en el proyecto.
- *setup()*: en esta función se inicializan todos los actuadores correspondientes a cada una de las estaciones, como pueden ser los ascensores, los retenedores o los brazos de cambio de carril instalados a lo largo de la cinta. Para obtener más detalle de las referencias concretas, se recomienda acudir a la Ilustración 47 e Ilustración 48.

- *esperaPale()*: esta función se ha programado para leer constantemente los sensores necesarios hasta que estos detecten un palé, por lo que su objetivo principal es esperar a que llegue un palé a la zona de trabajo y detectarlo. Cabe mencionar que en esta función se debe de comprobar si el palé tiene alguna pieza de lego montada, ya que, dependiendo de la entrada de la estación en la que se encuentre, deberá continuar por la cinta principal o acceder a la zona de trabajo de dicho robot.
- *montaFigura()*: su objetivo principal es definir las posiciones a las que el robot debería de llevar cada una de las piezas. Es decir, dependiendo de la figura que se quiera construir, se tienen que marcar unas coordenadas u otras.
- *desmontaFigura()*: la tarea de esta función es definir las posiciones en las que el robot debe coger las piezas para llevarlas a sus posiciones de desmontaje. Cabe mencionar que, dependiendo de la figura que se tenga que desmontar, se indicarán los valores deseados.
- *bajaPale()*: esta función se encarga de la configuración de las estaciones que cuentan con ascensor para gestionar el montaje y movimiento de los palés. Como se puede observar en el código desarrollado, se han de restaurar los retenedores necesarios en cada estación así como hacer uso de la función propia de *Rapid*, *WaitTime*, para asegurar que se ha esperado el tiempo suficiente y que el palé se encuentra en la posición esperada.
- *liberaPale()*: la gestión de la cinta principal con las cintas secundarias también es una parte crucial de la programación del laboratorio. En primer lugar, se activa la retención necesaria para que el palé no se lance a la cinta principal antes de tener la certeza de que esta se encuentra libre. Después de realizar esta comprobación, y de ceder el paso a otros palés que se pueden encontrar en movimiento en la cinta principal, el palé se desbloquea y se deja continuar con el flujo de la estación.

- *colocaLego()*: esta función depende de las variables de entrada que se le proporcionen. Su objetivo principal es definir el procedimiento de movimiento al coger una pieza específica de lego y conseguir transportarla a su posición final. Cabe mencionar que, dependiendo de los ejes y el montaje del robot en el laboratorio, se tuvieron que definir unas transformaciones concretas para asegurar que las piezas se alcanzaban con la pinza de la manera adecuada. Además, como se puede observar, también se hace una distinción entre las piezas largas y cortas, ya que dependiendo de su forma, el robot deberá acceder a ellas con orientaciones diferentes para así no colisionar o interferir con el resto del funcionamiento de la Minifábrica.
- *cogeLego()*: el propósito de esta función es muy similar al de la anterior, *colocaLego()*. La única diferencia se encuentra en que el procedimiento de movimiento de los robots programados con este método es el de desmontar una pieza y dejarla en su lugar de almacenamiento.

En conclusión, se quiere recalcar que toda la programación se ha realizado para que tenga una gran componente de escalabilidad. El propósito más significativo es proporcionar al alumno una herramienta sencilla y eficaz para poder reprogramar cualquiera de los robots que se encuentran en el laboratorio. Por esta razón, todas las estaciones cuentan con una jerarquía de código homogénea y sistemática, la cual se representa en la *Figura 4*.

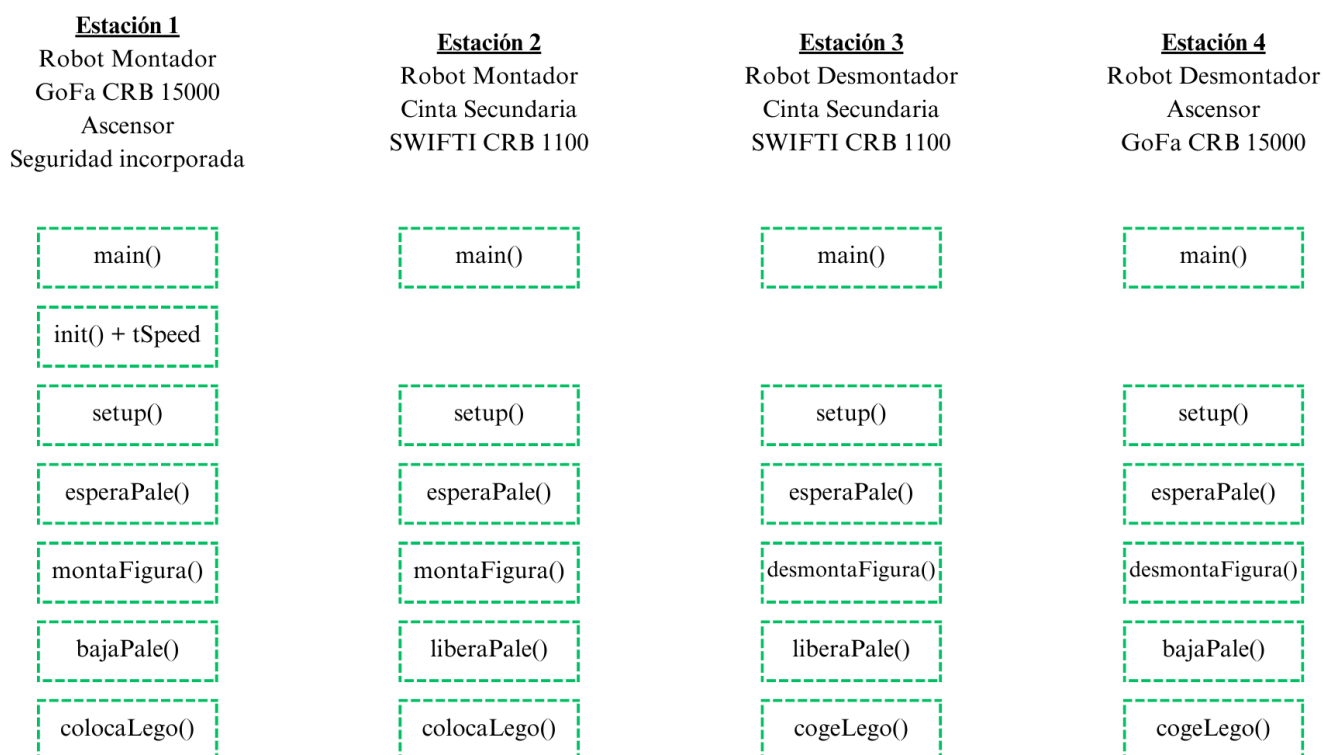


Figura 4: Esquema programación robots

Respecto a la investigación y programación realizadas en relación a la seguridad de los *Cobots GoFa CRB 15000*, esta se encuentra descrita en el *Capítulo 5. Protocolo de Seguridad*.

4.5 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

En esta sección se va a desarrollar toda la programación lógica de las estaciones que componen el laboratorio. La programación de bloques es crucial para cumplir con el funcionamiento secuencial de la Minifábrica entre los robots y la planta en su conjunto. Por esta razón, en este apartado se va a proceder a explicar la lógica que se tuvo que construir para diseñar el funcionamiento de los actuadores, de los sensores, la creación de las piezas de lego y sus correspondientes interacciones con los autómatas.

En primer lugar, se adjunta una visualización de la lógica general en la *Ilustración*

49.

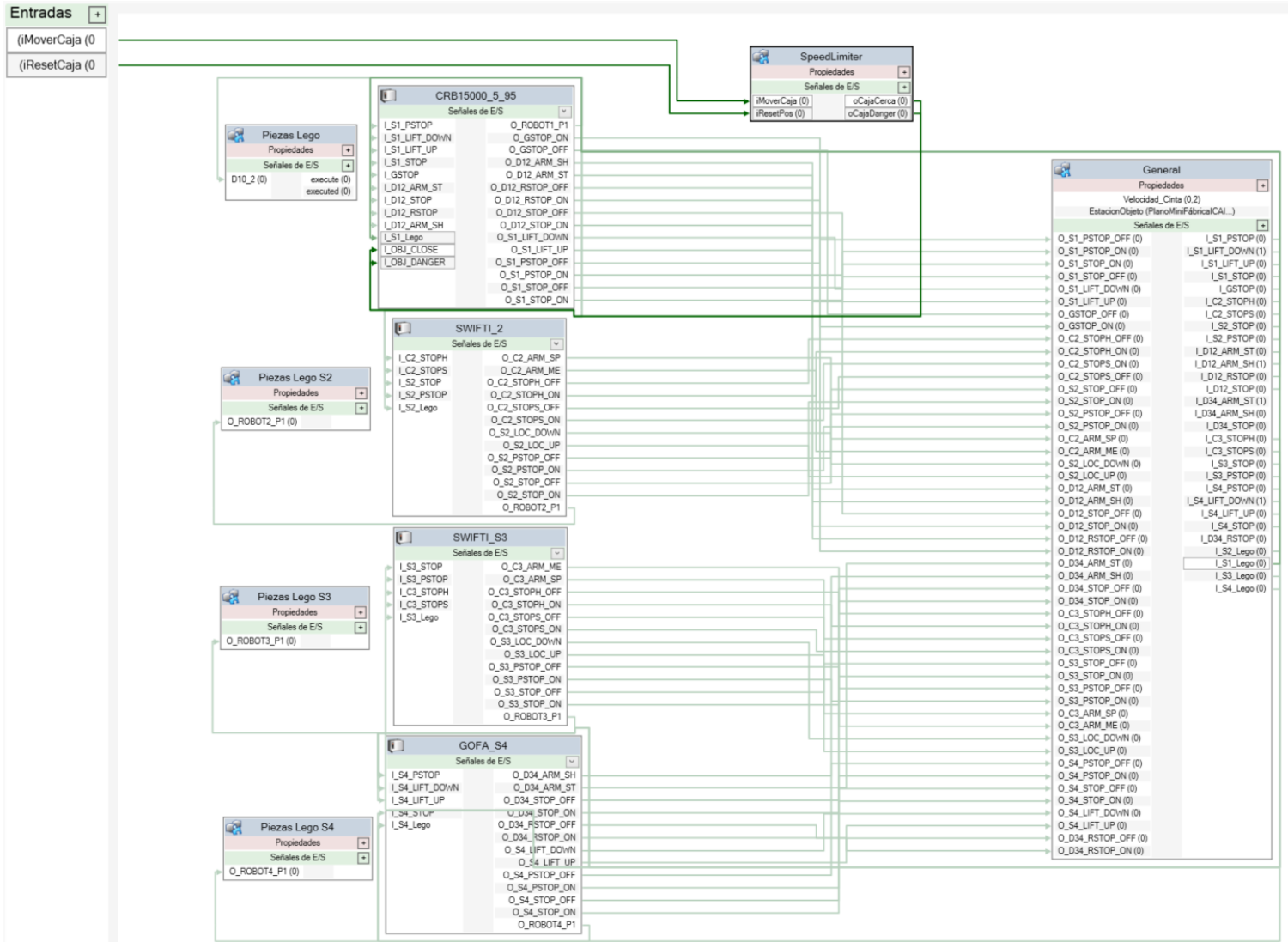


Ilustración 49: Lógica de estación general

Por un lado, la introducción de los robots y sus controladores en la lógica de la estación es un punto determinante para el flujo de trabajo del laboratorio. Los bloques correspondientes a estos robots son el “CRB15000_5_95” para la Estación 1, el bloque “SWIFTI_2” para la segunda estación, el bloque “SWIFTI_S3” para la Estación 3 y por último, el bloque “GOFA_S4” para la Estación 4. Como se puede observar, se tuvieron que introducir todas las entradas y salidas correspondientes a estos bloques para que el flujo de señales fuese el adecuado.

Por otro lado, se puede observar como el bloque “General” es el más voluminoso de todos. Esto se debe a que esta programación es la encargada de gestionar todos los actuadores y sensores de la fábrica, así como el movimiento de los palés. Cabe destacar que, este se heredó de un antiguo proyecto y se modificó según las necesidades pertinentes de este Trabajo de Fin de Máster. Los principales cambios se centraron en la incorporación de tres nuevos robots, así como la sustitución del robot IRB 120 instalado por un GoFa CRB 15000. Por esta razón, se puede apreciar como el número de entradas y salidas que conforman este bloque es significativamente mayor al del resto de la lógica.

Además, otra actualización principal del bloque “General” en el proyecto se enfocó en la creación de los sensores encargados de detectar si se encuentran o no piezas de lego montadas en los palés. Dicha función era crucial para este proyecto, ya que a diferencia de otros trabajos realizados sobre la Minifábrica, en este se incorporaron todos los robots del laboratorio así como una simulación real de los movimientos que se pueden encontrar en una industria. Por esta razón, la detección de piezas de lego en los palés era una tarea imprescindible para organizar el flujo de palés entre una estación y otra, dependiendo de si requerían de un robot montador o desmontador. Estos bloques se pueden observar en la *Ilustración 50*.

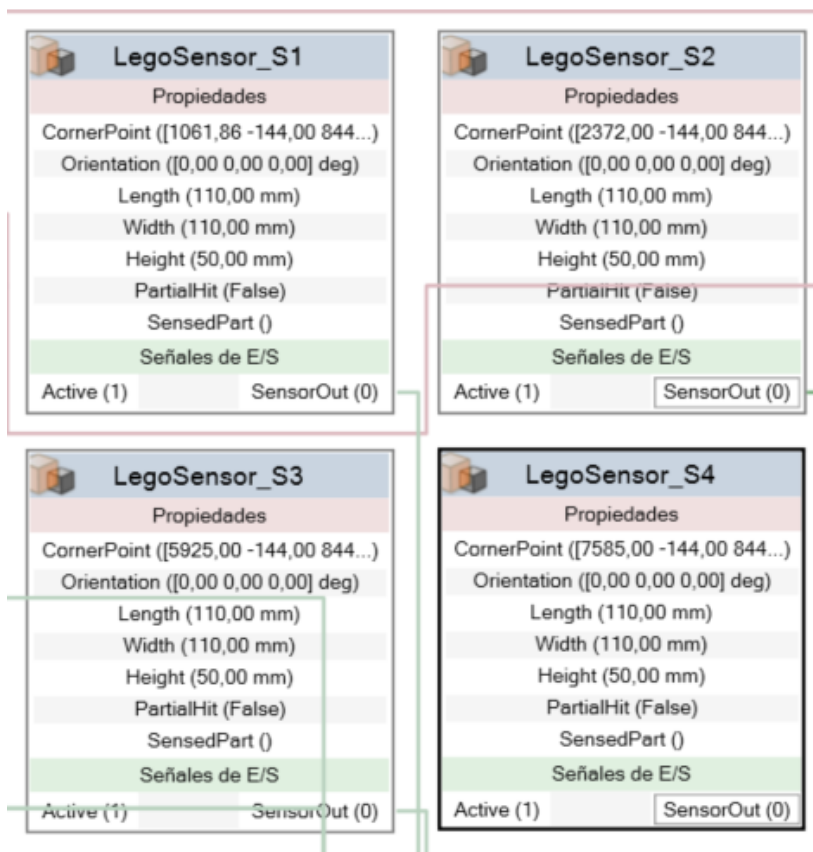


Ilustración 50: Bloques de sensores de piezas lego

Por último, se quiere hacer referencia a los bloques “Piezas Lego”. La función principal de estos se centra en la gestión de la creación, los movimientos y la eliminación de las piezas de lego. También se tuvo que programar en estos bloques la lógica que asegura que las piezas de lego van a seguir un movimiento análogo al de los palés o al de las pinzas de los robots en los momentos pertinentes. Esta lógica se adjunta en la Ilustración 51, en la Ilustración 52, en la Ilustración 53 y en la Ilustración 54.

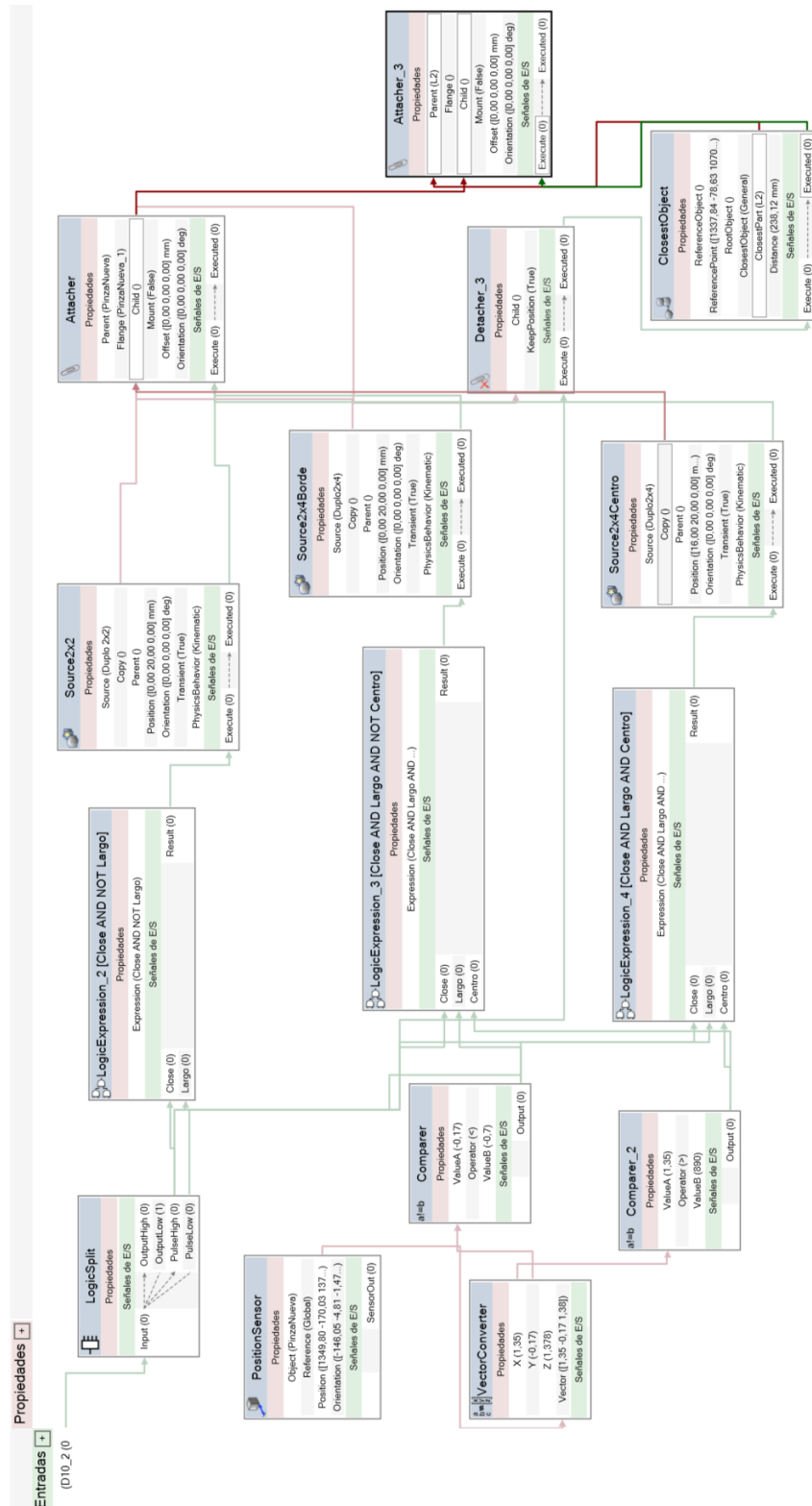


Ilustración 51: Bloque "Piezas Lego"

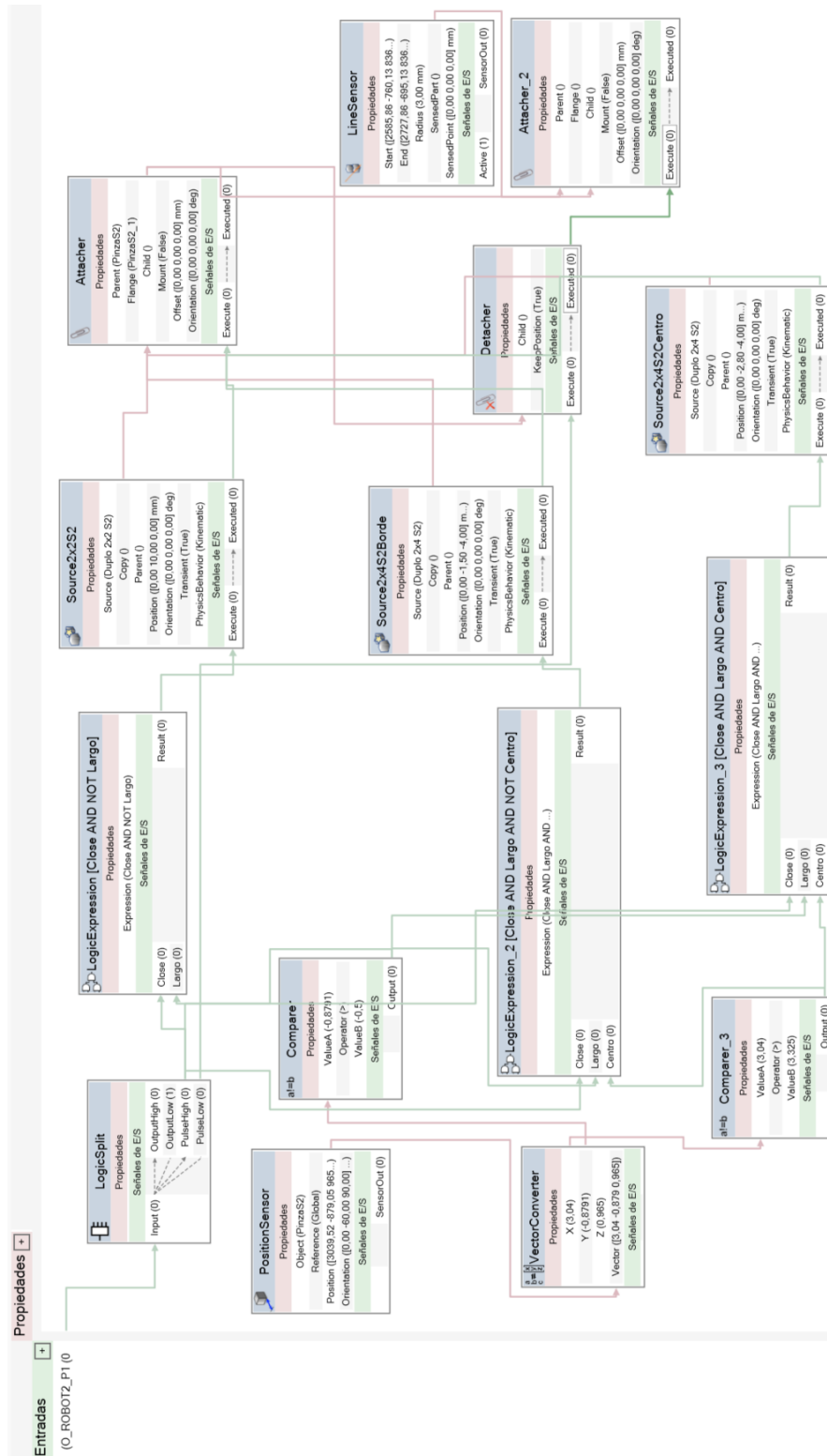


Ilustración 52: Bloque "Piezas Lego S2"

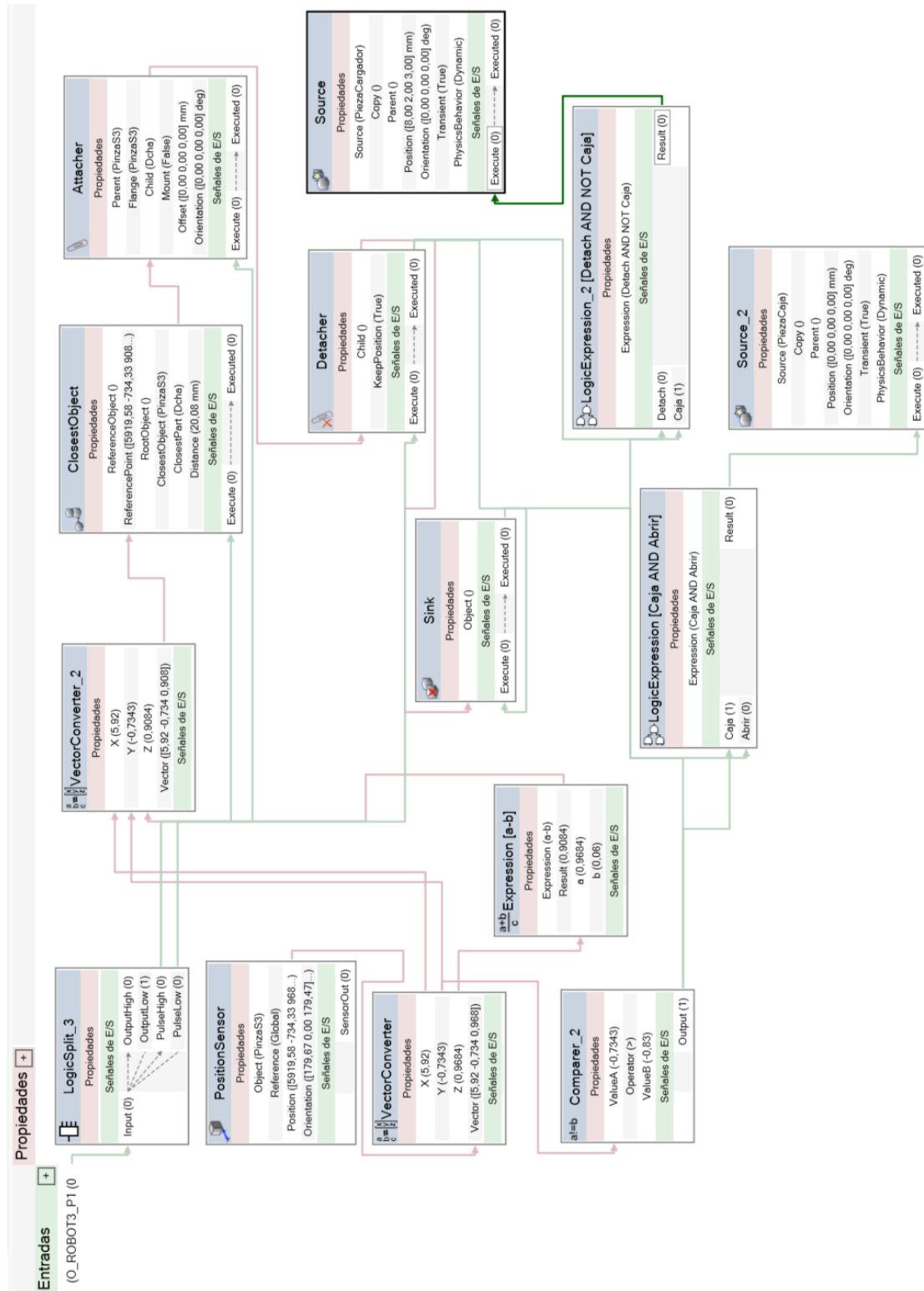


Ilustración 53: Bloque "Piezas Lego S3"

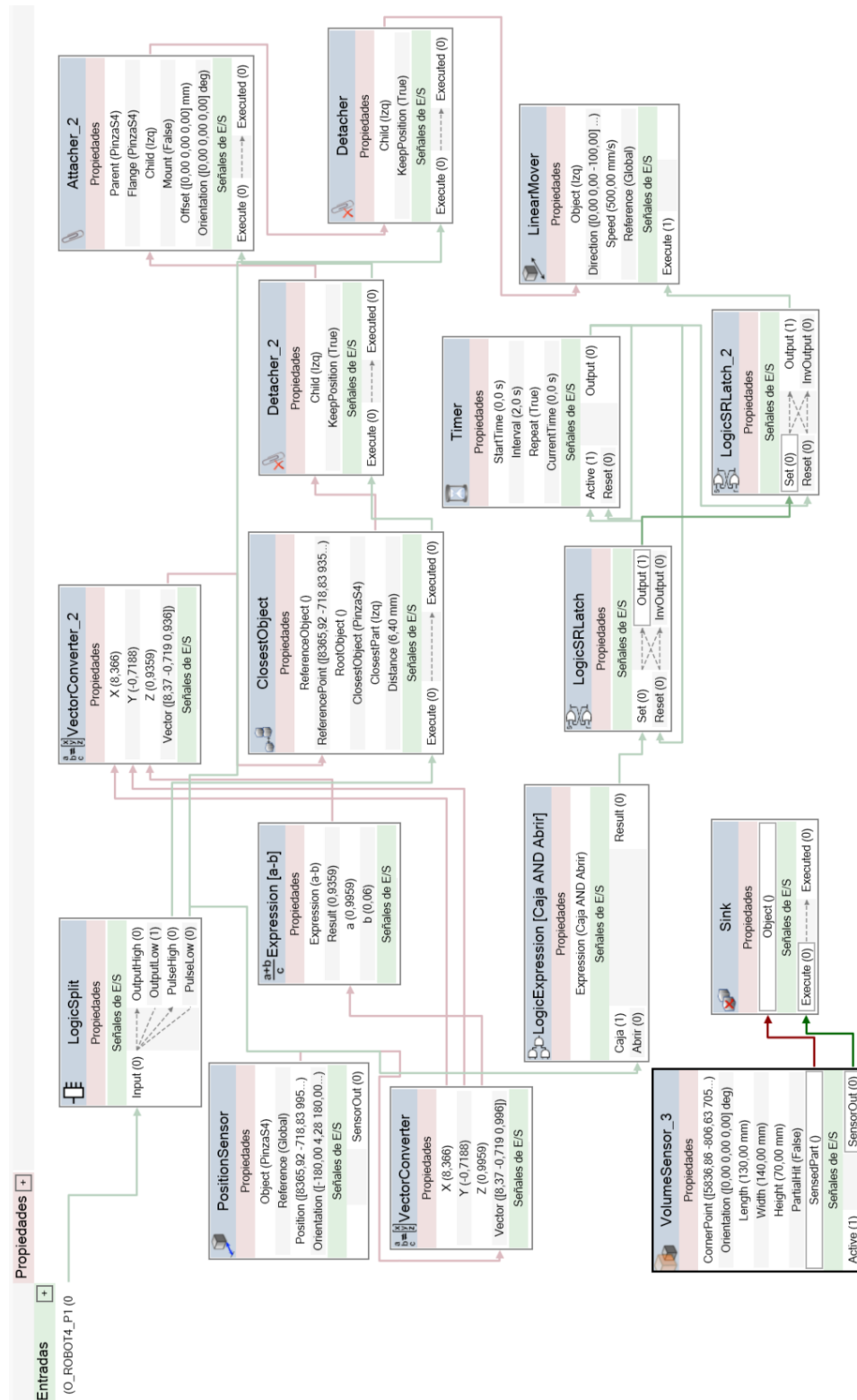


Ilustración 54: Bloque "Piezas Lego S4"

4.6 EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS *ROBOTSTUDIO* A OTROS DISPOSITIVOS

Se ha considerado conveniente introducir una sección en la que se pueda abordar un tema algo polémico con el software *RobotStudio*: la exportación e importación de archivos.

Un contenedor [29] es capaz de empaquetar todo el código y las dependencias de un proyecto en un formato estándar para su segura y ágil ejecución en otro dispositivo. De la misma manera, en *RobotStudio* se puede utilizar la función de *Pack and Go* o *Unpack and Work* [30].

- *Pack and Go*: se emplea cuando quieres empaquetar todos los elementos de un proyecto para poder abrirlo en otro dispositivo.
- *Unpack and Work*: es la opción que se debe seleccionar cuando el objetivo es abrir un *Pack and Go* en un dispositivo.

Desde luego, para el correcto desarrollo de este proyecto y cualquier otro, se recomienda esta forma de exportación de archivos. Es la opción más segura para cerciorarse de que todos los componentes del trabajo se transportan a salvo de un dispositivo a otro.

A continuación, en la *Ilustración 55* se puede observar la localización de estas opciones de empaquetado en la interfaz de *RobotStudio*.

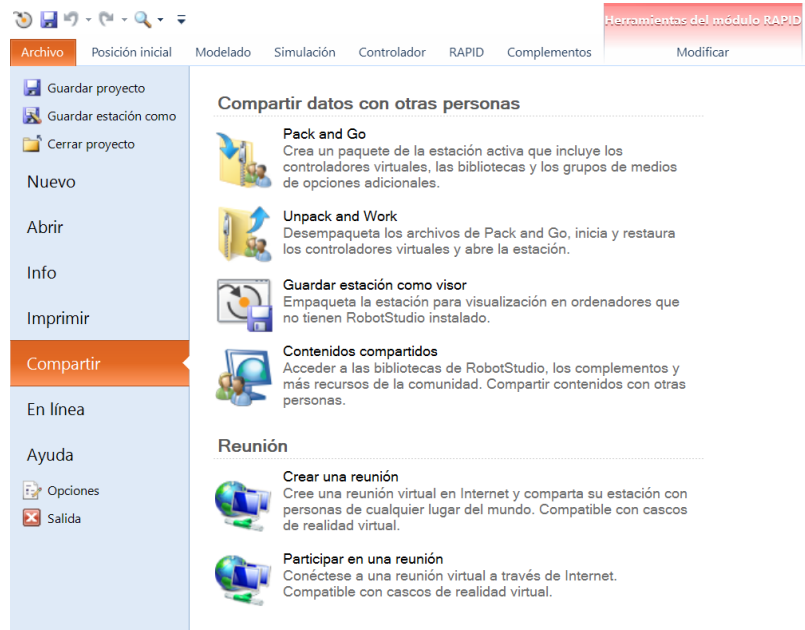


Ilustración 55: Pack and Go y Unpack and Work RobotStudio

4.7 PROBLEMAS DESTACABLES

En esta sección, se van a describir brevemente los principales problemas que se afrontaron durante el desarrollo del proyecto. Además, se van a incluir las soluciones principales que se propusieron a los mismos. Los inconvenientes están relacionados tanto con la simulación como con el modelado de la planta. Estos se desarrollan a continuación en el orden cronológico en el que se surgieron:

- Algunas de las curvas que definen las trayectorias de los palés en los puntos que tienen que girar a lo largo de la cinta transportadora estaban mal diseñadas. Esto se identificó al observar que, aunque aparentemente estaban bien modeladas, los palés se movían erróneamente al llegar a estas. Para solucionarlo se definieron de nuevo dichas curvas en el sentido correcto.
- En la Minifábrica real existen cámaras y otro tipo de sensores que en la simulación no se han llegado a incluir de manera precisa. Esto se puede apreciar notablemente en los puntos de la cinta transportadora en los que los

robots esperan a que lleguen los palés, ya que en dichas localizaciones, se debe detectar si el palé carga con alguna pieza de lego o no. En la Minifábrica real, en dicho punto, existe una cámara que solventaría este problema. En la simulación se ha optado por añadir un sensor volumétrico que sea capaz de identificar cualquier carga que lleve el palé.

- En concreto, el robot SWIFTI CRB 1100 de la Estación 3 ha ocasionado muchos problemas en las transformaciones de sus movimientos. En términos generales, esto se debe a su espacio limitado y a su colocación invertida en el laboratorio.
- Respecto a la simulación, los movimientos de las piezas de lego han sido un reto. El problema principal residía en conseguir que estas se moviesen con el palé al ser colocadas por el robot, lo que ha conllevado destreza e implementación de sensores más complejos en la simulación.
- La física de las piezas también ha resultado en un cuello de botella para el desarrollo de este proyecto. En ocasiones, la interacción de las mismas con el entorno de forma dinámica ocasionaba ineficiencias de simulación y problemas en la ejecución del proyecto. Finalmente, se optó por simular un comportamiento cinemático que permitía la interacción con todos los elementos de la planta y ofrecía un mayor control sobre las piezas, en concreto, en las estaciones que cuentan con un cargador implementado en su estructura.
- La inclusión de nuevos modelos 3D al diseño de la planta resultó más compleja de lo esperado. La principal razón reside en la compatibilidad de archivos que presenta RobotStudio. Es decir, a pesar de definir un modelo con unas dimensiones concretas, a la hora de introducirlo en el programa, este modelaba una malla de colisiones de menor calidad de la esperada, dando lugar a una interacción incorrecta con el entorno. Esto llevó a varias iteraciones en el desarrollo de los modelos de los cargadores y a una representación final que no era completamente fiel al modelo real. Sin embargo, cumple los objetivos de la simulación a la perfección.

Capítulo 5. PROTOCOLO DE SEGURIDAD

Una vez concluida la programación y simulación de los cuatro robots de la Minifábrica, se decidió realizar una investigación sobre la posible implementación de seguridad en los *Cobots GoFa CRB 15000*. La idea principal consistía en implementar la solución que proporciona *ABB* para permitir una colaboración más estrecha entre los robots y los trabajadores de la fábrica, *SafeMove* [31].

SafeMove, la innovadora propuesta de seguridad de *ABB*, ofrece una mayor versatilidad, optimización del espacio y avanzadas herramientas de puesta en marcha que aumentan la productividad y reducen los costes de inversión. Esta solución excepcional garantiza una seguridad muy robusta, fomentando una estrecha colaboración entre los robots y los trabajadores de fábrica, al tiempo que disminuye la inversión total hasta un 30%.

En primer lugar, se decidió buscar la suficiente información para tener una idea formada de las posibilidades de implementación de los protocolos de seguridad en *RobotStudio*. Ya que, en términos generales, la programación en el laboratorio físico cuenta con muchas más actualizaciones y documentación que el desarrollo en un entorno simulado.

Después de leer muchos manuales al respecto, se encontró uno en el que se definía la interfaz de usuario de *Visual SafeMove* en *RobotStudio* [32]. Esta documentación explica que se puede definir una zona segura, es decir, un volumen. En esta se podía configurar la posición, la orientación, la fuerza de la herramienta, la velocidad del eje o de la herramienta... pero no se podía simular la interacción de todas estas funciones con la aparición de una persona en la zona de seguridad. Además, también se podía definir un rango de seguridad o de grados en los que se podían mover los ejes de los robots. Sin embargo, esta configuración no funcionaba con las limitaciones de espacio de la Minifábrica, por lo que resultaba en los robots parados constantemente u ocasionando fallos en el flujo de movimientos del laboratorio.

El siguiente intento se centró en la implementación de la librería *Virtual Human* [33]. Acto seguido se descubrió que *ABB* incorporó este paquete a su software y lo llamó *Collaborative Speed Control* hace unas semanas. En términos generales, las nuevas guías encontradas acerca de esta librería explicaban que se debían de volver a introducir los controladores para poder configurarlos con los paquetes requeridos para implementar la simulación de seguridad. Es decir, se requería eliminar los robots existentes y comenzar el proyecto prácticamente desde el principio, ya que no se permitían realizar las modificaciones necesarias en la configuración de los controladores.

Finalmente, se concluyó que la mejor alternativa se centraría en desarrollar una simulación casera, en la que una caja realizase el movimiento de cruzar las zonas de seguridad como si de un operador se tratase. Para ello, se programó la función *init()*, encargada de la configuración inicial de todas las variables de seguridad y la declaración de la velocidad inicial de los robots. También se programaron todas las interrupciones que cambiaban el valor de la velocidad del robot según conviniese (velocidad 0%, velocidad 30% o velocidad 100%). El funcionamiento es el siguiente: si la caja atraviesa la primera zona de seguridad, el robot reduce su velocidad al 30%. En cambio, si la caja consigue llegar a la zona de peligro, el robot se para por completo para evitar ocasionar daños al operador humano.

Además, en la *Ilustración 56* se pueden observar ambos botones, “iMoverCaja” e “iResetCaja”, para activar el movimiento de la caja o para reestablecer su posición.

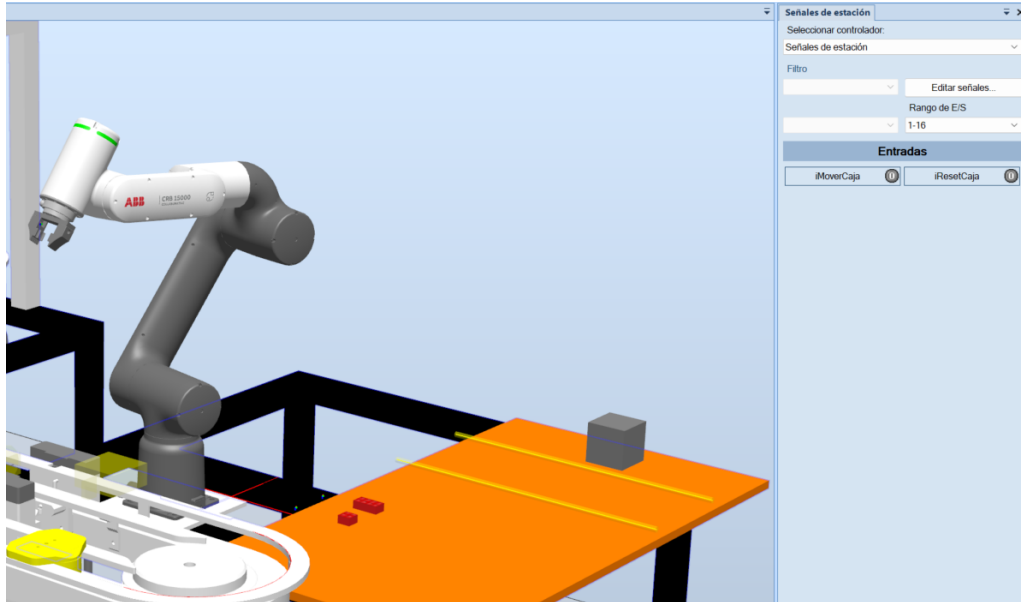


Ilustración 56: Ventana Señales de estación para protocolo de seguridad

Por último, como se puede observar en la *Ilustración 49*, el bloque “*SpeedLimiter*” se encarga de la lógica de simulación de este protocolo de seguridad creado. Este se encuentra adjunto en la *Ilustración 57* para una visualización en detalle de la programación.

Todo ello se puede comprender mejor acudiendo al *ANEXO V: Códigos de Rapid*.

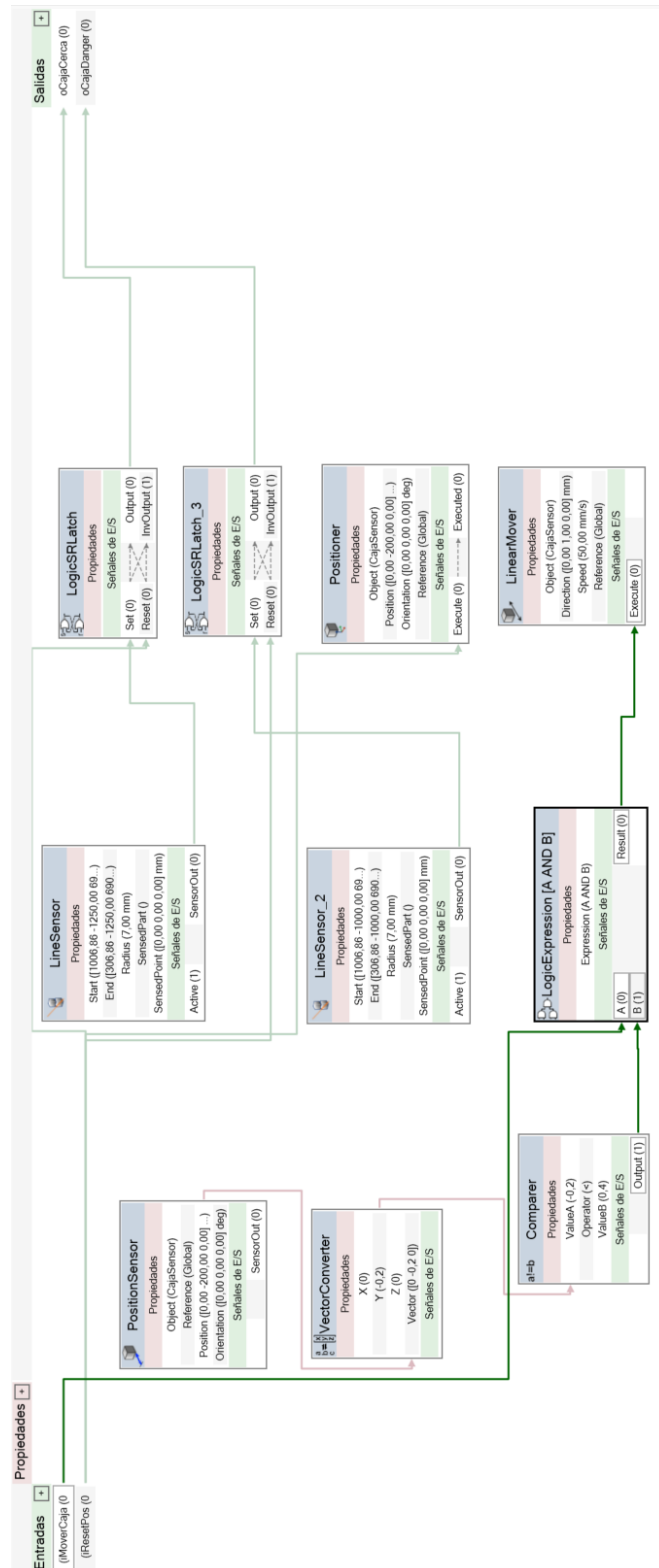


Ilustración 57: Bloque "SpeedLimiter"

Capítulo 6. PRESUPUESTO

Como en todo proyecto de estas características, se ha considerado conveniente adjuntar un capítulo relativo al presupuesto estimado que se necesitaría para implementar el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster en la industria.

Por un lado, la mayor inversión se debería de realizar en la mano de obra. Este proyecto cuenta con una componente crucial para el desarrollo de este gemelo digital: las horas de trabajo de un ingeniero. En términos generales, la parte práctica de este proyecto se desarrolló en aproximadamente ocho meses, por lo que se estima que este sería el intervalo de tiempo necesario para la obtención del trabajo terminado. Cabe mencionar que el ingeniero debe de estar formado en el sector robótico industrial, además este tiene que tener las cualidades necesarias para ser capaz de programar en *Rapid* y hacer un buen uso de todas las herramientas de *RobotStudio*, así como su correspondiente lógica. Por último, este profesional también debe de conocer un software de diseño, como es *Solid Edge*, para poder modelar todos los prototipos 3D necesarios para construir la estructura de la planta del laboratorio al completo.

Por otro lado, se deben de tener en cuenta también todas las licencias empleadas a lo largo del proyecto. Como se ha mencionado en el capítulo 3.2. *Tecnologías y software*, tanto el software enfocado a aplicaciones robóticas, *RobotStudio*, como el programa de diseño asistido por computadora, *Solid Edge*, no se pueden descargar de manera gratuita.

Finalmente, para sacar el máximo beneficio a esta simulación, es conveniente contar con un laboratorio físico con unas instalaciones similares a la Minifábrica de ICAI. Además, este deberá estar equipado con *Cobots*, como son el *GoFa CRB 15000* y el *SWIFTI CRB 1100*.

Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS,

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este último apartado se ha considerado oportuno unificar tanto un análisis de resultados de la solución propuesta como las conclusiones y trabajos futuros relativos a la misma. Ya que, debido a la falta de resultados numéricos para realizar un estudio cuantitativo de la solución, se ha considerado más apropiado presentarlo de esta forma.

Realizando una comparación entre la simulación realizada en *RobotStudio* y la realidad de la Minifábrica de ICAI, el balance sale extremadamente positivo. Se ha conseguido calcar prácticamente a la perfección los movimientos y el flujo de trabajo del laboratorio real. Al ejecutar el proyecto, este es capaz de procesar los cuatro controladores al mismo tiempo de una manera precisa, en la que se aprecia como las estaciones montadores y las desmontadoras trabajan simultáneamente para conseguir un resultado propio de una industria real.

Cabe mencionar que se han encontrado dos cuellos de botella significativos a la hora de simular este proyecto, aunque en todo momento se han conseguido solventar haciendo un buen uso de las herramientas que proporciona *RobotStudio*. Por un lado, la exactitud de la pinza para coger o dejar las piezas resultó un problema de alta precisión para que esta acción resultase realista. Por otro lado, la interacción del robot con el cargador obligó a programar una configuración cinemática, lo que supuso muchas semanas de trabajo para lidiar con la importación de archivos en *RobotStudio*, la creación de mallado alrededor de las geometrías y la construcción de las transformaciones precisas que hiciesen al robot interactuar con el cargador de una manera óptima respecto a la realidad.

En conclusión, los objetivos principales de este proyecto se han cubierto con grandes resultados. La idea principal consistía en conseguir un modelo completamente virtual para hacer accesible la Minifábrica de ICAI al alumno de manera remota. Además, dicha plataforma tiene un semejanza prácticamente completa con la realidad del laboratorio. Por lo que, tal y como se impuso en las especificaciones del proyecto, el alumno, gracias a la simulación desarrollada, es capaz de diseñar y programar una fábrica completamente modular desde el punto de vista de la robótica industrial.

Cabe mencionar que, a lo largo del desarrollo de este trabajo, se ha priorizado en todo momento conseguir obtener una herramienta modular. Es cierto que siempre hay que realizar una inversión inicial algo tediosa para construir la infraestructura del laboratorio, pero se ha procurado diseñar los mecanismos, definir las articulaciones y, en general, programar todos los elementos que conforman la simulación de una manera sistemática para conseguir la mayor escalabilidad posible a otras configuraciones de los *Cobots* o incluso a otros proyectos

Finalmente, se quiere terminar esta memoria haciendo referencia a los trabajos futuros de esta aplicación. Esta forma un modelo de simulación que proporciona con mucha precisión lo que va a ocurrir en la realidad del laboratorio, por lo que sería conveniente introducir nuevos elementos conforme se vaya actualizando la Minifábrica de ICAI. Por ejemplo, podría ser conveniente añadir un almacén o incorporar un robot móvil montado en una plataforma. Además, otro gran avance estaría ligado a conseguir un gemelo digital completo del laboratorio. La realimentación de la simulación con el modelo real puede proporcionar muchas prestaciones de precisión, control y seguridad. Por último, conforme se mejoren las prestaciones y se introduzcan nuevas actualizaciones en la herramienta de robótica *RobotStudio*, se podrán implementar de una manera más robusta los protocolos de seguridad, como es el *Virtual SafeMove*.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. I. o. education, «Ventajas y desventajas de los robots,» [En línea]. Available: <https://www.euroinnova.edu.es/blog/ventajas-y-desventajas-de-los-robots>. [Último acceso: 2023].
- [2] C. D. SEGURIDAD, «Los riesgos de la robótica en materia de seguridad y privacidad de datos,» [En línea]. Available: <https://cuadernosdeseguridad.com/2019/10/riesgos-robotica-seguridad/>. [Último acceso: 2023].
- [3] B. QHSE, «Robotización industrial: ¡hasta el infinito y más allá!,» [En línea]. Available: <https://www.blog-qhse.com/es/robotizacion-industrial-hasta-el-infinito-y-mas-alla>. [Último acceso: 2023].
- [4] ABB, «Collaborative Robots,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots>. [Último acceso: 2023].
- [5] ABB, «GoFa CRB 15000,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-15000>. [Último acceso: 2023].
- [6] ABB, «SWIFTI,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/swifti>. [Último acceso: 2023].
- [7] ifdesign, «GoFa CRB 15000,» [En línea]. Available: <https://ifdesign.com/en/winner-ranking/project/gofa-crb-15000/329592>. [Último acceso: 2023].

-
- [8] ABB, «SWIFTI CRB 1100,» [En línea]. Available: <https://webshop.robotics.abb.com/us/catalog/product/view/id/240/s/swifti-crb-1100-vision-inspection/category/3/>. [Último acceso: 2023].
- [9] ABB, «RobotStudio Suite,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robotstudio>. [Último acceso: 2023].
- [10] SIEMENS, «Solid Edge,» [En línea]. Available: <https://solidedge.siemens.com/en/>. [Último acceso: 2023].
- [11] hp, «Solución de impresión industrial 3D HP Jet Fusion 4200,» [En línea]. Available: <https://www.hp.com/es-es/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-4200.html>. [Último acceso: 2023].
- [12] ERP, «Desarrollo iterativo e incremental,» [En línea]. Available: <https://www.mundoerp.com/blog/metodologia-iterativa-o-incremental-gestion-proyectos/>. [Último acceso: 2023].
- [13] Automate, «UNIMATE The First Industrial Robot,» [En línea]. Available: <https://www.automate.org/a3-content/joseph-engelberger-unimate>. [Último acceso: 2023].
- [14] H. d. empresas, «El protagonismo decisivo de los ‘cobots’ en la industria 4.0,» [En línea]. Available: <https://hablemosdeempresas.com/grandes-empresas/que-son-los-cobots/>. [Último acceso: 2023].
- [15] U. ROBOTS, «LA VENTA DEL PRIMER COBOT DE UNIVERSAL ROBOTS,» [En línea]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/acerca-de-universal-robots/noticias/historia-de-los-cobots/>. [Último acceso: 2023].

- [16] movicontrol, «Robot colaborativo: marcas y ejemplos,» [En línea]. Available: <https://movicontrol.es/robots-colaborativos/>. [Último acceso: 2023].
- [17] weir, «Our Linatex Range of Rubber,» [En línea]. Available: <https://www.global.weir/brands/linatex/?lang=es>. [Último acceso: 2023].
- [18] U. ROBOTS, «Linatex,» [En línea]. Available: <https://www.universal-robots.com/case-stories/linatex/>. [Último acceso: 2023].
- [19] RIRIPSA, «La historia de los robots colaborativos.,» [En línea]. Available: <https://ripipsacobots.com/historia-robots-colaborativos/>. [Último acceso: 2023].
- [20] ABB, «IRB 120,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-120>. [Último acceso: 2023].
- [21] D. MECHATRONICS, «Los cobots: GoFa CRB 15000,» [En línea]. Available: <https://daneel-mechatronics.com/blog/los-cobots-gofa-crb-15000/>. [Último acceso: 2023].
- [22] ABB, «GoFa™ CRB 15000,» [En línea]. Available: <https://webshop.robotics.abb.com/es/catalog/product/view/id/249/s/gofa-crb-15000-vision-inspection/>. [Último acceso: 2023].
- [23] G. SOLUTIONS, «Introduction to Solid Edge,» [En línea]. Available: <https://www.geoplsm.com/blog/515-introduction-to-solid-edge>. [Último acceso: 2023].
- [24] SIEMENS, «Solid Edge,» [En línea]. Available: <https://solidedge.siemens.com/en/>. [Último acceso: 2023].

- [25] UltiMaker, «UltiMaker Cura,» [En línea]. Available: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>. [Último acceso: 2023].
- [26] ABB, «RobotStudio®,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/robotstudio/robotstudio#:~:text=Introducci%C3%B3n%20a%20las%20funciones%20de%20RobotStudio&text=Permite%20la%20simulaci%C3%B3n%20en%20tiempo,sin%20afectar%20a%20la%20producci%C3%B3n..> [Último acceso: 2023].
- [27] ABB, «Manual de referencia técnica,» [En línea]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC065040-005&LanguageCode=es&DocumentPartId=&Action=Launch>. [Último acceso: 2023].
- [28] J. A. R. Mondéjar, «AA_PrácticaPlanta_v1.0,» 2020.
- [29] Oracle, «¿Qué es Docker?,» [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/es/cloud/cloud-native/container-registry/what-is-docker/#:~:text=Un%20contenedor%20Docker%20es%20un,y%20fiable%20en%20entornos%20inform%C3%A1ticos..> [Último acceso: 2023].
- [30] ABB, «Tutorials,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio/tutorials>. [Último acceso: 2023].
- [31] ABB, «Presentando SafeMove,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/es/controladores/safemove>. [Último acceso: 2023].
- [32] ABB, «Manual de aplicaciones,» [En línea]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC066559-005&LanguageCode=es&DocumentPartId=&Action=Launch>. [Último acceso: 2023].

- [33] ABB, «Update (2022/04) - Virtual Human 1.4.1 Download,» [En línea]. Available: <https://forums.robotstudio.com/discussion/12353/update-2022-04-virtual-human-1-4-1-download>. [Último acceso: 2023].
- [34] robowork, «Schunk Products,» [En línea]. Available: https://www.robowork.pt/en/products-accessories/schunk-products?gclid=Cj0KCQjwn_OlBhDhARIsAG2y6zOGOp-lbS-nJis28iN2gqr8DNy0y-NYi2XzsLpJKNkZgf_ohDHBIqgaAhJVEALw_wcB. [Último acceso: 2023].
- [35] E. Español, «La robótica colaborativa aliada para la creación de tecnologías verdes,» [En línea]. Available: https://www.elespanol.com/enclave-ods/20221017/robotica-colaborativa-aliada-creacion-tecnologias-verdes/710808927_13.html. [Último acceso: 2023].
- [36] cic40, «El nuevo papel de la robótica, un paso hacia el futuro de la automatización y sostenibilidad,» [En línea]. Available: <https://cic40.es/aplicacion-sectores-industriales/el-nuevo-papel-de-la-robotica-un-paso-hacia-el-futuro-de-la-automatizacion-y-sostenibilidad/>. [Último acceso: 2023].
- [37] N. Unidas, «Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>. [Último acceso: 2023].
- [38] N. Unidas, «Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>. [Último acceso: 2023].

- [39] N. Unidas, «Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>. [Último acceso: 2023].

ANEXO I: ESTADO DE LA CUESTIÓN DE LA MINIFÁBRICA FÍSICA



Ilustración 58: Estación 1 Minifábrica física



Ilustración 59: Estación 2 Minifábrica física



Ilustración 60: Estación 3 Minifábrica física

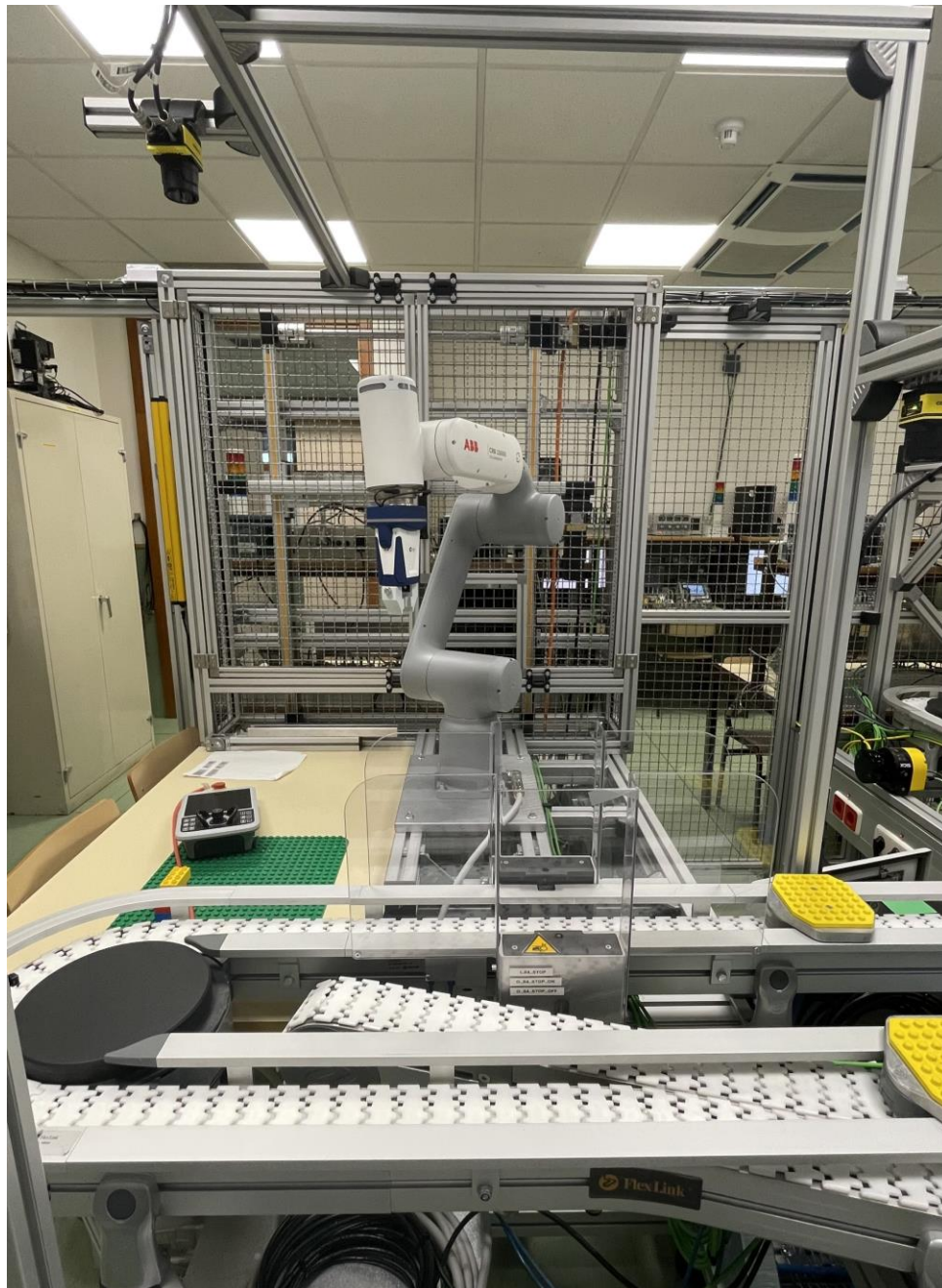


Ilustración 61: Estación 4 Minifábrica física

ANEXO II: PLANOS DE LA MINIFÁBRICA

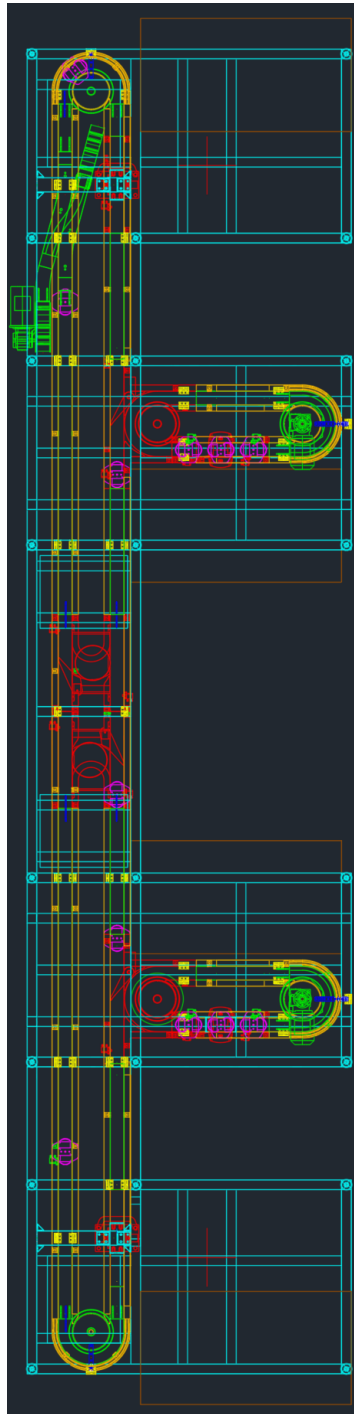


Ilustración 62: Planta plano AutoCad Minifábrica

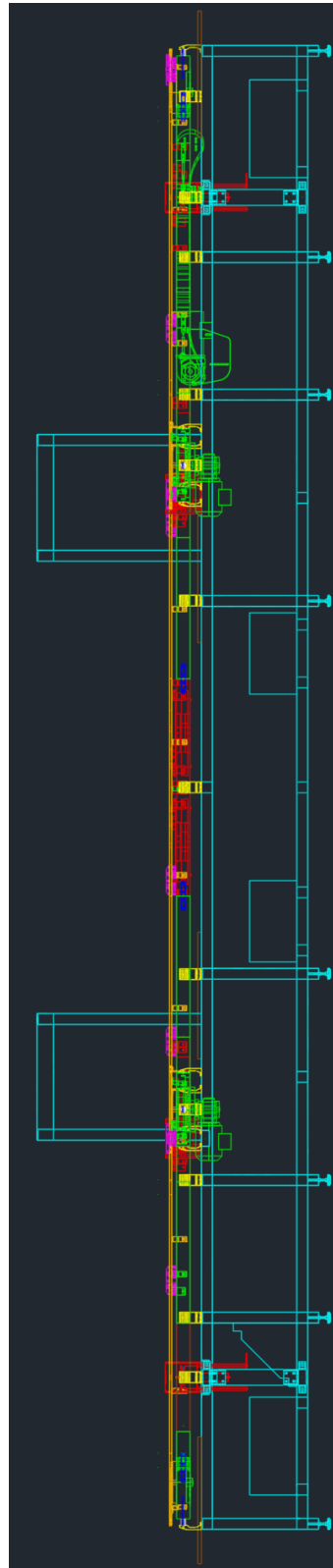


Ilustración 63: Alzado plano AutoCad Minifábrica

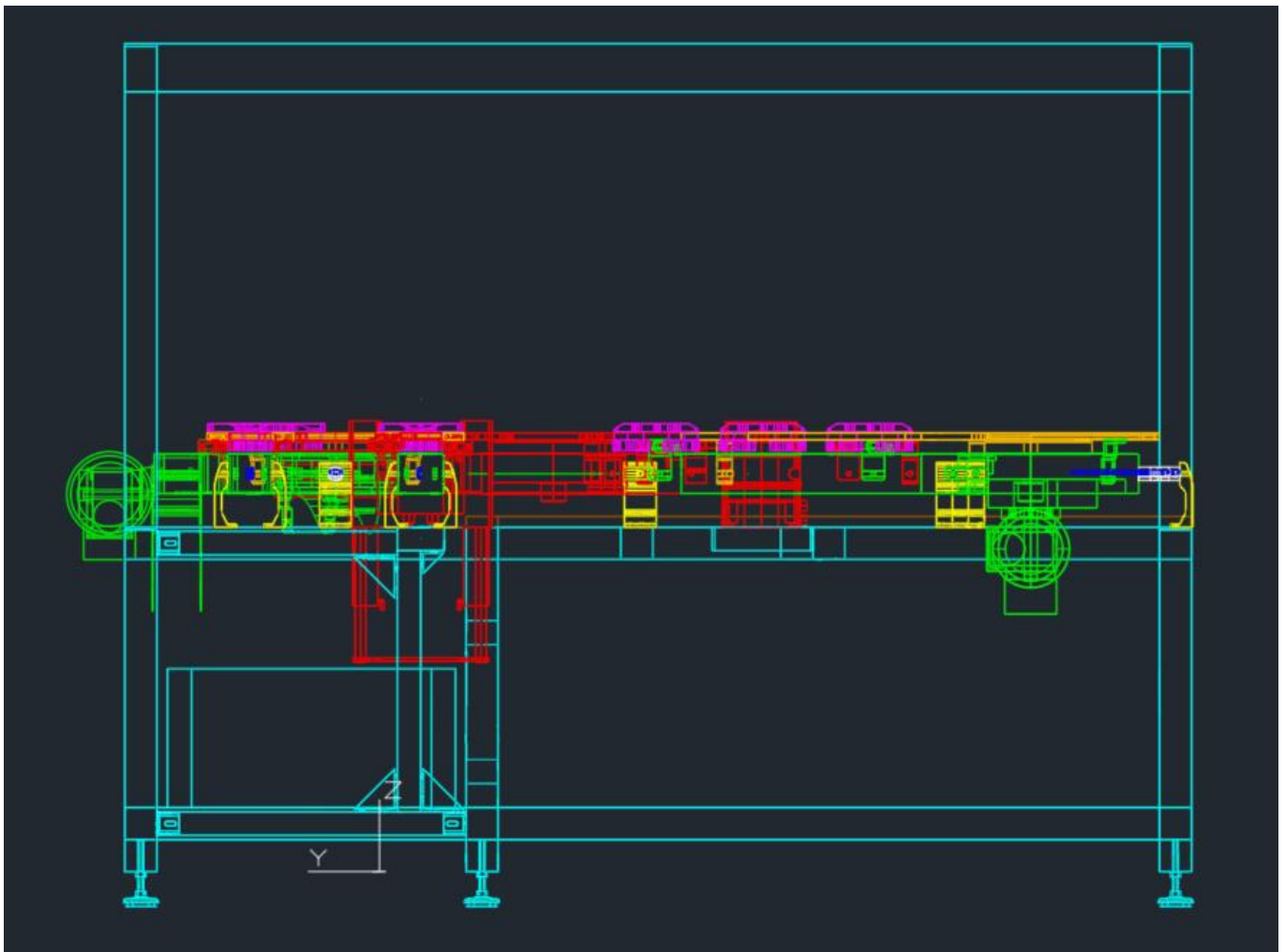


Ilustración 64: Perfil plano AutoCad Minifábrica

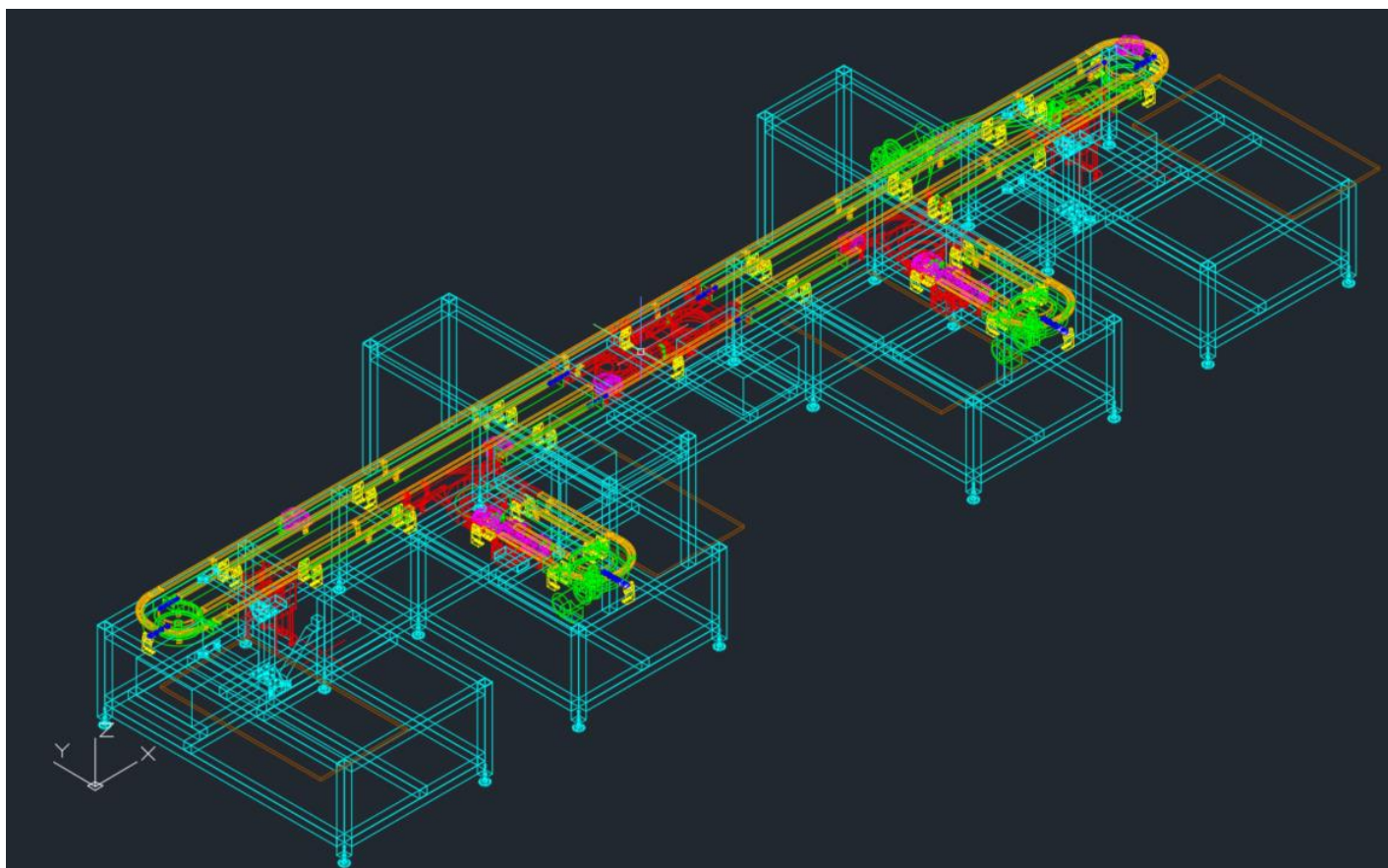


Ilustración 65: Vista completa plano AutoCad Minifábrica

ANEXO III: PLANOS PINZAS GoFa CRB 15000

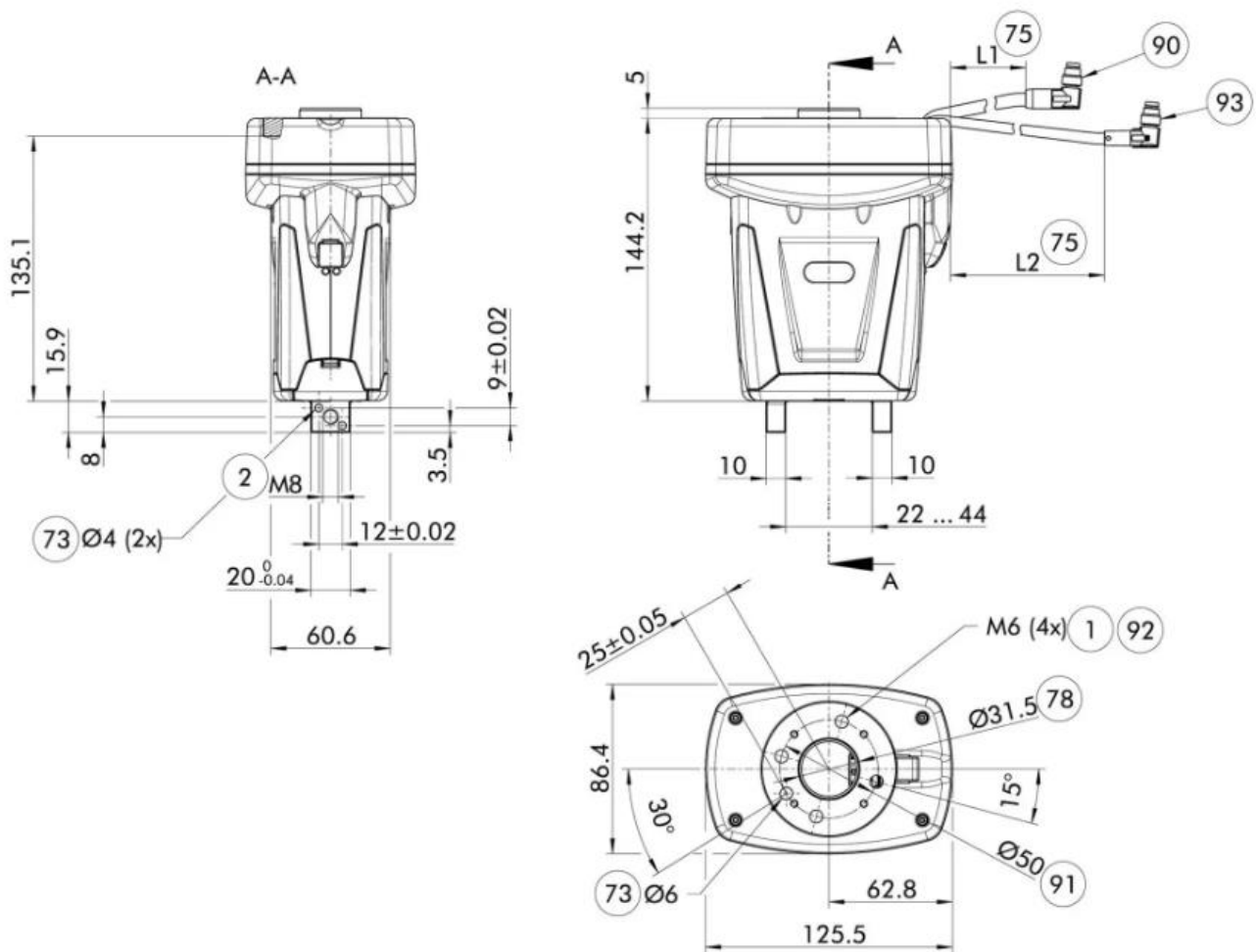


Ilustración 66: Plano pieza oficial de sujeción GoFa CRB 15000

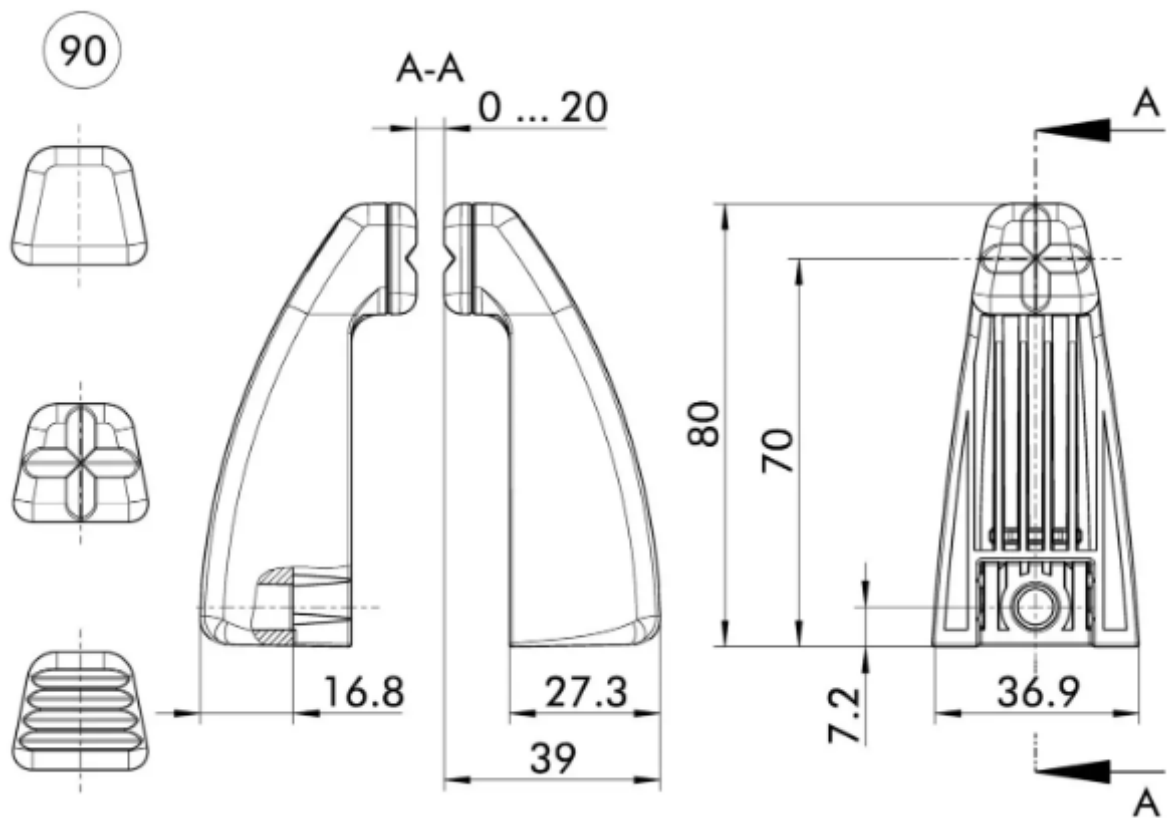


Ilustración 67: Plano pinza oficial GoFa CRB 15000

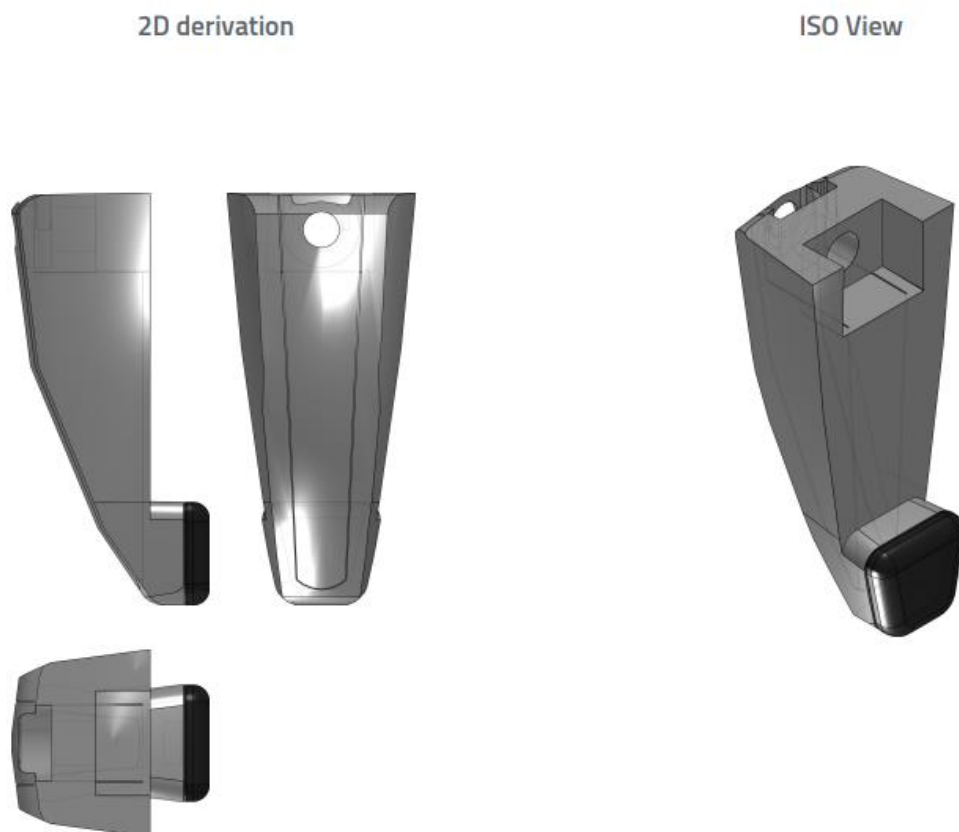


Ilustración 68: Vistas tridimensionales pinza oficial GoFa CRB 15000 [34]

ANEXO IV: ESTACIONES MINIFÁBRICA EN ROBOTSTUDIO

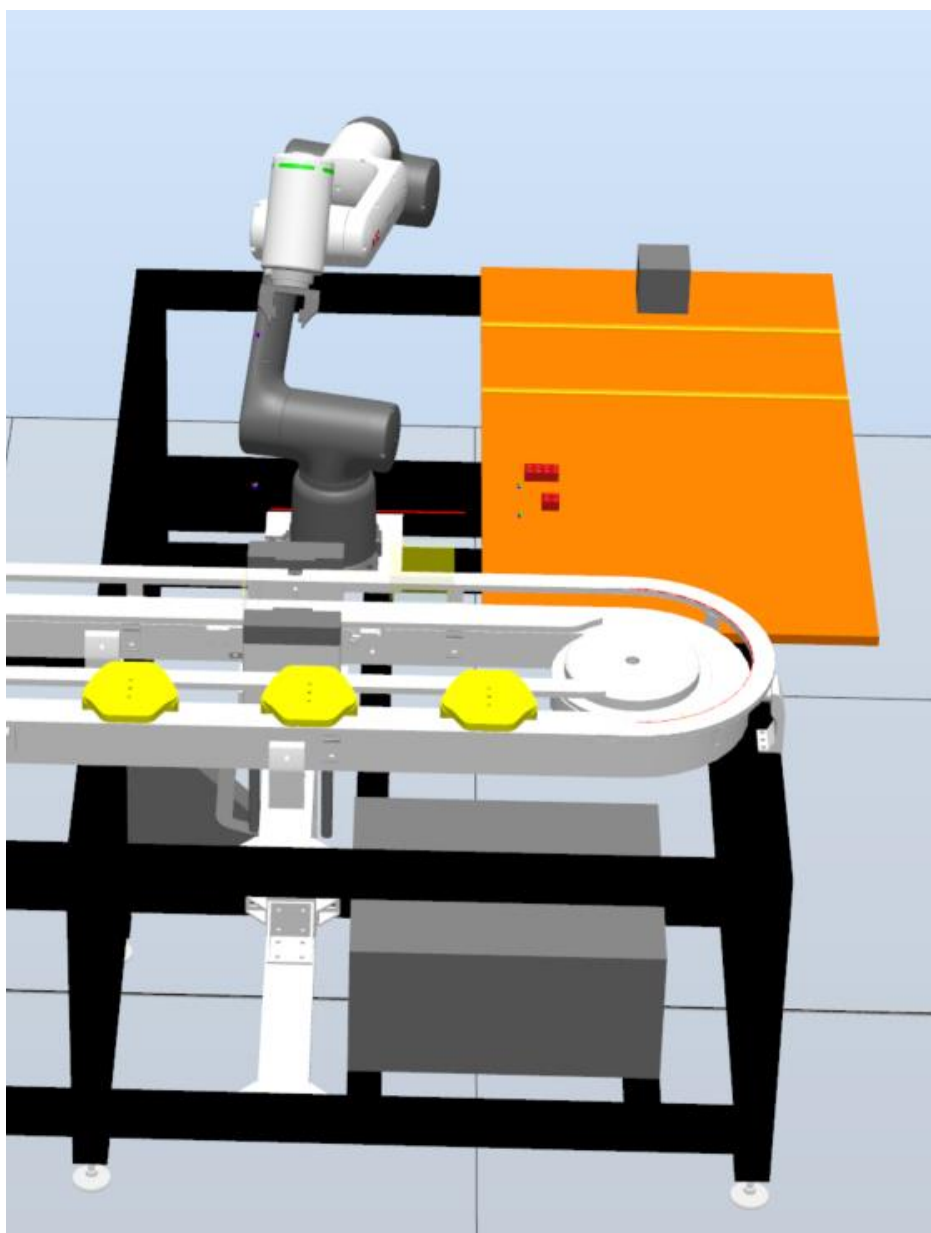


Ilustración 69: Estación 1 Minifábrica RobotStudio

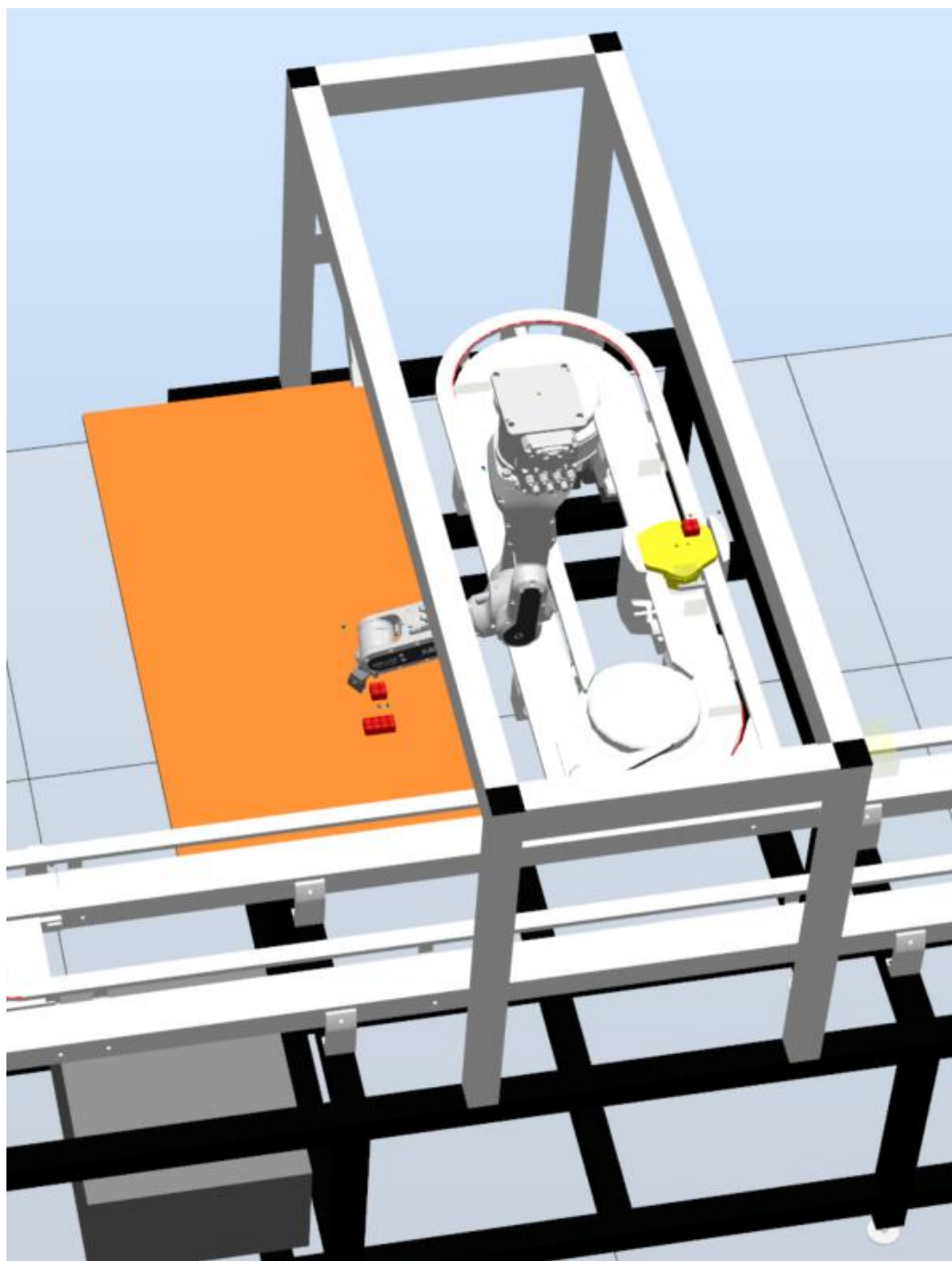


Ilustración 70: Estación 2 Minifábrica RobotStudio

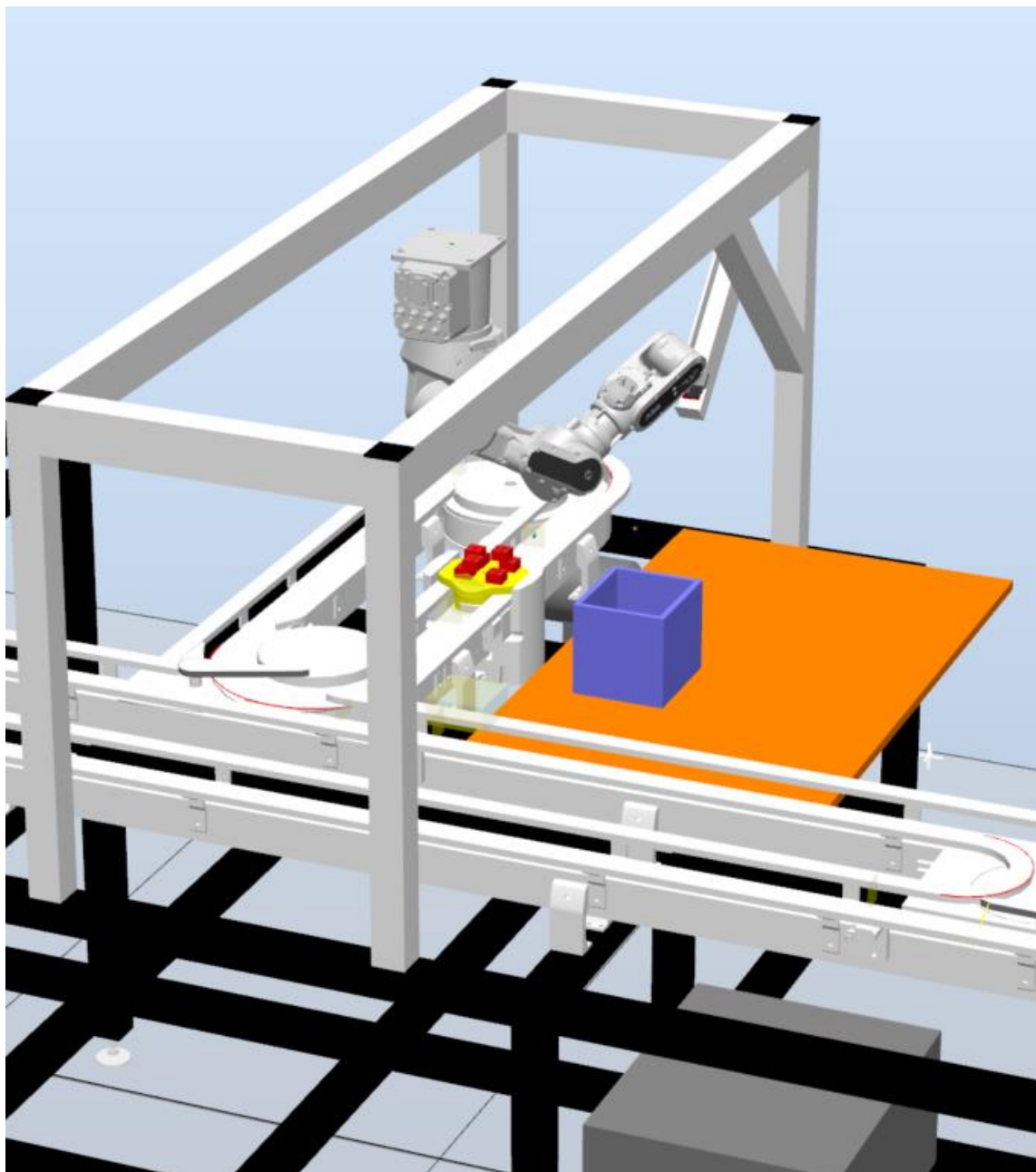


Ilustración 71: Estación 3 Minifábrica RobotStudio

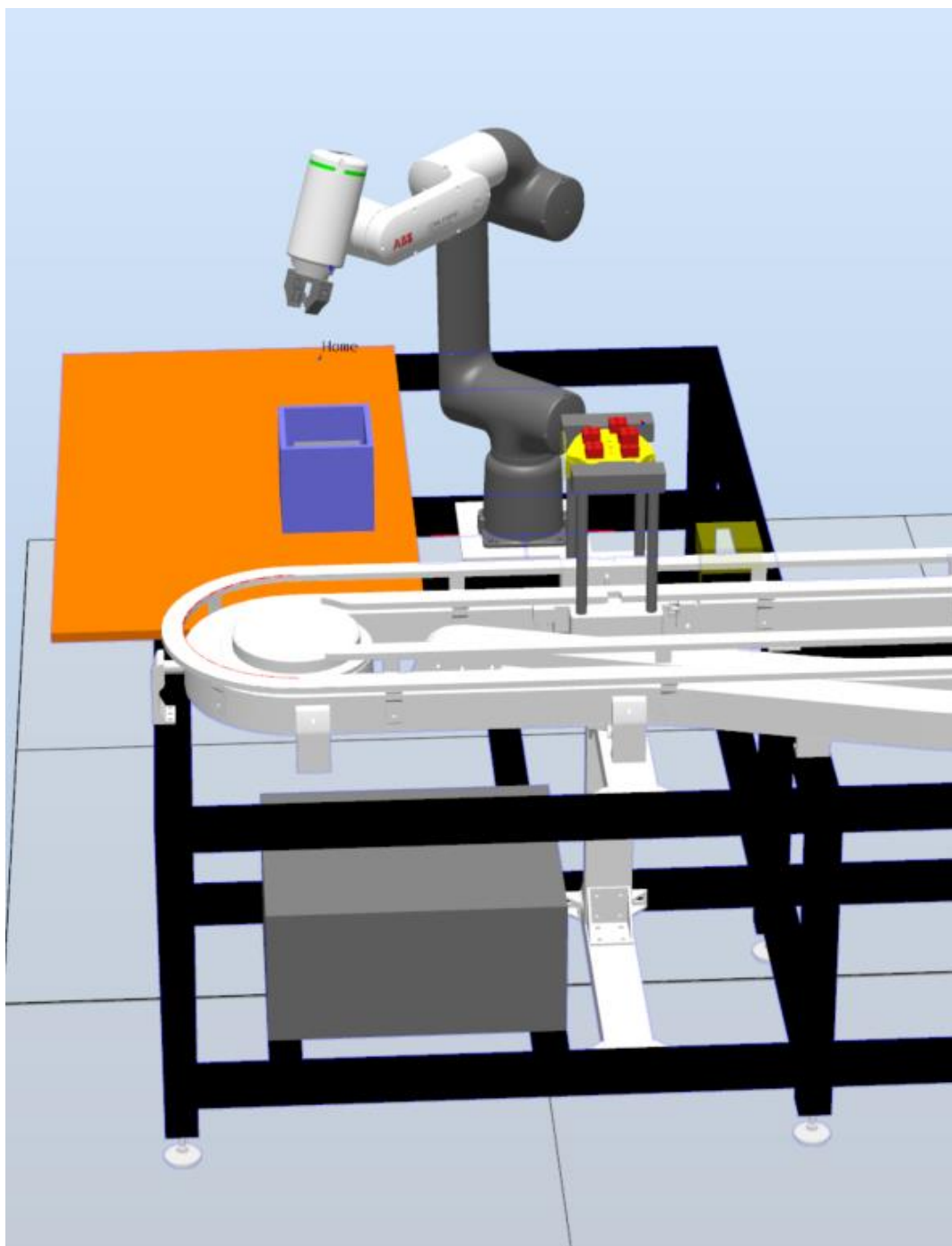


Ilustración 72: Estación 4 Minifábrica RobotStudio

ANEXO V: CÓDIGOS DE RAPID

- Código *Rapid* Estación 1:

```
MODULE Module1

    CONST robtarget Home:=[[-60.983,-313.902,732.067],[0.043834723,-0.000002953,-
0.955679747,0.291126669],[-2,-1,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget
Target_10:=[413.769,195.88,20],[0,0,1,0],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Target_20:=[[-64.268,-405,437],[0,0.707106781,0.707106781,0],[-2,0,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Target_30:=[396.686094163,179.770793858,75.733962425],[0.000822978,-
0.706698423,-0.707513923,-0.000842734],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale:=[[-60.983,-405,492.734],[0,0,1,0],[-2,0,-
2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego:=[396.686,179.771,75.734],[0.000821186,-0.706698924,-0.707513423,-
0.000844909],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego2:=[396.686,279.771,75.734],[0.000821186,-0.706698924,-0.707513423,-
0.000844909],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale2:=[[-60.983,-405,511.934],[0,0,1,0],[-2,0,-
2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    PERS robtarget paleTarget:=[[-60.983,-373,512.734],[0,0,1,0],[-2,0,-
2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_H:=[[-60.983,-405,492.734],[0,0.707106781,0.707106781,0],[-2,0,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_rot_4:=[[-60.983,-405,492.734],[0,-
0.707106781,0.707106781,0],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_rot3:=[[-60.983,-405,492.734],[0,1,0,0],[-
2,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego3:=[380.686010624,279.75257064,75.733441498],[0.000821186,-
0.706698924,-0.707513423,-0.000844909],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    VAR bool setupDone:=FALSE;
    VAR bool Montar:=FALSE;
    VAR intnum irSpeedSlow;
    VAR intnum irSpeedFast;
    VAR intnum irSpeedNull;

    ! Programa principal de la estación
    PROC main()
        MoveL Home,v2000,fine,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;
        SetDO O_ROBOT1_P1,0;
        IF setupDone THEN
            esperaPale;
            IF Montar=TRUE THEN
                montaFigura;
                bajaPale;
            ENDIF
        ELSE
            init;
            setup;
            setupDone:=TRUE;
        ENDIF
    ENDPROC
```

! Configuración inicial de variables de seguridad

```
PROC init()
  IDelete irSpeedSlow;
  CONNECT irSpeedSlow WITH tSlowSpeed;
  ISignalDI I_OBJ_CLOSE,high,irSpeedSlow;

  IDelete irSpeedFast;
  CONNECT irSpeedFast WITH tFastSpeed;
  ISignalDI I_OBJ_CLOSE,low,irSpeedFast;

  IDelete irSpeedNull;
  CONNECT irSpeedNull WITH tNullSpeed;
  ISignalDI I_OBJ_DANGER,high,irSpeedNull;

  IF TestDI (I_OBJ_CLOSE) THEN
    SpeedRefresh 50;
  ELSE
    SpeedRefresh 100;
  ENDIF
ENDPROC
```

```
TRAP tSlowSpeed
  SpeedRefresh 30;
ENDTRAP
```

```
TRAP tFastSpeed
  SpeedRefresh 100;
ENDTRAP
```

```
TRAP tNullSpeed
  SpeedRefresh 0;
ENDTRAP
```

! Configuración inicial de los actuadores

```
PROC setup()
  SetDO O_GSTOP_OFF,1;
  SetDO O_GSTOP_ON,0;

  SetDO O_S1_PSTOP_ON,1;
  SetDO O_S1_PSTOP_OFF,0;

  SetDO O_S1_STOP_ON,1;
  SetDO O_S1_STOP_OFF,0;

  SetDO O_S1_LIFT_DOWN,1;
  SetDO O_S1_LIFT_UP,0;

  SetDO O_D12_ARM_SH,0;
  SetDO O_D12_ARM_ST,1;

  SetDO O_D12_STOP_ON,0;
  SetDO O_D12_STOP_OFF,1;
ENDPROC
```

! Esperar palé

```
PROC esperaPale()
  SetDO O_S1_PSTOP_ON,1;
  SetDO O_S1_PSTOP_OFF,0;

  WaitDI I_S1_PSTOP,1;
  SetDO O_S1_STOP_ON,1;
```

```

SetDO O_S1_STOP_OFF,0;
WaitTime 1;

IF I_S1_Lego=1 THEN

    SetDO O_S1_PSTOP_ON,0;
    SetDO O_S1_PSTOP_OFF,1;
    SetDO O_S1_STOP_ON,0;
    SetDO O_S1_STOP_OFF,1;
    WaitTime 1;
    SetDO O_S1_PSTOP_ON,1;
    SetDO O_S1_PSTOP_OFF,0;

    Montar:=FALSE;

ELSE

    Montar:=TRUE;

    SetDO O_S1_PSTOP_OFF,1;
    SetDO O_S1_PSTOP_ON,0;
    WaitTime 0.3;

    SetDO O_S1_PSTOP_OFF,0;
    SetDO O_S1_PSTOP_ON,1;

    WaitDI I_S1_STOP,1;
    WaitTime 1;

    SetDO O_S1_LIFT_DOWN,0;
    SetDO O_S1_LIFT_UP,1;

    WaitDI I_S1_LIFT_UP,1;
    WaitTime 1;

    SetDO O_S1_STOP_ON,0;
    SetDO O_S1_STOP_OFF,1;

    SetDO O_S1_PSTOP_ON,0;
    SetDO O_S1_PSTOP_OFF,1;

ENDIF

ENDPROC

! Llevar piezas a sus posiciones de montaje
PROC montaFigura()
    colocaLego 0,-2,0,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego 0,2,0,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego -4,2,0,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego -4,-2,0,1,FALSE,TRUE;

    colocaLego 0,-1,1,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego -1,2,1,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego -4,1,1,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego -3,-2,1,1,FALSE,TRUE;

    colocaLego 0,1,2,1,TRUE,TRUE;
    colocaLego -1,4,2,2,TRUE,TRUE;
    colocaLego -4,-1,2,1,TRUE,TRUE;
    colocaLego 0,-4,2,4,TRUE,FALSE;
ENDPROC

```

```
! Bajar palé
PROC bajaPale()
  SetDO O_S1_PSTOP_ON,1;
  SetDO O_S1_PSTOP_OFF,0;
  WaitTime 2;

  SetDO O_S1_LIFT_DOWN,1;
  SetDO O_S1_LIFT_UP,0;
  WaitDI I_S1_LIFT_DOWN,1;

  WaitTime 2;
  SetDO O_S1_STOP_ON,1;
  SetDO O_S1_STOP_OFF,0;
ENDPROC

! Instrucciones montar una pieza
PROC colocaLego(num x,num y,num z,num rot,bool largo,bool centro)
  paleTarget.trans.x:=Pale.trans.x+32/2*x;
  paleTarget.trans.y:=Pale.trans.y+32/2*y;
  paleTarget.trans.z:=Pale.trans.z+19.2*z;
  IF rot=1 THEN
    paleTarget.rot.q1:=Pale.rot.q1;
    paleTarget.rot.q2:=Pale.rot.q2;
    paleTarget.rot.q3:=Pale.rot.q3;
    paleTarget.rot.q4:=Pale.rot.q4;
  ENDIF
  IF rot=2 THEN
    paleTarget.rot.q1:=Pale_H.rot.q1;
    paleTarget.rot.q2:=Pale_H.rot.q2;
    paleTarget.rot.q3:=Pale_H.rot.q3;
    paleTarget.rot.q4:=Pale_H.rot.q4;
  ENDIF
  IF rot=3 THEN
    paleTarget.rot.q1:=Pale_rot3.rot.q1;
    paleTarget.rot.q2:=Pale_rot3.rot.q2;
    paleTarget.rot.q3:=Pale_rot3.rot.q3;
    paleTarget.rot.q4:=Pale_rot3.rot.q4;
  ENDIF
  IF rot=4 THEN
    paleTarget.rot.q1:=Pale_rot_4.rot.q1;
    paleTarget.rot.q2:=Pale_rot_4.rot.q2;
    paleTarget.rot.q3:=Pale_rot_4.rot.q3;
    paleTarget.rot.q4:=Pale_rot_4.rot.q4;
  ENDIF

  IF largo THEN
    IF centro THEN
      MoveL Lego3,v2000,fine,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;
    ELSE
      MoveL Lego2,v2000,fine,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;
    ENDIF
  ELSE
    MoveL Lego,v2000,fine,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;
  ENDIF

  SetDO O_ROBOT1_P1,1;

  MoveL Home,v2000,z100,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;
```

```
paleTarget.trans.z:=paleTarget.trans.z+20;  
MoveL paleTarget,v2000,fine,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;  
  
paleTarget.trans.z:=paleTarget.trans.z-20;  
MoveL paleTarget,v2000,fine,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;  
  
SetDO O_ROBOT1_P1,0;  
  
MoveL Home,v2000,z100,PinzaNueva_1\WObj:=wobj0;  
ENDPROC  
ENDMODULE
```

- 98

```

SetDO O_C2_STOPH_OFF,0;
SetDO O_C2_STOPH_ON,1;

SetDO O_C2_STOPS_OFF,1;
SetDO O_C2_STOPS_ON,0;

SetDO O_S2_STOP_OFF,1;
SetDO O_S2_STOP_ON,0;

SetDO O_S2_PSTOP_OFF,1;
SetDO O_S2_PSTOP_ON,0;

SetDO O_S2_LOC_DOWN,1;
SetDO O_S2_LOC_UP,0;
ENDPROC

! Esperar palé
PROC esperaPale()
  SetDO O_C2_STOPH_OFF,0;
  SetDO O_C2_STOPH_ON,1;

  WaitDI I_C2_STOPH,1;
  WaitTime 1;

  IF I_S2_Lego=1 THEN

    SetDO O_C2_STOPH_OFF,1;
    SetDO O_C2_STOPH_ON,0;
    WaitTime 1;
    SetDO O_C2_STOPH_OFF,0;
    SetDO O_C2_STOPH_ON,1;
    Montar:=FALSE;

  ELSE

    Montar:=TRUE;

    SetDO O_C2_STOPH_OFF,1;
    SetDO O_C2_STOPH_ON,0;
    WaitTime 0.3;

    SetDO O_C2_STOPH_OFF,0;
    SetDO O_C2_STOPH_ON,1;

    SetDO O_C2_ARM_ME,0;
    SetDO O_C2_ARM_SP,1;
    WaitTime 5;

    SetDO O_C2_ARM_ME,1;
    SetDO O_C2_ARM_SP,0;

    SetDO O_C2_STOPH_OFF,1;
    SetDO O_C2_STOPH_ON,0;

    WaitDI I_S2_PSTOP,1;
    SetDO O_S2_STOP_ON,1;
    SetDO O_S2_STOP_OFF,0;
    WaitDI I_S2_STOP,1;
    WaitTime 1;
  ENDIF

```

ENDPROC

! Llevar piezas a sus posiciones de montaje

PROC montaFigura()

Montar:=FALSE;

colocaLego 0,-2,0,1,FALSE,TRUE;
colocaLego 0,-6,0,1,FALSE,TRUE;
colocaLego -4,-6,0,1,FALSE,TRUE;
colocaLego -4,-2,0,1,FALSE,TRUE;

colocaLego 0,-3,1,1,FALSE,TRUE;
colocaLego -1,-6,1,1,FALSE,TRUE;
colocaLego -4,-5,1,1,FALSE,TRUE;
colocaLego -3,-2,1,1,FALSE,TRUE;

colocaLego 0,-5,2,1,TRUE,TRUE;
colocaLego -3,-6,2,2,TRUE,TRUE;
colocaLego -4,-3,2,1,TRUE,TRUE;
colocaLego -2,-2,2,4,TRUE,FALSE;

ENDPROC

! Liberar palé

PROC liberaPale()

SetDO O_C2_STOPS_ON,1;
SetDO O_C2_STOPS_OFF,0;

SetDO O_S2_STOP_ON,0;
SetDO O_S2_STOP_OFF,1;

WaitDI I_C2_STOPS,1;
SetDO O_C2_STOPH_ON,1;
SetDO O_C2_STOPH_OFF,0;

SetDO O_C2_STOPS_ON,0;
SetDO O_C2_STOPS_OFF,1;
WaitTime 5;

SetDO O_C2_STOPH_ON,0;
SetDO O_C2_STOPH_OFF,1;

ENDPROC

! Instrucciones montar una pieza

PROC colocaLego(num x,num y,num z,num rot,bool largo,bool centro)

paleTarget.trans.x:=Pale.trans.x+32/2*x;
paleTarget.trans.y:=Pale.trans.y+32/2*y;
paleTarget.trans.z:=Pale.trans.z-19.2*z;

paleTarget.rot.q1:=Pale.rot.q1;
paleTarget.rot.q2:=Pale.rot.q2;
paleTarget.rot.q3:=Pale.rot.q3;
paleTarget.rot.q4:=Pale.rot.q4;

MoveJ PosInter,v1000,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;

IF largo THEN

IF centro THEN

MoveJ Lego3,v1000,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;

ELSE

```
        MoveJ Lego2,v1000,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;
    ENDIF

ELSE
    MoveJ Lego,v1000,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;
ENDIF

SetDO O_ROBOT2_P1,1;

MoveJ PosInter,v1000,z100,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;
MoveJ Home,v1000,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;

MoveJ offs(paleTarget,0,0,-50),v1000,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;
MoveL RelTool(paleTarget,0,0,0,\Rz:=90*(rot-1)),v100,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;

SetDO O_ROBOT2_P1,0;
MoveL offs(paleTarget,0,0,-50),v100,fine,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;

MoveJ Home,v1000,z100,PinzaS2_1\WObj:=wobj0;
ENDPROC
ENDMODULE
```

- Código *Rapid* Estación 3:

```
MODULE Module1

    CONST robtarget Home:=[[210.7056,277.2825,581.5673],[0.7038359,-0.002060147,-
0.002068121,0.7103566],[0,-3,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget PosInter:=[[367.1513,-10.66088,552.7213],[0.9990425,-
0.0005799612,0.04145191,0.01398175],[-1,-3,-2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget
Target_10:=[[413.769,195.88,20],[0,0,1,0],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Target_20:=[[-64.268,-405,437],[0,0.707106781,0.707106781,0],[-2,0,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Target_30:=[[396.686094163,179.770793858,75.733962425],[0.000822978,-
0.706698423,-0.707513923,-0.000842734],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget
Pale:=[[220.3161,43.78156,639.425],[0.9997156,0.00916499,0.01319019,0.01762776],[0,-
2,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Cargador:=[[483.0704,266,384.0282],[0.6514794,-0.244284,0.2661446,-
0.6671335],[0,-2,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego:=[[40.50145,-
275.9776,807.1288],[0.01706629,0.005200936,0.000608995,0.9998407],[-1,1,-
4,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego2:=[[-60.32555,-275.5895,811.4756],[0.999523,-
0.0002388497,0.006421196,-0.03020586],[-2,1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale2:=[[-60.983,-405,511.934],[0,0,1,0],[-2,0,-
2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    PERS robtarget paleTarget:=[[192.592,421.857,596.426],[0.021451,0.0134611,-
0.00028868,0.999679],[0,0,0,1],[9E+9,9E+9,9E+9,9E+9,9E+9,9E+9]];
    CONST robtarget Pale_H:=[[-60.983,-405,492.734],[0,0.707106781,0.707106781,0],[-2,0,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_rot_4:=[[-60.983,-405,492.734],[0,-
0.707106781,0.707106781,0],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_rot3:=[[-60.983,-405,492.734],[0,1,0,0],[-
2,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego3:=[[-60.32552,-293.746,811.4756],[0.999523,-
0.0002388215,0.006421296,-0.03020591],[-2,1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    VAR bool setupDone:=FALSE;
    VAR bool Desmontar:=FALSE;

    ! Programa principal de la estación
    PROC main()
        MoveJ Home,v1000,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;

        SetDO O_ROBOT3_P1,0;

        IF setupDone THEN
            esperaPale;
            IF Desmontar=TRUE THEN
                desmontaFigura;
                liberaPale;
            ENDIF
        ELSE
            setup;
            setupDone:=TRUE;
        ENDIF
    ENDPROC

    ! Configuración inicial de los actuadores
    PROC setup()
```

```

SetDO O_C3_ARM_ME,1;
SetDO O_C3_ARM_SP,0;

SetDO O_C3_STOPH_OFF,0;
SetDO O_C3_STOPH_ON,1;

SetDO O_C3_STOPS_OFF,1;
SetDO O_C3_STOPS_ON,0;

SetDO O_S3_STOP_OFF,1;
SetDO O_S3_STOP_ON,0;

SetDO O_S3_PSTOP_OFF,1;
SetDO O_S3_PSTOP_ON,0;

SetDO O_S3_LOC_DOWN,1;
SetDO O_S3_LOC_UP,0;
ENDPROC

! Esperar palé
PROC esperaPale()

SetDO O_C3_STOPH_OFF,0;
SetDO O_C3_STOPH_ON,1;

WaitDI I_C3_STOPH,1;
WaitTime 1;

IF I_S3_Lego=0 THEN

    SetDO O_C3_STOPH_OFF,1;
    SetDO O_C3_STOPH_ON,0;
    WaitTime 1;
    SetDO O_C3_STOPH_OFF,0;
    SetDO O_C3_STOPH_ON,1;
    Desmontar:=FALSE;
ELSE
    Desmontar:=TRUE;

    SetDO O_C3_STOPH_OFF,1;
    SetDO O_C3_STOPH_ON,0;
    WaitTime 0.3;

    SetDO O_C3_STOPH_OFF,0;
    SetDO O_C3_STOPH_ON,1;

    SetDO O_C3_ARM_ME,0;
    SetDO O_C3_ARM_SP,1;
    WaitTime 5;

    SetDO O_C3_ARM_ME,1;
    SetDO O_C3_ARM_SP,0;

    SetDO O_C3_STOPH_OFF,1;
    SetDO O_C3_STOPH_ON,0;

    WaitDI I_S3_PSTOP,1;
    SetDO O_S3_STOP_ON,1;
    SetDO O_S3_STOP_OFF,0;
    WaitDI I_S3_STOP,1;

```

```

        WaitTime 1;
    ENDIF
ENDPROC

! Llevar piezas a sus posiciones de desmontaje
PROC desmontaFigura()
    Desmontar:=FALSE;
    cogeLego -2,-2,2,0,TRUE,FALSE;
    cogeLego -4,-3,2,1,TRUE,TRUE;
    cogeLego -3,-6,2,0,TRUE,TRUE;
    cogeLego 0,-5,2,1,TRUE,TRUE;

    cogeLego -3,-2,1,0,FALSE,TRUE;
    cogeLego -4,-5,1,0,FALSE,TRUE;
    cogeLego -1,-6,1,0,FALSE,TRUE;
    cogeLego 0,-3,1,0,FALSE,TRUE;

    cogeLego -4,-2,0,0,FALSE,TRUE;
    cogeLego -4,-6,0,0,FALSE,TRUE;
    cogeLego 0,-6,0,0,FALSE,TRUE;
    cogeLego 0,-2,0,0,FALSE,TRUE;

ENDPROC

! Liberar palé
PROC liberaPale()

    SetDO O_C3_STOPS_ON,1;
    SetDO O_C3_STOPS_OFF,0;

    SetDO O_S3_STOP_ON,0;
    SetDO O_S3_STOP_OFF,1;

    WaitDI I_C3_STOPS,1;
    SetDO O_C3_STOPH_ON,1;
    SetDO O_C3_STOPH_OFF,0;

    SetDO O_C3_STOPS_ON,0;
    SetDO O_C3_STOPS_OFF,1;
    WaitTime 5;

    SetDO O_C3_STOPH_ON,0;
    SetDO O_C3_STOPH_OFF,1;
ENDPROC

! Instrucciones desmontar una pieza
PROC cogeLego(num x,num y,num z,num rot,bool largo,bool centro)
    paleTarget.trans.x:=Pale.trans.x+32/2*x;
    paleTarget.trans.y:=Pale.trans.y+32/2*y;
    paleTarget.trans.z:=Pale.trans.z-19.2*z;

    paleTarget.rot.q1:=Pale.rot.q1;
    paleTarget.rot.q2:=Pale.rot.q2;
    paleTarget.rot.q3:=Pale.rot.q3;
    paleTarget.rot.q4:=Pale.rot.q4;

    paleTarget.robconf.cf1:= Pale.robconf.cf1;
    paleTarget.robconf.cf4:= Pale.robconf.cf4;
    paleTarget.robconf.cf6:= Pale.robconf.cf6;
    paleTarget.robconf.cfx:= Pale.robconf.cfx;

```

```

MoveJ PosInter,v500,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
MoveJ RelTool(offsets(paleTarget,0,0,-50),0,0,0,\Rz:=90*(rot-
1)),v100,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
MoveL RelTool(paleTarget,0,0,0,\Rz:=90*(rot-1)),v100,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
WaitTime 1;

SetDO O_ROBOT3_P1,1;
MoveL offsets(paleTarget,0,0,-50),v100,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
MoveJ PosInter,v500,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
IF largo THEN
    MoveJ Home,v500,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
    WaitTime 1;
    SetDO O_ROBOT3_P1,0;
ELSE
    MoveJ RelTool(Cargador,0,-64,-19.5),v500,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
    MoveL RelTool(Cargador,0,0,-19.5),v100,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
    MoveL RelTool(Cargador,0,0,-10),v100,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;
    WaitTime 1;
    SetDO O_ROBOT3_P1,0;
    MoveL RelTool(Cargador,0,0,-19.5),v100,fine,PinzaS3\WObj:=wobj0;

ENDIF

ENDPROC
PROC montaFigura()

ENDPROC
ENDMODULE

```

- Código *Rapid* Estación 4:

```

MODULE Module1

    CONST robtarget Home:=[[389.0622,-85.20763,350.8866],[0.03738145,0.000000037,0.9993011,-
0.000000024],[-1,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget PosInter:=[[379.7883,466.8725,767.5204],[0.1886512,-0.9054105,0.3751951,-
0.06221836],[0,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget
Target_10:=[[413.769,195.88,20],[0,0,1,0],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Target_20:=[[-64.268,-405,437],[0,0.707106781,0.707106781,0],[-2,0,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Target_30:=[[396.686094163,179.770793858,75.733962425],[0.000822978,-
0.706698423,-0.707513923,-0.000842734],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale:=[[-150.4268,620.4395,511.2212],[0.01707592,-0.9995016,-
0.02654969,9.891023E-05],[1,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego:=[[396.686,179.771,75.734],[0.000821186,-0.706698924,-0.707513423,-
0.000844909],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego2:=[[396.686,279.771,75.734],[0.000821186,-0.706698924,-0.707513423,-
0.000844909],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale2:=[[-60.983,-405,511.934],[0,0,1,0],[-2,0,-
2,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    PERS robtarget paleTarget:=[[-111.427,590.44,530.421],[0.0170759,-0.999502,-
0.0265497,9.89102E-5],[1,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_H:=[[-60.983,-405,492.734],[0,0.707106781,0.707106781,0],[-2,0,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_rot_4:=[[-60.983,-405,492.734],[0,-
0.707106781,0.707106781,0],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Pale_rot3:=[[-60.983,-405,492.734],[0,1,0,0],[-
2,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    CONST robtarget Lego3:=[[380.686010624,279.75257064,75.733441498],[0.000821186,-
0.706698924,-0.707513423,-0.000844909],[0,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
    VAR bool setupDone:=FALSE;
    VAR bool Desmontar:=FALSE;

    ! Programa principal de la estación
    PROC main()
        MoveL Home,v1000,fine,Pinzas4\WObj:=wobj0;

        SetDO O_ROBOT4_P1,0;

        IF setupDone THEN
            esperaPale;
            IF Desmontar=TRUE THEN
                desmontaFigura;
                bajaPale;
            ENDIF

        ELSE
            setup;
            setupDone:=TRUE;
        ENDIF

    ENDPROC

    ! Configuración inicial de los actuadores
    PROC setup()

        SetDO O_S4_PSTOP_ON,1;
        SetDO O_S4_PSTOP_OFF,0;
    
```

```

SetDO O_S4_STOP_ON,1;
SetDO O_S4_STOP_OFF,0;

SetDO O_S4_LIFT_DOWN,1;
SetDO O_S4_LIFT_UP,0;
ENDPROC

! Esperar palé
PROC esperaPale()

SetDO O_S4_PSTOP_ON,1;
SetDO O_S4_PSTOP_OFF,0;

WaitDI I_S4_PSTOP,1;
SetDO O_S4_STOP_ON,1;
SetDO O_S4_STOP_OFF,0;
WaitTime 1;

IF I_S4_Lego=0 THEN

SetDO O_S4_PSTOP_ON,0;
SetDO O_S4_PSTOP_OFF,1;
SetDO O_S4_STOP_ON,0;
SetDO O_S4_STOP_OFF,1;
WaitTime 1;
SetDO O_S4_PSTOP_ON,1;
SetDO O_S4_PSTOP_OFF,0;

Desmontar:=FALSE;

ELSE

Desmontar:=TRUE;

SetDO O_S4_PSTOP_OFF,1;
SetDO O_S4_PSTOP_ON,0;
WaitTime 0.3;

SetDO O_S4_PSTOP_OFF,0;
SetDO O_S4_PSTOP_ON,1;

WaitDI I_S4_STOP,1;
WaitTime 1;

SetDO O_S4_LIFT_DOWN,0;
SetDO O_S4_LIFT_UP,1;

WaitDI I_S4_LIFT_UP,1;
WaitTime 1;

SetDO O_S4_STOP_ON,0;
SetDO O_S4_STOP_OFF,1;

SetDO O_S4_PSTOP_ON,0;
SetDO O_S4_PSTOP_OFF,1;
ENDIF

ENDPROC

! Llevar piezas a sus posiciones de desmontaje

```

```

PROC desmontaFigura()
    Desmontar:=FALSE;

    colocaLego 2,2,2,2,TRUE,TRUE;
    colocaLego 4,4,2,1,TRUE,TRUE;
    colocaLego 2,6,2,2,TRUE,TRUE;
    colocaLego 0,4,2,1,TRUE,TRUE;

    colocaLego 3,2,1,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego 4,5,1,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego 1,6,1,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego 0,3,1,1,FALSE,TRUE;

    colocaLego 4,2,0,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego 4,6,0,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego 0,6,0,1,FALSE,TRUE;
    colocaLego 0,2,0,1,FALSE,TRUE;

ENDPROC

! Bajar palé
PROC bajaPale()

    SetDO O_S4_PSTOP_ON,1;
    SetDO O_S4_PSTOP_OFF,0;
    WaitTime 2;

    SetDO O_S4_LIFT_DOWN,1;
    SetDO O_S4_LIFT_UP,0;
    WaitDI I_S4_LIFT_DOWN,1;

    WaitTime 2;
    SetDO O_S4_STOP_ON,1;
    SetDO O_S4_STOP_OFF,0;

ENDPROC

! Instrucciones desmontar una pieza
PROC colocaLego(num x,num y,num z,num rot,bool largo,bool centro)
    paleTarget.trans.x:=Pale.trans.x+32/2*x;
    paleTarget.trans.y:=Pale.trans.y-32/2*y;
    paleTarget.trans.z:=Pale.trans.z+19.2*z;

    paleTarget.rot.q1:=Pale.rot.q1;
    paleTarget.rot.q2:=Pale.rot.q2;
    paleTarget.rot.q3:=Pale.rot.q3;
    paleTarget.rot.q4:=Pale.rot.q4;

    paleTarget.robconf.cf1:= Pale.robconf.cf1;
    paleTarget.robconf.cf4:= Pale.robconf.cf4;
    paleTarget.robconf.cf6:= Pale.robconf.cf6;
    paleTarget.robconf.cfx:= Pale.robconf.cfx;

    MoveJ PosInter,v1000,z100,PinzaS4\WObj:=wobj0;

    MoveJ RelTool(paleTarget,0,0,-50,\Rz:=90*(rot-1)),v1000,fine,PinzaS4\WObj:=wobj0;
    MoveJ RelTool(paleTarget,0,0,0,\Rz:=90*(rot-1)),v100,fine,PinzaS4\WObj:=wobj0;

    SetDO O_ROBOT4_P1,1;
    MoveL RelTool(paleTarget,0,0,-50,\Rz:=90*(rot-1)),v100,fine,PinzaS4\WObj:=wobj0;

```

```
MoveJ PosInter,v1000,z100,PinzaS4\WObj:=wobj0;  
  
MoveJ Home,v1000,z100,PinzaS4\WObj:=wobj0;  
  
WaitTime 1;  
SetDO O_ROBOT4_P1,0;  
ENDPROC  
PROC montaFigura()  
  
ENDPROC  
ENDMODULE
```

ANEXO VI: ALINEACIÓN CON LOS ODS

Hace aproximadamente una década, en el año 2015, todos los estados miembros de la ONU se unieron para hacer un llamamiento a la acción universal [35]. El objetivo principal era erradicar la pobreza, cuidar la Tierra y mejorar la vida y perspectiva de las personas que forman la sociedad mundial. El resultado se vio reflejado en 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Todos los cambios relevantes para esta aprobación deberían estar implementados para la Agenda de Desarrollo Sostenible de 2030. De esta manera, dichas acciones ayudarían a conseguir un mundo más sostenible en el que la robótica jugaría un papel clave.

En concreto, se han identificado 13 objetivos de los 17 en los que los robots pueden colaborar para cumplir con este movimiento, contribuyendo a la creación e implementación de tecnologías verdes y ahorrando recursos. Sin embargo, las máquinas inteligentes e interconectadas serán determinantes en los objetivos [36]:

- ODS 3. Salud y Bienestar: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades [37].
- ODS 9. Industria, innovación e infraestructura: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación [38].
- ODS 12. Producción y consumo responsables: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles [39].

Además, la Inteligencia Artificial nos brindará la posibilidad de tomar mejores decisiones, y el despliegue del 5G, conseguirá progresos en la asistencia sanitaria, servicios energéticos, producción, agricultura y protección ambiental. Ambas tecnologías correladas con el desarrollo de la robótica colaborativa.